



KQ CASEbolt KQ CASEbolt #
107 PANORAMIC
WAY
BERKELEY CAL

370

ÉNERGIE ATOMIQUE
À DES FINS MILITAIRES

Droit d'auteur, 1945, par H. D. Smyth
Reproduction totale ou partielle autorisée et
permise

Imprimé aux États-Unis d'Amérique par
Maple Press, York, Pennsylvanie

AVANT-PROPOS

L'histoire du développement de la bombe atomique par les efforts combinés de nombreux groupes aux États-Unis est un récit fascinant mais très technique d'une énorme entreprise. De toute évidence, la sécurité militaire empêche cette histoire d'être racontée dans son intégralité pour le moment. Cependant, il n'y a aucune raison pour que l'histoire administrative du projet de bombe atomique et les connaissances scientifiques de base sur lesquelles se sont basés les différents développements ne soient pas maintenant accessibles au grand public. À cette fin, ce compte rendu du professeur H. D. Smyth est présenté.

Toutes les informations scientifiques pertinentes qui peuvent être divulguées au public à l'heure actuelle sans violer les besoins de la sécurité nationale sont contenues dans ce volume. Aucune demande d'information supplémentaire ne doit être adressée à des personnes privées ou à des organisations associées directement ou indirectement au projet. Les personnes qui divulguent ou obtiennent des informations supplémentaires par quelque moyen que ce soit sans autorisation sont passibles de sanctions sévères en vertu de la loi sur l'espionnage.

Le succès de ce développement est dû aux milliers de scientifiques, d'ingénieurs, d'ouvriers et d'administrateurs, civils et militaires, dont le travail prolongé, la persévérance silencieuse et la coopération sans réserve ont rendu possibles les réalisations techniques sans précédent décrites ici.

L. R. GROVES
Major General, États-Unis

Ministère de la Guerre
Washington, D. C.
Août 1945

PRÉFACE

La responsabilité ultime de la politique de notre nation repose sur ses citoyens et ils ne peuvent s'acquitter de ces responsabilités avec sagesse que s'ils en sont informés. On ne peut pas s'attendre à ce que le citoyen moyen comprenne clairement comment une bombe atomique est construite ou comment elle fonctionne, mais il y a dans ce pays un groupe important d'ingénieurs et de scientifiques qui peuvent comprendre de telles choses et qui peuvent expliquer les potentialités des bombes atomiques à leurs concitoyens. Le présent rapport est rédigé pour ce groupe professionnel et constitue un compte rendu général et pragmatique des travaux menés aux États-Unis depuis 1939 en vue de la production de telles bombes. Il ne s'agit ni d'une histoire officielle documentée, ni d'un traité technique pour experts. Les exigences en matière de secret ont affecté à la fois le contenu détaillé et l'accent général, de sorte que de nombreux développements intéressants ont été omis.

Les références aux travaux britanniques et canadiens ne sont pas censées être exhaustives puisqu'elles sont écrites du point de vue des activités dans ce pays.

L'auteur espère que ce compte rendu est substantiellement exact, grâce à la coopération de tous les groupes participant au projet ; Il assume l'entière responsabilité des erreurs qui pourraient survenir. •

H. D. SMYTH

1 juillet 1945

Des modifications mineures ont été apportées pour cette édition. Ces modifications consistent en les variations suivantes par rapport au rapport publié le 12 août 1945 : « (1) Clarifications et corrections mineures dans le libellé ; (2) Inclusion d'un

paragraphe sur les effets radioactifs publié par le ministère de la
Guerre pour accompagner le rejet original vii
Viii Préface

du présent rapport ; 3° Ajout de quelques phrases sur le succès des précautions
sanitaires ; (4) Ajout de quelques noms ; (5) Ajout de l'appendice 6, donnant le
communiqué du ministère de la Guerre sur l'essai du Nouveau-Mexique du 16
juillet 1945 ; (6) Inclusion de la section photographique : (7) Inclusion d'un
index.

1 septembre 1945

CONTENU

AVANT-PROPOS

PRÉFACE

I. PRÉAMBULE	1
11. ÉNONCÉ DU PROBLÈME	31
111. HISTORIQUE ADMINISTRATIF JUSQU'À DÉCEMBRE 1941	45
IV. PROGRÈS JUSQU'EN DÉCEMBRE 1941 HISTOIRE ADMINISTRATIVE 1942-1945	75
LE PROJET MÉTALLURGIQUE À CHICAGO EN 1942	88
VII. LE PROBLÈME DE LA PRODUCTION DE PLUTONIUM EN FÉVRIER 1943	108
VIII. LE PROBLÈME DU PLUTONIUM, JANVIER 1943 À JUIN 1945	130
IX. DISCUSSION GÉNÉRALE DE LA SÉPARATION DES ISOTOPES	154
X. LA SÉPARATION DES ISOTOPES DE L'URANIUM PAR DIFFUSION GAZEUSE	172
XI. SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE L'URANIUM ISOTOPES	187
XII. LES TRAVAUX SUR LA BOMBE ATOMIQUE	206
XIII. RÉSUMÉ GÉNÉRAL	223
ANNEXES	227
INDEX	255
LA SECTION D'ILLUSTRATION SE TROUVE DANS LE CHAPITRE viii	

ÉNERGIE ATOMIQUE
À DES FINS MILITAIRES

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

1.1. Le présent rapport a pour objet de décrire les développements scientifiques et techniques survenus dans ce pays depuis 1940 en vue de l'utilisation militaire de l'énergie des noyaux atomiques. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un compte rendu « populaire » du sujet, ce rapport est destiné à être intelligible pour les scientifiques et les ingénieurs en général et pour d'autres diplômés universitaires ayant de bonnes bases en physique et en chimie. L'équivalence de la masse et de l'énergie est choisie comme principe directeur dans la présentation du matériel de base de l'Introduction.

LA CONSERVATION DE LA MASSE ET DE L'ÉNERGIE

1.2. Il y a deux principes qui ont été les pierres angulaires de la structure de la science moderne. La première, à savoir que la matière ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement modifiée dans sa forme, a été énoncée au XVIIIe siècle et est familière à tous les étudiants en chimie ; Elle a conduit au principe connu sous le nom de loi de conservation de la masse. La seconde, à savoir que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement modifiée dans sa forme, est apparue au XIXe siècle et a toujours été depuis la plaie des inventeurs de machines à mouvement perpétuel ; C'est ce qu'on appelle la loi de conservation de l'énergie.

1.3. Ces deux principes ont constamment guidé et discipliné le développement et l'application de la science. À toutes fins pratiques, ils n'ont pas été modifiés et séparés jusqu'à il y a environ cinq ans. Dans la plupart des cas pratiques, ils le sont encore, mais on sait maintenant qu'ils sont, en fait, deux phases d'un seul principe, car nous avons découvert que l'énergie peut parfois être

convertie en matière et la matière en énergie. Plus précisément, une telle conversion est observée dans le phénomène de fission nucléaire de

l'uranium, un processus dans lequel les noyaux atomiques se divisent en fragments avec la libération d'une énorme quantité d'énergie. L'utilisation militaire de cette énergie a fait l'objet des projets de recherche et de production décrits dans le présent rapport.

L'ÉQUIVALENCE DE LA MASSE ET DE L'ÉNERGIE

1.4. Une conclusion apparue assez tôt dans le développement de la théorie de la relativité était que la masse inertielle d'un corps en mouvement augmentait à mesure que sa vitesse augmentait. Cela impliquait une équivalence entre une augmentation de l'énergie de mouvement d'un corps, c'est-à-dire son énergie cinétique, et une augmentation de sa masse. Pour la plupart des physiciens et des ingénieurs, cela semblait être une fiction mathématique sans importance pratique. Même Einstein n'aurait guère pu prévoir les applications actuelles, mais dès 1905, il a clairement déclaré que la masse et l'énergie étaient équivalentes et a suggéré que la preuve de cette équivalence pourrait être trouvée par l'étude des substances radioactives. Il a conclu que la quantité d'énergie, E , équivalente à une masse, m , était donnée par l'équation

$$E = mc^2$$

où c est la vitesse de la lumière. Si cela est exprimé en chiffres réels, son caractère surprenant est évident. Il montre qu'un kilogramme de matière, s'il était entièrement converti en énergie, donnerait 25 milliards de kilowattheures d'énergie. C'est l'énergie qui serait produite par l'ensemble de l'industrie de l'énergie électrique aux États-Unis (en 1939) pendant environ deux mois. Comparez ce chiffre fantastique avec les 8,5 kilowattheures d'énergie thermique qui peuvent être produits en brûlant une quantité égale de charbon.

1.5. L'extrême taille de ce chiffre de conversion était intéressante à plusieurs égards. En premier lieu, elle explique pourquoi l'équivalence de la masse et de l'énergie n'a jamais été observée dans la combustion

chimique ordinaire. Nous croyons maintenant que la chaleur dégagée par une telle combustion est associée à une masse, mais cette masse est si petite qu'elle ne peut être détectée par les balances les plus sensibles disponibles.

capable. (C'est de l'ordre de quelques milliardièmes de gramme par mole.) En second lieu, il a été clairement établi qu'aucune quantité appréciable de matière n'était convertie en énergie dans des processus terrestres familiers, car aucune source d'énergie aussi importante n'était connue. De plus, la possibilité d'initier ou de contrôler une telle conversion de quelque manière que ce soit semblait très lointaine. Enfin, l'importance même du facteur de conversion a ouvert un magnifique champ de spéculation aux philosophes, aux physiciens, aux ingénieurs et aux dessinateurs de bandes dessinées. Pendant vingt-cinq ans, de telles spéculations n'ont pas été étayées par des preuves expérimentales directes, mais à partir de 1930 environ, de telles preuves ont commencé à apparaître en quantité croissante et rapide. Avant de discuter de ces preuves et de la conversion partielle pratique de la matière en énergie qui est notre thème principal, nous passerons en revue les fondements de la physique atomique et nucléaire. Une familiarité générale avec la nature atomique de la matière et avec l'existence des électrons est supposée. Notre traitement ne sera guère plus qu'un aperçu qui peut être élaboré en se référant à des livres tels que Applied Nuclear Physics de Pollard et Davidson et The « Particles » of Modern Physics de Stranathan.

RADIOACTIVITÉ ET STRUCTURE ATOMIQUE

1.6. Découverts pour la première fois par H. Becquerel en 1896, puis étudiés par Pierre et Marie Curie, E. Rutherford et bien d'autres, les phénomènes de radioactivité ont joué un rôle de premier plan dans la découverte des lois générales de la structure atomique et dans la vérification de l'équivalence de la masse et de l'énergie.

IONISATION PAR DES SUBSTANCES RADIOACTIVES

1.7. Le premier phénomène de radioactivité observé est le noircissement des plaques photographiques par les minéraux d'uranium. Bien que cet effet soit encore utilisé dans une certaine mesure dans la recherche sur la radioactivité, la propriété des substances radioactives qui a la plus grande valeur scientifique est leur capacité à ioniser les gaz. Dans des conditions normales, l'air et les autres gaz ne conduisent pas l'électricité, sinon les lignes électriques et les machines électriques ne fonctionneraient pas à l'air libre comme elles le font. Mais dans certaines circonstances, les molécules d'air sont décomposées en fragments chargés positivement et négativement, appelés ions. L'air ainsi ionisé conduit l'électricité. Quelques mois après la première découverte de la radioactivité, Becquerel découvrit que l'uranium avait le pouvoir d'ioniser l'air. Plus précisément, il a découvert que la charge d'un électroscope s'échapperait rapidement dans l'air si des sels d'uranium étaient placés à proximité. (La même chose arriverait à une batterie de stockage si des matières radioactives étaient placées à proximité.) Depuis cette époque, la vitesse de décharge d'un électroscope a servi de mesure de l'intensité de la radioactivité. De plus, presque tous les instruments actuels d'étude des phénomènes radioactifs dépendent directement ou indirectement de cet effet d'ionisation. On trouvera à l'annexe 1 un compte rendu élémentaire de ces instruments, notamment les électroscopes, les compteurs Geiger-Müller, les chambres d'ionisation et les chambres à brouillard de Wilson.

LES DIFFÉRENTS RAYONNEMENTS OU PARTICULES

1.8. La preuve que les différentes substances radioactives diffèrent par leur pouvoir ionisant, tant par leur nature que par leur intensité, indique qu'il existe des différences dans les « rayonnements » émis. Certains rayonnements sont beaucoup plus pénétrants que d'autres ; Par conséquent, deux échantillons

radioactifs ayant le même effet sur un électroscope « non blindé » peuvent avoir des effets très différents si l'électroscope est « blindé », c'est-à-dire si des écrans sont interposés entre l'échantillon et l'électroscope. On dit que ces écrans absorbent le rayonnement.

1.9. Des études sur l'absorption et d'autres phénomènes ont montré qu'il existe en fait trois types de « rayonnements » émis par les substances radioactives. Il existe des particules alpha, qui sont des atomes d'hélium ionisés à grande vitesse (en fait les noyaux d'atomes d'hélium), des particules bêta, qui sont des électrons à grande vitesse, et des rayons gamma, qui sont des rayonnements électromagnétiques similaires aux rayons X. Parmi ceux-ci, seuls les rayons gamma sont proprement appelés rayonnements, et même ceux-ci agissent comme des particules en raison de leur courte longueur d'onde. Une telle « particule » ou quantum de rayonnement gamma est appelée photon. En général, les rayons gamma sont très pénétrants, les rayons alpha et bêta moins. Même si les rayons alpha et bêta ne sont pas très pénétrants, ils ont d'énormes énergies cinétiques pour les particules de taille atomique, des énergies des milliers de fois supérieures aux énergies cinétiques que les molécules d'un gaz ont en raison de leur mouvement thermique, et des milliers de fois plus grandes que les changements d'énergie par atome dans les réactions chimiques. C'est pour cette raison qu'Einstein a suggéré que les études de la radioactivité pourraient montrer l'équivalence de la masse et de l'énergie.

L'ATOME

1.10. Avant d'examiner quels types d'atomes émettent des rayons alpha, bêta et gamma, et avant de discuter des lois qui régissent cette émission, nous décrirons les idées actuelles sur la façon dont les atomes sont construits, idées basées en partie sur l'étude de la radioactivité.

1.11. Selon notre point de vue actuel, chaque atome se compose d'un petit noyau lourd d'environ 10 à 12 cm de diamètre, entouré

d'une région largement vide de 10 à 8 cm de diamètre, dans laquelle les électrons se déplacent un peu comme des planètes autour du soleil. Le noyau porte un nombre entier de charges positives, chacune d'une taille de $1,6 \times 10^{-19}$ coulombs. (Voir l'annexe 2 pour une discussion sur les unités.) Chaque électron porte une charge négative de cette même taille, et le nombre d'électrons circulant autour du noyau est égal au nombre de charges positives sur le noyau, de sorte que l'atome dans son ensemble a une charge nette de zéro.

1.12. Numéro atomique et structure électronique. Le nombre de charges positives dans le noyau est appelé numéro atomique, Z . Il détermine le nombre d'électrons dans la structure extranucléaire, ce qui détermine à son tour les propriétés chimiques de l'atome. Ainsi, tous les atomes d'un élément chimique donné ont le même numéro atomique, et inversement, tous les atomes ayant le même numéro atomique sont des atomes du même élément, quelles que soient les différences possibles de leur structure nucléaire. Les électrons extranucléaires d'un atome s'organisent en couches successives selon des lois bien établies. Les spectres optiques résultent de perturbations dans les parties externes de cette structure électronique ; Les rayons X proviennent de perturbations des électrons proches du noyau. Les propriétés chimiques d'un atome dépendent des électrons les plus externes, et la formation de composés chimiques s'accompagne de réarrangements mineurs de ces structures électroniques. Par conséquent, lorsque l'énergie est obtenue par oxydation, combustion, explosion ou d'autres processus chimiques, elle est obtenue aux dépens de ces structures, de sorte que l'arrangement des électrons dans les produits du processus doit être celui d'un contenu énergétique réduit. (On peut supposer que la masse totale de ces produits est proportionnellement plus faible, mais pas détectable.) Les noyaux atomiques ne sont affectés par aucun processus chimique.

1.13. Nombre de masse. Non seulement la charge positive sur un noyau est toujours un nombre entier de charges électroniques, mais la masse

du noyau est toujours approximativement un nombre entier multiplié par une unité de masse fondamentale qui est presque la masse d'un proton, le noyau d'un atome d'hydrogène. (Voir l'annexe 2.) Ce nombre entier est appelé le nombre de masse, A , et est toujours au moins deux fois plus grand que le numéro atomique, sauf dans le cas de l'hydrogène et d'un isotope rare de l'hélium. Étant donné que la masse d'un proton est environ 1 800 fois celle d'un électron, la masse du noyau est presque la masse totale de l'atome.

1.14. Isotopes et isobares. Deux espèces d'atomes ayant le même numéro atomique mais des nombres de masse différents sont appelées isotopes. Ils sont chimiquement identiques, étant simplement deux espèces du même élément chimique. Si deux espèces d'atomes ont le même nombre de masse mais des numéros atomiques différents, elles sont appelées isobares et représentent deux éléments chimiques différents.

RADIOACTIVITÉ ET CHANGEMENT NUCLÉAIRE

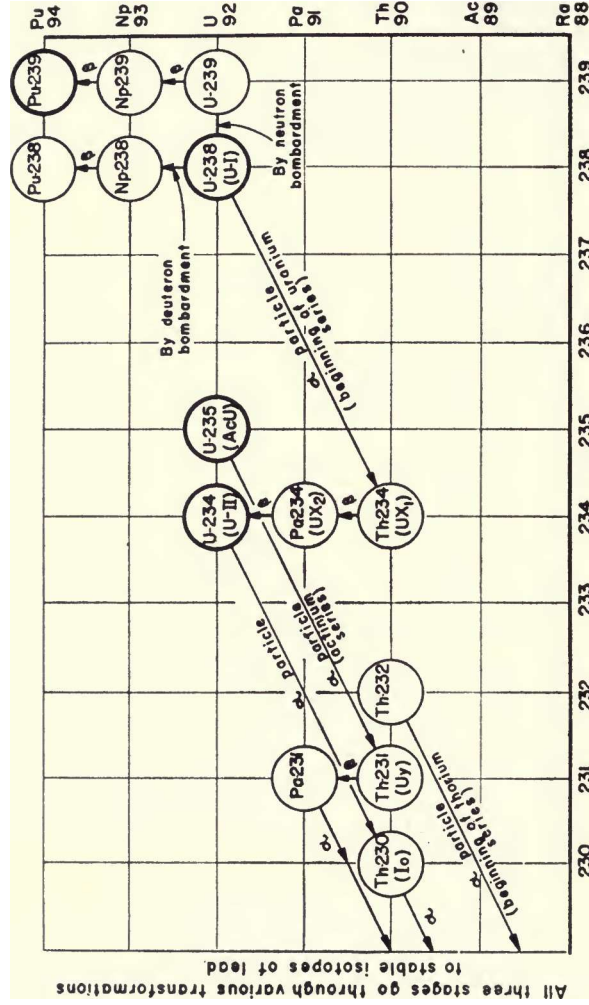
1.15. Si un atome émet une particule alpha (qui a un numéro atomique de deux et une masse de quatre), il devient un atome d'un élément différent avec un numéro atomique inférieur de deux et un nombre de masse inférieur de quatre. L'émission par un noyau d'une particule bêta augmente le numéro atomique d'une unité et laisse le nombre de masse inchangé. Dans certains cas, ces changements s'accompagnent de l'émission de rayons gamma. Les éléments qui se modifient spontanément ou se désintègrent de cette manière sont instables et sont décrits comme étant radioactifs. Les seuls éléments naturels qui présentent cette propriété d'émettre des particules alpha ou bêta sont (à quelques exceptions près) ceux qui ont des numéros atomiques et des nombres de masse très élevés, tels que l'uranium, le thorium, le radium et l'actinium, c'est-à-dire ceux dont on sait qu'ils ont les structures nucléaires les plus compliquées.

DEMI-VIES ; LA SÉRIE RADIOACTIVE

1.16. Tous les atomes d'une espèce radioactive particulière ont la même probabilité de se désintégrer dans un temps donné, de sorte qu'un échantillon appréciable de matière radioactive, contenant plusieurs millions d'atomes, change ou se « désintègre » toujours à la même vitesse. Cette vitesse à laquelle la matière change est exprimée en termes de « demi-vie », le temps nécessaire pour qu'une moitié des atomes initialement présents se désintègrent, ce qui est évidemment constant pour toute espèce atomique particulière. La demi-vie des matières radioactives varie de quelques fractions de seconde pour les plus instables à des milliards d'années pour celles qui ne le sont que légèrement. Souvent, le noyau « fille » comme son « parent » radioactif est lui-même radioactif et ainsi de suite pendant plusieurs générations successives de noyaux jusqu'à ce qu'un noyau stable soit finalement atteint. Il existe trois familles ou séries de ce type comprenant au total une quarantaine d'espèces radioactives différentes. La série du radium commence à partir d'un isotope de l'uranium, la série de l'actinium à partir d'un autre isotope de l'uranium et la série du thorium à partir du thorium. Le produit final de chaque série, après dix ou douze émissions successives de particules alpha et bêta, est un isotope stable du plomb.

PREMIÈRE DÉMONSTRATION DE LA DÉSINTÉGRATION NUCLÉAIRE
ARTIFICIELLE

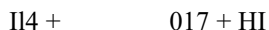
1.17. Avant 1919, personne n'avait réussi à perturber la stabilité des noyaux ordinaires ou à influencer sur les taux de désintégration de ceux qui étaient naturellement radioactifs. En 1919, Rutherford a montré que les particules alpha de haute énergie pouvaient provoquer une altération



The beginnings of the three natural radioactive series and the new transuranic

dans le noyau d'un élément ordinaire. Plus précisément, il a réussi à transformer quelques atomes d'azote en atomes

d'oxygène en les bombardant de particules alpha. Le processus impliqué peut s'écrire comme suit :



ce qui signifie qu'un noyau d'hélium de masse numéro 4 (une particule alpha) frappant un noyau d'azote de masse numéro 14 produit un noyau d'oxygène de masse numéro 17 et un noyau d'hydrogène de masse numéro 1. Le noyau d'hydrogène, connu sous le nom de « proton », est d'une importance particulière car il a la plus petite masse de tous les noyaux. Bien que les protons n'apparaissent pas dans les processus radioactifs naturels, il existe de nombreuses preuves directes qu'ils peuvent être éliminés des noyaux.

LE NEUTRON

1.18. Au cours de la décennie qui a suivi les travaux de Rutherford, de nombreuses expériences similaires ont été réalisées avec des résultats similaires. Une série d'expériences de ce type a conduit à la découverte du neutron, qui sera discutée en détail puisque le neutron est pratiquement la chanson thème de tout ce projet.

1.19. En 1930, W. Bothe et H. Becker en Allemagne ont découvert que si les particules alpha patorales très énergétiques du polonium tombaient sur certains éléments légers, en particulier le béryllium, le bore ou le lithium, un rayonnement exceptionnellement pénétrant était produit. Au début, on a pensé que ce rayonnement était un rayonnement gamma, bien qu'il fût plus pénétrant que tous les rayons gamma connus, et les détails des résultats expérimentaux étaient très difficiles à interpréter sur cette base. La contribution importante suivante a été rapportée en 1932 par Irène Curie et F. Joliot à Paris. Ils ont montré que si ce rayonnement inconnu tombait sur le paraffin ou tout autre composé contenant de l'hydrogène, il éjectait des protons de très haute énergie. Cela n'était pas en soi incompatible avec la nature gamma supposée du nouveau

rayonnement, mais l'analyse quantitative détaillée des données est devenue de plus en plus difficile à concilier avec une telle hypothèse. Finalement, plus tard en 1932, J. Chadwick en Angleterre a effectué une série d'expériences montrant que l'hypothèse des rayons gamma était insoutenable. Il a suggéré qu'en fait le nouveau rayonnement était constitué de particules non chargées d'environ la masse du proton, et il a effectué une série d'expériences vérifiant sa suggestion. De telles particules non chargées sont maintenant appelées neutrons.

1.20. La seule caractéristique des neutrons qui les différencie des autres particules subatomiques est le fait qu'ils ne sont pas chargés. Cette propriété des neutrons a retardé leur découverte, les rend très pénétrants, rend impossible leur observation directe et les rend très importants en tant qu'agents du changement nucléaire. Certes, un atome à l'état normal n'est pas non plus chargé, mais il est dix mille fois plus gros qu'un neutron et se compose d'un système complexe d'électrons chargés négativement et largement espacés autour d'un noyau chargé positivement. Les particules chargées (telles que les protons, les électrons ou les particules alpha) et les rayonnements électromagnétiques (tels que les rayons gamma) perdent de l'énergie en traversant la matière. Ils exercent des forces électriques qui ionisent les atomes du matériau qu'ils traversent (ce sont de tels processus d'ionisation qui rendent l'air conducteur d'électricité sur le chemin des étincelles électriques et des éclairs). L'énergie absorbée par l'ionisation est égale à l'énergie perdue par la particule chargée, qui ralentit, ou par le rayon gamma, qui est absorbé. Le neutron, cependant, n'est pas affecté par de telles forces ; Il n'est affecté que par une force à très courte portée, c'est-à-dire une force qui entre en jeu lorsque le neutron s'approche très près d'un noyau atomique. C'est le genre de force qui maintient un noyau ensemble en dépit de la répulsion mutuelle des charges positives qu'il contient. Par conséquent, un neutron libre poursuit son chemin sans contrôle

jusqu'à ce qu'il entre en collision frontale avec un noyau atomique. Comme les noyaux sont très petits, de telles collisions se produisent rarement et le neutron parcourt une longue distance avant d'entrer en collision. Dans le cas d'une collision de type « élastique », les lois ordinaires de la quantité de mouvement s'appliquent comme elles le font dans la collision élastique des boules de billard. Si le noyau qui est frappé est lourd, il acquiert relativement peu de vitesse, mais s'il s'agit d'un proton, dont la masse est approximativement égale à celle du neutron, il est projeté vers l'avant avec une grande fraction de la vitesse initiale du neutron, qui est lui-même ralenti en conséquence. Les projectiles secondaires résultant de ces collisions peuvent être détectés, car ils sont chargés et produisent une ionisation. La nature non chargée du neutron le rend non seulement difficile à détecter, mais aussi difficile à contrôler. Les particules chargées peuvent être accélérées, décélérées ou déviées par des champs électriques ou magnétiques qui n'ont aucun effet sur les neutrons. De plus, les neutrons libres ne peuvent être obtenus qu'à partir de désintégrations nucléaires ; Il n'y a pas d'approvisionnement naturel. Le seul moyen dont nous disposons pour contrôler les neutrons libres est de mettre des noyaux sur leur chemin afin qu'ils soient ralentis et déviés ou absorbés par les collisions. Comme nous le verrons, ces effets sont de la plus haute importance pratique.

LE POSITRON ET LE DEUTÉRON

1.21. L'année 1932 a vu la découverte non seulement du neutron mais aussi du positron. Le positron a été observé pour la première fois par C. D. Anderson au California Institute of Technology. Il a la même masse et la même amplitude de charge que l'électron, mais la charge est positive au lieu d'être négative. Sauf en tant que particule émise par des noyaux artificiellement radioactifs, elle ne nous intéresse guère.

1.22. Une autre découverte majeure a marqué l'année 1932. H. C. Urey, F. G. Brickwedde et G. M. Murphy ont découvert que l'hydrogène avait un isotope de masse numéro 2, présent dans l'hydrogène naturel à une partie sur 5 000. En raison de son importance particulière, cette espèce lourde d'hydrogène reçoit un nom qui lui est propre, le deutérium, et le noyau correspondant est appelé deutéron. Comme la particule alpha, le deutéron n'est pas l'une des particules fondamentales, mais joue un rôle important dans certains processus de désintégration nucléaire.

STRUCTURE NUCLÉAIRE

1.23. L'idée que tous les éléments sont constitués de quelques particules fondamentales est ancienne. Elle est aujourd'hui solidement établie. Nous pensons qu'il existe trois particules fondamentales : le neutron, le proton et l'électron. Un traité complet traiterait également du positron, que nous avons mentionné, du neutrino et du mésotron. Le deutéron et la particule alpha, qui ont déjà été mentionnés, sont des particules complexes importantes.

1.24. Selon nos vues actuelles, les noyaux de toutes les espèces atomiques sont constitués de neutrons et de protons. Le nombre de protons est égal au numéro atomique Z . Le nombre de neutrons, N , est égal à la différence entre le nombre de masse et le numéro atomique, ou $A - Z$. Il existe deux ensembles de forces agissant sur ces particules, les forces de répulsion électriques ordinaires entre les charges positives et les forces à très courte portée entre toutes les particules. Ces dernières forces ne sont que partiellement comprises, et nous n'essaierons pas de les discuter. Il suffit de dire que les effets combinés de ces forces attractives et répulsives sont tels que seules certaines combinaisons de neutrons et de protons sont stables. Si les neutrons et les protons sont peu nombreux, la stabilité se produit lorsque leur nombre est à peu près égal. Pour les noyaux plus

gros, la proportion de neutrons nécessaires à la stabilité est plus grande. Enfin, à la fin du tableau périodique, où le nombre de protons est supérieur à 90 et le nombre de neutrons proche de 150, il n'y a pas de noyaux complètement stables. (Certains noyaux lourds sont presque stables, comme en témoignent les demi-vies très longues.) Si un noyau instable est formé artificiellement par l'ajout d'un neutron ou d'un proton supplémentaire, un changement vers une forme stable finit par se produire. Curieusement, cela ne se fait pas par l'éjection d'un proton ou d'un neutron mais par l'éjection d'un positron ou d'un électron ; Apparemment, à l'intérieur du noyau, un proton se convertit en neutron et en positron (ou un neutron se convertit en proton et en électron), et la particule chargée de lumière est éjectée. En d'autres termes, le nombre de masse reste le même, mais le numéro atomique change. Les conditions de stabilité ne sont pas très critiques, de sorte que pour un nombre de masse donné, c'est-à-dire un nombre total de protons et de neutrons, il peut y avoir plusieurs arrangements stables de protons et de neutrons (au plus trois ou cinq) donnant plusieurs isobares. Pour un numéro atomique donné, c'est-à-dire un nombre donné de protons, les conditions peuvent varier encore plus largement, de sorte que certains éléments lourds ont jusqu'à dix ou douze isotopes stables. Quelque deux cent cinquante noyaux stables différents ont été identifiés, dont le nombre de masse varie de un à deux cent trente-huit et le numéro atomique de un à quatre-vingt-douze.

1.25. Toutes les déclarations que nous avons faites sont basées sur des preuves expérimentales. La théorie des forces nucléaires est encore incomplète, mais elle a été développée sur la base de principes de la mécanique quantique pour expliquer non seulement les observations ci-dessus, mais aussi des données empiriques plus détaillées sur la radioactivité artificielle et sur les différences entre les noyaux de masse paire et impaire.

1.26. Nous avons mentionné l'émission de positrons ou d'électrons par des noyaux en quête de stabilité. L'émission d'électrons (rayons bêta) était déjà connue dans l'étude des substances naturellement radioactives, mais l'émission de positrons n'a pas été trouvée dans le cas de ces substances. En fait, la discussion générale présentée ci-dessus était manifestement fondée en partie sur des informations qui ne peuvent être présentées dans le présent rapport. Nous donnerons cependant un bref compte rendu de la découverte de la radioactivité « artificielle » et de ce que l'on sait aujourd'hui à son sujet.

I .27. En 1934, Curie et Joliot rapportent que certains éléments légers (bore, magnésium, aluminium) qui ont été bombardés de particules alpha continuent d'émettre des positrons pendant un certain temps après l'arrêt du bombardement. En d'autres termes, le bombardement de particules alpha a produit des formes radioactives de bore, de magnésium et d'aluminium. Curie et Joliot ont en fait mesuré des demi-vies de 14 minutes, 2,5 minutes et 3,25 minutes, respectivement, pour les substances radioactives formées par le bombardement des particules alphaparticules.

1.28. Ce résultat a stimulé des expériences similaires dans le monde entier. En particulier, E. Fermi a estimé que les neutrons, en raison de leur manque de charge, devraient être efficaces pour pénétrer dans les noyaux, en particulier ceux de numéro atomique élevé qui repoussent fortement les protons et les particules alpha. Il a pu vérifier sa prédiction presque immédiatement, constatant que le noyau de l'atome bombardé capturait le neutron et qu'il en résultait donc un noyau instable qui atteignait ensuite la stabilité en émettant un électron. Ainsi, le noyau final et stable était d'une unité plus élevé en nombre de masse et d'une unité de plus en numéro atomique que le noyau cible initial.

1.29. À la suite d'innombrables expériences menées depuis 1934, il est maintenant possible de produire des isotopes radioactifs de presque tous les éléments du tableau périodique. Certains d'entre eux reviennent à la stabilité par l'émission de positrons, d'autres par l'émission d'électrons, d'autres par un processus connu sous le nom de capture d'électrons K dont nous ne parlerons pas, et un petit nombre (probablement trois) par émission de particules alpha. Au total, quelque cinq cents espèces nucléaires instables ont été observées et, dans la plupart des cas, leurs numéros atomiques et leurs nombres de masse ont été identifiés.

1.30. Non seulement ces éléments artificiellement radioactifs jouent un rôle important tout au long du projet qui nous occupe, mais leur valeur future en médecine, en chimie des traceurs et dans de nombreux autres domaines de recherche ne peut être surestimée.

CONSIDÉRATIONS ÉNERGÉTIQUES

ÉNERGIES DE LIAISON NUCLÉAIRE

1.31. En décrivant la radioactivité et la structure atomique, nous avons délibérément évité les données quantitatives et n'avons mentionné aucune application de l'équivalence de masse et d'énergie que nous avons annoncée comme principe directeur du présent rapport. Or, quand il s'agit de détails quantitatifs, et non pas seulement de principes généraux.

1.32. Nous avons parlé de noyaux stables et instables constitués d'assemblages de protons et de neutrons maintenus ensemble par des forces nucléaires. C'est un principe général de la physique que le travail doit être fait sur un système stable pour le briser. Ainsi, si un assemblage de neutrons et de protons est stable, il faut fournir de l'énergie pour séparer les particules qui le composent. Si l'énergie et la masse sont vraiment équivalentes, alors la masse totale d'un noyau stable devrait être inférieure à la masse totale des protons et des neutrons séparés qui le composent. Cette différence de masse devrait donc être équivalente à l'énergie nécessaire pour perturber complètement le noyau, ce qu'on appelle l'énergie de liaison. Rappelez-vous

que les masses de tous les noyaux étaient approximativement des nombres entiers. Ce sont les petites différences par rapport aux nombres entiers qui sont significatives.

1.33. Prenons l'exemple de la particule alpha. Il est stable ; Comme son nombre de masse est de quatre et son numéro atomique de deux, il se compose de deux protons et de deux neutrons. La masse d'un proton est de 1,00758 et celle d'un neutron est de 1,00893 (voir l'annexe 2), de sorte que la masse totale des composants séparés du noyau d'hélium est

$$2 \times 1,00758 + 2 \times 1,00893 = 4,03302$$

alors que la masse du noyau d'hélium lui-même est de 4,00280. En négligeant les deux dernières décimales, nous avons 4,033 et 4,003, soit une différence de 0,030 unité de masse. Il s'agit donc de « l'énergie de liaison » des protons et des neutrons dans le noyau d'hélium. Il semble petit, mais en se rappelant l'équation d'Einstein, $E = mc^2$, nous nous souvenons qu'une petite quantité de masse équivaut à une grande quantité d'énergie. En fait, 0,030 unité de masse est égal à $4,5 \times 10^5$ ergs par noyau ou $2,7 \times 10^{19}$ ergs par gramme de molécule d'hélium. Dans des unités plus familières à l'ingénieur ou au chimiste, cela signifie que pour briser les noyaux de tous les atomes d'hélium dans un gramme d'hélium, il faudrait $1,62 \times 10^{11}$ grammes de calories ou 190 000 kilowattheures d'énergie. À l'inverse, si les protons et les neutrons libres pouvaient être assemblés en noyaux d'hélium, cette énergie serait libérée.

1.34. Il est évident qu'il vaut la peine d'explorer la possibilité d'obtenir de l'énergie en combinant des protons et des neutrons ou en transmutant un type de noyau en un autre. Commençons par passer en revue les connaissances actuelles sur les énergies de liaison des différents noyaux.

SPECTRES DE MASSE ET ÉNERGIES DE LIAISON

1.35. Les déterminations chimiques du poids atomique donnent le poids moyen d'un grand nombre d'atomes d'un élément donné. À moins que l'élément n'ait qu'un seul isotope, le poids atomique chimique n'est pas

proportionnelle à la masse des atomes individuels. Le spectrographe de masse mis au point par F. W. Aston et d'autres à partir de l'appareil antérieur de J. J. Thomson mesure les masses des isotopes individuels. En effet, ce sont précisément de telles mesures qui ont prouvé l'existence d'isotopes et montré que, sur l'échelle des poids atomiques, les masses de toutes les espèces atomiques étaient presque des nombres entiers. Ces nombres entiers, découverts expérimentalement, sont les nombres de masse que nous avons déjà définis et qui représentent la somme des nombres des protons et des neutrons ; Leur découverte a largement contribué à notre vision actuelle selon laquelle tous les noyaux sont des combinaisons de neutrons et de protons.

I .36. L'amélioration des données du spectrographe de masse, complétée dans quelques cas par des données sur les réactions nucléaires, a donné des chiffres précis sur les énergies de liaison de nombreuses espèces atomiques sur toute la gamme des masses atomiques. Cette énergie de liaison, B , est la différence entre la masse nucléaire vraie, M , et la somme des masses de tous les protons et neutrons du noyau. C'est

$$B = (ZM_p + NM_n) - M$$

où M_p et M_n sont respectivement les masses du proton et du neutron, Z est le nombre de protons, $N = A - Z$ est le nombre de neutrons et M est la masse réelle du noyau. Il est plus intéressant d'étudier l'énergie de liaison par particule, B/A , que B lui-même. Une telle étude montre qu'en dehors des fluctuations des noyaux légers, la tendance générale de l'énergie de liaison par particule est d'augmenter rapidement jusqu'à un maximum plat autour de $A = 60$ (nickel) puis de diminuer à nouveau progressivement. De toute évidence, les noyaux au milieu du tableau périodique – les noyaux de masse de 40 à 100 – sont les plus fortement liés. Toute réaction nucléaire où les particules des noyaux résultants sont plus fortement liées que les particules des noyaux initiaux libérera de l'énergie. En

termes thermochimiques, de telles réactions sont exothermiques. Ainsi, en général, on peut gagner de l'énergie en combinant des noyaux légers pour former des noyaux plus lourds ou en brisant des noyaux très lourds en deux ou trois fragments plus petits. En outre, il existe un certain nombre de cas particuliers de désintégrations nucléaires exothermiques parmi les dix ou douze premiers éléments du tableau périodique, où l'énergie de liaison par particule varie irrégulièrement d'un élément à l'autre.

1.37. Jusqu'à présent, nous semblons empiler une supposition sur une autre. Tout d'abord, nous avons supposé que la masse et l'énergie étaient équivalentes ; Maintenant, nous supposons que les noyaux atomiques peuvent être réarrangés avec une réduction conséquente de leur masse totale, libérant ainsi de l'énergie qui peut ensuite être utilisée. Il est temps de parler de quelques expériences qui ont convaincu les physiciens de la véracité de ces affirmations.

PREUVE EXPÉRIMENTALE DE L'ÉQUIVALENCE DE LA MASSE ET DE L'ÉNERGIE

1.38. Comme nous l'avons déjà dit, les travaux de Rutherford en 1919 sur la désintégration nucléaire artificielle ont été suivis de nombreuses expériences similaires. L'amélioration progressive de la technique à haute tension a permis de substituer des ions à grande vitesse d'hydrogène ou d'hélium produits artificiellement aux particules alpha naturelles. J. D. Cockcroft et E. T. S. Walton, dans le laboratoire de Rutherford, ont été les premiers à réussir à produire des changements nucléaires par de telles méthodes. En 1932, ils ont bombardé une cible de lithium avec des protons d'une énergie de 700 kilovolts et ont constaté que des particules alpha étaient fortement éjectées de la cible à la suite du bombardement. La réaction nucléaire qui s'est produite peut s'écrire symboliquement comme suit :



où l'indice représente la charge positive sur le noyau (numéro atomique) et l'exposant est le nombre de particules massives dans le noyau (nombre de masse). Comme dans une équation chimique, les quantités de gauche doivent s'additionner à celles de droite ; Ainsi, les indices sont au nombre de quatre et les exposants huit de chaque côté.

1.39. Ni la masse ni l'énergie n'ont été incluses dans cette équation. En général, le proton incident et les particules alpha résultantes auront chacun une énergie cinétique. De plus, la masse de deux particules alpha ne sera pas exactement la même que la somme des masses d'un proton et d'un atome de lithium. Selon notre théorie, les totaux de masse et d'énergie pris ensemble devraient être les mêmes avant et après la réaction. Les masses étaient connues à partir de spectres de masse. À gauche ($\text{Li}^7 + \text{H}^1$) ils totalisaient 8,0241, à droite (2He^4) 8,0056, de sorte que 0,0185 unité de masse avait disparu dans la réaction. Les énergies déterminées expérimentalement des particules alpha étaient d'environ 8,5 millions d'électronvolts chacune, un chiffre par rapport auquel l'énergie cinétique du proton incident pouvait être négligée. Ainsi, 0,0185 unité de masse avait disparu et 17 Mev d'énergie cinétique étaient apparus. Maintenant, 0,0185 unité de masse correspond à $3,07 \times 10^{-26}$ grammes, 17 Mev correspond à $27,2 \times 10^6$ ergs et c est égal à 3×10^{10} cm/sec. (Voir l'annexe 2.) Si nous remplaçons ces chiffres dans l'équation d'Einstein, $E = mc^2$, nous avons $27,2 \times 10^6$ ergs sur le côté gauche et sur le côté droit, nous avons $27,6 \times 10^6$ ergs, de sorte que l'équation est satisfaite à une bonne approximation. En d'autres termes, ces résultats expérimentaux prouvent que l'équivalence de la masse et de l'énergie a été correctement énoncée par Einstein.

1.40. Cockcroft et Walton ont produit des protons d'assez haute énergie en ionisant de l'hydrogène gazeux, puis en accélérant les ions dans un appareil à haute tension transformateur-redresseur. Une procédure similaire peut être utilisée pour produire des deutérons de haute énergie à partir de deutérium ou des particules alpha de haute énergie à partir d'hélium. Des énergies plus élevées peuvent être atteintes en accélérant les ions dans des cyclotrons ou des machines Van de Graaff. Cependant, pour obtenir un rayonnement gamma de haute énergie ou, plus important encore, pour obtenir des neutrons, les réactions nucléaires elles-mêmes doivent être utilisées comme sources. Des rayonnements d'une énergie suffisamment élevée proviennent de certaines matières naturellement radioactives ou de certains bombardements. Les neutrons sont généralement produits par le bombardement de certains éléments, notamment le béryllium ou le bore, par des particules alpha naturelles, ou en bombardant des cibles appropriées avec des protons ou des deutérons. La source la plus courante de neutrons est un mélange de radium et de béryllium où les particules alpha du radium et de ses produits de désintégration pénètrent dans les noyaux Be^9 , qui émettent ensuite des neutrons et deviennent des noyaux C^{12} stables (carbone ordinaire). Une source de neutrons à « faisceau » fréquemment utilisée résulte de l'accélération des deutérons qui empiètent sur la glace d'eau lourde. Ici, les deutérons à grande vitesse frappent les deutérons cibles pour produire des neutrons et des noyaux He^3 . Une demi-douzaine d'autres réactions sont également utilisées impliquant le deutérium, le lithium, le béryllium ou le bore comme cibles. Notez que dans toutes ces réactions, le nombre de masse totale et le nombre de charge totale sont inchangés.

1.41. En résumé, les agents qui déclenchent les réactions nucléaires sont, par ordre approximatif d'importance, les neutrons, les deutérons, les protons, les particules alpha, les rayons gamma et, plus rarement, les particules plus lourdes.

RESULTATS DES BOMBARDEMENTS NUCLEAIRES

1.42. La plupart des noyaux atomiques peuvent être pénétrés par au moins un type de projectile atomique (ou par rayonnement gamma). Une telle pénétration peut entraîner un réarrangement nucléaire au cours duquel une particule fondamentale est éjectée ou un rayonnement est émis, ou les deux. Le noyau résultant peut être l'une des espèces stables naturellement disponibles, ou, plus probablement, il peut s'agir d'un atome d'un type différent qui est radioactif, et qui finit par se transformer en un noyau différent. Celui-ci peut à son tour être radioactif et, si c'est le cas, se désintégrer à nouveau. Le processus se poursuit jusqu'à ce que tous les noyaux soient passés à un type stable. Il y a deux aspects dans lesquels ces substances artificiellement radioactives diffèrent des substances naturelles : beaucoup d'entre elles changent en émettant des positrons (inconnu dans la radioactivité naturelle) et très peu d'entre elles émettent des particules alpha. Dans tous les cas où des mesures précises ont été effectuées, l'équivalence de la masse et de l'énergie a été démontrée et le total masse-énergie est resté constant. (Parfois, il est nécessaire d'invoquer des neutrinos pour préserver la conservation de l'énergie de masse.)

NOTATION

1.43. Une description complète d'une réaction nucléaire doit inclure la nature, la masse et l'énergie de la particule incidente, ainsi que la nature (nombre de masse et numéro atomique), la masse et l'énergie (généralement nulles) de la particule cible, ainsi que la nature, la masse et l'énergie des particules éjectées (ou rayonnement), et enfin la nature, la masse et l'énergie du

reste. Mais tous ces éléments sont rarement connus et, à de nombreuses fins, leur spécification complète n'est pas nécessaire. Une réaction nucléaire est souvent décrite par une notation qui désigne d'abord la cible par le symbole chimique et le nombre de masse si elle est connue, puis le projectile, puis la particule émise, et enfin le reste. Dans ce schéma, le neutron est représenté par la lettre n, le proton par p, le deutéron par d, la particule alpha par a et le rayon gamma par γ . Ainsi, la réaction neutronique radium-béryllium peut s'écrire ${}^{226}_{88}\text{Ra} + {}^2_1\text{n} \rightarrow {}^{224}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ et la réaction deutéron-deutéron ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

TYPES DE RÉACTION

1.44. Si l'on considère les cinq particules différentes (n, p, d, a, l) à la fois comme projectiles et comme produits émis, on peut s'attendre à trouver vingt-cinq combinaisons possibles. En fait, le deutéron se produit très rarement en tant que particule produite, et le photon n'initie que deux types de réaction. Il existe cependant quelques autres types de réaction, tels que (n, 2n), (d, H³) et la fission, qui portent le nombre total de types connus à environ vingt-cinq. Peut-être faudrait-il mentionner spécifiquement la réaction (n, γ) car elle est très importante dans un processus qui nous concernera. On l'appelle souvent « capture radiative » car le neutron reste dans le noyau et seul un rayon gamma en sort.

PROBABILITÉ ET SECTION EFFICACE

1.45. Jusqu'à présent, rien n'a été dit sur la probabilité de réactions nucléaires. En fait, cela varie considérablement. Il n'y a aucune garantie qu'un neutron ou un proton se dirigeant directement vers un noyau le pénétrera. Cela dépend du noyau et de la particule incidente. En physique nucléaire, il est commode d'exprimer la probabilité d'un événement particulier par une « section efficace ». Statistiquement, les centres des

atomes d'une feuille mince peuvent être considérés comme des points uniformément répartis sur un plan. Le centre d'un projectile atomique frappant ce plan a géométriquement une probabilité définie de passer à une certaine distance (r) de l'un de ces points. En fait, s'il y a n centres atomiques dans une aire A du plan, cette probabilité est $n\pi r^2/A$, qui est simplement le rapport de l'aire agrégée des cercles de rayon r tracés autour des points à l'aire entière. Si l'on considère les atomes comme des disques d'acier impénétrables et la particule d'impact comme une balle de diamètre négligeable, ce rapport est la probabilité que la balle frappe un disque d'acier, c'est-à-dire que le projectile atomique soit arrêté par la feuille. Si c'est la fraction d'atomes d'impact traversant la feuille qui est mesurée, le résultat peut encore être exprimé en termes de section efficace d'arrêt équivalente des atomes. Cette notion peut être étendue à toute interaction entre la particule en impact et les atomes de la cible. Par exemple, la probabilité qu'une particule alpha frappant une cible de béryllium produise un neutron peut être exprimée comme la section efficace équivalente de béryllium pour ce type de réaction.

1.46. En physique nucléaire, il est conventionnel de considérer que les particules en impact ont un diamètre négligeable. La définition technique de la section efficace pour tout procédé nucléaire est donc la suivante :

Nombre de pDe plus, il n'y a pas d'autre moyen nombre de =
 (Nombre de noyaux cibles par cm^2) \times (section efficace nucléaire en cm^2)
 particules incidentes

Il est à noter que cette définition concerne la section efficace par noyau. Les sections efficaces peuvent être calculées pour n'importe quel type de processus, tels que la diffusion par capture, la production de neutrons, etc. Dans de nombreux cas, le nombre de particules émises ou dispersées dans les processus nucléaires n'est pas mesuré directement ; On mesure simplement l'atténuation produite dans un faisceau parallèle de particules incidentes par l'interposition d'une épaisseur connue d'un matériau particulier. La section transversale obtenue de cette manière est appelée section transversale totale et est généralement désignée par c .

1.47. Comme indiqué au paragraphe 1.11, le diamètre nucléaire typique est de l'ordre de 10^{-12} cm. On peut donc s'attendre à ce que les sections efficaces des réactions nucléaires soient de l'ordre de rd^2 soit environ 10^{-24} cm² et c'est l'unité dans laquelle elles sont généralement exprimées. En fait, les sections transversales observées varient énormément. Ainsi, pour les neutrons lents absorbés par la réaction (n, - γ), la section efficace dans certains cas est de l'ordre de $1\,000 \times 10^{-24}$ cm², tandis que les sections efficaces pour les transmutations par absorption de rayons gamma sont de l'ordre de $(1/1\,000) \times 10^{-24}$ cm².

FAISABILITÉ DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE EN 1939

DES EXPÉRIENCES À PETITE ÉCHELLE

1.48. Nous avons parlé avec désinvolture de l'équivalence de la masse et de l'énergie et des réactions nucléaires, telles que celle des protons sur le lithium, où l'énergie était libérée en quantités relativement importantes. Demandons-nous maintenant pourquoi les centrales atomiques n'ont pas vu le jour dans le monde entier dans les années trente. Après tout, si nous pouvons obtenir $2,76 \times 10^5$ ergs à partir d'un atome de lithium frappé par un proton, nous pourrions nous attendre à obtenir environ un demi-million de kilowattheures en combinant un gramme d'hydrogène avec sept grammes de lithium. C'est mieux que de brûler du charbon. Les difficultés sont dans la production des protons à grande vitesse et dans le contrôle de l'énergie produite. Toutes les expériences dont nous avons parlé ont été faites avec de très petites quantités de matière, assez grandes en nombre d'atomes, certes, mais en termes de masses ordinaires infinitésimales – non pas des tonnes, des livres ou des grammes, mais des fractions de microgrammes. La quantité d'énergie utilisée dans l'expérience a toujours été beaucoup plus grande que la quantité générée par la réaction nucléaire.

1.49. Les neutrons sont particulièrement efficaces pour produire la désintégration nucléaire. Pourquoi n'ont-ils pas été utilisés ? Si leur source initiale était un faisceau d'ions frappant une cible, les limitations discutées dans le dernier paragraphe

s'appliquaient. Si l'on devait utiliser une source de radium et de béryllium, la rareté du radium constituait une difficulté.

LA NÉCESSITÉ D'UNE RÉACTION EN CHAÎNE

1.50. Nos sources d'énergie communes, autres que la lumière du soleil et l'énergie hydraulique, sont des réactions chimiques, généralement la combustion du charbon ou du pétrole. Ils libèrent de l'énergie à la suite de réarrangements des structures électroniques externes des atomes, le même type de processus qui fournit de l'énergie à notre corps. La combustion se propage toujours d'elle-même ; Ainsi, allumer un feu avec une allumette libère suffisamment de chaleur pour enflammer le combustible voisin, qui libère plus de chaleur qui enflamme plus de combustible, et ainsi de suite. Dans les réactions nucléaires, nous avons

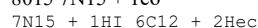
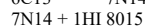
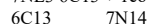
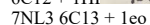
décrit cela n'est généralement pas vrai ; Ni l'énergie libérée ni les nouvelles particules formées ne sont suffisantes pour maintenir la réaction. Mais on peut imaginer des réactions nucléaires émettant des particules du même type que celles qui les initient et en nombre suffisant pour propager la réaction dans les noyaux voisins. Une telle réaction d'auto-propagation est appelée « réaction en chaîne » et de telles conditions doivent être réunies si l'on veut utiliser à grande échelle l'énergie des réactions nucléaires dont il s'agit.

PÉRIODE DE SPÉCULATION

1.51. Bien qu'il n'y ait pas eu de centrales atomiques construites dans les années trente, il y a eu beaucoup de découvertes en physique nucléaire et beaucoup de spéculations. Une théorie a été avancée par H. Bethe pour expliquer la chaleur du soleil par un cycle de changements nucléaires impliquant le carbone, l'hydrogène, l'azote et l'oxygène, et conduisant finalement à la formation d'hélium. * Cette théorie est aujourd'hui généralement admise. La découverte de quelques (n, 2n) réactions nucléaires (c'est-à-dire des réactions produites par des neutrons et des réactions productrices de neutrons) a suggéré

qu'une réaction en chaîne auto-multiplicatrice pourrait être initiée dans les bonnes conditions. On a beaucoup parlé de l'énergie atomique et d'autres des bombes atomiques. Mais la dernière grande étape de cette période préliminaire est intervenue après quatre ans d'hésitation. Les effets du bombardement neutronique de l'uranium, l'élément le plus complexe connu, ont été étudiés par certains des physiciens les plus compétents. Les résultats ont été frappants mais déroutants. L'histoire de leur interprétation progressive est complexe et très technique, une histoire fascinante de théorie et d'expérience. En passant par l'inadéquation de l'ancien

* La série de réactions postulées a été



L'effet net est la transformation de l'hydrogène en hélium et en positrons (désignés sous le nom de e^0) et la libération d'une trentaine de millions d'électronvolts d'énergie.

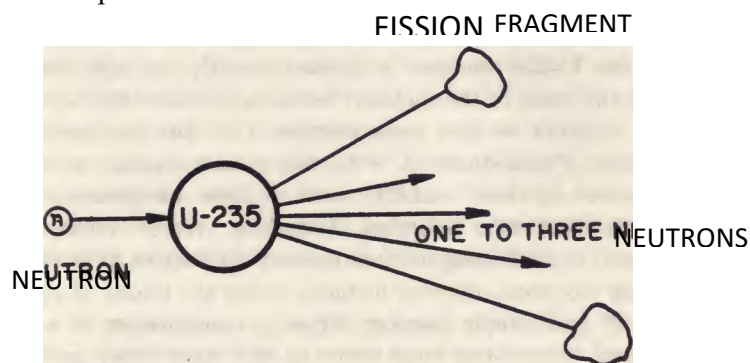
Nous allons passer directement à l'explication finale, qui, comme c'est souvent le cas, est relativement simple.

DÉCOUVERTE DE LA FISSION DE L'URANIUM

1.52. Comme on l'a déjà mentionné, le neutron s'est avéré être la particule la plus efficace pour induire des changements nucléaires. Cela était particulièrement vrai pour les éléments de numéro atomique et de poids les plus élevés où la grande charge nucléaire exerce de fortes forces de répulsion sur les projectiles de deutéron ou de protons, mais pas sur les neutrons non chargés. Les résultats du bombardement de l'uranium par les neutrons s'étaient avérés intéressants et déroutants. Étudiés pour la première fois par Fermi et ses collègues en 1934, ils n'ont été correctement interprétés que plusieurs années plus tard.

1.53. Le 16 janvier 1939, Niels Bohr, de Copenhague, au Danemark, est arrivé dans ce pays pour passer plusieurs mois à Princeton, dans le New Jersey, et était particulièrement désireux de discuter de certains problèmes abstraits avec Einstein. (Quatre ans plus tard, Bohr devait s'échapper du Danemark occupé par les nazis dans un petit bateau.) Juste avant que Bohr ne quitte le Danemark, deux de ses collègues, O. R. Frisch et L. Meitner (tous deux réfugiés d'Allemagne), lui avaient fait part de leur hypothèse selon laquelle l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium provoquait parfois la division de ce noyau en parties à peu près égales avec la libération d'énormes quantités d'énergie, un processus qui a rapidement commencé à être appelé « fission » nucléaire. L'occasion de cette hypothèse fut l'importante découverte de O. Hahn et F. Strassmann en Allemagne (publiée dans *Naturwissenschaften* au début de janvier 1939) qui prouva qu'un isotope du baryum était produit par bombardement neutronique de l'uranium. Dès son arrivée aux États-Unis, Bohr communiqua cette idée à son ancien étudiant J. A. Wheeler et à d'autres étudiants de Princeton, et d'eux la nouvelle se répandit de bouche à oreille aux physiciens voisins, dont E. Fermi de l'Université Columbia. À la suite de conversations entre Fermi, J. R. Dunning et G. B. Pegram, une recherche a été entreprise à Columbia pour trouver les fortes impulsions d'ionisation que l'on pouvait attendre des fragments volants du noyau d'uranium. Le 26 janvier 1939, il y a eu une conférence sur la physique théorique à Washington, D.C., parrainée conjointement par l'Université George Washington et la Carnegie Institution de Washington. Fermi quitta New York pour assister à cette réunion avant que les expériences de fission de Columbia n'aient été tentées. Lors de la réunion, Bohr et Fermi ont discuté du problème de la fission, et en particulier Fermi a mentionné la possibilité que des neutrons puissent être émis au cours du processus. Bien qu'il ne s'agisse que d'une supposition, l'implication de la possibilité d'une réaction en

chaîne était évidente. Un certain nombre d'articles sensationnels ont été publiés.



FISSION FRAGMENT

dans la presse à ce sujet. Avant la fin de la réunion de Washington, plusieurs autres expériences de confirmation de la fission avaient été lancées, et une confirmation expérimentale positive a été rapportée par quatre laboratoires (Université Columbia, Carnegie Institution de Washington, Université Johns Hopkins, Université de Californie) dans le numéro du 15 février 1939 de la Physical Review. À ce moment-là, Bohr avait entendu dire que des expériences similaires avaient été faites dans son laboratoire à Copenhague vers le 15 janvier. (Lettre de Frisch à Nature datée du 16 janvier 1939 et parue dans le numéro du 18 février.) F. Joliot à Paris avait également publié ses premiers résultats dans les Comptes Rendus du 30 janvier 1939. À partir de ce moment-là, il y eut un flux constant d'articles sur le sujet de la fission, de sorte qu'au moment où (6 décembre 1939) L. A. Turner de Princeton écrivit un article de synthèse sur le sujet dans les Reviews of Modern Physics, près d'une centaine d'articles avaient paru. Une analyse et une discussion complètes de ces documents ont été publiées dans l'article de Turner et ailleurs.

1.54. Considérons la suggestion de Frisch et Meitner à la lumière des deux tendances générales qui ont été découvertes dans la structure nucléaire : premièrement, que la proportion de neutrons augmente avec le numéro atomique ; deuxièmement, que l'énergie de liaison par particule est un maximum pour les noyaux de numéro atomique intermédiaire. Supposons que le noyau U-238 soit brisé exactement en deux ; Ensuite, en négligeant la masse du neutron incident, nous avons deux noyaux de numéro atomique 46 et de numéro de masse 119. Mais l'isotope stable le plus lourd du palladium ($Z = 46$) n'a qu'un nombre de masse de 110. Par conséquent, pour atteindre la stabilité, chacun de ces nouveaux noyaux imaginaires doit éjecter neuf neutrons, devenant des noyaux ${}^{46}\text{Pd}^{110}$; ou quatre neutrons dans chaque noyau doivent se convertir en protons en émettant des électrons, formant ainsi des noyaux d'étain stables de numéro de masse 119 et de numéro atomique 50 ; ou une combinaison de ces éjections et conversions doit se produire pour donner une autre paire de noyaux stables. En fait, comme l'a suggéré Hahn et Strassmann en identifiant le baryum ($Z = 56, A = 135$ à 140) comme un produit de la fission, la scission se produit de manière à produire deux parties inégales de nombres de masse d'environ 140 et 90 avec l'émission de quelques neutrons et la désintégration radioactive subséquente par émission d'électrons jusqu'à ce que des noyaux stables soient formés. Des calculs à partir de données d'énergie de liaison montrent qu'un tel réarrangement donne une masse résultante globale considérablement inférieure à la masse initiale du noyau d'uranium, et donc qu'une grande quantité d'énergie doit être libérée.

1.55. De toute évidence, le phénomène de fission a trois implications majeures : la libération d'énergie, la production d'espèces atomiques radioactives et la possibilité d'une réaction en chaîne de neutrons. La libération d'énergie pourrait se révéler

dans l'énergie cinétique des fragments de fission et dans la désintégration radioactive ultérieure des produits. La possibilité d'une réaction en chaîne de neutrons dépendait de l'émission ou non de neutrons, une possibilité qui nécessitait des études.

1.56. Tels étaient les problèmes suggérés par la découverte de la fission, le genre de problème signalé dans les revues en 1939 et 1940 et depuis lors étudié en grande partie en secret. L'étude du processus de fission lui-même, y compris la production de neutrons et de fragments rapides, a été en grande partie réalisée par des physiciens à l'aide de compteurs, de chambres à brouillard, etc. L'étude et l'identification des produits de fission ont été réalisées en grande partie par des chimistes, qui ont dû effectuer des séparations chimiques rapidement, même avec des quantités submicroscopiques de matière, et déterminer à plusieurs reprises la demi-vie des isotopes instables. Nous résumerons l'état des connaissances en juin 1940. À cette époque, les principaux faits sur la fission avaient été découverts et révélés au monde scientifique. Une réaction en chaîne n'avait pas été obtenue, mais sa possibilité, du moins en principe, était claire et plusieurs voies qui pourraient y conduire avaient été suggérées.

ÉTAT DES CONNAISSANCES EN JUIN 1940

INFORMATIONS PRÉCISES ET GÉNÉRALEMENT CONNUES SUR LA FISION

1.57. Toutes les informations suivantes étaient généralement connues Juin 1940, ici et à l'étranger :

Que trois éléments – l'uranium, le thorium et le protoactinium – lorsqu'ils sont bombardés par des neutrons, se divisent parfois en fragments à peu près égaux, et que ces fragments sont des isotopes d'éléments au milieu du tableau périodique, allant du sélénium ($Z = 34$) au lanthane ($Z = 57$).

Que la plupart de ces fragments de fission étaient instables, se désintégrant radioactivement par émission successive de particules bêta à travers une série d'éléments en diverses formes stables.

Que ces fragments de fission avaient une très grande énergie cinétique.

Cette fission du thorium et du protoactinium n'a causé que des par des neutrons rapides (vitesses de l'ordre de milliers de kilomètres par seconde).

Cette fission dans l'uranium pourrait être produite par des neutrons rapides ou lents (appelés vitesse thermique) ; plus précisément, que les neutrons thermiques provoquaient la fission d'un isotope, l'U-235, mais pas de l'autre, l'U-238, et que les neutrons rapides avaient une probabilité plus faible de provoquer la fission de l'U-235 que les neutrons thermiques.

Qu'à certaines vitesses de neutrons, il y avait une grande section efficace de capture dans l'U-238 produisant de l'U-239 mais pas de la fission.

Que l'énergie libérée par fission d'un noyau d'uranium était d'environ 200 millions d'électronvolts.

Que des neutrons à grande vitesse ont été émis dans le processus de fission.

Que le nombre moyen de neutrons libérés par fission se situait entre un et trois.

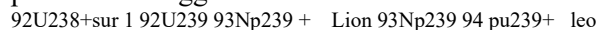
Ces neutrons à grande vitesse pourraient perdre de l'énergie par collision inélastique avec des noyaux d'uranium sans qu'aucune réaction nucléaire n'ait lieu.

Que la plupart de ces informations étaient cohérentes avec la théorie semi-empirique de la structure nucléaire élaborée par Bohr et Wheeler et d'autres ; Cela suggérait que les prédictions basées sur cette théorie avaient de bonnes chances de succès.

SUGGESTION DE PLUTONIUM Frss10N

1.58. On s'est rendu compte que la capture radiative de neutrons par l'U-238 conduirait probablement, par deux émissions

successives de rayons bêta, à la formation d'un noyau pour lequel $Z = 94$ et $A = 239$. L'examen de la théorie de la fission de Bohr-Wheeler et de certaines relations empiriques entre les noyaux par L. A. Turner et d'autres a suggéré que ce noyau serait un émetteur alpha assez stable et subirait probablement une fission lorsqu'il serait bombardé par des neutrons thermiques. Plus tard, l'importance d'une telle fission thermique pour le maintien de la réaction en chaîne a été préfigurée dans la correspondance et les discussions privées. En ce qui concerne nos connaissances et notre notation actuelles, la réaction particulière suggérée est la suivante :



où NP et Pu sont les symboles chimiques maintenant utilisés pour les deux nouveaux éléments, le neptunium et le plutonium ; ${}^1_0\text{n}$ représente le neutron, et ${}^0_{-1}\text{e}$ représente un électron ordinaire (négatif). Le plutonium 239 est le noyau dont on suppose à juste titre qu'il est fissile par les neutrons thermiques. Nous en parlerons en détail dans les chapitres suivants.

ETAT GÉNÉRAL DE LA PHYSIQUE NUCLEAIRE

1.59. En 1940, les réactions nucléaires avaient fait l'objet d'études intensives pendant plus de dix ans. Plusieurs livres et articles de synthèse sur la physique nucléaire ont été publiés. De nouvelles techniques ont été mises au point pour la production et le contrôle des projectiles nucléaires, pour l'étude de la radioactivité artificielle et pour la séparation des quantités submicroscopiques d'éléments chimiques produits par les réactions nucléaires. Les masses isotopiques avaient été mesurées avec précision. Des sections efficaces de capture de neutrons ont été mesurées. Des méthodes de ralentissement des neutrons ont été mises au point. Des effets physiologiques des neutrons ont été observés ; Ils avaient même été essayés dans le traitement du cancer. Toutes ces informations étaient généralement disponibles ; mais il était très incomplet. Il y avait beaucoup de lacunes et beaucoup d'inexactitudes. Les techniques étaient difficiles et les quantités de matériaux disponibles étaient

souvent submicroscopiques. Bien que les principes fondamentaux soient clairs, la théorie était pleine d'hypothèses non vérifiées et les calculs étaient difficiles à faire. Les prédictions faites en 1940 par différents physiciens de même niveau étaient souvent contradictoires. Le sujet était à bien des égards un art plutôt qu'une science.

RÉSUMÉ

1.60. Si l'on se penche sur l'année 1940, on constate que toutes les conditions préalables à une attaque sérieuse sur le problème de la production de bombes atomiques et du contrôle de l'énergie atomique étaient réunies. Il avait été prouvé que la masse et l'énergie étaient équivalentes. Il a été prouvé que les neutrons initiant la fission de l'uranium les reproduisaient. et que, par conséquent, une réaction en chaîne qui se multiplie pourrait se produire avec une force explosive. Certes, personne ne savait si les conditions requises pouvaient être réunies, mais de nombreux scientifiques avaient des idées claires sur les problèmes à résoudre et sur les directions dans lesquelles des solutions pourraient être recherchées. Le chapitre suivant de ce rapport expose les problèmes et sert de guide pour l'évolution des cinq dernières années.

CHAPITRE 11. ÉNONCÉ DU PROBLÈME

INTRODUCTION

2.1. Depuis la première découverte des grandes quantités d'énergie libérées dans les réactions nucléaires jusqu'à la découverte de la fission de l'uranium, l'idée de l'énergie atomique ou même des bombes atomiques a été discutée par intermittence dans les milieux scientifiques. La découverte de la fission a rendu ce discours beaucoup moins spéculatif, mais la réalisation de l'énergie atomique semblait encore dans un avenir lointain et il y avait un sentiment instinctif parmi de nombreux scientifiques qu'elle pourrait, en fait, ne jamais être réalisée. Au cours des années 1939 et 1940, de nombreuses déclarations publiques, dont certaines émanaient de scientifiques responsables, attirèrent l'attention sur l'énorme énergie disponible dans l'uranium pour les explosifs et pour l'énergie contrôlée, de sorte que l'U-235 devint un synonyme familier indiquant de grandes choses à venir. L'importance militaire possible de la fission de l'uranium fut portée à l'attention du gouvernement (voir chapitre III) et, lors d'une conférence avec des représentants du ministère de la Marine en mars 1939, Fermi suggéra la possibilité de réaliser une réaction contrôlable à l'aide de neutrons lents ou une réaction à caractère explosif à l'aide de neutrons rapides. Il a toutefois souligné que les données alors disponibles pourraient être insuffisantes pour des prédictions précises.

2.2. Dès l'été 1940, il était possible de formuler le problème assez clairement, bien qu'il fût encore loin d'être possible de répondre aux diverses questions soulevées ou même de décider si une réaction en chaîne pourrait jamais être obtenue. Dans ce chapitre, nous exposerons le problème dans son intégralité. À des fins de clarification, nous pouvons utiliser certaines connaissances qui n'ont été acquises qu'à une date ultérieure.

Énoncé du problème

LE PROBLÈME DE LA RÉACTION EN CHAÎNE

2.3. Le principe de fonctionnement d'une bombe atomique ou d'une centrale électrique utilisant la fission de l'uranium est assez simple. Si un neutron

31

provoque une fission qui produit plus d'un nouveau neutron, le nombre de fissions peut augmenter considérablement avec la libération d'énormes quantités d'énergie. C'est une question de probabilités. Les neutrons produits au cours du processus de fission peuvent s'échapper entièrement de l'uranium, être capturés par l'uranium dans un processus n'entraînant pas de fission ou être capturés par une impureté. Ainsi, la question de savoir si une réaction en chaîne se produit ou non dépend du résultat d'une compétition entre quatre processus :

échapper
captage par l'uranium de non-fission,
captage de non-fission par les impuretés,
Capture par fission.

Si la perte de neutrons par les trois premiers processus est inférieure à l'excédent produit par le quatrième, la réaction en chaîne se produit ; sinon, ce n'est pas le cas. De toute évidence, l'un ou l'autre des trois premiers processus peut avoir une probabilité si élevée dans un arrangement donné que les neutrons supplémentaires créés par la fission seront insuffisants pour maintenir la réaction. Par exemple, s'il s'avérait que le processus (2) – la capture de l'uranium par la non-fission – a une probabilité beaucoup plus élevée que la capture par fission, il n'y aurait vraisemblablement aucune possibilité de réaliser une réaction en chaîne.

Une complication supplémentaire est que l'uranium naturel contient trois isotopes : l'U-234, l'U-235 et l'U-238, présents à environ 0,006, 0,7 et 99,3 %, respectivement. Nous avons déjà vu que les probabilités des processus (2) et (4) sont différentes pour différents isotopes. Nous avons également vu que les probabilités sont différentes pour des neutrons d'énergies différentes.

Nous allons maintenant examiner les limites imposées par les trois premiers processus et la manière dont leurs effets peuvent être minimisés.

Énoncé du problème

ÉCHAPPEMENT DE NEUTRONS ; TAILLE CRITIQUE

2.6. Le nombre relatif de neutrons qui s'échappent d'une quantité d'uranium peut être minimisé en modifiant la taille

33

et la forme. Dans une sphère, tout effet de surface est proportionnel au carré du rayon, et tout effet de volume est proportionnel au cube du rayon. Or, la fuite de neutrons d'une quantité d'uranium est un effet de surface dépendant de la surface de la surface, mais la capture de fission se produit dans tout le matériau et est donc un effet de volume. Par conséquent, plus la quantité d'uranium est importante, moins il est probable que l'échappement neutronique prédomine sur la capture de fission et empêche une réaction en chaîne. La perte de neutrons par capture de non-fission est un effet de volume comme la production de neutrons par capture de fission, de sorte que l'augmentation de la taille ne change rien à son importance relative.

2.7. La taille critique d'un dispositif contenant de l'uranium est définie comme la taille pour laquelle la production de neutrons libres par fission est juste égale à leur perte par échappement et par capture sans fission. En d'autres termes, si la taille est inférieure à la taille critique, alors, par définition, aucune réaction en chaîne ne se maintiendra. En principe, il était possible en 1940 de calculer la taille critique, mais dans la pratique, l'incertitude des constantes impliquées était si grande que les différentes estimations différaient considérablement. Il ne semblait pas improbable que la taille critique soit trop grande pour des raisons pratiques. Aujourd'hui encore, les estimations des arrangements qui n'ont pas encore fait l'objet d'essais varient quelque peu d'une personne à l'autre, à mesure que de nouvelles informations sont disponibles.

UTILISATION D'UN MODÉRATEUR POUR RÉDUIRE LA CAPTURE DE NON-FISSION

2.8. Dans le chapitre I, nous avons dit que les neutrons thermiques ont la plus grande probabilité de produire la fission de l'U-235, mais nous avons également dit que les neutrons émis dans le processus de fission avaient des vitesses élevées. De toute évidence, il était trop simpliste de

Énoncé du problème

dire que la réaction en chaîne pourrait se maintenir si plus de neutrons étaient créés par la fission qu'ils n'en absorbaient. Car la probabilité de capture de fission et de capture de non-fission dépend de la vitesse des neutrons. Malheureusement, la vitesse à laquelle la capture de non-fission est la plus probable est intermédiaire entre la vitesse moyenne des neutrons émis dans le processus de fission et la vitesse à laquelle la capture de fission est la plus probable.

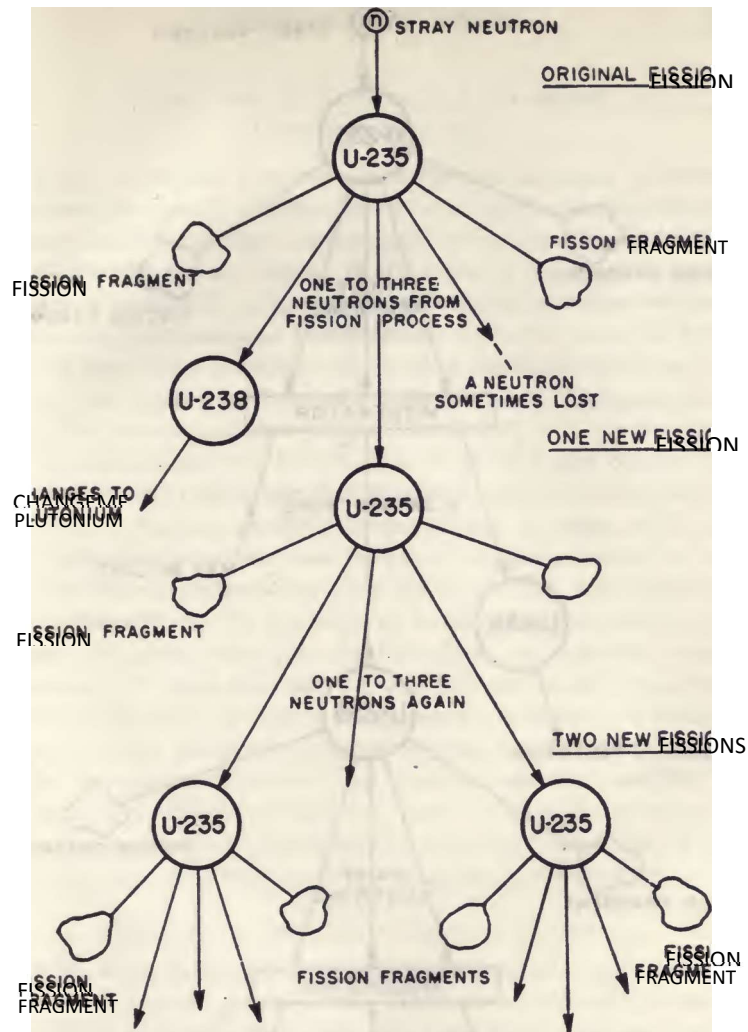
2.9. Pendant quelques années avant la découverte de la fission, la façon habituelle de ralentir les neutrons était de les faire passer à travers des matériaux de faible poids atomique, tels que des matériaux hydrogènes. Le processus de ralentissement ou de modération est simplement un processus de collisions élastiques entre des particules à grande vitesse et des particules pratiquement au repos. Plus les masses du neutron et de la particule frappée sont presque identiques, plus la perte d'énergie cinétique par le neutron est importante. Par conséquent, les éléments légers sont les plus efficaces en tant que « modérateurs », c'est-à-dire en tant qu'agents ralentissants, pour les neutrons.

2.10. Il est venu à l'esprit d'un certain nombre de physiciens qu'il serait peut-être possible de mélanger l'uranium avec un modérateur de telle sorte que les neutrons de fission à grande vitesse, après avoir été éjectés de l'uranium et avant de rencontrer à nouveau des noyaux d'uranium, voient leur vitesse réduite en dessous des vitesses pour lesquelles la capture de la non-fission est hautement probable. De toute évidence, les caractéristiques d'un bon modérateur sont qu'il doit avoir un faible poids atomique et qu'il doit avoir peu ou pas de tendance à absorber les neutrons. Le lithium et le bore sont exclus sur ce dernier point. L'hélium est difficile à utiliser car il s'agit d'un gaz et ne forme aucun composé. Le choix du modérateur s'est donc porté entre l'hydrogène, le deutérium, le béryllium et le carbone. Aujourd'hui encore, aucune de ces substances ne peut être exclue de la liste des possibilités pratiques. Ce sont E. Fermi et L. Szilard qui ont proposé l'utilisation du graphite comme modérateur d'une réaction en chaîne.

Énoncé du problème

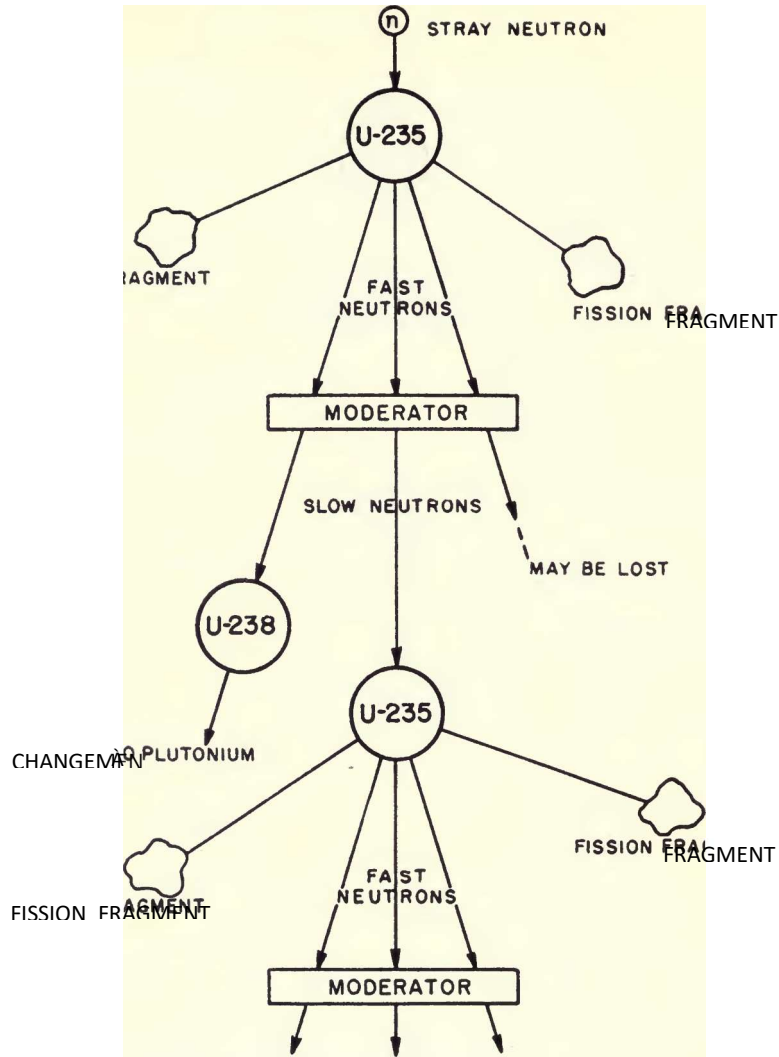
UTILISATION D'UN TREILLIS POUR RÉDUIRE LA CAPTURE DE NON-FISSION

2.11. Le schéma général d'utilisation d'un modérateur mélangé à l'uranium était assez évident. Une manière spécifique d'utiliser un modérateur a été suggérée pour la première fois dans ce pays, pour autant que nous puissions le découvrir, par Fermi et Szilard. L'idée était d'utiliser des morceaux d'uranium de taille considérable incrustés dans une matrice de matériau modérateur. On peut montrer qu'un tel réseau présente de réels avantages par rapport à un mélange homogène. Au fur et à mesure que les constantes ont été déterminées avec plus de précision, il est devenu possible de calculer théoriquement le type de réseau qui serait le plus efficace.



PLUSIEURS NOUVEAUX NEUTRONS
PROVOQUENT PLUS DE FISSIONS

DIAGRAMME SCHÉMATIQUE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE DE LA
FISSION, EFFET NÉGLIGEANT
DE LA VITESSE DES NEUTRONS. DANS UNE RÉACTION
EXPLOSIVE, LE NOMBRE DE
LES NEUTRONS SE MULTIPLIENT INDÉFINIMENT. DANS UNE
RÉACTION CONTRÔLÉE
LE NOMBRE DE NEUTRONS S'ACCUMULE JUSQU'À UN CERTAIN
NIVEAU, PUIS RESTE CONSTANT.



FISSION FRAGMENT
 RALENTIR LES NEUTRONS POUR PROVOQUER PLUS
 DE FISSIONS ET AINSI DE SUITE.

DIAGRAMME SCHÉMATIQUE D'UNE RÉACTION EN
CHAÎNE DE FISSION À L'AIDE D'UN
MODÉRATEUR POUR RALENTIR LES NEUTRONS À DES VITESSES
PLUS SUSCEPTIBLES DE
PROVOQUER LA FISSION

RÉDUCTION DE LA CAPTURE DE NON-FISSION PAR SÉPARATION
ISOTOPIQUE

2.12. Dans le chapitre I, il a été dit que pour les neutrons de certaines vitesses intermédiaires (correspondant à des énergies de quelques électronvolts), l'U-238 a une grande section efficace de capture pour la production d'U-239 mais pas pour la fission. Il existe également une probabilité considérable d'inélastique (c'est-à-dire les collisions non productrices de capture) entre des neutrons à grande vitesse et des noyaux d'U-238. Ainsi, la présence de l'U-238 tend à la fois à réduire la vitesse des neutrons rapides et à effectuer la capture de ceux de vitesse modérée. Bien qu'il puisse y avoir une certaine capture de non-fission par l'U-235, il est évident que si nous pouvons séparer l'U-235 de l'U-238 et éliminer l'U-238, nous pouvons réduire la capture de non-fission et ainsi favoriser la réaction en chaîne. En fait, la probabilité de fission de l'U-235 par des neutrons à grande vitesse peut être suffisamment grande pour rendre inutile l'utilisation d'un modérateur une fois que l'U-238 a été retiré. Malheureusement, l'uranium 235 n'est présent dans l'uranium naturel qu'à raison d'environ une partie sur 140. De plus, la différence de masse relativement faible entre les deux isotopes rend la séparation difficile. En fait, en 1940, aucune séparation à grande échelle des isotopes n'avait jamais été réalisée, à l'exception de l'hydrogène, dont les deux isotopes diffèrent en masse d'un facteur deux. Néanmoins, la possibilité de séparer l'U-235 a été reconnue très tôt comme étant de la plus haute importance, et cette séparation a, en fait, été l'une des

deux principales lignes d'effort du projet au cours des cinq dernières années.

PRODUCTION ET PURIFICATION DE NIATERIALS

2.13. Il a été dit plus haut que « la section efficace pour la capture des neutrons varie considérablement d'un matériau à l'autre. Dans certains cas, elle est très élevée par rapport à la section efficace maximale de fission de l'uranium. Si donc nous voulons espérer obtenir une réaction en chaîne, nous devons réduire l'effet (3) – la capture de non-fission par les impuretés – au point qu'il ne soit pas sérieux. Cela signifie une purification très soigneuse de l'uranium métal et une purification très soigneuse du modérateur. Les calculs montrent que les concentrations maximales admissibles de nombreux éléments d'impuretés sont de quelques parties par million, soit dans l'uranium, soit dans le modérateur. Si l'on se souvient que, jusqu'en 1940, la quantité totale d'uranium métal produite dans ce pays n'était pas supérieure à quelques grammes et même que celle-ci était d'une pureté douteuse, que la quantité totale de béryllium métallique produite dans ce pays n'était pas supérieure à quelques livres, que la quantité totale de deutérium concentré produite n'était pas supérieure à quelques livres, Et que le carbone n'avait jamais été produit en quantité avec la pureté requise d'un modérateur, il est clair que le problème de la production et de la purification des matériaux était majeur.

CONTRÔLE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE

2.14. Les problèmes qui ont été discutés jusqu'à présent concernent uniquement la réalisation de la réaction en chaîne. Si une telle réaction doit être utile, nous devons être en mesure de la contrôler. Le problème du contrôle est différent selon que l'on s'intéresse à une production régulière d'énergie ou à une explosion. En général, la production régulière d'énergie atomique nécessite une réaction en chaîne de fission induite par des neutrons lents se produisant dans un mélange ou un réseau

d'uranium et de modérateur, tandis qu'une bombe atomique nécessite une réaction en chaîne de fission induite par des neutrons rapides dans l'U-235 ou le Pu-239, bien que la fission à neutrons lents et à neutrons rapides puisse y contribuer dans chaque cas. Il semblait probable, même en 1940, qu'en utilisant des absorbeurs de neutrons, une réaction en chaîne puissante pourrait être contrôlée. Il a également été considéré comme probable, mais pas certain, qu'une telle réaction en chaîne serait auto-limitante en raison de la probabilité plus faible de capture produisant de fission lorsqu'une température plus élevée était atteinte. Néanmoins, il y avait une possibilité qu'un système de réaction en chaîne puisse devenir incontrôlable, et il semblait donc nécessaire d'effectuer l'expérience de réaction en chaîne dans un endroit inhabité.

APPLICATION PRATIQUE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE

2.15. Jusqu'à présent, nous avons discuté de la manière de produire et de contrôler une réaction nucléaire en chaîne, mais pas de la manière de l'utiliser. L'écart technologique entre la production d'une réaction en chaîne contrôlée et son utilisation comme source d'énergie à grande échelle ou comme explosif est comparable à l'écart entre la découverte d'un incendie et la fabrication d'une locomotive à vapeur.

2.16. Bien que la production d'énergie n'ait jamais été l'objet principal de ce projet, suffisamment d'attention a été accordée à la question pour révéler la difficulté majeure : l'obtention d'un fonctionnement à haute température. Un moteur thermique efficace doit non seulement développer de la chaleur, mais aussi développer de la chaleur à haute température. Il est beaucoup plus difficile de faire fonctionner un système à réaction en chaîne à haute température et de convertir la chaleur générée en travail utile que de faire fonctionner un système à réaction en chaîne à basse température.

2.17. Bien entendu, la preuve qu'une réaction en chaîne est possible n'assure pas en soi que l'énergie nucléaire puisse être

efficace dans une bombe. Pour qu'une explosion soit efficace, il est nécessaire que la réaction en chaîne s'accumule extrêmement rapidement ; sinon, seule une petite quantité d'énergie nucléaire sera utilisée avant que la bombe ne s'envole et que la réaction ne s'arrête. Il est également nécessaire qu'aucune explosion prématurée ne se produise. Tout ce problème de « détonation » a été et reste l'un des problèmes les plus difficiles dans la conception d'une bombe atomique à haute puissance.

POSSIBILITÉ D'UTILISER DU PLUTONIUM

2.18. Jusqu'à présent, toutes nos discussions ont porté principalement sur l'utilisation de l'uranium lui-même. Nous avons déjà mentionné la suggestion selon laquelle l'élément de numéro atomique 94 et de masse 239, communément appelé plutonium, pourrait être très efficace. En fait, nous pensons maintenant qu'il a une valeur comparable à celle de l'U-235 pur. Nous avons mentionné la difficulté de séparer l'U-235 de l'isotope U-238, plus abondant. Ces deux isotopes sont, bien sûr, chimiquement identiques. Mais le plutonium, bien que produit à partir de l'U-238, est un élément chimique différent. Par conséquent, si l'on pouvait mettre au point un procédé permettant de convertir une partie de l'U-238 en plutonium, une séparation chimique du plutonium de l'uranium pourrait s'avérer plus pratique que la séparation isotopique de l'U-235 de l'U-238.

2.19. Supposons que nous ayons mis en place une réaction en chaîne contrôlable dans un réseau d'uranium naturel et un modérateur, disons du carbone, sous forme de graphite. Ensuite, au fur et à mesure que la réaction en chaîne se déroule, des neutrons sont émis dans le processus de fission de l'U-235 et beaucoup de ces neutrons sont absorbés par l'U-238. Cela produit de l'U-239, dont chaque atome émet alors une particule bêta, devenant du neptunium (${}_{93}\text{Np} 239$). Le neptunium, à son tour, émet une autre particule bêta, devenant du plutonium

(^{239}Pu), qui émet une particule alpha, se désintégrant à nouveau en U-235, mais si lentement qu'il s'agit en fait d'un élément stable. (Voir la figure de la p. 8.) Si, après avoir laissé la réaction se dérouler pendant un temps considérable, le mélange de métaux est éliminé, il peut être possible d'extraire le plutonium par des méthodes chimiques et de le purifier pour l'utiliser dans une réaction en chaîne de fission ultérieure de nature explosive.

EFFETS COMBINÉS ET HÉMORROÏDES ENRICHIES

2.20. Trois façons d'augmenter la probabilité d'une réaction en chaîne ont été mentionnées : l'utilisation d'un modérateur ; l'obtention d'une grande pureté des matériaux ; l'utilisation d'un matériau spécial, soit l'U-235, soit le Pu. Les trois procédés ne s'excluent pas mutuellement, et de nombreux schémas ont été proposés pour l'utilisation de petites quantités d'U-235 ou de Pu-239 séparés dans un réseau composé principalement d'uranium ordinaire ou d'oxyde d'uranium et d'un modérateur ou de deux modérateurs différents. De tels arrangements proposés sont généralement appelés « pieux enrichis ».

UTILISATION DE THORIUM OU DE PROTOACTINIUM OU D'AUTRES MATÉRIAUX

2.21. Toutes nos discussions précédentes ont porté sur l'utilisation directe ou indirecte de l'uranium, mais on savait que le thorium et le protoactinium subissaient également une fission lorsqu'ils étaient bombardés par des neutrons à grande vitesse. Le grand avantage de l'uranium, du moins pour les travaux préliminaires, était sa sensibilité aux neutrons lents. On n'a pas beaucoup pris en considération les deux autres substances. Protoactinium peut être éliminé en raison de sa rareté dans la nature. Le thorium est relativement abondant mais n'a pas d'avantage apparent sur l'uranium.

2.22. Il ne faut pas oublier qu'en théorie, de nombreuses réactions nucléaires pourraient être utilisées pour libérer de l'énergie. À l'heure actuelle, nous ne voyons pas d'autres réactions d'initiation ou de contrôle que celles impliquant la fission, mais certaines synthèses telles que celles qui ont déjà été mentionnées comme source d'énergie solaire peuvent éventuellement être produites en laboratoire.

QUANTITÉS DE MATÉRIAUX NÉCESSAIRES

2.23. De toute évidence, il était impossible, au cours de l'été 1940, de faire plus que des suppositions quant aux quantités de matériaux nécessaires à la production :

une réaction en chaîne avec l'utilisation d'un modérateur :

une bombe à réaction en chaîne en U-235 ou plutonium pur, ou du moins enrichi.

Un chiffre de 1 à 100 kilogrammes d'U-235 était couramment donné à cette époque pour la taille critique d'une bombe. Il faudrait, bien sûr, séparer cela d'au moins 140 fois plus d'uranium naturel. Pour une réaction en chaîne à neutrons lents utilisant un modérateur et une uraniure non séparée, il était presque certain qu'il fallait des tonnes de métal et de modérateur.

DISPONIBILITÉ DES MATÉRIAUX

2.24. Les estimations de la composition de la croûte terrestre montrent que l'uranium et le thorium sont tous deux présents en quantités considérables (environ 4 parties par million d'uranium et 12 parties par million de thorium dans la croûte terrestre). On sait qu'il existe des gisements de minerai d'uranium au Colorado, dans la région du Grand lac de l'Ours, dans le nord du Canada, à Joachimstal, en Tchécoslovaquie, et au Congo belge. De nombreux autres gisements de minerai d'uranium sont connus, mais leur étendue est dans de nombreux cas inexplorée. On trouve toujours de l'uranium avec du radium, bien qu'en quantité beaucoup plus importante. Les deux se

trouvent souvent avec des minerais de vanadium. De petites quantités d'oxyde d'uranium sont utilisées depuis de nombreuses années dans l'industrie de la céramique.

2.25. Le thorium est également assez largement distribué, se présentant sous forme d'oxyde de thorium à une concentration assez élevée dans les sables de monazite. De tels sables se trouvent dans une certaine mesure dans ce pays, mais particulièrement au Brésil et dans l'Inde britannique.

2.26. Les premières estimations approximatives, qui sont probablement optimistes, indiquaient que l'énergie nucléaire disponible dans les gisements d'uranium connus était suffisante pour répondre aux besoins totaux en électricité de ce pays pendant 200 ans (en supposant l'utilisation de l'U-238 ainsi que de l'U-235).

2.27. Comme on l'a déjà dit, on n'avait produit que peu ou pas d'uranium jusqu'en 1940 et les informations étaient si rares que même le point de fusion n'était pas connu. (Par exemple, le Manuel de physique et de chimie pour 1943-1944 dit seulement que le point de fusion est inférieur à 1850° C. alors que nous savons maintenant qu'il se situe dans le voisinage de 1150° .) Il est évident qu'en ce qui concerne l'uranium, il n'y a pas de difficulté insurmontable à se procurer des matières premières ou à produire le métal, mais il y a des questions très sérieuses quant au temps et au coût de la production des quantités nécessaires de métal pur.

2.28. Parmi les matériaux mentionnés ci-dessus comme pouvant être utilisés par les modérateurs, le deutérium présentait les avantages les plus évidents. Il est présent dans l'hydrogène ordinaire à hauteur d'environ une partie sur 5 000. En 1940, un certain nombre de méthodes différentes pour le séparer de l'hydrogène avaient été développées, et quelques litres avaient été produits dans ce pays à des fins expérimentales. La seule production à grande échelle avait eu lieu dans une usine norvégienne, d'où provenaient plusieurs centaines de litres d'eau lourde (D_2O , oxyde de deutérium).

Comme dans le cas de l'uranium, le problème était celui du coût et du temps.

2.29. Le béryllium sous forme de silicates de béryllium est largement répandu, mais seulement dans de petites quantités de minerai. Son utilisation comme agent d'alliage s'est généralisée au cours des dernières années ; Pour une telle utilisation, cependant, il n'est pas nécessaire de produire le béryllium sous forme métallique. En 1940, seulement 700 livres de métal ont été produites dans ce pays.

2.30. En ce qui concerne le carbone, la situation est évidemment tout à fait différente. Il y avait plusieurs centaines de tonnes de graphite produites chaque année dans ce pays. C'était l'une des raisons pour lesquelles le graphite semblait très souhaitable comme modérateur. Les difficultés résidaient dans l'obtention de quantités suffisantes de graphite de la pureté requise, en particulier compte tenu des besoins croissants de l'industrie de guerre.

ESTIMATION DU TEMPS ET DES COÛTS

2.31 Les besoins en temps et en argent dépendent non seulement de nombreux facteurs scientifiques et technologiques inconnus, mais aussi de décisions politiques. De toute évidence, des années de temps et des millions de dollars pourraient être nécessaires pour atteindre l'objectif ultime. À peu près tout ce qui a été tenté à ce moment-là a été d'établir des estimations sur le temps qu'il faudrait et sur le coût qu'il en coûterait pour clarifier les perspectives scientifiques et technologiques. Il semblait que ce ne serait pas une très grande entreprise que de poursuivre le développement de la réaction en chaîne neutronique thermique dans un réseau graphite-uranium au point de découvrir si la réaction se produirait effectivement. À l'époque, on estimait qu'il faudrait environ un an et 100 000 \$ pour obtenir une réponse. Ces estimations s'appliquaient à un système à réaction en chaîne de très faible puissance, sans système de refroidissement ni aucun moyen d'utiliser l'énergie libérée.

RISQUES POUR LA SANTÉ

2.32. On savait depuis longtemps que les matières radioactives étaient dangereuses. Ils émettent des rayonnements très pénétrants – les rayons gamma – qui ressemblent beaucoup aux rayons X dans leurs effets physiologiques. Ils émettent également des rayons bêta et alpha qui, bien que moins pénétrants, peuvent tout de même être dangereux. Les quantités de radium utilisées dans les hôpitaux et dans les mesures physiques ordinaires ne sont généralement que de quelques milligrammes. Les quantités de matières radioactives produites par la fission de l'uranium dans un système de réaction en chaîne relativement petit peuvent être équivalentes à des centaines ou des milliers de grammes de radium. Un système à réaction en chaîne émet également un rayonnement neutronique intense connu pour être comparable aux rayons gamma en ce qui concerne les risques pour la santé. Outre ses propriétés radioactives, l'uranium est chimiquement toxique. Ainsi, presque tous les travaux dans ce domaine sont dangereux, en particulier les travaux sur les réactions en chaîne et les produits radioactifs qui en résultent.

MÉTHODE D'APPROCHE DU PROBLÈME

2.33. Il y avait deux façons d'aborder le problème. L'une d'entre elles consistait à effectuer une série élaborée de mesures physiques précises sur les sections efficaces d'absorption de divers matériaux pour divers processus induits par les neutrons et diverses énergies neutroniques. Une fois que ces données seraient disponibles, les calculs sur ce qui pourrait être fait sous la forme d'une réaction en chaîne pourraient être effectués avec une assez grande précision. L'autre approche était purement empirique consistant à mélanger de l'uranium ou des composés d'uranium de diverses manières avec divers modérateurs et à observer ce qui se passait. Des méthodes extrêmes similaires étaient possibles dans le cas du problème de la séparation

isotopique. Dans les deux cas, il s'agit d'une approche intermédiaire ou de compromis.

PUISSANCE VS. BOMBE

2.34. Les avantages militaires attendus des bombes à uranium étaient beaucoup plus spectaculaires que ceux d'une centrale à uranium. Il était concevable que quelques bombes à l'uranium puissent être décisives pour gagner la guerre pour le camp qui les utiliserait en premier. De telles pensées étaient très présentes dans l'esprit de ceux qui travaillaient dans ce domaine, mais la réalisation d'une réaction en chaîne à neutrons lents semblait une étape préliminaire nécessaire dans le développement de nos connaissances et devint le premier objectif du groupe intéressé par le problème. Cela semblait également une étape importante pour convaincre les autorités militaires et les scientifiques les plus sceptiques que toute cette notion n'était pas une chimère. En partie pour ces raisons et en partie à cause de l'extrême secret imposé à cette époque, l'idée d'une bombe atomique n'apparaît pas beaucoup dans les archives entre l'été 1940 et l'automne 1941.

UTILITÉ MILITAIRE

2.35. Si tous les atomes d'un kilogramme d'U-235 subissent une fission, l'énergie libérée est équivalente à l'énergie libérée lors de l'explosion d'environ 20 000 tonnes courtes de TNT. Si la taille critique d'une bombe s'avère pratique, disons de l'ordre de 1 à 100 kilogrammes, et que tous les autres problèmes peuvent être résolus, il reste deux questions. Premièrement, quel pourcentage des noyaux fissiles peut subir une fission avant que la réaction ne s'arrête ; c'est-à-dire, quelle est l'efficacité de l'explosion ? Deuxièmement, quel est l'effet d'une libération d'énergie aussi concentrée ? Même si seulement 1 % de l'énergie théoriquement disponible est libérée, l'explosion sera toujours d'un ordre de grandeur totalement différent de celui produit par n'importe quel type de bombe connu jusqu'à présent. La valeur d'une telle bombe était donc une question que les experts militaires devaient examiner très attentivement.

RÉSUMÉ

2.36. Il a été établi (1) que la fission de l'uranium s'est produite avec la libération de grandes quantités d'énergie ; et (2) qu'au cours du processus, des neutrons supplémentaires ont été libérés, ce qui pourrait déclencher une réaction en chaîne. Il n'était contraire à aucun principe connu qu'une telle réaction devait avoir lieu et qu'elle devait avoir une application militaire très importante en tant que bombe. Cependant, l'idée était révolutionnaire et donc suspecte ; Il était certain que de nombreuses opérations techniques d'une grande difficulté auraient été mises au point avant qu'une telle bombe puisse être produite. Les seuls matériaux satisfaisants pour une bombe étaient probablement soit l'U-235, qui devrait être séparé de l'isotope U-238 140 fois plus abondant, soit le Pu-239, un isotope de l'élément inconnu jusqu'à présent le plutonium, qui devrait être généré par un processus de réaction en chaîne contrôlé lui-même inconnu jusqu'à présent. Pour parvenir à une telle réaction en chaîne contrôlée, il était clair que l'uranium métallique et l'eau lourde, le béryllium ou le carbone pourraient être produits en grande quantité avec une grande pureté. Une fois que le matériel de bombe a été produit, un processus devrait être mis au point.

d'utiliser de manière sûre et efficace. Dans certains procédés, des risques pour la santé d'un nouveau genre seraient rencontrés.

PROBLÈME DE POLITIQUE

2.37. À l'été 1940, le Comité de recherche sur la défense nationale avait été formé et demandait à de nombreux scientifiques du pays de travailler sur divers problèmes militaires urgents. Le personnel scientifique était limité, bien que cela n'ait pas été pleinement réalisé à l'époque. Il était donc très difficile de décider à quel rythme les travaux devaient être poursuivis sur une bombe atomique. La décision a dû être révisée à intervalles fréquents au cours des quatre années suivantes. On trouvera un compte rendu de la façon dont ces décisions politiques ont été prises dans les chapitres III et V.

CHAPITRE 111. HISTORIQUE ADMINISTRATIF JUSQU'À DÉCEMBRE 1941

INTÉRÊT POUR LES POSSIBILITÉS MILITAIRES

3.1. L'annonce de l'hypothèse de la fission et sa confirmation expérimentale eurent lieu en janvier 1939, comme nous l'avons déjà raconté au chapitre I. Il y a eu un intérêt immédiat pour l'utilisation militaire possible des grandes quantités d'énergie libérées par la fission. À cette époque, les physiciens nucléaires nés aux États-Unis étaient si peu habitués à l'idée d'utiliser leur science à des fins militaires qu'ils réalisaient à peine ce qu'il fallait faire. Par conséquent, les premiers efforts visant à restreindre la publication et à obtenir le soutien du gouvernement ont été stimulés en grande partie par un petit groupe de physiciens nés à l'étranger et centrés sur L. Szilard et comprenant E. Wigner, E. Teller, V. F. Weisskopf et E. Fermi.

RESTRICTION DE PUBLICATION

3.2. Au printemps 1939, le groupe mentionné ci-dessus a sollicité la coopération de Niels Bohr pour tenter d'empêcher la publication de nouvelles données par un accord volontaire. D'éminents physiciens américains et britanniques étaient d'accord, mais F. Joliot, le plus grand physicien nucléaire français, refusa, apparemment à cause de la publication d'une lettre dans la *Physical Review* envoyée avant que tous les Américains n'aient été impliqués dans l'accord. Par conséquent, la publication s'est poursuivie librement pendant environ un an, bien que quelques articles aient été volontairement retenus par leurs auteurs.

3.3. Lors de la réunion d'avril 1940 de la Division des sciences physiques du Conseil national de recherches, G. Breit proposa la formation d'un comité de censure pour contrôler la publication dans toutes les revues scientifiques américaines. Bien que la raison de cette

La suggestion était principalement le désir de contrôler la publication d'articles sur la fission de l'uranium, le « Comité de référence » tel qu'il a finalement été mis en place un peu plus tard au printemps (au Conseil national de recherches) était un comité général, et a été organisé pour contrôler la politique de publication dans tous les domaines d'intérêt militaire possible. Le président du comité était L. P. Eisenhart ; les autres membres étaient G. Breit, W. M. Clark, H. Fletcher, E. B. Fred, G. B. Pegram, H. C. Urey, L. H. Weed et E. G. Wever. Divers sous-comités ont été nommés, dont le premier portait sur la fission de l'uranium. G. Breit a été président de ce sous-comité ; ses autres membres étaient J. W. Beams, L. J. Briggs, G. B. Pegram, H. C. Urey et E. Wigner. En général, la procédure suivie consistait à demander aux rédacteurs en chef de diverses revues d'envoyer des copies d'articles dans ce domaine, dans les cas où l'opportunité de publication était douteuse, soit directement à Breit, soit indirectement à lui par l'intermédiaire d'Eisenhart. Breit les distribuait ensuite à tous les membres du sous-comité pour qu'ils examinent s'ils devaient ou non être publiés, et informait les rédacteurs en chef du résultat. Cet arrangement a eu beaucoup de succès pour empêcher la publication et était toujours nominalement en vigueur, sous une forme modifiée, en juin 1945. En fait, l'absorption de la plupart des physiciens de ce pays dans le travail de guerre d'une sorte ou d'une autre a rapidement réduit le nombre de documents renvoyés au comité pratiquement jusqu'au point de fuite. Il est intéressant de noter que tout cet arrangement était purement volontaire ; Il convient de féliciter les scientifiques du pays pour leur entière coopération. Il est à espérer qu'après la guerre, il sera possible de publier ces articles, au moins en partie, afin que leurs auteurs puissent recevoir un crédit professionnel approprié pour leurs contributions.

3.4. Du côté positif, c'est-à-dire l'intérêt et le soutien du gouvernement à la recherche en physique nucléaire, l'histoire est beaucoup plus compliquée. Le premier contact avec le gouvernement a été établi par Pegram de Columbia en mars 1939. Pegram téléphona au et organisa une conférence entre des représentants du ministère de la Marine et Fermi. Le seul résultat de cette conférence a été que la Marine a manifesté son intérêt et a demandé à être tenue informée. La tentative suivante d'intéresser le gouvernement fut stimulée par Szilard et Wigner. En juillet 1939, ils s'entretenirent avec A. Einstein, et un peu plus tard avec Einstein, Wigner et Szilard ont discuté du problème avec Alexander Sachs de New York. À l'automne, Sachs, appuyé par une lettre d'Einstein, expliqua au président Roosevelt l'opportunité d'encourager les travaux dans ce domaine. Le président nomma un comité, connu sous le nom de « Comité consultatif sur l'uranium » et composé de Briggs (directeur du Bureau des normes) comme président, du colonel K. F. Adamson du département de l'artillerie de l'armée et du commandant G. C. Hoover du Bureau de l'artillerie de la marine, et demanda à ce comité d'examiner le problème. C'était le seul comité sur l'uranium qui avait un statut officiel jusqu'au moment de l'organisation du Comité de recherche sur la défense nationale en juin 1940. Le comité s'est réuni de manière très informelle et a inclus divers autres représentants scientifiques dans ses réunions.

3.5. La première réunion du Comité de l'uranium s'est tenue le 21 octobre 1939 et comprenait, outre les membres du comité, F. L. Mohler, Alexander Sachs, L. Szilard, E. Wigner, E. Teller et R. B. Roberts. Le résultat de cette réunion fut un rapport daté du 1er novembre 1939 et transmis au président Roosevelt par Briggs, Adamson et Hoover. Ce rapport contenait huit recommandations, qu'il n'est pas nécessaire d'énumérer en détail. Il est intéressant, cependant, qu'il mentionne spécifiquement à la fois l'énergie atomique et une bombe

atomique comme possibilités. Il recommandait spécifiquement l'achat de 4 tonnes de graphite et de 50 tonnes d'oxyde d'uranium pour les mesures de la section efficace d'absorption du carbone. D'autres recommandations étaient de nature générale ou n'ont jamais été mises en œuvre. Apparemment, un mémorandum préparé par Szilard a été plus ou moins la base de la discussion de cette réunion.

3.6. Le premier transfert de fonds (6 000 \$) de l'armée et de la marine pour l'achat de matériel conformément à la recommandation du 1er novembre est rapporté dans un mémorandum de Briggs au général E. M. Watson (assistant du président Roosevelt) le 20 février 1940. La réunion suivante du « Comité consultatif sur l'uranium » eut lieu le 28 avril 1940 et fut suivie par Sachs, Wigner, Pegram, Fermi, Szilard, Briggs, l'amiral H. G. Bowen, le colonel Adamson et le commandant Hoover. Au moment de cette réunion, deux nouveaux facteurs importants étaient entrés en jeu. Tout d'abord, il a été découvert que la fission de l'uranium provoquée par des neutrons de vitesses thermiques ne se produisait que dans l'isotope U-235. Deuxièmement, il a été signalé qu'une grande partie de l'Institut Kaiser Wilhelm de Berlin avait été réservée à la recherche sur l'uranium. Bien que la teneur générale de la discussion à cette réunion semble avoir été que les travaux devraient être poussés plus vigoureusement, aucune recommandation précise n'a été formulée. Il a été souligné que les mesures critiques sur le carbone déjà en cours à Columbia devraient bientôt donner un résultat, et l'implication était que des recommandations précises devraient attendre un tel résultat.

3.7. Au cours des semaines suivantes, un certain nombre de personnes concernées, en particulier Sachs, ont insisté sur l'importance d'un soutien accru et d'une meilleure organisation. Leur position a été renforcée par les résultats de Columbia (tels que rapportés, par exemple, dans une lettre de Sachs au général Watson le 15 mai 1940) montrant que l'absorption du carbone était sensiblement plus faible qu'on ne l'avait pensé auparavant et que la probabilité que le carbone soit satisfaisant en tant que

modérateur était donc considérable. Sachs s'occupa aussi activement de la question de l'approvisionnement en minerai. Le 1er juin 1940, Sachs, Briggs et Urey rencontrèrent l'amiral Bowen pour discuter de l'approche des responsables de l'Union ministérielle du Congo belge. Une telle approche a été faite peu de temps après par Sachs.

3.8. L'état général du problème a été discuté par un groupe consultatif spécial convoqué par Briggs au National Bureau of Standards le 15 juin 1940. Briggs, Urey, M. A. Tuve, Wigner, Breit, Fermi, Szilard et Pegram ont assisté à cette réunion. Après une discussion approfondie, le groupe a recommandé au Comité de l'uranium de rechercher des fonds pour soutenir la recherche sur l'expérience uranium-carbone selon deux axes :

d'autres mesures des constantes nucléaires impliquées dans le type de réaction proposé ;

Des expériences avec des quantités d'uranium et de carbone égales à environ un cinquième à un quart de la quantité qui pourrait être estimée comme le minimum dans lequel une réaction en chaîne se maintiendrait.

« Il a été estimé qu'environ 40 000 \$ seraient nécessaires pour d'autres mesures des constantes fondamentales et qu'environ 100 000 \$ d'uranium métallique et de graphite pur seraient nécessaires pour l'expérience intermédiaire. » (Citations d'un mémorandum de Pegram à Briggs, daté du 14 août 1940.)

LE COMITÉ RECONSTITUÉ SOUS • CDNR

3.9. Avant que les décisions prises lors de cette réunion ne puissent être mises en œuvre, la création du Comité de recherche sur la défense nationale a été annoncée en juin 1940, et le Président Roosevelt a donné des instructions pour que le Comité de l'uranium soit reconstitué en tant que sous-comité de la NDRC, sous la responsabilité de Vannevar Bush (président de la NDRC). La composition de ce comité de l'uranium reconstitué était la suivante : Briggs, président ; Pegram, Urey, Beams, Tuve, R. Gunn et Breit. Avec l'autorisation de Briggs, Breit consulta fréquemment Wigner et Teller, bien qu'ils ne

fussent pas membres du comité. À partir de ce moment et jusqu'à l'été 1941, ce comité continua à exercer le contrôle avec à peu près le même nombre de membres. Ses recommandations ont été transmises par Briggs à la NDRC, et des contrats appropriés ont été conclus entre la NDRC et divers instituts de recherche. Les fonds, cependant, ont d'abord été fournis par l'armée et la marine, et non par des crédits réguliers de la NDRC.

SOUTIEN À LA RECHERCHE

3.10. Le premier contrat attribué dans le cadre de cette nouvelle configuration a été attribué à l'Université Columbia pour les deux axes de travail recommandés lors de la réunion du 15 juin, tels que décrits ci-dessus. Le projet a été approuvé par la NDRC et le premier contrat de la NDRC (NDCrc-32) a été signé le 8 novembre 1940 et a été effectif du 1er novembre 1940 au 1er novembre 1941. Le montant de ce contrat était de 40 000 \$.

3.11. Seules de très petites dépenses avaient été effectuées avant l'entrée en vigueur du contrat. Par exemple, environ 3 200 \$ avaient été dépensés pour le graphite et le cadmium, ce montant ayant été prélevé sur les 6 000 \$ alloués par l'armée et la marine en février 1940.

3.12. Nous n'essaierons pas d'examiner en détail les autres contrats qui ont été conclus avant décembre 1941. Leur nombre et leur montant total ont augmenté progressivement. Urey a commencé à travailler sur la séparation isotopique par la méthode de centrifugation dans le cadre d'un contrat de la Marine à l'automne 1940. D'autres contrats ont été accordés à l'Université Columbia, à l'Université de Princeton, à la Standard Oil Development Company, à l'Université Cornell, à la Carnegie Institution de Washington, à l'Université du Minnesota, à l'Iowa State College, à l'Université Johns Hopkins, au National Bureau of Standards, à l'Université de Virginie, à l'Université de Chicago et à l'Université de Californie au cours de l'hiver et du printemps 1940-1941 jusqu'à ce qu'en novembre 1941, le nombre total de projets approuvés soit de seize. pour un total d'environ 300 000 \$.

3.13. L'ampleur des dépenses est au moins un indice approximatif de l'activité. Il est donc intéressant de comparer ce chiffre avec ceux d'autres branches de la recherche sur la guerre. En novembre 1941, le budget total approuvé par la NDRC pour le laboratoire de radiation du Massachusetts Institute of Technology s'élevait à plusieurs millions de dollars. Même un projet relativement modeste comme celui de la section S de la division A de la NDRC avait dépensé ou avait été autorisé à dépenser 136 000 \$ pour des travaux qui se sont avérés utiles, mais qui n'étaient manifestement pas d'une importance comparable à celle des travaux sur l'uranium.

COMITÉ RÉORGANISÉ À L'ÉTÉ 1941

3.14. Le Comité de l'uranium, tel qu'il a été constitué dans le L'année 1940 est restée pratiquement inchangée jusqu'à l'été 1941. À cette époque, le comité principal a été quelque peu élargi et des sous-comités ont été formés sur la séparation isotopique, les aspects théoriques, la production d'énergie et l'eau lourde. * Elle s'appela par la suite la Section de l'uranium ou la Section S-1 de la NDRC. Bien qu'il n'ait été officiellement dissous qu'à l'été 1942, ce comité révisé a été en grande partie remplacé en décembre 1941 (voir chapitre V).

LE COMITÉ D'EXAMEN DE L'ACADÉMIE NATIONALE

3.15. Au printemps 1941, Briggs, estimant qu'un examen impartial du problème était souhaitable, demanda à Bush de nommer un comité d'examen. Bush demanda alors officiellement à F. B. Jewett, président de l'Académie nationale des sciences, de nommer un tel comité. Jewett s'exécuta et nomma A. H. Compton président ; W. D. Coolidge, E. O. Lawrence, J. C. Slater, J. H. Van Vleck et B. Gherardi. (En raison de sa maladie, Gherardi n'a pas été en mesure de servir.) Ce comité a été chargé d'évaluer l'importance militaire du problème de l'uranium et de recommander le niveau de dépenses auquel le problème devrait être investi.

3.16. Ce comité s'est réuni en mai et a présenté un rapport. (Ce rapport et les suivants seront résumés dans le chapitre suivant.) Sur la base de ce rapport et de l'exposé oral de Briggs devant une réunion de la NDRC, un crédit de 267 000 \$ a été approuvé par la NDRC à sa réunion du 18 juillet 1941, et la probabilité que des dépenses beaucoup plus importantes seraient nécessaires a été indiquée. Bush demanda un second rapport mettant l'accent sur les aspects techniques, et afin de répondre à cette demande, O. E. Buckley, des Bell Telephone Laboratories et de l'Association des Téléphonistes.

* Uranium Section: Briggs, chairman; Pegram, vice-chairman; S. K. Allison, Beams, Breit, E. U. Condon, H. D. Smyth, Urey.

Sous-section de la séparation : Urey, président ; Poutres.

Sous-section de la production d'énergie : Pegram, président ; Allison, Fermi, Smyth, Szilard.

Sous-section de l'eau lourde : Urey, président ; T. H. Chilton.

Sous-section des aspects théoriques : Fermi, président ; Breit, C. H. Eckart, Smyth, Szilard, J. A. Wheeler.

L. W. Chubb de la Westinghouse Electrical and Manufacturing ont été ajoutés au comité. (Compton était en Amérique du Sud pendant l'été et n'a donc pas participé aux réunions d'été du comité.) Le deuxième rapport a été présenté par Coolidge. À la suite de nouvelles mesures de la section efficace de fission de l'U-235 et de la conviction croissante que la séparation isotopique était possible, en septembre 1941, Compton et Lawrence suggérèrent à J. B. Conant de la NDRC, qui travaillait en étroite collaboration avec Bush, qu'un troisième rapport était souhaitable. Comme Bush et Conant avaient appris au cours de l'été 1941 que les Britanniques se sentaient également de plus en plus optimistes, le comité fut invité à faire une autre étude sur l'ensemble du sujet. À cette fin, le comité fut élargi par l'ajout de W. K. Lewis, R. S. Mulliken et G. B. Kistiakowsky. Ce troisième rapport a été soumis par Compton le 6 novembre 1941.

INFORMATIONS REÇUES DES BRITANNIQUES

3.17. À partir de 1940, il y eut un certain échange d'informations avec les Britanniques et, au cours de l'été 1941, Bush apprit qu'ils avaient

examiné l'ensemble du sujet entre avril et juillet. Eux aussi s'étaient intéressés à la possibilité d'utiliser du plutonium ; en fait, une suggestion quant à l'opportunité d'étudier le plutonium était contenue dans une lettre de J. D. Cockcroft à R. H. Fowler datée du 28 décembre 1940. Fowler, qui occupait à l'époque les fonctions d'officier de liaison scientifique britannique à Washington, transmet la lettre de Cockcroft à Lawrence. Les Britanniques n'ont jamais envisagé la possibilité du plutonium, car ils estimaient que leur main-d'œuvre limitée devait se concentrer sur l'U-235. Chadwick, au moins, était convaincu qu'une bombe U-235 d'une grande puissance destructrice pouvait être fabriquée, et l'ensemble du groupe britannique estimait que la séparation de l'U-235 par diffusion était probablement réalisable.

3.18. Les comptes rendus de l'opinion britannique, y compris la première ébauche du rapport britannique examinant le sujet, ont été mis à la disposition de Bush et Conant de manière informelle au cours de l'été 1941, bien que le rapport officiel britannique du 15 juillet ait été transmis pour la première fois à Conant par G. P. Thomson le 3 octobre. Cependant, comme l'examen britannique n'a pas été mis à la disposition du comité de l'Académie nationale des sciences, les rapports du comité de l'Académie et les rapports britanniques constituaient des évaluations indépendantes des perspectives de production de bombes atomiques.

3.19. Outre les conférences officielles et semi-officielles, il y a eu beaucoup de discussions moins formelles, l'une d'entre elles ayant été stimulée par M. L. E. Oliphant d'Angleterre lors de sa visite dans ce pays au cours de l'été 1941. À titre d'exemple d'une telle discussion informelle, nous pourrions mentionner les discussions entre Conant, Compton et Lawrence lors de la célébration du demi-centenaire de l'Université de Chicago en septembre 1941. La conclusion générale était qu'il fallait pousser le programme ; et cette conclusion, sous diverses formes, a été communiquée à Bush par un certain nombre de personnes.

3.20. À l'automne 1941, Urey et Pegram ont été envoyés en Angleterre pour obtenir des informations de première main sur ce qui s'y passait. C'était la première fois qu'un Américain se

rendait en Angleterre spécifiquement pour le problème de l'uranium. Le rapport préparé par Urey et Pegram a confirmé et complété les informations reçues précédemment.

DÉCISION D'AGRANDIR ET DE RÉORGANISER

3.21. À la suite des rapports préparés par le comité de l'Académie nationale, par les Britanniques, par Urey et Pegram, et par l'insistance générale d'un certain nombre de physiciens, Bush, en tant que directeur du Bureau de la recherche scientifique et du développement (dont la NDRC fait partie), décida que les travaux sur l'uranium devaient être poussés plus énergiquement. .

3.22. Avant que l'Académie nationale ne publie son troisième rapport et avant que Pegram et Urey ne se rendent en Angleterre, Bush avait abordé toute la question de l'uranium avec le président Roosevelt et le vice-président Wallace. Il leur résuma les vues britanniques, qui étaient dans l'ensemble optimistes, et souligna les incertitudes des prévisions. Le président a convenu qu'il était souhaitable d'élargir le programme, de fournir une organisation différente, de fournir des fonds provenant d'une source spéciale et d'effectuer un échange complet d'informations avec les Britanniques. Il a été convenu

de limiter les discussions de politique générale au groupe suivant : le président, le vice-président, le secrétaire à la Guerre, le chef d'état-major, Bush et Conant. Ce groupe était souvent appelé le groupe de politiques supérieures.

3.23. Au moment de la présentation du troisième rapport de l'Académie nationale et du retour d'Angleterre d'Urey et de Pegram, le plan général de la réorganisation commençait à se dessiner. Le rapport de l'Académie était plus conservateur que le rapport britannique, comme Bush l'a souligné dans sa lettre du 27 novembre 1941 au président Roosevelt. Il était cependant suffisamment optimiste pour donner un soutien supplémentaire au projet d'agrandissement de l'ouvrage. La réorganisation proposée a été annoncée lors d'une réunion de la Section de

l'uranium juste avant l'attaque de Pearl Harbor et sera décrite au chapitre V.

RÉSUMÉ

3.24. En mars 1939, quelques semaines seulement après la découverte de la fission de l'uranium, l'importance militaire possible de la fission a été portée à l'attention du gouvernement. À l'automne 1939, le premier comité gouvernemental sur l'uranium est créé. Au printemps 1940, un mécanisme a été mis en place pour restreindre la publication d'articles importants dans ce domaine. Lors de la création de la NDRC en juin 1940, le Comité de l'uranium a été reconstitué sous l'égide de la NDRC. Cependant, jusqu'à l'automne 1941, les dépenses totales étaient relativement faibles. En décembre 1941, après avoir reçu le rapport de la National Academy et des informations des Britanniques, la décision est prise d'élargir et de réorganiser le programme.

CHAPITRE IV. PROGRESSION JUSQU'À DÉCEMBRE 1941

LES QUESTIONS IMMÉDIATES

4.1. Dans le chapitre II, les problèmes généraux liés à la production d'une réaction en chaîne à des fins militaires ont été décrits. Au début de l'été 1940, les questions les plus importantes étaient les suivantes :

Pourrait-on trouver des circonstances dans lesquelles la réaction en chaîne se produirait ?

L'isotope U-235 pourrait-il être séparé à grande échelle ?

Pourrait-on obtenir un modérateur et d'autres matériaux en pureté et en quantité suffisantes ?

Bien qu'il y ait eu beaucoup de problèmes subsidiaires, comme on le verra dans le récit des progrès accomplis au cours des dix-huit mois suivants, ces trois questions ont déterminé le cours des travaux.

LA RÉACTION EN CHAÎNE

PROGRAMME PROPOSÉ LE 15 JUIN 1940

4.2. En juin 1940, presque tous les travaux sur la réaction en chaîne étaient concentrés à Columbia sous la direction générale de Pegram, avec Fermi et Szilard en charge immédiate. Il avait été conclu que la réaction en chaîne la plus facile à produire était probablement celle qui dépendait de la fission neutronique thermique dans un mélange hétérogène de graphite et d'uranium. Au printemps 1940, Fermi, Szilard et H. L. Anderson avaient amélioré la précision des mesures de la section efficace de capture du carbone pour les neutrons, de l'absorption par résonance (vitesse intermédiaire) des neutrons par l'U-238 et du ralentissement des neutrons dans le carbone.

4.3. Pegram, dans un mémorandum adressé à Briggs le 14 août 1940, écrivait : « Il n'est pas très facile de mesurer ces quantités avec précision sans l'utilisation de grandes quantités de matériel. Les résultats nets de ces expériences au printemps 1940 furent que la possibilité de la réaction en chaîne n'était pas définitivement prouvée, alors qu'elle était encore loin d'être définitivement réfutée. Dans l'ensemble, les indications étaient plus favorables que toutes les conclusions qui auraient pu être raisonnablement revendiquées à partir des résultats précédents.

4.4. Lors d'une réunion tenue le 15 juin (voir chapitre III), ces résultats furent discutés et il a été recommandé (A) que d'autres mesures soient effectuées sur les constantes nucléaires, et (B) que des expériences soient faites sur des réseaux d'uranium et des quantités d'uranium contenant du carbone d'un cinquième à un quart des quantités critiques estimées.

PROGRÈS JUSQU'AU 15 FÉVRIER 1941

4.5. Le rapport de Pegram du 15 février 1941 montre que la plupart des travaux effectués jusque-là portaient sur (A), tandis que (B), l'expérience dite intermédiaire, a été retardée par manque de matériel.

4.6. Pour paraphraser le rapport de Pegram, les principaux progrès ont été les suivants :

(a) Le ralentissement des neutrons dans le graphite a été étudié en étudiant l'intensité d'activation de divers détecteurs (rhodium, indium, iode) placés à diverses positions à l'intérieur d'une colonne rectangulaire de graphite de dimensions 3 X 3 X 8 pieds lorsqu'une source de neutrons y a été placée. Par le choix approprié de cribles de cadmium, les effets de la résonance* et des neutrons thermiques ont été étudiés séparément. t Une analyse mathématique, fondée sur des

* Voir note de bas de page p. 58.

†La présence de neutrons peut être détectée par des chambres d'ionisation ou des compteurs ou par la radioactivité artificielle induite dans diverses feuilles métalliques. (Voir l'annexe 1.) La réponse de chacun de ces détecteurs dépend des caractéristiques particulières du détecteur et de la vitesse des neutrons (par exemple, les neutrons d'une énergie d'environ 1,5 volts sont particulièrement

efficaces pour activer l'indium). De plus, certains matériaux ont une absorption très importante

La théorie de la fusion, des données expérimentales, a permis de prédire les résultats attendus dans divers autres arrangements. Ces résultats, associés à des études théoriques sur la diffusion des neutrons thermiques, ont jeté les bases de calculs futurs du nombre de neutrons thermiques et de résonance que l'on peut trouver en tout point d'une masse de graphite de forme donnée lorsqu'une source de neutrons donnée est placée à une position spécifiée à l'intérieur ou à proximité du graphite.

Le nombre de neutrons émis lors de la fission. Les expériences sur le ralentissement des neutrons ont montré que les neutrons de haute énergie (à grande vitesse) tels que ceux de la fission étaient pratiquement tous réduits en énergies thermiques (faibles vitesses) après avoir traversé 40 cm ou plus de graphite. Un morceau d'uranium placé dans une région où des neutrons thermiques sont présents absorbe les neutrons thermiques et, au fur et à mesure que la fission se produit, réémet des neutrons rapides, qui se distinguent facilement des neutrons thermiques. Par une série de mesures avec et sans présence d'uranium et avec divers détecteurs et absorbeurs, il est possible d'obtenir une valeur pour la constante k , le nombre de neutrons émis par neutron thermique absorbé par l'uranium. Ce n'est pas le nombre de neutrons émis par fission, mais il est un peu plus petit que ce nombre car toutes les absorptions ne provoquent pas de fission.

Théorie du treillis. Des calculs approfondis ont été effectués sur le nombre probable de neutrons s'échappant de réseaux de conceptions et de tailles diverses. C'était fondamental pour ce qu'on appelle l'expérience intermédiaire, mentionnée ci-dessus au point (B).

LANCEMENT DE NOUVEAUX PROGRAMMES

4.7. Au début de 1941, l'intérêt porté au problème général de la réaction en chaîne par des individus de Princeton, Chicago et de Californie a conduit à l'approbation de certains projets dans ces institutions. Par la suite, le travail de ces groupes a été coordonné

avec celui de Columbia, faisant partie d'un seul grand programme.

Sections efficaces pour les neutrons de plages de vitesse particulières (par exemple, le cadmium pour les neutrons thermiques). Ainsi, les mesures effectuées avec différents détecteurs, avec ou sans absorbeurs différents, donnent une indication à la fois du nombre de neutrons présents et de leur distribution d'énergie. Cependant, l'état de l'art de telles mesures est plutôt rudimentaire.

TRAVAIL SUR L'ABSORPTION PAR RÉSONANCE *

4.8. Dans le chapitre II, il est indiqué qu'il y avait des avantages à ce qu'il y ait une structure en treillis ou « tas » avec de l'uranium concentré en morceaux régulièrement répartis dans une matrice de modérateur. C'était le système sur lequel travaillait le groupe Columbia. Comme c'est souvent le cas, l'idée fondamentale est simple. Si l'uranium et le modérateur sont mélangés de manière homogène, les neutrons perdront en moyenne de l'énergie par petites étapes entre les passages à travers l'uranium, de sorte qu'au cours de leur réduction à la vitesse thermique, la probabilité qu'ils traversent l'uranium à une vitesse donnée, par exemple à une vitesse correspondant à l'absorption de résonance, est grande. Mais, si l'uranium est en gros morceaux espacés à de grands intervalles dans le modérateur, les quantités d'énergie perdues par les neutrons entre les passages d'un morceau d'uranium à un autre seront grandes et la probabilité qu'ils atteignent un morceau d'uranium avec une énergie juste égale à l'énergie d'absorption de résonance est relativement faible. Ainsi, la probabilité d'absorption par l'U-238 pour produire de l'U-239, par rapport à la probabilité d'absorption sous forme de neutrons thermiques pour provoquer la fission, peut être suffisamment réduite pour permettre à une réaction en chaîne de se produire. Si l'on connaissait les valeurs exactes des sections efficaces de chaque isotope de l'uranium pour chaque type d'absorption et chaque plage de vitesse des neutrons, et si l'on avait des connaissances similaires pour le modérateur, on pourrait calculer le « réseau optimal », c'est-à-dire la meilleure taille, la forme et l'espacement

des morceaux d'uranium dans la matrice du modérateur. Étant donné que ces données n'étaient que partiellement connues, une approche expérimentale directe semblait s'imposer. En conséquence, il a été proposé de mesurer l'absorption des neutrons par l'uranium dans des conditions similaires à celles attendues dans un tas à réaction en chaîne utilisant le graphite comme modérateur.

4.9. Des expériences de ce type ont été lancées à Columbia et se sont poursuivies à Princeton en février 1941. Essentiellement, l'

* Le terme « absorption par résonance » est utilisé pour décrire la très forte absorption des neutrons par l'U-238 lorsque les énergies des neutrons sont dans certaines parties définies de la région d'énergie de 0 à 1 000 électronvolts. Une telle absorption par résonance démontre l'existence de niveaux d'énergie nucléaire à des énergies correspondantes. A certaines occasions, le terme absorption par résonance est utilisé pour désigner l'ensemble de la région d'énergie au voisinage de ces niveaux.

L'expérience a consisté à étudier l'absorption de neutrons dans la gamme d'énergie s'étendant de quelques milliers d'électronvolts jusqu'à une fraction d'électronvolt (énergies thermiques), l'absorption ayant lieu dans différentes couches d'uranium ou de sphères d'oxyde d'uranium noyées dans un tas de graphite.

4.10. Dans ces expériences, une source de neutrons a été fournie par un moyen de protons (accélérés par un cyclotron) entrant en collision avec une cible en béryllium. (Le rendement en neutrons qui en résultait était équivalent à celui d'une source de radium-béryllium d'une force d'environ 3 500 curies.) Les neutrons ainsi produits avaient une large distribution continue de vitesses. Ils sont partis de cette source pour former un gros bloc de graphite. En plaçant les différentes sphères d'uranium ou d'oxyde d'uranium à l'intérieur du bloc de graphite à diverses positions représentant des distances croissantes de la source, absorption de neutrons ; de la diminution des vitesses moyennes jusqu'aux vitesses thermiques a été étudiée. Il a été constaté que l'absorption totale des neutrons par de telles sphères pouvait être exprimée en termes d'effet de « surface » et d'effet de « masse ».

4.11. Ces expériences, impliquant une variété de tailles, de densités et de positions de sphères, se sont poursuivies jusqu'au printemps 1942, lorsque la majeure partie du groupe a été

transférée à Chicago. Des expériences similaires réalisées plus tard à l'Université de l'Indiana par A. C. G. Mitchell et ses collègues ont vérifié et, dans certains cas, corrigé les données de Princeton, mais les données de Princeton étaient suffisamment précises à l'été 1941 pour être utilisées dans la planification des expériences sur pieux intermédiaires et des expériences ultérieures sur des pieux en fonctionnement.

4.12. Les travaux expérimentaux sur l'absorption par résonance à Princeton ont été réalisés par R. R. Wilson, E. C. Creutz et leurs collaborateurs, sous la direction générale de H. D. Smyth ; ils bénéficiaient de l'aide constante de Wigner et de Wheeler et de fréquentes conférences avec le groupe Columbia.

LES PREMIÈRES EXPÉRIENCES INTERMÉDIAIRES

4.13. Vers juillet 1941, la première structure en réseau de graphite et d'uranium a été mise en place à Columbia. Il s'agissait d'un cube de graphite d'environ 8 pieds sur un bord et contenait environ 7 tonnes d'oxyde d'uranium dans des conteneurs en fer répartis à intervalles égaux dans le graphite. Une série préliminaire de mesures a été effectuée sur cette structure en août 1941. Des structures similaires de taille un peu plus grande ont été mises en place et étudiées en septembre et octobre, et la méthode dite exponentielle (décrite ci-dessous) de détermination du facteur de multiplication a été développée et appliquée pour la première fois. Ce travail a été fait par Fermi et ses assistants, H. L. Anderson, B. Feld, G. Weil et W. H. Zinn.

4.14. L'expérience du facteur de multiplication est assez similaire à celle déjà décrite pour la détermination de q , le nombre de neutrons produits par neutron thermique absorbé. Une source de neutrons radiumberyllium est placée près du bas de la structure du réseau et le nombre de neutrons est mesuré en divers points du réseau. Ces chiffres sont ensuite comparés aux nombres correspondants déterminés lorsqu'il n'y a pas d'uranium dans la masse de graphite. De toute évidence, l'absorption de neutrons par l'U-238 pour produire de l'U-239 tend à réduire le nombre de

neutrons, tandis que les fissions tendent à en augmenter le nombre. La question est : qu'est-ce qui prédomine ? ou, plus précisément, la production de neutrons par fission prédomine-t-elle sur tous les processus d'élimination des neutrons autres que l'échappement ? L'interprétation des données expérimentales sur cette question cruciale implique de nombreuses corrections, calculs et approximations, mais toutes se réduisent finalement à un seul nombre, le facteur de multiplication k .

LE FACTEUR DE MULTIPLICATION k

4.15. Le succès ou l'échec du projet uranifère dépendait du facteur de multiplication k , parfois appelé facteur de reproduction. Si k pouvait être rendu supérieur à 1 dans un système pratique, le projet réussirait ; Sinon, la réaction en chaîne ne serait jamais plus qu'un rêve. C'est ce qui ressort clairement de la discussion suivante, qui s'applique à tout système contenant des matières fissiles. Supposons qu'il y ait un certain nombre de neutrons libres présents dans le système à un moment donné. Certains de ces neutrons vont eux-mêmes initier des fissions et vont donc directement produire de nouveaux neutrons. Le facteur de multiplication k est le rapport entre le nombre de ces nouveaux neutrons et le nombre de neutrons libres présents à l'origine. Ainsi, si dans un tas donné comprenant de l'uranium, du carbone, des impuretés, des contenants, etc., 100 neutrons sont produits par fission, certains s'échapperont, d'autres seront absorbés dans l'uranium sans provoquer de fission, d'autres seront absorbés dans le carbone, dans les contenants ou dans les impuretés, et d'autres provoqueront une fission, produisant ainsi plus de neutrons. * Si les fissions sont nombreuses, et qu'elles sont efficaces individuellement, plus de 100 nouveaux neutrons seront produits et le système réagira en chaîne. Si le nombre de nouveaux neutrons est égal à 105, $k = 1,05$. Mais si le nombre de nouveaux neutrons pour 100 neutrons initiaux est de 99, $k = 0,99$ et aucune réaction en chaîne ne peut se maintenir.

4.16. En reconnaissant que l'expérience intermédiaire ou « exponentielle » décrite ci-dessus était trop petite pour réagir en

chaîne, nous voyons qu'il était d'un grand intérêt de savoir si un empilement plus grand de la même structure en réseau réagirait en chaîne. Cela pourrait être déterminé en calculant quelle serait la valeur de k pour un réseau infiniment grand de ce même type. En d'autres termes, le problème était de calculer quelle serait la valeur de k si aucun neutron ne s'échappait par les côtés de la pile. En fait, on constate qu'une fois qu'un système à réaction en chaîne est bien au-dessus de la taille critique – disons deux ou trois fois plus grande – et qu'il est entouré de ce qu'on appelle un réflecteur, la valeur effective de k diffère très peu de celle de la taille infinie à condition que k soit proche de 1,00. Par conséquent, il est devenu habituel de caractériser les potentialités de réaction en chaîne de différents mélanges de métal et de modérateur par la valeur de la constante de multiplication obtenue en supposant la taille infinie de la pile.

4.17. La valeur de k_n rapportée par Fermi à la section d'uranium à l'automne 1941 était d'environ 0,87. Ceci était basé sur les résultats de la deuxième expérience intermédiaire de Columbia. Tous ont convenu que le facteur de multiplication pourrait être augmenté par une plus grande pureté des matériaux, des arrangements de treillis différents, etc. Personne ne pouvait dire avec certitude qu'il pouvait être rendu plus grand qu'un. * Voir dessin ci-contre p. 35.

EXPÉRIENCES SUR LE BÉRYLLIUM

4.18. À peu près au même moment où les travaux sur l'absorption par résonance ont commencé à Princeton, S. K. Allison, à la suggestion de A. H. Compton, a commencé à travailler à Chicago dans le cadre d'un contrat allant du 1er janvier 1941 au 1er août 1941. Les objectifs déclarés de ce travail étaient d'étudier (a) l'augmentation de la production de neutrons lorsque la pile est enfermée dans une enveloppe de béryllium ou un réflecteur, et (b) les coupes efficaces du béryllium. Un nouveau contrat est autorisé le 18 juillet 1941 jusqu'au 30 juin 1942. Cela énonçait l'objectif un peu plus large d'étudier les systèmes uranium-

béryllium-carbone en général. Les crédits en jeu sont modestes : 9 500 \$ pour le premier contrat et 30 000 \$ pour le second.

4.19. Comme on l'a déjà souligné au chapitre I, le béryllium présente des qualités souhaitables en tant que modérateur en raison de son faible poids atomique et de sa faible section efficace d'absorption des neutrons ; il était également possible que la réaction $(n, 2n)$ du béryllium contribue au nombre de neutrons. La valeur de la section transversale n'était pas connue avec précision ; De plus, il était loin d'être certain qu'une grande quantité de béryllium pur puisse être obtenue. Le problème d'Allison était essentiellement similaire au problème de Columbia, à l'exception de l'utilisation du béryllium à la place du graphite. En raison de la rareté du béryllium, il a été suggéré qu'il pourrait être utilisé en conjonction avec du graphite ou un autre modérateur, peut-être comme réflecteur.

4.20. Dans les expériences de Chicago, les neutrons produits à l'aide d'un cyclotron ont été amenés à pénétrer dans un tas de graphite et de béryllium. Allison a effectué un certain nombre de mesures sur le ralentissement et l'absorption par le graphite, qui ont été des vérifications précieuses pour des expériences similaires à Columbia. Il a finalement pu obtenir suffisamment de béryllium pour effectuer des mesures significatives qui ont montré que le béryllium était un modérateur possible comparable au graphite. Cependant, le béryllium n'était en fait pas du tout utilisé de manière intensive en raison de la grande difficulté de le produire en quantité sous les formes structurales requises.

4.21. Ce projet de Chicago, tel que décrit ci-dessus, a été intégré au projet de laboratoire métallurgique établi à l'Université de Chicago au début de 1942.

TRAVAUX THÉORIQUES

4.22 : Les expériences intermédiaires à Columbia et les travaux continus d'absorption par résonance à Princeton ont nécessité une interprétation théorique habile. Fermi a élaboré la théorie de la pile « exponentielle » et Wigner la théorie de l'absorption de résonance ; Ces deux hommes se concertaient constamment et

contribuaient à de nombreux problèmes. Wheeler de Princeton, Breit du Wisconsin et Eckart de Chicago – pour n'en citer que quelques-uns – ont également apporté des contributions à la théorie générale des pieux et à des sujets connexes. Dans l'ensemble, on peut dire qu'à la fin de 1941, la théorie générale de la réaction en chaîne pour les neutrons lents était presque complètement comprise. Ce sont les constantes numériques et les possibilités technologiques qui sont encore incertaines.

4.23. En ce qui concerne la théorie d'une réaction à neutrons rapides dans l'U-235, de nombreux progrès ont également été réalisés. En particulier, de nouvelles estimations de la taille critique ont été faites, et il a été prédit que peut-être 10 % de l'énergie totale pourrait être libérée de manière explosive.

Sur cette base, un kilogramme d'U-235 équivaldrait à 2 000 tonnes de TNT. Les conclusions sont examinées ci-dessous dans le cadre du rapport de l'Académie nationale. Il ne faut pas oublier qu'il y a deux facteurs en jeu : (1) la quantité d'énergie de fission disponible qui sera libérée avant que la réaction ne s'arrête ; (2) à quel point une explosion aussi concentrée sera destructrice.

TRAVAUX SUR LE PLUTONIUM

4.24. Dans le chapitre I, il est fait mention de la suggestion selon laquelle l'élément 94, baptisé plus tard plutonium, serait formé par des désintégrations de rayons bêta de l'uranium 239 résultant de l'absorption de neutrons par l'uranium 238 et que le plutonium serait probablement un émetteur de particules alpha à longue demi-vie et subirait une fission lorsqu'il serait bombardé par des neutrons. Au cours de l'été 1940, le groupe de physique nucléaire de l'Université de Californie à Berkeley a été invité à utiliser les neutrons de son puissant cyclotron pour produire du plutonium, à le séparer de l'uranium et à étudier ses propriétés de fission. Diverses expériences pertinentes ont été réalisées par E. Segré, G. T. Seaborg, J. W. Kennedy et A. C. Wahl à Berkeley avant 1941 et ont été rapportées par E. O. Lawrence au Comité de l'Académie nationale (voir ci-dessous) en mai 1941 et également dans un mémorandum qui a été incorporé dans le deuxième

rapport du Comité daté du 11 juillet. 1941. On verra que ce mémorandum contient une idée importante qui n'a pas été spécifiquement soulignée par d'autres (paragraphe 1.58), à savoir la production de grandes quantités de plutonium destiné à être utilisé dans une bombe.

4.25. Nous citons le mémorandum de Lawrence comme suit :
« Depuis le premier rapport du Comité de l'Académie nationale des sciences sur la fission atomique, une nouvelle possibilité extrêmement importante a été ouverte pour l'exploitation de la réaction en chaîne avec des isotopes d'uranium non séparés. Des expériences menées au Radiation Laboratory de l'Université de Californie ont indiqué (a) que l'élément 94 est formé à la suite de la capture d'un neutron par l'uranium 238 suivie de deux transformations bêta successives, et en outre (b) que cet élément transurannique subit une fission neutronique lente et se comporte donc vraisemblablement comme l'uranium 235.

« Il apparaît donc que, si une réaction en chaîne avec des isotopes non séparés est réalisée, elle peut être autorisée à se dérouler violemment pendant un certain temps dans le but exprès de fabriquer l'élément 94 en quantités substantielles. Ce matériau pourrait être extrait par chimie ordinaire et serait vraisemblablement l'équivalent de l'uranium 235 à des fins de réaction en chaîne.

"S'il en est ainsi, les trois possibilités importantes suivantes s'ouvrent :

'1. L'uranium 238 serait disponible pour la production d'énergie, multipliant ainsi d'environ cent fois l'énergie atomique totale que l'on peut obtenir à partir d'une quantité donnée d'uranium.

« 2. En utilisant l'élément 94, on peut envisager la préparation de petites unités de réaction en chaîne à des fins énergétiques, pesant peut-être une centaine de livres au lieu de cent tonnes, comme cela serait probablement nécessaire pour des unités utilisant de l'uranium naturel.

'3. Si de grandes quantités de l'élément 94 étaient disponibles, il est probable qu'une réaction en chaîne avec des neutrons rapides pourrait être produite. Dans une telle réaction, l'énergie serait

libérée à une vitesse explosive que l'on pourrait décrire comme une « super bombe ».»

POISONS RADIOACTIFS

4.26. Comme indiqué précédemment, les fragments résultant de la fission sont dans la plupart des cas des noyaux instables, c'est-à-dire des matières artificiellement radioactives. Il est de notoriété publique que les rayonnements des matières radioactives ont des effets mortels semblables à ceux des rayons X.

4.27. Dans un tas à réaction en chaîne, ces produits de fission radioactifs s'accumulent au fur et à mesure de la réaction ». (Ils se sont avérés, dans la pratique, être la caractéristique la plus gênante d'une pile qui réagit.) Puisqu'ils diffèrent chimiquement de l'uranium, il devrait être possible de les extraire et de les utiliser comme une forme particulièrement vicieuse de gaz toxique. Cette idée a été mentionnée dans le rapport de la National Academy (voir paragraphe 4.48) et a été développée dans un rapport écrit le 10 décembre 1941 par E. Wigner et H. D. Smyth, qui ont conclu que les produits de fission produits en une journée d'une pile à réaction en chaîne de 100 000 kW pourraient être suffisants pour rendre une grande zone inhabitable.

4.28. Wigner et Smyth n'ont pas recommandé l'emploi de poisons radioactifs et n'ont pas été sérieusement proposés depuis lors par les autorités responsables, mais on a sérieusement envisagé la possibilité que les Allemands puissent faire un usage surprise de poisons radioactifs, et des mesures défensives ont donc été prévues.

SÉPARATION ISOTOPIQUE

SÉPARATION À PETITE ÉCHELLE PAR LE SPECTROGRAPHE IMASs

4.29. Dans le chapitre I, l'attribution de la fission de l'uranium par neutrons thermiques à l'isotope U-235 est mentionnée comme étant établie expérimentalement. Cela a été fait en séparant partiellement des quantités infimes d'isotopes de l'uranium dans le spectrographe de masse d'A. O. Nier, puis en étudiant les

propriétés nucléaires des échantillons. D'autres petits échantillons ont été fournis par Nier au cours de l'été 1941 et étudiés par N. P. Heydenburg et d'autres au laboratoire de M. A. Tuve au Département de magnétisme terrestre de la Carnegie Institution de Washington. Mais les résultats de ces expériences étaient encore préliminaires, et il était évident qu'une étude plus approfondie d'échantillons plus grands et plus complètement séparés était souhaitable.

4.30. Le besoin d'échantillons plus importants d'U-235 a incité E. O. Lawrence de Berkeley à travailler sur la séparation électromagnétique. Il réussit remarquablement et, le 6 décembre 1941, il rapporta qu'il pouvait déposer en une heure un microgramme d'U-235 dont une grande partie de l'U-238 avait été retirée.

4.31. Auparavant, lors d'une réunion du Comité de l'uranium, M. Smyth, de Princeton, avait soulevé la question d'une éventuelle séparation à grande échelle des isotopes par des moyens électromagnétiques, mais on lui avait répondu que cela avait été étudié et qu'il était considéré comme impossible. Néanmoins, Smyth et Lawrence, lors d'une rencontre fortuite en octobre 1941, discutèrent du problème et convinrent que cela pourrait encore être possible. Smyth souleva de nouveau la question lors d'une réunion du Comité de l'uranium le 6 décembre et à la réunion suivante (18 décembre 1941), il y eut une discussion générale sur les méthodes électromagnétiques à grande échelle en relation avec le rapport de Lawrence sur ses résultats déjà mentionné. Les conséquences de cette discussion sont rapportées au chapitre XI.

LES MÉTHODES DE CENTRIFUGATION ET DE DIFFUSION GAZEUSE

4.32. Bien que nous ayons clairement indiqué que la séparation de l'U-235 et de l'U-238 pourrait être fondamentale pour la réussite du projet, peu de choses ont été dites sur les travaux dans ce domaine. Ce travail était en cours depuis l'été 1940 sous la direction générale de H. C. Urey à Columbia. Comme cette partie de l'uranium n'a pas été très affectée par la réorganisation de

décembre 1941, un compte rendu détaillé des travaux est réservé aux chapitres IX et X. Seul un résumé est présenté ici.

4.33 Après un examen minutieux et un nombre considérable d'expériences sur d'autres méthodes, il a été conclu que les deux méthodes les plus prometteuses pour séparer de grandes quantités d'uranium 235 de l'uranium 238 étaient l'utilisation de centrifugeuses et l'utilisation de la diffusion à travers des barrières poreuses. Dans la centrifugeuse, les forces agissant sur les deux isotopes sont légèrement différentes en raison de leurs différences de masse. Dans la diffusion à travers les barrières, les vitesses de diffusion sont légèrement différentes pour les deux isotopes, encore une fois en raison de leurs différences de masse. Chaque méthode exigeait que l'uranium soit sous forme gazeuse, ce qui constituait une limitation immédiate et sérieuse puisque le seul composé gazeux approprié de l'uranium connu à l'époque était l'hexafluorure d'uranium : dans chaque méthode, la quantité d'enrichissement à attendre dans une seule unité de production ou « étape » est très faible ; Cela indiquait que de nombreuses étapes successives seraient nécessaires si l'on voulait atteindre un degré élevé d'enrichissement.

4.34. À la fin de 1941, chaque méthode avait fait l'objet d'une démonstration expérimentale de principe ; c'est-à-dire que des séparateurs à un étage avaient effectué l'enrichissement de l'U-235 à l'échelle du laboratoire à peu près au degré prédit théoriquement. K. Cohen de Columbia et d'autres avaient développé la théorie pour les unités individuelles et pour la série ou la « cascade » d'unités qui seraient nécessaires. Ainsi, il a été possible d'estimer qu'environ 5 000 étapes seraient nécessaires pour un type de système de diffusion et qu'une surface totale de plusieurs acres de barrière de diffusion serait nécessaire dans une usine séparant un kilogramme d'U-235 chaque jour. Les estimations de coûts correspondantes s'élevaient à des dizaines de millions de dollars. Pour la centrifugeuse, le nombre d'étages serait plus petit, mais il a été prévu qu'une production similaire par des centrifugeuses nécessiterait 22 000 centrifugeuses à

entraînement séparé et à très grande vitesse, chacune de trois pieds de long à un coût comparable.

4.35. Bien entendu, les estimations de coûts n'ont pas pu être faites avec précision puisque les problèmes technologiques n'étaient presque pas résolus, mais ces estimations quant à la taille et au coût de l'installation ont permis de souligner l'ampleur de l'entreprise.

DIFFUSION THERMIQUE DANS LES LIQUIDES

4.36. En septembre 1940, P. H. Abelson soumit à Briggs un mémorandum de 17 pages suggérant la possibilité de séparer les isotopes de l'uranium par diffusion thermique dans de l'hexafluorure d'uranium liquide. R. Gunn, du Naval Research Laboratory, s'intéressait aussi beaucoup au problème de l'uranium et fut nommé membre du Comité de l'uranium lors de sa réorganisation sous l'égide de la NDRC à l'été 1940. À la suite de la suggestion d'Abelson et de l'intérêt de Gunn, des travaux sur la diffusion thermique ont été entrepris au National Bureau of Standards. Ces travaux ont été financés par des fonds du ministère de la Marine et en 1940 ont été transférés au Naval Research Laboratory, toujours sous la direction d'Abelson, où ils ont été poursuivis.

4.37. Nous reviendrons plus loin sur les travaux de diffusion thermique, mais nous pouvons mentionner ici que des résultats significatifs avaient déjà été obtenus à la fin de 1941 et qu'en janvier 1942, à l'aide d'une seule colonne de séparation, on avait obtenu un facteur de séparation comparable ou supérieur à celui obtenu jusque-là lors d'essais préliminaires sur les méthodes de diffusion et de centrifugation.

LA PRODUCTION D'EAU LOURDE

4.38. Il a été souligné au chapitre II que le deutérium semblait très prometteur comme modérateur en raison de sa faible absorption et de sa bonne propriété de ralentissement, mais qu'il n'était pas prometteur en raison de sa rareté. L'intérêt pour un modérateur de deutérium a été stimulé par des résultats expérimentaux obtenus à Berkeley démontrant que la section efficace d'absorption du deutérium pour les neutrons était, en fait,

presque nulle. Étant donné que l'oxygène a un très faible coème d'absorption des neutrons, on supposait généralement que le deutérium serait utilisé combiné avec de l'oxygène, c'est-à-dire dans le matériau très pratique : l'eau lourde. Les travaux à Columbia sur les méthodes possibles de concentration à grande échelle de l'eau lourde ont été entrepris en février 1941 sous la direction de H. C. Urey (sous la direction d'un Contrat de l'OSRD). Au début de 1941, R. H. Fowler d'Angleterre rapporta l'intérêt du groupe britannique pour un modérateur de deutérium sous forme d'eau lourde et leur conviction qu'une réaction en chaîne se produirait dans des unités relativement petites d'uranium et d'eau lourde.

4.39. Urey et A. von Grosse avaient déjà étudié la concentration de l'eau lourde au moyen d'une réaction d'échange catalytique entre l'hydrogène gazeux et l'eau liquide. Ce processus dépend du fait que, lorsque l'équilibre isotopique est établi entre l'hydrogène gazeux et l'eau, l'eau contient une concentration de deutérium trois à quatre fois supérieure à celle de l'hydrogène gazeux. Au cours de l'année 1941, cette réaction d'échange entre l'eau et l'hydrogène a été étudiée à Columbia et au Frick Chemical Laboratory de Princeton et des travaux approfondis ont été effectués pour développer des méthodes à grande échelle de production de matériaux adaptés à la catalyse de la réaction.

4.40. Le développement ultérieur de ce travail et d'autres méthodes de production d'eau lourde est examiné au chapitre IX. À l'instar des autres travaux de séparation isotopique à Columbia, ce travail a été relativement peu affecté par la réorganisation de décembre 1941. Il est mentionné ici de manière préliminaire pour indiquer que toutes les principales lignes d'approche étaient à l'étude en 1941.

PRODUCTION ET ANALYSE DES MATÉRIAUX

4.41. A la fin de 1941, peu de progrès avaient été accomplis dans la production de matériaux destinés à être utilisés dans un système de réaction sur chaise. Le National Bureau of Standards et le groupe Columbia sont en contact avec la Metal Hydrides

Company de Beverly, Massachusetts. Cette société produisait de l'uranium sous forme de poudre, mais les efforts pour augmenter sa production et faire fondre le métal en poudre en lingots solides n'avaient pas été très fructueux.

4.42. De même, aucun arrangement satisfaisant n'a été pris pour l'obtention de grandes quantités de graphite hautement purifié. Le graphite utilisé à Columbia avait été obtenu de la U.S. Graphite Company de Saginaw, au Michigan. Il était d'une grande pureté pour un produit commercial, mais il contenait environ une partie sur 500 000 de bore, ce qui n'était pas souhaitable.

4.43. C'est en grande partie grâce à l'intérêt d'Allison que la possibilité d'augmenter la production de béryllium a été étudiée au point de s'assurer que cela serait difficile et coûteux, mais probablement possible.

4.44 Bien que peu de progrès aient été accomplis en matière d'approvisionnement, beaucoup de progrès ont été accomplis en ce qui concerne l'analyse. La mise au point de méthodes d'analyse chimique suffisamment précises des matériaux utilisés a été un problème de première ampleur tout au long de l'histoire du projet, bien que parfois éclipsé par les problèmes plus spectaculaires rencontrés. Au cours de cette période, C. J. Rodden et d'autres membres du National Bureau of Standards étaient principalement responsables des analyses. H. T. Beans, de Columbia, a également coopéré. En 1942, plusieurs autres groupes avaient créé des sections analytiques qui n'ont cessé d'être actives depuis.

4.45. En résumé, à la fin de 1941, il n'y avait aucune preuve qu'il était impossible de se procurer des matériaux en quantité et en pureté suffisantes, mais les problèmes étaient loin d'être résolus.

ÉCHANGE D'INFORMATIONS AVEC LES BRITANNIQUES

4.46. Avant l'automne 1941, il y avait eu des échanges de rapports avec les Britanniques et des discussions avec des représentants scientifiques britanniques qui étaient ici pour d'autres affaires. En septembre 1941, il fut décidé que Pegram et

Urey obtiendraient des informations de première main lors d'un voyage en Angleterre. Ils ont terminé leur voyage au cours de la première semaine de décembre 1941.

4.47. D'une manière générale, le travail en Angleterre a suivi à peu près les mêmes lignes que dans ce pays. En ce qui concerne le problème de la réaction en chaîne, leur attention s'était concentrée sur l'eau lourde en tant que modérateur plutôt que sur le graphite ; En ce qui concerne la séparation isotopique, ils ont fait des travaux approfondis sur le processus de diffusion, y compris la théorie générale des cascades. En fait, l'importance principale de cette visite et d'autres échanges au cours de l'été 1941 ne résidait pas dans l'exactitude des données scientifiques, mais dans les impressions scientifiques générales. Les Britanniques, en particulier J. Chadwick, étaient convaincus qu'une réaction en chaîne de l'U-235 pouvait être réalisée. Ils savaient qu'on produisait plusieurs kilogrammes d'eau lourde par jour en Norvège, et que l'Allemagne avait ordonné que des quantités considérables de paramn soient fabriquées à l'aide d'hydrogène lourd ; Il était difficile d'imaginer une autre utilisation de ces matériaux que dans le cadre de travaux sur le problème de l'uranium. Ils craignaient que si les Allemands obtenaient des bombes atomiques avant les Alliés, la guerre pourrait être terminée en quelques semaines. Le sentiment d'urgence que Pegram et Urey ramenèrent avec eux était d'une grande importance.

RAPPORT DU COMITÉ DE L'ACADÉMIE NATIONALE

4.48. La nomination d'un comité de l'Académie nationale a été mentionnée au chapitre III. Le premier rapport du comité, en mai 1941, mentionnait (a) les poisons radioactifs, (b) l'énergie atomique et (c) les bombes atomiques, mais l'accent était mis sur la puissance. Le deuxième rapport soulignait l'importance des nouveaux résultats sur le plutonium, mais ne précisait pas les utilisations militaires auxquelles le processus de fission pourrait être destiné. Ces deux rapports insistaient pour que le projet soit poussé plus vigoureusement.

4.49. Le troisième rapport (6 novembre 1941) portait spécifiquement sur les « possibilités d'une réaction de fission explosive avec l'U-235 ». Bien qu'aucun des deux premiers rapports de l'Académie nationale n'indiquait que l'uranium serait susceptible d'être d'une importance décisive dans la guerre actuelle, cette possibilité a été soulignée dans le troisième rapport. Nous ne pouvons mieux faire que de citer des extraits de ce rapport.

« Depuis notre dernier rapport, les progrès accomplis dans la séparation des isotopes de l'uranium ont été tels qu'il est urgent d'examiner (1) la probabilité de succès de la tentative de production d'une bombe à fission, (2) l'effet destructeur que l'on peut attendre d'une telle bombe, (3) le temps prévu avant que sa mise au point puisse être achevée et que la production puisse être lancée, et (4) une estimation préliminaire des coûts impliqués.

"1. Conditions d'une bombe à fission. Une bombe à fission d'une puissance superlativement destructrice résultera de la réunion rapide d'une masse suffisante d'élément U-235. Cela semble être aussi sûr que n'importe quelle prédiction non testée basée sur la théorie et l'expérience peut l'être. Nos calculs indiquent en outre que les masses requises peuvent être réunies assez rapidement pour que la réaction devienne importante. . .

"2. Effet destructeur des bombes à fission. a) Masse de la bombe. La masse d'U-235 nécessaire pour produire une fission explosive dans des conditions appropriées ne peut guère être inférieure à 2 kg ni supérieure à 100 kg. Ces limites larges reflètent principalement l'incertitude expérimentale de la section efficace de capture de l'U-235 pour les neutrons rapides. b) Énergie libérée par la fission explosive bp. Les calculs pour le cas de masses correctement situées à l'instant initial indiquent qu'entre 1 et 5 % de l'énergie de fission de l'uranium devrait être libérée lors d'une explosion de fission. Cela signifie de 2 à 10×10^8 kilocalories par kg d'uranium 235. L'énergie explosive disponible par kg d'uranium est donc équivalente à environ 3 millions de tonnes de TNT.

"3. Temps nécessaire à la mise au point et à la production de l'U-235 nécessaire. a) Quantité d'uranium nécessaire. Puisque la destructivité des bombes actuelles est déjà un facteur important dans la guerre, il est évident que, si la destructivité des bombes est ainsi multipliée par 10 000, elles devraient devenir d'une importance décisive.

La quantité d'uranium nécessaire sera néanmoins importante. Si l'estimation est correcte que 500 000 tonnes de bombes TNT seraient nécessaires pour dévaster les objectifs militaires et industriels de l'Allemagne, de 1 à 10 tonnes d'U-235 seront nécessaires pour faire le même travail.

«b) Séparation de l'U-235. La séparation des isotopes de l'uranium peut se faire dans les quantités nécessaires. Plusieurs méthodes sont en cours de développement, dont au moins deux semblent tout à fait adéquates, et approchent du stade de l'essai pratique. Ce sont les méthodes de la centrifugeuse et de la diffusion à travers des barrières poreuses. D'autres méthodes sont à l'étude ou nécessitent une étude qui pourrait finalement s'avérer supérieure, mais qui sont maintenant plus éloignées du stade de l'ingénierie.

c) Temps nécessaire à la production des bombes à fission. Une estimation de Le temps nécessaire au développement, à l'ingénierie et à la production des bombes à fission ne peut être fait que très grossièrement à l'heure actuelle.

Si tous les efforts possibles sont consacrés au programme, on pourrait cependant s'attendre à ce que les bombes à fission soient disponibles en quantité significative d'ici trois ou quatre ans.

"4. Estimation approximative des coûts. (Les chiffres donnés dans le rapport de l'Académie sous cette rubrique n'ont été reconnus que comme des estimations approximatives, car les données scientifiques et techniques permettant de les rendre plus précises n'étaient pas disponibles. Ils ont seulement montré que l'entreprise serait extrêmement coûteuse, mais toujours en ligne avec d'autres dépenses de guerre.

4.50. Le rapport examine ensuite les besoins immédiats et la réorganisation souhaitable.

RÉSUMÉ

4.51. A la fin du chapitre I, nous avons résumé les connaissances sur la fission nucléaire en juin 1940 et, au chapitre II, nous avons exposé les problèmes en suspens à la même date. À la lumière de ces déclarations, nous souhaitons revenir sur les dix-huit mois de

progrès qui viennent d'être relatés. Les progrès tangibles n'ont pas été importants. Aucune réaction en chaîne n'avait été obtenue ; aucune quantité appréciable d'U-235 n'avait été séparée de l'U-238 ; seules d'infimes quantités de Pu-239 avaient été produites ; La production de grandes quantités d'uranium métal, d'eau lourde, de béryllium et de graphite pur en était encore largement au stade des discussions. Mais il y avait eu des progrès. Les constantes étaient mieux connues ; les calculs avaient été vérifiés et étendus ; Les suppositions quant à l'existence et aux propriétés nucléaires du Pu-239 ont été vérifiées. Des études ont été faites sur les problèmes d'ingénierie, l'efficacité des procédés, les coûts et les échéanciers. Plus important encore, il avait été démontré que la taille critique de la bombe se situait presque certainement dans des limites pratiques. Dans l'ensemble, la probabilité que les problèmes puissent être résolus semblait plus grande dans tous les cas qu'elle ne l'était en 1940. Peut-être plus important que le changement réel était le changement psychologique. Peut-être que Yvigner, Szilard et Fermi n'étaient pas plus convaincus que les bombes atomiques étaient possibles qu'ils ne l'avaient été en 1940, mais beaucoup d'autres personnes s'étaient familiarisées avec l'idée et ses conséquences possibles. Apparemment, les Britanniques et les Allemands, tous deux en guerre acharnée, pensaient que le problème valait la peine d'être entrepris. De plus, c'est toute la psychologie nationale qui avait changé. Bien que l'attaque de Pearl Harbor n'ait pas encore eu lieu, la menace imminente d'une guerre a été ressentie beaucoup plus vivement qu'auparavant, et les dépenses d'efforts et d'argent qui auraient semblé énormes en 1940 ont été considérées comme des précautions évidemment nécessaires en décembre 1941. Il n'est donc pas surprenant que Bush et ses associés aient estimé qu'il était temps de pousser vigoureusement le projet d'uranium. À cette fin, une organisation administrative entièrement nouvelle a été créée, qui sera décrite dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V. HISTOIRE ADMINISTRATIVE 1942-1945

5.1. Dans le chapitre II, l'historique administratif des travaux sur l'uranium jusqu'en décembre 1941 a été passé en revue. Le chapitre IV rend compte de l'état d'avancement des travaux scientifiques jusqu'à la même date. Le présent chapitre décrit la réorganisation administrative qui a eu lieu en décembre 1941 et les divers changements qui ont eu lieu par la suite.

RÉORGANISATION DU TRANSFERT DE LA SECTION URANIUM DE LA NDRC À L'OSRD

5.2. Deux décisions importantes s'imposaient dans la poursuite de la planification du programme de bombes atomiques ou d'uranium. Ces décisions ont été prises par Vannevar Bush, directeur du Bureau de la recherche scientifique et du développement (dont faisait partie la NDRC), après une conférence avec divers scientifiques et administrateurs concernés. (Voir chapitre III.) Les décisions étaient les suivantes : premièrement, que la possibilité d'obtenir des bombes atomiques pour les utiliser dans la guerre actuelle était suffisamment grande pour justifier un effort « total » pour leur développement ; deuxièmement, que l'organisation existante, la Section de l'uranium de la NDRC (connue sous le nom de Section S-1, et composée de L. J. Briggs, président, G. B. Pegram, vice-président, H. T. Wensel, aide technique, S. K. Allison, J. W. Beams, G. Breit, E. U. Condon, R. Gunn, H. D. Smyth et H. C. Urey) n'était pas correctement organisée pour un tel effort.

5.3. Lors d'une réunion du Comité de recherche sur la défense nationale le 28 novembre 1941, le Dr Bush a expliqué pourquoi il estimait qu'il était souhaitable de mettre en place le programme d'uranium en dehors de la NDRC. Les membres de la NDRC ont accepté un transfert. Par conséquent, l'

La NDRC, en tant qu'organisation, n'avait plus aucun lien avec les 75 l'uranium, qui a été administré pendant un certain temps par l'OSRD directement par l'intermédiaire d'une section S-1 de l'OSRD et, plus tard, par l'intermédiaire d'un comité exécutif de l'OSRD S-1.

5.4. Lors d'une réunion de la Section S-1 de l'OSRD le 6 décembre, En 1941, J. B. Conant, parlant au nom de Bush, annonça l'effort « tous azimuts » proposé et la réorganisation du groupe. La section S-1 elle-même n'avait pas été officiellement consultée au sujet de la réorganisation proposée, mais il ne fait aucun doute que la plupart de ses membres étaient fortement en faveur des nouvelles propositions. La composition de la section S-1 réorganisée était la suivante : J. B. Conant, représentant de V. Bush ; L. J. Briggs, président ; G. B. Pegram, vice-président ; A. H. Compton, chef de programme ; E. O. Lawrence, chef de programme ; H. C. Urey, chef de programme ; E. V. Murphree, président du Conseil de planification organisé séparément ; H. T. Wensel, aide technique ; S. K. Allison, J. W. Beams, G. Breit, E. U. Condon, H. D. Smyth.

FORMATION DU CONSEIL DE PLANIFICATION

5.5. Au moment de la réorganisation de la section S-1, Bush a également mis en place un conseil de planification chargé des aspects techniques et techniques des travaux, de l'approvisionnement en matériaux et de la construction d'usines pilotes et d'usines de production grandeur nature. Ce conseil de planification était composé de E. V. Murphree (président), W. K. Lewis, L. W. Chubb, G. O. Curme, Jr. et P. C. Keith.

FONCTIONS DU CONSEIL DE PLANIFICATION ET DE LA SECTION S-1 DU BSRD

5.6. Il a été convenu que les contrats pour les parties scientifiques des travaux seraient recommandés à Bush non pas par l'ensemble de la section S-1, mais par Briggs et Conant après des conférences avec les chefs de programme concernés, et que des recommandations sur les contrats d'ingénierie seraient faites à Bush par le Conseil de planification. (Les contrats qui avaient été conclus au nom de

l'ancienne Section de l'uranium avaient été administrés par la NDRC.)
I-liüory

Des contrats pour la mise au point de procédés de diffusion et de séparation par centrifugation devaient être recommandés par le Conseil de planification, qui serait également responsable du programme de production d'eau lourde. Bush a déclaré que le Conseil de planification « sera chargé de veiller à ce que nous ayons des plans pour passer à l'étape suivante aussi rapidement que possible ».

5.7. Les aspects scientifiques des travaux ont été séparés des phases d'acquisition et d'ingénierie. Les chefs de programme – H. C. Urey, E. O. Lawrence et A. H. Compton – devaient être chargés des aspects scientifiques. Initialement, il a été proposé qu'Urey soit chargé de la séparation des isotopes par les méthodes de diffusion et de centrifugation et des travaux de recherche sur la production d'eau lourde. Lawrence devait être chargé de la production initiale de petits échantillons d'éléments fissiles, de la production en quantité par des méthodes de séparation électromagnétique et de certains travaux expérimentaux relatifs aux propriétés du noyau de plutonium. Compton devait être chargé des études physiques fondamentales de la réaction en chaîne et de la mesure des propriétés nucléaires, en particulier de la réaction en chaîne explosive. Après coup, il a été autorisé à explorer également la possibilité que le plutonium puisse être produit en quantités utiles par la méthode de réaction en chaîne contrôlée. Il était toutefois entendu que cette répartition des responsabilités devait être définie plus précisément dans les conférences ultérieures. (Les documents écrits de cette période ne rendent pas toujours compte de manière adéquate de ce qui se passait dans l'esprit des hommes concernés. Par respect pour les exigences de sécurité, les références à l'importance du plutonium et même à la bombe elle-même ont souvent été complètement omises.)

5.8. La réorganisation a eu pour effet de confier la direction des projets à un petit groupe composé de Bush, Conant, Briggs, Compton, Urey, Lawrence et Murphree. Théoriquement, Compton, Lawrence, Urey et Murphree n'étaient responsables que de leurs divisions respectives du programme. Chacun d'entre eux rencontrait Conant et Briggs ou, à

l'occasion, Bush pour discuter de ses problèmes spécifiques, ou même du programme dans son ensemble.

LA RÉUNION DU GROUPE D'ORIENTATION SUPÉRIEUR—L'APPROBATION DE LA RÉORGANISATION

5.9. Le 16 décembre 1941 s'est tenue une réunion du Top Policy Group, composé du vice-président Henry A. Wallace, du secrétaire à la Guerre Henry L. Stimson et du Dr V. Bush. Le général George C. Marshall et le Dr J. B. Conant, également membres du groupe, étaient absents. M. H. L. Smith, du Bureau du budget, y assiste. Bush a décrit la réorganisation qui était en cours et ses plans ont été approuvés. Dans un mémorandum à Conant décrivant cette réunion, Bush écrit : « L'ensemble du groupe a vraiment estimé que l'OSRD devait insister le plus rapidement possible sur la physique fondamentale et sur la planification de l'ingénierie, et en particulier sur la construction d'usines pilotes. » Bush a estimé que le coût de cet aspect des travaux serait de quatre ou cinq millions de dollars, et a déclaré que l'armée devrait prendre le relais lorsque la construction à grande échelle commencerait, probablement lorsque les usines pilotes seraient prêtes. Il a suggéré l'affectation d'un officier de l'armée ayant reçu une formation technique pour se familiariser avec la nature générale du problème de l'uranium. Il a été clairement indiqué lors de cette réunion que les relations internationales concernées étaient entre les mains du président, Bush n'étant responsable de la liaison que sur les questions techniques.

RÉUNION DE LA SECTION S-1 DE L'OSRD LE 18 DÉCEMBRE 1941

5.10. Le 18 décembre 1941, une réunion de la section S-1 réorganisée a eu lieu. Conant était présent et a discuté de la nouvelle politique, qui exigeait un effort total. Il a souligné qu'un tel effort n'était justifié que par la valeur militaire des bombes atomiques et que toute l'attention devait être concentrée dans la direction du développement de la bombe. Toute la réunion a été imprégnée d'une atmosphère d'enthousiasme et d'urgence. Plusieurs méthodes de séparation électromagnétique ont été proposées et discutées, et un certain nombre de nouveaux contrats ont été recommandés.

RÉUNION DE LA SECTION S-1 DE L'OSRD LE 16 JANVIER 1942

5.11. Une autre réunion de la section S-1 de l'OSRD a eu lieu le 16 janvier 1942. Discussions informelles sur les différentes productions

Des méthodes ont été mises en place et des estimations provisoires ont été faites quant au moment où chaque méthode produirait des résultats. Ces prévisions n'étaient en fait que des suppositions, car à l'époque, les informations scientifiques disponibles étaient très incomplètes et les problèmes d'application des données existantes à la construction et à l'exploitation des usines de production n'avaient guère été abordés.

RÉORGANISATION DE L'

DÉBUT 1942

5.12. À la mi-janvier 1942, Compton décida de concentrer les travaux dont il était responsable à l'Université de Chicago. Le groupe de Columbia, sous la direction de Fermi, et son matériel et son équipement accumulés, ainsi que le groupe de Princeton, qui avait étudié l'absorption par résonance, furent déplacés à Chicago au cours du printemps. Ailleurs, certains petits groupes demeurèrent actifs sous la direction de Compton. Sous la direction de Lawrence, l'étude de la séparation électromagnétique à grande échelle a été accélérée à l'Université de Californie à Berkeley et un projet de séparation connexe a été lancé à Princeton. La recherche et le développement sur le procédé de diffusion et sur la production d'eau lourde se sont poursuivis à Columbia sous la direction d'Urey ; sous la supervision générale de Murphree, les travaux sur la centrifugeuse se sont poursuivis à l'Université de Virginie sous la direction de Beams, tandis que les travaux sur la centrifugeuse Columbia ont été transférés aux laboratoires de la Standard Oil Development Co. à Bayway, New Jersey.

RAPPORT AU PRÉSIDENT PAR BUSH LE 9 MARS 1942

5.13. Dans un rapport daté du 20 février 1942, Conant recommandait que toutes les phases des travaux soient repoussées au moins jusqu'au 1er juillet 1942. De même, le 9 mars 1942, le Dr Bush envoya au président un rapport reflétant l'optimisme général, mais mettant l'accent sur la nature provisoire des conclusions. Son rapport prévoyait l'achèvement du projet en 1944. De plus, le rapport

suggérait que l'armée soit appelée au cours de l'été 1942 pour la construction d'usines à grande échelle.

CRITIQUES DU PROGRAMME PAR CONANT

5.14. L'ensemble du programme d'eau lourde faisait l'objet d'un examen Mars et avril 1942. Les revues font suite à une visite aux États-Unis en février et mars 1942 de F. Simon, H. Halban et W. A. Akers d'Angleterre. Dans un mémorandum du 1er avril 1942 adressé à Bush, Conant passe en revue la situation et rend compte des conférences avec Compton et Briggs. Son rapport soulignait que de très grandes quantités d'eau lourde seraient nécessaires pour une usine de production de plutonium utilisant de l'eau lourde au lieu du graphite comme modérateur. C'est pour cette raison qu'il défavorable à la suggestion d'inviter Halban à apporter dans ce pays les 165 litres d'eau lourde qu'il possédait alors en Angleterre.

5.15. Dans un mémorandum écrit à Bush le 14 mai 1942 (peu de temps avant une réunion proposée des chefs de programme), Conant estimait qu'il y avait cinq méthodes de séparation ou de production qui avaient à peu près autant de chances de réussir : les méthodes de centrifugeuse, de diffusion et électromagnétiques de séparation de l'U-235 ; les méthodes de production de plutonium à base d'uranium-graphite et d'uranium-eau lourde. Tous étaient considérés comme prêts pour la construction d'usines pilotes et peut-être même pour la conception préliminaire d'usines de production. Si les méthodes ^{Irvere} devaient être poussées au stade de la production, un engagement de cinq cents millions de dollars serait nécessaire. Bien qu'il soit trop tôt pour estimer avec précision les mérites relatifs des différentes méthodes, on a supposé que certaines méthodes s'avéreraient plus rapides et plus efficaces que d'autres. On craignait toutefois que l'élimination d'une méthode n'entraîne un sérieux retard. On pensait que les Allemands pourraient avoir une certaine longueur d'avance sur les États-Unis dans un programme similaire.

5.16. Conant a mis l'accent sur une question qui a été cruciale tout au long du développement du projet d'uranium. La question était de savoir si les bombes atomiques seraient des armes décisives ou simplement des armes complémentaires. S'ils étaient décisifs, il n'y

avait pratiquement aucune limite à la quantité d'efforts et d'argent qui devaient être consacrés au travail. Mais personne ne savait à quel point les bombes atomiques seraient efficaces.

PASSAGE DE LA SECTION S-1 DE L'OSRD AU COMITÉ EXÉCUTIF S-1 DE L'OSRD

5.17. En mai 1942, Conant suggéra à Bush qu'au lieu d'encourager les membres de la section individuellement à discuter de leurs propres phases de travail avec Conant et Briggs, la section S-1 de l'OSRD devrait se réunir pour des discussions générales sur l'ensemble du programme. Bush a réagi en mettant fin à la section S-1 de l'OSRD et en la remplaçant par le comité exécutif de l'OSRD S-1, composé des personnes suivantes : J. B. Conant, président, L. J. Briggs, A. H. Compton, E. O. Lawrence, E. V. Murphree, H. C. Urey. H. T. Yvensel et I. Stewart ont été choisis pour siéger au Comité en tant qu'assistant technique et secrétaire, respectivement.

5.18. Les membres suivants de l'ancienne Section S-1 de l'OSRD ont été nommés conseillers auprès du nouveau Comité : S. K. Allison, J. W. Beams, G. Breit, E. U. Condon et H. D. Smyth.

5.19. Les fonctions du nouveau Comité exécutif de l'OSRD S-I étaient les suivantes : a) Faire rapport sur le programme et le budget pour les dix-huit prochains mois, pour chaque méthode. b) Formuler des recommandations sur le nombre de programmes à poursuivre. c) Formuler des recommandations sur les parties du programme qui devraient être éliminées.

5.20. Les recommandations relatives à la politique S-1 de l'OSRD et à l'attribution de contrats S-1 ont été formulées sur la base d'un vote majoritaire du Comité. Conant s'est abstenu de voter, sauf en cas d'égalité des voix. Alors que Bush était le seul à avoir le pouvoir d'établir les politiques de l'OSRD et d'engager les fonds de l'OSRD, il suivait généralement les recommandations du Comité exécutif du S-1.

RAPPORT AU PRÉSIDENT PAR BUSH ET CONANT LE 17 JUIN 1942

5.21. Le 13 juin 1942, Bush et Conant envoyèrent au vice-président Henry A. Wallace, au secrétaire à la Guerre Henry L. Stimson et au

chef d'état-major, le général George C. Marshall, un rapport recommandant des plans détaillés pour l'expansion et la poursuite du programme de bombes atomiques. Tous les trois ont approuvé le rapport. Le 17 juin 1942, le rapport a été envoyé par Bush au président, qui l'a également approuvé. Le rapport, qui est trop long pour être présenté dans son intégralité, comportait quatre parties principales, qui traitaient des points suivants : a) L'état d'avancement de l'évolution telle qu'elle a été évaluée par les scientifiques de haut niveau ; b) Recommandations formulées par les chefs de programme et le Conseil de planification ; c) Commentaires de Bush, Conant et du major-général W. D. Styer ; d) Recommandations de Bush et Conant. Nous pouvons paraphraser les parties (a) et (c) comme suit :

(a) L'état du Programme. (1) Il était clair qu'une quantité d'uranium 235 ou de plutonium d'un certain nombre de kilogrammes serait explosive, qu'une telle explosion équivaldrait à plusieurs milliers de tonnes de TNT et qu'une telle explosion pourrait se produire à l'instant souhaité. (2) Il était clair qu'il y avait quatre méthodes de préparation de la matière fissile et que toutes ces méthodes semblaient réalisables ; mais il n'était pas possible d'affirmer avec certitude que l'un d'eux est supérieur aux autres. (3) Il était clair que des usines de production de taille considérable pouvaient être conçues et construites. (4) Il semblait probable qu'avec des fonds et des priorités suffisants, l'exploitation à grande échelle de l'usine pourrait être commencée assez tôt pour avoir une importance militaire.

c) Observations de Bush, Conant et du général Styer. Certaines recommandations avaient été formulées par Lawrence, Urey, Compton et Murphree. Ces recommandations avaient été examinées par Bush,

Conant et le général Styer (qui avait reçu l'ordre du général Marshall de suivre les progrès du programme) et leurs commentaires concernant le programme étaient les suivants : (1) Si quatre méthodes distinctes semblaient toutes à un groupe scientifique hautement compétent pouvoir être appliquées avec succès, il semblait certain que le résultat final désiré pourrait être atteint par l'ennemi. à condition qu'il ait eu beaucoup de temps. (2) Le programme tel qu'il est proposé ne pouvait évidemment pas être exécuté rapidement sans interférer

avec d'autres questions importantes, tant en ce qui concerne le personnel scientifique que les matériaux critiques. Il fallait faire un choix entre le résultat militaire qui semblait atteignable et l'interférence certaine avec d'autres activités de guerre. (3) Il n'était pas prudent à l'époque, étant donné le caractère pionnier de l'ensemble de l'effort, de se concentrer sur un seul moyen d'obtenir le résultat. (4) Il a donc semblé préférable de procéder immédiatement aux phases du programme qui interféraient le moins possible avec d'autres activités de guerre importantes. Les travaux sur d'autres phases du programme pourraient se poursuivre une fois que les questions de brouillage auront été résolues.

5.22. Le rapport du 13 juin 1942 au Président et la lettre de transmission de Bush datée du 17 juin 1942 ont été retournés à Bush avec l'approbation paraphée du Président. Une copie du rapport fut ensuite envoyée par Bush au général Styer le 19 juin 1942.

SÉLECTION DU COLONEL J. C. MARSHALL

5.23. Le 18 juin 1942, le colonel J. C. Marshall, du Corps des ingénieurs, a reçu du chef du génie l'ordre de former un nouveau district dans le Corps des ingénieurs pour effectuer les travaux spéciaux (bombes atomiques) qui lui étaient assignés. Ce district a été désigné comme le district de Manhattan et a été créé le 13 août 1942. Les travaux dont il s'agissait v. Pour des raisons de sécurité, le projet DSM (Development of Substitute Materials) a été labellisé, pour des raisons de sécurité.

SÉLECTION DU GÉNÉRAL L. R. GROVES

5.24. Le 17 septembre 1942, le secrétaire à la Guerre a confié au brigadier général L. R. Groves du Corps of Engineers la responsabilité complète de toutes les activités de l'armée relatives au projet DSM.

COMITÉ DE POLITIQUE MILITAIRE ; FONCTIONNEMENT DE
LES COMITÉS DE L'OSRD

5.25. Une conférence s'est tenue le 23 septembre 1942 entre les personnes désignées par le Président pour déterminer les orientations générales du projet, et quelques autres. Les personnes présentes

étaient le secrétaire à la Guerre Henry L. Stimson, le chef d'état-major, le général George C. Marshall, le Dr J. B. Conant, le Dr V. Bush, le major

Le général Brehon Somervell, le major-général W. D. Styer et le brigadier-général L. R. Groves. (Le vice-président Henry A. Wallace n'a pas pu être présent.) Un comité de politique militaire fut nommé, composé du Dr V. Bush en tant que président et du Dr J. B. Conant comme suppléant, du major-général W. D. Styer et du contre-amiral W. R. Purnell. Le général Groves a été nommé pour siéger au comité et agir à titre de directeur général pour mettre en œuvre les politiques qui ont été déterminées. Les tâches de ce comité étaient de planifier les politiques militaires relatives aux matériaux, à la recherche et au développement, à la production, à la stratégie et aux tactiques, et de soumettre des rapports d'étape au groupe politique désigné par le président.

5.26. La nomination du Comité de politique militaire a été approuvée par le Comité interarmées sur les nouvelles armes, créé par les chefs d'état-major interarmées des États-Unis et composé du Dr V. Bush, du contre-amiral W. R. Purnell et du brigadier général R. G. Moses.

5.27. La création du Comité de politique militaire a en effet placé toutes les phases du projet DSM sous le contrôle de M. Bush, de M. Conant, du général Styer, de l'amiral Purnell et du général Groves.

5.28. Le Comité exécutif de l'OSRD S-I s'est réuni environ une fois par mois de juin 1942 à mai 1943 et une fois par la suite, en septembre 1943. Le général Groves, après septembre 1942, et le colonel Marshall assistaient normalement à ces réunions, et souvent des représentants des entreprises industrielles concernées par les usines de production. Les recommandations du Comité n'étaient pas contraignantes, mais elles étaient généralement suivies. C'est ainsi qu'il a servi d'organe consultatif auprès du Dr Bush et du général Groves, et de groupe de liaison initial entre les parties scientifique, industrielle et militaire du projet DMS. Le Comité exécutif du S-1 n'a jamais été officiellement dissous, mais il est inactif depuis l'automne 1943.

5.29. Les fonctions d'approvisionnement et d'ingénierie du Conseil de planification ont été reprises par le district de Manhattan au cours de l'été 1942 et ce conseil est alors devenu inactif.

5.30. Au printemps 1943, on estimait que le Manhattan

District était en mesure de reprendre les contrats de recherche et de développement de l'OSRD. Un tel transfert a été effectué à partir du 1er mai 1943 et a marqué la fin du lien formel de l'OSRD avec le projet d'uranium.

5.31. En juillet 1943, Conant et R. C. Tolman furent officiellement invités par le général Groves à devenir ses conseillers scientifiques. Ils l'avaient déjà fait de manière informelle et ont continué à le faire. La coordination des différents programmes scientifiques et techniques s'est faite par des réunions entre le général Groves et les responsables des différents projets, en particulier Compton, Lawrence, Oppenheimer (voir chapitre XII) et Urey.

ORGANISATION SUBSÉQUENTE : LE MANHATTAN DISTRICT

5.32. Depuis 1943, il n'y a pas eu de changements importants dans la forme de l'organisation et peu de changements importants dans le personnel d'exploitation. Le général Groves a continué d'assumer la responsabilité majeure de corrélérer l'ensemble de l'effort et de le maintenir dirigé vers ses objectifs militaires. Il a été de son devoir de maintenir les différentes parties du projet en phase, de veiller à ce que les matières premières soient disponibles pour les différentes usines, de déterminer les calendriers de production, de s'assurer que le développement de la conception des bombes suivait les calendriers de production, d'organiser l'utilisation des bombes le moment venu et de maintenir un système de sécurité adéquat. Dans l'accomplissement de ces fonctions, le général Groves a pu compter sur sa formidable organisation, composée de scientifiques et d'ingénieurs civils, d'officiers du génie et d'hommes de troupe. De nombreux civils ont déjà été mentionnés ou le seront dans les chapitres ultérieurs traitant de projets particuliers. Le brigadier-général T. F. Farrell a agi en tant qu'adjoint du général Groves dans les phases ultérieures

importantes du projet. Le colonel K. D. Nichols, ingénieur de district du district de Manhattan dont le quartier général est à Clinton Engineer Works, est lié au projet depuis 1942. Il s'est préoccupé des problèmes de recherche et de production de l'U-235

86

et le plutonium et a toujours fait preuve d'une compréhension exceptionnelle des problèmes techniques et de leur importance relative. Deux autres omcers qui méritent d'être mentionnés sont le colonel F. T. Matthias et le colonel S. L. VVarren. Le colonel Matthias s'est acquitté d'importantes responsabilités à l'usine du génie de Hanford d'une manière extrêmement compétente ; Ses fonctions ont porté à la fois sur les phases de construction et d'exploitation du projet. Le colonel Warren est chef de la section médicale du district de Manhattan et a donc eu la responsabilité ultime des problèmes de santé dans toutes les parties du projet.

RÉSUMÉ

5.33. A la fin de 1941, un examen approfondi de l'ensemble de la situation de l'uranium avait été achevé. À la suite de cet examen, Bush et ses conseillers décidèrent d'augmenter l'effort sur le projet d'uranium et de changer l'organisation. Cette décision a été approuvée par le président Roosevelt. De janvier 1942 jusqu'au début de l'été 1942, les travaux sur l'uranium furent dirigés par Bush et Conant, en collaboration avec les chefs de programme et un conseil de planification. Au cours de l'été 1942, l'armée, par l'intermédiaire du Corps of Engineers, a été affectée à une part active dans les phases d'approvisionnement et d'ingénierie, organisant le district de Manhattan à cet effet. En septembre 1942, le Dr Bush, le Dr Conant, le général Styer et l'amiral Purnell ont été nommés en tant que comité de politique militaire pour déterminer les politiques générales de l'ensemble du projet. Toujours en septembre, le général Groves a été nommé pour prendre en charge toutes les activités de l'armée du projet. La période de contrôle conjoint de l'OSRD et de l'armée s'est

poursuivie jusqu'en avril 1943, l'armée jouant un rôle de plus en plus important à mesure que l'effort industriel commençait à progresser. En mai 1943, les contrats de recherche sont transférés au Corps of Engineers ; la période de contrôle conjoint de l'OSRD et de l'armée a pris fin et la période de contrôle complet de l'armée a commencé.

5.34. Dès les premiers jours du projet, le Président Roosevelt l'a suivi avec intérêt et, jusqu'à sa mort, a continué à étudier et à approuver les grands programmes du Comité de politique militaire. Le président Truman, qui, en tant que sénateur des États-Unis, était au courant du projet et de son ampleur, a reçu le tableau complet et actualisé du secrétaire à la Guerre et du général Groves lors d'une conférence à la Maison Blanche immédiatement après son investiture. Par la suite, le Président a apporté son soutien total au programme, en restant constamment en contact avec les progrès.

CHAPITRE VI. LE PROJET MÉTALLURGIQUE À CHICAGO EN 1942

INTRODUCTION

6.1. Ainsi qu'il a été précisé dans les chapitres IV et V, les informations accumulées à la fin de 1941 sur la possibilité de produire une bombe atomique étaient de nature à justifier l'expansion de l'œuvre, et cette expansion nécessitait une réorganisation administrative. Il était généralement admis qu'il y avait une très forte probabilité qu'une bombe atomique d'une puissance destructrice énorme puisse être fabriquée, soit à partir d'U-235 concentré, soit à partir du nouvel élément plutonium. Il a donc été proposé d'instituer un programme expérimental et théorique intensif comprenant des travaux à la fois sur la séparation isotopique et sur les problèmes de réaction en chaîne. On espérait que ce programme établirait avec certitude si l'U-235 pouvait être séparé en quantités significatives de l'U-238, soit par des méthodes électromagnétiques, soit par des méthodes statistiques. la question de savoir s'il est possible d'établir une réaction en chaîne avec l'uranium naturel ou ses composés et de produire des quantités relativement importantes de plutonium ; et si le plutonium ainsi produit pouvait ou non être séparé de la matière première, l'uranium. On espérait également que le programme fournirait les données théoriques et expérimentales nécessaires à la conception d'une bombe à réaction en chaîne à neutrons rapides.

6.2. Comme nous l'avons expliqué au chapitre V, les problèmes de séparation isotopique avaient été assignés à des groupes sous Lawrence et Urey, tandis que les problèmes restants avaient été attribués au groupe de Compton, qui était organisé sous le nom énigmatique de « Metallurgical Laboratory » de l'Université de Chicago. Dans ce chapitre et dans les deux suivants, nous décrirons les travaux du Laboratoire métallurgique et des laboratoires associés jusqu'en juin 1945. Dans les chapitres suivants, nous discuterons de l'isotope⁸⁸

et le travail du groupe de développement de la bombe, qui a été séparé du laboratoire métallurgique au début de 1943.

6.3. Il serait vain de tenter d'évaluer l'importance relative des contributions des différents laboratoires au succès global du projet de bombe atomique. Ce rapport ne fait pas une telle tentative, et il y a peu de corrélation entre l'espace consacré au travail d'un groupe donné et la capacité ou l'importance de ce groupe. En décidant quelle subdivision du projet de bombe atomique devrait être discutée en premier et de la manière la plus complète, nous avons été régis par des critères d'intérêt général et de sécurité militaire. Certains développements d'une grande importance technique sont de peu d'intérêt général ; D'autres, à la fois intéressantes et importantes, doivent encore être gardées secrètes. De tels critères, appliqués aux objectifs et aux réalisations des différents laboratoires mis en place depuis le début des travaux de grande envergure, favorisent le Laboratoire métallurgique comme partie du projet à traiter le plus complètement.

OBJECTIFS

6.4. Conformément aux objectifs généraux qui viennent d'être exposés, les objectifs initiaux du Laboratoire de métallurgie étaient : premièrement, de trouver un système utilisant de l'uranium normal dans lequel une réaction en chaîne se produirait ; deuxièmement, de montrer que, si une telle réaction en chaîne se produisait, il serait possible de séparer chimiquement le plutonium des autres matières ; enfin, d'obtenir les données théoriques et expérimentales permettant d'effectuer une réaction en chaîne explosive avec de l'uranium 235 ou du plutonium. L'objectif ultime du laboratoire était de préparer des plans pour la production à grande échelle de plutonium et pour son utilisation dans des bombes.

ORGANISATION DU TRAVAIL

6.5. Le laboratoire ne devait pas seulement se préoccuper de ses objectifs immédiats, mais en même temps garder à l'esprit les

objectifs ultimes et travailler à leur réalisation en partant du principe que les objectifs immédiats seraient atteints. Il ne pouvait pas attendre qu'une réaction en chaîne se produise pour étudier la chimie du plutonium. Elle a dû partir du principe que le plutonium serait séparé et procéder à l'élaboration de plans pour sa production et son utilisation. Par conséquent, les problèmes ont été continuellement redéfinis au fur et à mesure que de nouvelles informations devenaient disponibles, et les programmes de recherche ont été réévalués presque de semaine en semaine. D'une manière générale, le groupe de physique nucléaire expérimentale dirigé par E. Fermi s'occupait principalement de la mise en œuvre d'une réaction en chaîne, la division de chimie organisée par F. H. Spedding (plus tard à son tour sous S. K. Allison, J. Franck, W. C. Johnson et T. Hogness) avec la chimie du plutonium et avec les méthodes de séparation, et le groupe théorique sous E. Wigner avec la conception des piles de production. Cependant, les problèmes étaient entremêlés et les divers aspects scientifiques et techniques du processus de fission étaient étudiés dans le groupe qui semblait le mieux équipé pour la tâche particulière. En mars 1942, Thomas Moore est nommé à la tête du groupe d'ingénierie. D'autres hommes d'expérience dans ce groupe étaient M. C. Leverett, J. A. Wheeler et C. M. Cooper, qui succéda plus tard à Moore à la tête de la division technique. Au cours de l'été 1942, l'importance des problèmes de santé est devenue évidente et une division de la santé a été organisée sous la direction du Dr R. S. Stone. La tâche difficile d'organiser et d'administrer un laboratoire de recherche de plus en plus grand et de plus en plus complexe avec une violence presque explosive a été accomplie par R. L. Doan en tant que directeur du laboratoire.

6.6. Nous avons choisi de limiter ce chapitre aux travaux de 1942 parce qu'une réaction en chaîne auto-entretenu a été réalisée pour la première fois le 2 décembre de cette année-là, à un moment où l'ensemble du projet de Chicago était en cours d'évaluation par un comité d'examen dont les membres étaient particulièrement sélectionnés pour leur formation d'ingénieur. *

C'était une coïncidence dramatique et aussi commode pour les besoins de ce rapport, car l'un ou l'autre incident pouvait être considéré comme marquant la fin d'une époque au Laboratoire métallurgique. De plus, en préparation de la visite du comité d'examen

* Ce comité était composé de W. K. Lewis, C. H. Greenewalt, T. C. Gary et Roger Williams. E. V. Murphree était également membre, mais en raison d'une maladie, il n'a pas pu participer.

Un rapport détaillé a été établi. Ce rapport était généralement connu sous le nom de « rapport de faisabilité » et a été largement utilisé dans la préparation du présent chapitre.

PLAN DU PRÉSENT CHAPITRE

6.7. Dans ce chapitre, nous présenterons le matériel dans l'ordre des objectifs donnés ci-dessus. Dans la première partie, nous examinerons les progrès accomplis vers les objectifs initiaux, y compris (a) l'achat de matériaux, (b) la preuve expérimentale de la réaction en chaîne, (c) la chimie du plutonium et certains des problèmes de séparation, (d) certains des types d'expériences auxiliaires qui ont été réalisées, et enfin (e) les travaux sur les « neutrons rapides ». Nécessairement, le travail décrit en détail n'est qu'un échantillon de la grande quantité de travaux théoriques et expérimentaux effectivement réalisés. Dans la deuxième partie, nous discuterons des possibilités envisagées pour les pieux de production et les méthodes de séparation, ainsi que des propositions concrètes faites en novembre 1942.

PARTIE 1 : PROGRÈS VERS LES OBJECTIFS INITIAUX

APPROVISIONNEMENT EN MATÉRIAUX GÉNÉRALITÉS

6.8. Il a été clairement indiqué dans les chapitres précédents du présent rapport que l'approvisionnement en matériaux d'une pureté suffisante constituait une partie importante du problème.

En ce qui concerne l'uranium, il semblait probable qu'il serait nécessaire sous forme métallique hautement purifiée ou au moins sous forme d'oxyde d'uranium hautement purifié. Les autres matériaux qui allaient être nécessaires étaient soit le graphite, soit l'eau lourde, soit peut-être le béryllium. Il était clair à ce moment-là que, aussi avantageux que puisse être l'eau lourde en tant que modérateur, elle ne serait pas disponible en grandes quantités avant des mois ou des années. Le béryllium semblait moins avantageux et presque aussi difficile à obtenir. Par conséquent, les efforts d'approvisionnement pour un modérateur étaient centrés sur le graphite. Comme nous l'avons expliqué au chapitre V, l'approvisionnement en uranium et en graphite n'était pas la responsabilité principale du Laboratoire métallurgique, mais était géré par E. V. Murphree et d'autres membres du conseil de planification. En fait, l'intérêt évident du Laboratoire métallurgique pour le problème a conduit à une intervention continue de ses représentants. Une grande partie du mérite du succès final dans l'obtention de matériaux est due à N. Hilberry et plus tard à R. L. Doan, toujours soutenu par A. H. Compton.

MINERAI D'URANIUM

6.9. Il est évident qu'il ne servirait à rien d'entreprendre tout ce projet s'il n'était pas possible de trouver suffisamment d'uranium pour produire les bombes. Les premières indications étaient favorables, et une étude minutieuse effectuée en novembre 1942 a montré que la livraison immédiate de tonnages suffisants de minerais d'uranium pouvait être effectuée.

OXYDE D'URANIUM ET URANIUM MÉTAL

6.10. À la fin de 1941, le seul uranium métallique existant était quelques grammes de bon matériau fabriqué à titre expérimental par la Westinghouse Electric and Manufacturing Company et d'autres, et quelques kilos de poudre pyrophorique hautement impure fabriquée par la Metal Hydrides Company. La seule quantité considérable de matière première disponible à l'époque

dans ce pays était sous la forme d'un oxyde d'uranium noir de qualité commerciale, que l'on pouvait obtenir en quantités limitées de la Canadian Radium and Uranium Co. Il contenait de 2 à 5 % d'impuretés et était le matériau qui donnait un facteur de multiplication neutronique d'environ 0,87 lorsqu'il était utilisé dans un tas exponentiel.

6.11. En mai 1942, des livraisons moyennes de 15 tonnes par mois d'oxyde noir d'une pureté supérieure et d'une qualité plus uniforme ont commencé à arriver. Les impuretés totales étaient inférieures à 1 %, le bore représentait quelques parties par million et le facteur de multiplication des neutrons (k) était d'environ 0,98. (Il ne faut pas oublier que le facteur de multiplication dépend aussi de la pureté du graphite.) Les livraisons de ce matériel atteignirent une tonne par jour en septembre 1942.

6.12. Des expériences menées par J. I. Hoffman au National Bureau of Standards ont démontré que, par l'utilisation d'une méthode d'extraction à l'éther, toutes les impuretés sont éliminées par une seule extraction de nitrate d'uranyle. L'utilisation de cette méthode a éliminé la grande partie des difficultés liées à l'obtention d'oxydes purs et de matériaux purs pour la production de métaux. Au début du mois de mai 1942, des arrangements ont été conclus avec l'usine chimique Mallinckrodt de Saint-Louis pour soumettre la nouvelle qualité d'oxyde à un processus d'extraction à l'éther sur une base de production afin de réduire davantage la teneur en impuretés et de livrer le produit final sous forme de dioxyde brun. Les livraisons débutent en juillet 1942 à raison de 30 tonnes par mois. Cet oxyde est maintenant utilisé comme point de départ pour toute la production de métaux, et on ne peut pas s'attendre à un degré de pureté plus élevé à l'échelle commerciale. En fait, c'est une réalisation remarquable que d'avoir mis au point et mis en production, à l'échelle d'une tonne par jour, un procédé de transformation d'oxyde commercial grossièrement impur en

oxyde d'un degré de pureté rarement atteint, même à l'échelle d'un laboratoire.

6.13. Le procédé utilisé par Westinghouse pour produire le métal était l'électrolyse du KUF5 à un coût d'environ 1 000 \$ la livre. Étant donné que le KUF5 a été produit photochimiquement sous l'action de la lumière du soleil, cette méthode constituait un goulot d'étranglement potentiel dans la production. Il a été constaté que le tétrafluorure d'uranium pouvait être utilisé à la place du KUF5, et des mesures ont été prises pour que ce sel soit produit à la Harshaw Chemical Company à Cleveland et à l'usine du Pont à Penns Grove, New Jersey. La production a commencé en août 1942 et en octobre 1942, elle atteignait 700 livres par jour à Harshaw et 300 livres par jour à du Pont, la méthode de fabrication dans les deux cas étant l'hydrofluoration du dioxyde de carbone purifié par Mallinckrodt.

6.14. À la suite de cet approvisionnement en matières premières à Westinghouse, et à la suite de l'agrandissement de l'usine, les livraisons de Westinghouse s'étaient accumulées à un total de plus de 6 000 livres en novembre 1942 et on s'attendait à ce qu'elles soient de 500 livres par jour en janvier 1943. La pureté du métal était bonne et le coût était tombé à 22 \$ la livre.

6.15. Les livraisons de métal acceptable de la Metal Hydrides Co. ont été retardées pour diverses raisons et ne commençaient qu'en novembre 1942. La production de cette société devait atteindre un millier de livres par semaine par la suite.

6.16. Ni le procédé Westinghouse ni le procédé des hydrures métalliques n'ont été entièrement satisfaisants. Une activité intensive destinée à accélérer la production de métaux, et menée indépendamment par F. H. Spedding et ses associés à l'Iowa State College à Ames, Iowa, et par C. J. Rodden au National Bureau of Standards, a abouti à la mise au point d'une méthode satisfaisante. Des installations de production ont été installées à Ames à l'automne 1942 et avaient déjà produit plus d'une tonne à la fin du mois de novembre. Le processus a été extrêmement simple, rapide et peu coûteux.

6.17. D'autres recherches ont indiqué que d'autres changements pourraient être apportés à leur avantage et, au milieu de 1943, Spedding, de l'Iowa, et d'autres producteurs qui entraient dans le tableau utilisaient la méthode de production finale adoptée.

6.18. À la fin de 1942, des dispositions avaient été prises par le district de Manhattan pour augmenter la production de métaux en faisant davantage appel à la Mallinckrodt Chemical Works, à l'Union Carbide and Carbon Corporation et à la Compagnie du Pont. 6.19. En résumé, il n'y avait presque pas de métal disponible pendant la majeure partie de l'année 1942, ce qui a sérieusement retardé les progrès comme nous le verrons, mais les problèmes de production avaient été presque résolus à la fin de 1942 et quelque 6 tonnes de métal ont été incorporées dans le tas construit en novembre 1942. Tout le problème de l'approvisionnement en métal fut pris en charge par le district de Manhattan à la fin de l'année, sous la direction générale du colonel Ruhoff, ancien employé de l'usine chimique Mallinckrodt. Du point de vue du projet métallurgique, il n'y a pas eu d'autres retards ou difficultés graves en raison de pénuries de métaux.

APPROVISIONNEMENT EN GRAPHITE

6.20. Au début de 1942, la production de graphite n'était pas encore satisfaisante, mais elle se trouvait bien sûr dans un état tout à fait différent de celui de la production de métaux, car la production industrielle de graphite était déjà très importante. Il s'agissait simplement d'un problème de pureté et de priorité. C'est en grande partie grâce aux efforts de N. Hilberry que la National Carbon Company et la Speer Carbon Company ont toutes deux été attirées dans le tableau. À la suite des suggestions faites par les experts du Bureau national des normes, ces entreprises ont été en mesure de produire du graphite hautement purifié avec une absorption neutronique inférieure d'environ 20 % à celle des matériaux commerciaux standard utilisés jusqu'à présent. Bien que les efforts visant à réduire les impuretés aient eu un certain succès, le problème de la pureté a été

essentiellement résolu au milieu de 1942 et de grosses commandes ont été passées avec la coopération du War Production Board. Comme dans le cas du métal, le problème de l'approvisionnement en graphite a été pris en charge par le district de Manhattan.

LA RÉACTION EN CHAÎNE

AUTRES EXPÉRIENCES INTERMÉDIAIRES

6.21. À l'époque où le projet métallurgique a été organisé, la plupart des physiciens familiers avec le problème pensaient qu'un tas réagissant en chaîne pourrait probablement être construit si l'on pouvait obtenir du graphite pur et de l'uranium métal. Suffisamment de travaux avaient été réalisés sur l'absorption par résonance, sur la théorie de l'absorption et de la diffusion des neutrons dans un tas, et sur des expériences intermédiaires pour permettre de concevoir une structure en réseau ayant de très bonnes chances de maintenir une réaction en chaîne. Néanmoins, il y avait des incertitudes dans les données expérimentales et dans les approximations qui devaient être faites dans les calculs théoriques. Il y avait deux alternatives : (1) construire un tas selon la meilleure conception possible ; 2° de déterminer avec plus de précision les constantes nucléaires pertinentes, d'effectuer des expériences intermédiaires et d'améliorer les calculs. Il ne fait guère de doute que la première alternative était celle qui était susceptible de conduire le plus rapidement à la production de plutonium. Il y avait beaucoup de questions importantes auxquelles on aurait pu répondre plus rapidement par une telle pile en fonctionnement que par une série d'expériences à petite échelle. Malheureusement, les quantités nécessaires de matériel n'ont pas été disponibles et n'ont pas été disponibles pendant près de neuf mois. Par conséquent, il était nécessaire de choisir la deuxième alternative, c'est-à-dire d'accumuler toutes les informations pertinentes ou éventuellement pertinentes par tous les moyens disponibles.

6.22. La principale ligne de recherche a été une série d'expériences intermédiaires. La configuration particulière de chaque expérience intermédiaire pourrait être utilisée pour tester des calculs basés sur des expériences auxiliaires distinctes. Par exemple, la proportion d'oxyde d'uranium par rapport au graphite a été modifiée, des oxydes de différentes puretés ont été utilisés, l'oxyde a été utilisé en morceaux de différentes tailles et formes et de compression, l'espacement des réseaux a été modifié, l'effet d'entourer les unités d'oxyde d'uranium de béryllium et de paraffin a été essayé ; et, enfin, des piles de type de réseau identique mais de taille totale différente ont été essayées pour voir si les valeurs du facteur de multiplication k (par exemple taille infinie) calculés à partir des différents ensembles de résultats étaient identiques. En général, E. Fermi était directement responsable de l'étude des effets des impuretés, et S. K. Allison était responsable des essais impliquant différentes dimensions du réseau. Toutes ces expériences renforcèrent la confiance du groupe dans la valeur calculée de k et dans la croyance qu'une pile pouvait être construite avec k supérieur à l'unité. En juillet, on disposait d'une quantité suffisante d'oxyde d'uranium purifié provenant de Mallinckrodt pour permettre la construction de la pile intermédiaire n° 9. Comme dans les expériences précédentes, une source de neutrons radiumbéryllium a été placée au bas de la structure du réseau et la densité neutronique a été mesurée le long de l'axe vertical de la pile. À cette époque, on savait que la densité neutronique diminuait exponentiellement avec l'augmentation de la distance par rapport à la source de neutrons (d'où le nom souvent utilisé pour les expériences de ce type, « pile exponentielle ») et que, à partir de ces vitesses de diminution, la constante de multiplication k pour un empilement infiniment grand des mêmes proportions de réseau pouvait être calculée. Pour la première fois, la constante de multiplication k , ainsi calculée à partir des résultats expérimentaux, est supérieure à un. (La valeur réelle était de 1,007.) Même avant cette expérience, Compton avait prédit dans son rapport du 1er juillet qu'une

valeur de k comprise entre 1,04 et 1,05 pourrait être obtenue dans un tas contenant de l'oxyde d'uranium hautement purifié et du graphite, à condition que l'air soit retiré du tas pour éviter l'absorption de neutrons par l'azote.

UNE EXPÉRIENCE AUXILIAIRE ; NEUTRONS RETARDÉS

6.23. Nous ne mentionnerons pas la majorité des diverses expériences auxiliaires faites au cours de cette période. Il y en avait une, cependant, — l'étude des neutrons retardés — dont nous parlerons parce que c'est un bon exemple du genre d'expérience qu'il fallait faire et parce qu'elle concernait un effet, qui n'a pas été mentionné jusqu'ici, et qui est d'une grande importance pour contrôler un tas à réaction en chaîne.

6.24. D'après des recherches antérieures, dont certaines ont déjà été publiées, on savait qu'environ 1 % des neutrons émis lors des processus de fission n'étaient pas éjectés immédiatement, mais qu'ils étaient émis en quantité décroissante au cours d'une période de temps, ce qui rappelle l'émission de rayons bêta par des substances radioactives à courte durée de vie. Plusieurs demi-vies avaient été observées, la plus longue étant de l'ordre de la minute.

6.25. On s'est vite rendu compte que ce retard donnait une sorte d'inertie à la réaction en chaîne qui devrait grandement faciliter le contrôle. Si le facteur de multiplication effectif d'une pile devenait légèrement supérieur à 1, la densité neutronique ^{n'augmenterait} pas presque instantanément jusqu'à des valeurs dangereusement élevées, mais augmenterait progressivement de sorte qu'il y aurait une chance pour les contrôles de fonctionner. (D'autres intervalles de temps impliqués, tels que ceux entre les collisions, sont trop petits pour être utiles.)

6.26. En raison de l'importance de cet effet des neutrons retardés pour le contrôle, il a été décidé de répéter et d'améliorer les mesures antérieures. (Le fait qu'il s'agisse d'une répétition plutôt que d'une nouvelle mesure est également typique d'une grande partie des travaux en physique de cette période.) Une description de l'expérience est donnée à l'annexe 3. Les résultats indiquent

que 1,0 % des neutrons émis lors de la fission de l'uranium sont retardés d'au moins 0,01 seconde et qu'environ 0,7 % sont retardés d'une minute. En concevant un empilement tel que la valeur effective de k , le facteur de multiplication, ne soit que de 1,01, le nombre de neutrons retardés est soixant pour permettre un contrôle facile.

LE PREMIER PIEU AUTOPORTANT À RÉACTION EN CHAÎNE

6.27. À l'automne 1942, il y avait suffisamment de graphite, d'oxyde d'uranium et d'uranium métal à Chicago pour justifier une tentative de construction d'un véritable tas auto-entretenu à réaction en chaîne. Mais la quantité de métal disponible était faible – seulement environ 6 tonnes – et les autres matériaux n'étaient pas très abondants et de qualité variable. Ce sont ces conditions, plutôt qu'une efficacité optimale, qui ont contrôlé la conception.

6.28. Le pieu a été construit selon le principe du treillis avec du graphite comme modérateur et des morceaux de métal ou d'oxyde comme unités réagissantes régulièrement espacées à travers le graphite pour former le treillis. Des instruments situés en divers points de la pile ou à proximité de celle-ci indiquaient l'intensité des neutrons, et des bandes mobiles de matériau absorbant servaient de contrôle. (Pour une description plus complète de la pile, voir l'annexe 4.) Étant donné qu'il devait y avoir des neutrons provenant de la fission spontanée ou d'autres sources, on s'attendait à ce que la réaction commence dès que la structure aurait atteint sa taille critique si les bandes de contrôle n'étaient pas placées en position « retardée ». Par conséquent, les bandes de contrôle ont été placées dans une position « retardée » appropriée dès le départ et l'intensité neutronique a été mesurée fréquemment. C'était une chance, car on a constaté que l'approche de l'état critique se produisait à un stade plus précoce de l'assemblage que prévu.

6.29. Le pieu a été exploité pour la première fois en tant que système autosuffisant le 2 décembre 1942. Pour autant que nous le sachions, c'était la première fois que des êtres humains initiaient une réaction

nucléaire en chaîne auto-entretenu. Initialement, la pile fonctionnait à un niveau de puissance de h watt, mais le 12 décembre, le niveau de puissance a été porté à 200 watts.

ÉNERGIE DÉVELOPPÉE PAR LE PIEU

6.30. Dans ces expériences, aucune mesure directe de la libération d'énergie n'a été effectuée. Le nombre de neutrons par seconde émis

par le tas a été estimé en termes d'activité des feuilles d'indium standardisées. Ensuite, à partir d'une connaissance du nombre de neutrons produits par fission, le taux de libération d'énergie résultant (puissance) a été calculé.

CONCLUSION > ?

6.31. De toute évidence, cette expérience, exécutée le 2 décembre au moment même où un comité d'examen évaluait le projet de Chicago, a répondu sans l'ombre d'un doute à la première question posée au Laboratoire métallurgique ; Une réaction nucléaire en chaîne auto-entretenu avait été produite dans un système utilisant de l'uranium normal. Cette expérience avait été réalisée sous la direction générale de E. Fermi, assisté principalement par les groupes dirigés par W. H. Zinn et H. L. Anderson. V. C. Wilson et son groupe avaient été en grande partie responsables de la mise au point des instruments et des commandes, et un grand nombre d'autres personnes dans le laboratoire avaient contribué au succès de l'entreprise.

RELATION ENTRE L'ÉNERGIE ET LA PRODUCTION DE PLUTONIUM

6.32. L'objectif immédiat de la construction d'un tas d'uranium et de graphite était de prouver qu'il y avait des conditions dans lesquelles une réaction en chaîne se produirait, mais l'objectif ultime du laboratoire était de produire du plutonium par réaction en chaîne. Par conséquent, nous nous intéressons à la relation entre la puissance à laquelle un tas fonctionne et la vitesse à laquelle il produit du plutonium. La relation peut être évaluée à une première approximation assez facilement. Un pieu fonctionnant de manière stable doit produire autant de neutrons

qu'il en perd. Pour chaque neutron thermique absorbé dans l'U-235, un certain nombre de neutrons, 1,7, sont émis. L'un de ces neutrons est nécessaire au maintien de la chaîne. Par conséquent, en supposant que les neutrons supplémentaires soient tous absorbés par l'U-238 pour former du plutonium, il y aura 1 atome de Pu 239 formé pour chaque fission. Chaque fission libère environ 200 Mev d'énergie. Par conséquent, la formation de — 1 atome de plutonium accompagne la libération d'environ 200 Mev. Puisque — 1 est un petit nombre, on peut supposer que pour produire un kilogramme de plutonium par jour, un tas à réaction en chaîne doit libérer de l'énergie à un rythme de 500 000 à 1 500 000 kilowatts. Le premier pile à réaction en chaîne que nous venons de décrire fonctionnait à un maximum de 200 watts. En supposant qu'une seule bombe nécessitera de l'ordre de 1 à 100 kilogrammes de plutonium, le tas qui a été décrit devrait être maintenu en vie pendant au moins 70 000 ans pour produire une seule bombe. De toute évidence, le problème de la production en quantité de plutonium n'était pas encore résolu.

LA CHIMIE DU PLUTONIUM

6.33. Le deuxième objectif spécifique du Laboratoire métallurgique était de montrer que, si une réaction en chaîne se produisait, il serait possible de séparer chimiquement le plutonium des autres matériaux avec lesquels il se trouve. Les progrès vers cet objectif étaient nécessairement plus lents que vers la réalisation d'une réaction en chaîne. Au début, peu de choses ont été faites au Laboratoire métallurgique sur les problèmes chimiques, bien que le problème de l'extraction ait été discuté lors d'une conférence peu de temps après l'organisation du projet et que les travaux du groupe de Seaborg à l'Université de Californie sur le plutonium aient été encouragés. Les 22 et 23 avril 1942, une conférence générale sur la chimie s'est tenue à Chicago, à laquelle ont participé F. H. Spedding, E. W. Thiele, G. T. Seaborg, J. W. Kennedy, H. C. Urey, E. Wigner, N. Hilberry, G. E. Boyd, I. B. Johns, H. A. Wilhelm, I. Perlman, A. C. Wahl et J. A. Wheeler. Spedding, en ouvrant la réunion, a

souligné qu'il y avait deux tâches principales pour les chimistes : premièrement, séparer le plutonium dans les quantités et la pureté requises pour les besoins de la guerre ; Deuxièmement, obtenir une bonne compréhension de la chimie nécessaire à la construction et à l'entretien du pile. Le problème de la séparation devait être étudié par un nouveau groupe à Chicago sous la direction de Seaborg, par Johns et Wilhelm à Ames, et par Wahl et Kennedy continuant le travail en Californie. D'autres groupes étroitement apparentés à Chicago devaient être celui de C. D. Coryell, travaillant sur les produits de fission, et celui de Boyd sur les problèmes analytiques. Le groupe de chimie de Chicago s'est rapidement développé depuis lors. Un nouveau bâtiment a dû être construit pour l'abriter à la fin de 1942, et ce bâtiment a été agrandi par la suite. Dans l'ensemble, la résolution d'un grand nombre de problèmes chimiques a été l'une des réalisations les plus remarquables du Laboratoire métallurgique.

6.34. Le premier isotope du plutonium découvert et étudié n'était pas l'isotope 239 mais l'isotope 238, qui est un émetteur de rayons alpha avec une demi-vie d'environ 50 ans. L'U-238 bombardé de deutérons donne du ${}^{93}\text{Np} 238$ qui se désintègre en ${}^{94}\text{Pu} 238$ par émission bêta. La première preuve de l'existence réelle de ces nouveaux éléments (excluant l'interprétation erronée originale de la scission de l'uranium comme preuve de leur existence) a été obtenue par E. McMillan et P. H. Abelson qui ont isolé ${}^{93}\text{Np} 238$ de l'uranium bombardé de deutérons dans le cyclotron de Berkeley. Ce nouvel élément a été identifié comme un émetteur bêta, mais l'échantillon était trop petit pour l'isolement du produit fille ${}^{94}\text{Pu} 238$. Plus tard, suffisamment de ${}^{94}\text{Pu} 238$ a été préparé pour permettre à Seaborg, Kennedy et Wahl de commencer l'étude de ses propriétés chimiques au cours de l'hiver 1940-1941 en utilisant la chimie des traceurs avec des porteurs selon la pratique habituelle en radiochimie. De telles études ont permis de déterminer de nombreuses propriétés chimiques du plutonium, et plusieurs processus chimiques possibles ont été mis au point par lesquels le ${}^{94}\text{Pu} 239$ pourrait être éliminé de la pile à réaction en chaîne. Le succès des

expériences à l'échelle du traceur a conduit à des plans pour produire suffisamment de Pu-239 pour être traité comme une substance ordinaire à l'échelle ultra-microchimique. De telles quantités ont été produites par un bombardement prolongé de plusieurs centaines de livres de nitrate d'uranyle avec des neutrons obtenus à l'aide de cyclotrons, d'abord à Berkeley et plus tard à l'Université Washington à Saint-Louis. À la fin de 1942, on avait obtenu quelque chose de plus de 500 microgrammes sous forme de sels de plutonium purs. Bien que cette quantité soit inférieure à ce qu'il faudrait pour faire la tête d'une épingle, pour les micro-chimistes, elle était suffisante pour fournir des renseignements considérables ; car un microgramme est considéré comme suffisant pour effectuer des expériences de pesée, des titrages, des études de solubilité, etc.

6.35. D'après sa position dans le tableau périodique, on peut s'attendre à ce que le plutonium soit similaire aux terres rares ou à l'uranium, * Voir dessin à la p. 8.

thorium, ou osmium. Lequel d'entre eux il ressemblera le plus dépend, bien sûr, de l'arrangement des groupes d'électrons les plus externes et cet arrangement aurait difficilement pu être prédit. Dans l'ensemble, le plutonium s'est avéré être plus proche de l'uranium que de n'importe lequel des autres éléments nommés et pourrait même être considéré comme le deuxième membre d'une nouvelle série de terres rares commençant par l'uranium. On a découvert assez tôt qu'il y avait au moins deux états d'oxydation du plutonium. (On sait maintenant qu'il y en a quatre, correspondant à des valences positives de 3, 4, 5 et 6.) La préparation microchimique réussie de certains sels de plutonium et l'étude de leurs propriétés ont conduit à la conclusion générale qu'il était possible de séparer chimiquement le plutonium des autres matériaux de la pile. Cette conclusion représente l'atteinte du deuxième objectif immédiat du Laboratoire métallurgique. Ainsi, à la fin de l'année 1942, le plutonium, totalement inconnu dix-huit mois plus tôt, était considéré comme un élément dont le

comportement chimique était aussi bien compris que celui de plusieurs éléments de l'ancien tableau périodique.

ÉTUDES DIVERSES

6.36. Outre les problèmes majeurs que nous avons mentionnés, c'est-à-dire la réaction en chaîne, la séparation chimique et la planification d'une installation de production, il y avait d'innombrables problèmes mineurs à résoudre. Parmi les plus importants d'entre eux figuraient l'amélioration des compteurs de neutrons, des chambres d'ionisation et d'autres instruments, l'étude de la corrosion de l'uranium et de l'aluminium par l'eau et d'autres liquides de refroidissement possibles, la détermination des effets de la variation de température sur les sections efficaces des neutrons, la fabrication de barres et de tubes d'uranium, l'étude des produits de fission et la détermination des effets biologiques des rayonnements. Comme typique de ce genre de travail, nous pouvons citer la mise au point de méthodes de fabrication et de revêtement de l'uranium métallique, sous la direction de E. Creutz. Sans la réalisation de ces enquêtes secondaires, le projet n'aurait pas pu atteindre son objectif. Pour donner une idée plus précise de l'ampleur des travaux, une liste d'une vingtaine de titres de rapports est présentée à l'annexe 5, les 20 rapports étant choisis parmi les quelque 400 publiés au cours de l'année 1942.

LA RÉACTION À NEUTRONS RAPIDES

6.37. Le troisième objectif initial du projet métallurgique était d'obtenir des données théoriques et expérimentales sur une réaction à neutrons rapides, telle qu'elle serait nécessaire dans une bombe atomique. Cet aspect du travail a été initialement planifié et coordonné par G. Breit de l'Université du Wisconsin, puis poursuivi par J. R. Oppenheimer de l'Université de Californie. Étant donné que la construction de la bombe devait être la dernière partie du programme, l'urgence d'étudier de telles réactions n'était pas si grande. Par conséquent, peu d'attention a

été accordée aux problèmes théoriques jusqu'à l'été 1942, lorsqu'un groupe a été organisé à Chicago sous la direction d'Oppenheimer.

6.38. Dans l'intervalle, des travaux expérimentaux initiés, dans la plupart des cas, par G. Breit, étaient en cours (sous la direction générale du Projet métallurgique) dans diverses institutions disposant d'équipements adaptés aux études à neutrons rapides (Carnegie Institution de Washington, National Bureau of Standards,

Université Cornell, Université Purdue, Université de Chicago,

Université du Minnesota, Université du Wisconsin, Université de

Californie, Université de Stanford, Université de l'Indiana et

Rice Institute). Les problèmes étudiés concernaient la diffusion,

l'absorption et la section efficace de fission, le spectre d'énergie

des neutrons de fission et le délai d'émission des neutrons de

fission. Pour l'essentiel, ces travaux ont représenté une étape

intermédiaire dans la confirmation et l'extension des mesures

précédentes, mais n'ont pas abouti à une nouvelle conclusion

finale. Ce type de travail s'est ensuite concentré sur un autre site

(voir chapitre XII).

6.39. Comme l'indique le rapport de faisabilité (dans une section

rédigée par J. H. Manley, J. R. Oppenheimer, R. Serber et E.

Teller), la situation n'a changé de manière significative que sur

un point depuis la parution du rapport de l'Académie nationale

un an plus tôt. Des études théoriques montraient maintenant que

l'efficacité de la bombe atomique à produire des dommages

serait plus grande que ce qui avait été indiqué dans le rapport de

l'Académie nationale. Cependant, la taille critique de la bombe

était encore inconnue. Les méthodes de détonation de la bombe

ont été quelque peu étudiées, mais dans l'ensemble, aucune

réponse certaine n'a été trouvée.

PARTIE 11 : PROGRÈS VERS LA OBJECTIF ULTIME

PLANIFICATION D'UNE USINE DE PRODUCTION

PLANIFICATION ET TRAVAUX TECHNIQUES

6.40. Comme nous l'avons vu, les objectifs initiaux du Laboratoire métallurgique avaient été atteints à la fin de 1942, mais les objectifs ultimes, à savoir la production de grandes quantités de plutonium et la conception et la fabrication de bombes, étaient encore loin d'être atteints. La responsabilité de la conception et de la fabrication des bombes a été transférée à un autre groupe à peu près à la même époque. Ses travaux sont rapportés au chapitre X II. La production de Pu-239 en quantité est demeurée la responsabilité principale du Laboratoire métallurgique, bien qu'elle soit partagée avec la Compagnie du Pont depuis la fin de 1942.

6.41 Sur la base des éléments de preuve disponibles, il est clair qu'un taux de production de plutonium compris entre un kilogramme par mois et un kilogramme par jour serait nécessaire. À raison d'un kilogramme par jour, une centrale de 500 000 à 1 500 000 kilowatts serait nécessaire. (La capacité finale des centrales hydroélectriques du barrage de Grand Coulee devrait être de 2 000 000 kw.) De toute évidence, la création d'une usine de production de plutonium de la taille requise devait être une entreprise majeure, même sans essayer d'utiliser l'énergie thermique libérée. Néanmoins, en novembre 1942, la plupart des problèmes avaient été bien définis et des solutions provisoires avaient été proposées. Bien que ces problèmes soient discutés en détail dans le chapitre suivant, nous les mentionnerons ici.

6.42. Étant donné qu'une grande quantité de chaleur est générée dans tout tas produisant des quantités appréciables de plutonium, le premier problème de conception est celui d'un système de refroidissement. Avant de pouvoir concevoir un tel système, il est nécessaire de trouver la température maximale à laquelle un pieu peut fonctionner en toute sécurité et les facteurs – nucléaires ou structurels – qui déterminent cette température. Un autre

problème majeur est la méthode de chargement et de déchargement de l'uranium, un problème compliqué par le blindage et le système de refroidissement. Un blindage contre les rayonnements doit être prévu à la fois pour le tas lui-même et pour l'installation de séparation chimique. La nature de l'installation de séparation dépend du procédé de séparation particulier à utiliser, qui doit être décidé. Enfin, la rapidité d'approvisionnement et de construction doit être un facteur primordial dans la planification de la pile et de l'usine chimique.

TYPES DE PLANTES POSSIBLES

6.43. Après avoir examiné les principaux facteurs influençant la conception de l'installation, c'est-à-dire le refroidissement, l'efficacité, la sécurité et la rapidité de construction, le « Rapport de faisabilité » a suggéré un certain nombre de types d'installations possibles dans l'ordre de préférence suivant :

I. (a) Réseau métallique d'uranium ordinaire dans un modérateur en graphite avec refroidissement à l'hélium. (b) Le même, avec refroidissement par eau. c) Le même, avec refroidissement au bismuth fondu.

II. Treillis métallique ordinaire d'uranium dans un modérateur
d'eau lourde

Ator.

Uranium enrichi en isotope 235 en utilisant du graphite, de l'eau lourde ou de l'eau ordinaire comme modérateur.

Les types II et III n'avaient pas d'intérêt immédiat car il n'y avait pas d'uranium enrichi ni d'eau lourde. Le développement de ces deux types s'est cependant poursuivi, car si aucun autre type ne s'avérait réalisable, ils pourraient devoir être utilisés. Le type I (c), qui prévoit un refroidissement au bismuth liquide, semble très prometteur du point de vue de l'utilisation de l'énergie thermique libérée, mais on estime que les problèmes techniques ne pourront pas être résolus avant longtemps.

6.44. Au cours de cette période, au cours du second semestre de 1942, alors que des usines de production étaient en cours de planification, il a été reconnu qu'une usine de taille intermédiaire était souhaitable. Une telle usine était nécessaire pour deux raisons : premièrement, en tant qu'usine pilote ; deuxièmement, en tant que producteur de quelques grammes de plutonium dont on a cruellement besoin à des fins expérimentales. Conçue comme une usine refroidie par air d'une capacité de 1 000 kW, la pile intermédiaire construite à Clinton, dans le Tennessee, aurait pu servir à ces deux fins si le refroidissement à l'hélium avait été conservé pour l'usine principale. Bien que les plans de l'usine principale aient été modifiés de manière à ce que le refroidissement par eau soit nécessaire, l'usine pilote a continué à refroidir par air dans l'espoir que le deuxième objectif serait atteint plus rapidement. Elle cessa donc d'être une usine pilote, sauf pour la séparation chimique. En fait, la centrale principale a été construite sans bénéficier d'une véritable usine pilote, un peu comme si les générateurs hydroélectriques de Grand Coulee avaient été conçus simplement à partir de l'expérience acquise avec un générateur d'un type tout à fait différent et d'une petite fraction de la puissance.

PROPOSITIONS SPÉCIFIQUES

6.45. Tel qu'il a été examiné par Hilberry dans le « Rapport de faisabilité » du 26 novembre 1942, les perspectives d'un tas de graphite refroidi à l'hélium semblaient prometteuses en ce qui concerne la production immédiate ; Le tas utilisant de l'eau lourde comme modérateur et utilisant de l'eau lourde ou de l'eau ordinaire comme liquide de refroidissement semblait mieux pour une utilisation à grande échelle. Un certain nombre de propositions concrètes ont été faites pour la construction de telles installations et pour l'étude plus approfondie des problèmes qui s'y rattachent. Ces propositions étaient fondées sur des estimations de temps et de coûts qui n'étaient nécessairement guère meilleures que des suppositions approximatives. À la suite d'une enquête plus approfondie, le programme de construction décrit dans les chapitres suivants a été très différent de celui proposé.

RÉSUMÉ

6.46. Le problème de l'approvisionnement, qui avait retardé les progrès, était pour l'essentiel résolu à la fin de 1942. Un petit auto-

La pile de graphite-uranium a été construite en novembre 1942 et a été mise en service pour la première fois le 2 décembre 1942, à un niveau de puissance de 10^1 watt et plus tard à 200 watts. Il était facilement contrôlable grâce au phénomène d'émission retardée de neutrons. Au total, 500 microgrammes de plutonium ont été fabriqués avec le cyclotron et séparés chimiquement de l'uranium et des produits de fission. On en a appris suffisamment sur la chimie du plutonium pour indiquer la possibilité d'une séparation à une échelle relativement grande. Il n'y a pas eu de grands progrès dans la théorie des bombes, mais les calculs ont été vérifiés et les expériences avec les neutrons rapides ont été étendues. Au contraire, les perspectives d'attentat à la bombe semblaient plus favorables qu'un an plus tôt.

6.47. Suffisamment d'expériences et de planification ont été faites pour définir les problèmes à rencontrer lors de la construction et de l'exploitation d'une usine de production à grande échelle. Quelques progrès v..^{Le} premier choix à l'époque était un tas d'uranium métallique et de graphite, refroidi soit à l'hélium, soit à l'eau. Un programme spécifique a été élaboré pour la construction d'usines pilotes et de production. Ce programme présentait des estimations de temps et de coûts.

CHAPITRE VII. LA PRODUCTION DE PLUTONIUM PROBLÈME EN FÉVRIER 1943

INTRODUCTION

NÉCESSITÉ DE PRENDRE DES DÉCISIONS

7.1. Au premier janvier 1943, le Laboratoire métallurgique avait atteint son premier objectif, un tas à réaction en chaîne, et était en bonne voie pour le second, un procédé d'extraction du plutonium produit dans un tel tas. Il était clairement temps de formuler des plans plus précis pour une usine de production. Les décisions politiques ont été prises par le Comité d'orientation (voir le chapitre V) sur les recommandations du directeur du laboratoire (A. H. Compton), du Comité exécutif du S-1 et du Comité d'examen qui s'était rendu à Chicago en décembre 1942. Les seules décisions qui avaient déjà été prises étaient que la première pile à réaction en chaîne devait être démantelée puis reconstruite sur un site à une courte distance de Chicago et qu'une usine de plutonium de 1 000 kilowatts devait être construite à Clinton, dans le Tennessee.

L'ÉCHELLE DE PRODUCTION

7.2. La première décision à prendre concernait l'échelle de production à tenter. Pour des raisons de sécurité, le chiffre retenu ne peut être divulgué ici. C'était très grand.

LA NIAGNITUDE DU PROBLÈME

7.3. Comme nous l'avons vu, la production d'un gramme de plutonium par jour correspond à une production d'énergie de 500 à 1 500 kilowatts. Par conséquent, une usine de production à grande échelle de plutonium libérera une très grande quantité d'énergie.

108

Le problème était donc de concevoir une installation de cette capacité sur la base de l'expérience acquise avec un pieu qui ne pouvait fonctionner qu'à un niveau de puissance de 0,2 kilowatt. En ce qui concerne les travaux de séparation du plutonium, ce qui est tout aussi

important, il est nécessaire d'élaborer les plans d'une installation d'extraction et d'épuration qui séparerait quelques grammes par jour de plutonium de quelques tonnes d'uranium, et cette planification doit être basée sur des informations obtenues par des études microchimiques ne portant que sur un demi-milligramme de plutonium. Certes, il y avait des informations disponibles pour la conception de l'usine de tas et de séparation à grande échelle provenant d'expériences auxiliaires et d'études à grande échelle de procédés de séparation utilisant l'uranium comme substitut du plutonium, mais même ainsi, les extrapolations proposées à la fois en ce qui concerne les piles à réaction en chaîne et les processus de séparation étaient stupéfiantes. En temps de paix, aucun ingénieur ou scientifique sain d'esprit n'envisagerait de faire un tel grossissement en une seule étape, et même en temps de guerre, seule la possibilité d'obtenir des résultats extrêmement importants pourrait le justifier.

ATTRIBUTION DE RESPONSABILITÉ

7.4. Dès qu'il a été décidé de procéder à la production à grande échelle de plutonium, il est apparu évident qu'une grande expansion de l'organisation était nécessaire. La Stone and Webster Engineering Corporation avait été choisie comme société d'ingénierie et de construction pour le projet DSNi peu de temps après que le district de Manhattan ait été chargé des travaux de construction en juin 1942. En octobre 1942, il est devenu évident que les différentes parties constitutives du travail étaient trop éloignées physiquement les unes des autres et étaient trop compliquées techniquement pour être prises en charge par une seule entreprise, en particulier compte tenu du rythme rapide requis. Par conséquent, il a été décidé qu'il serait avantageux que Stone et Webster soient déchargés de la partie des travaux relatifs à la construction d'installations de production de plutonium. C'est ce qui fut fait, et le général Groves choisit la E. I. du Pont de Nemours and Company comme la firme la plus apte à poursuivre cette phase des travaux. Les accords conclus avec diverses entreprises industrielles par le district de Manhattan ont pris des formes diverses. Les accords avec du Pont sont discutés en détail à titre d'exemple.

7.5. Le général Groves soumit la question à W. S. Carpenter, Jr., président de du Pont, et après de longues discussions avec lui et d'autres fonctionnaires de la firme, du Pont accepta d'entreprendre le travail. Dans leur acceptation, ils ont clairement indiqué et il a été compris par tous les intéressés que du Pont n'entreprenait le travail que parce que le ministère de la Guerre considérait le travail comme de la plus haute importance, et parce que le général Groves a déclaré que ce point de vue quant à l'importance était un point de vue personnellement partagé par le président des États-Unis. le secrétaire à la Guerre, le chef d'état-major et le général Groves, et à cause de l'affirmation du général Groves selon laquelle du Pont était de loin l'organisation la mieux qualifiée pour le poste. En même temps, on reconnaissait que la Compagnie du Pont avait déjà assumé toutes les activités liées à la guerre que l'on pouvait s'attendre à ce que son organisation existante s'acquitte sans trop de difficultés.

7.6. La Compagnie du Pont, en acceptant l'engagement, a insisté pour que les travaux soient exécutés sans profit et sans droits de brevet d'aucune sorte. La Compagnie du Pont a toutefois demandé que, compte tenu du caractère inconnu du champ dans lequel elle était invitée à s'embarquer et des risques imprévisibles encourus, le gouvernement lui fournisse une protection maximale contre les pertes subies par du Pont.

7.7. Le contrat de coût majoré d'honoraires fixes conclu entre le gouvernement et du Pont prévoyait des honoraires fixes de 1,00 \$. Le gouvernement a accepté de payer tous les coûts des travaux par remboursement direct ou par le biais d'indemnités prévues au contrat pour couvrir les frais administratifs et généraux affectés aux travaux conformément aux pratiques comptables normales de du Pont, telles que déterminées par une vérification effectuée par des experts-comptables agréés. Aux termes du contrat, toute partie de ces indemnités qui n'a pas été réellement dépensée par du Pont sera, à la fin des travaux, retournée aux États-Unis. Le contrat prévoyait également qu'aucun droit de brevet ne reviendrait à l'entreprise.

7.8. Les responsabilités spécifiques assumées par du Pont étaient d'concevoir, de concevoir et de construire une semi-usine à petite

échelle à Clinton Engineer Works dans le Tennessee et d'concevoir, concevoir, construire et exploiter une usine de production de plutonium à grande échelle de grande capacité à Hanford Engineer Works dans l'État de Washington. En raison de ses liens étroits avec la recherche fondamentale, la semi-usine Clinton devait être exploitée sous la direction de l'Université de Chicago. Un grand nombre de techniciens clés de du Pont devaient être prêtés à Chicago et à Clinton, afin de fournir à l'université le personnel dont elle avait grand besoin, en particulier des hommes ayant une expérience industrielle, et de former certains de ces personnels pour un service futur à Hanford.

7.9. Dans la mesure où l'on demandait à du Pont de sortir de son rôle habituel en chimie pour s'intéresser à un nouveau domaine impliquant la physique nucléaire, il a été convenu qu'il serait nécessaire pour eux de dépendre le plus fortement possible du Metallurgical Laboratory de l'Université de Chicago pour obtenir des données sur la recherche et le développement fondamentaux et pour obtenir des conseils. La Compagnie du Pont avait de l'expérience en ingénierie et en industrie, mais elle avait besoin du Laboratoire métallurgique pour acquérir de l'expérience en physique nucléaire et en radiochimie. Le Laboratoire métallurgique a mené des recherches fondamentales sur les problèmes relatifs à la conception et à l'exploitation des semi-usines et des grandes installations de production. Il a proposé les parties essentielles des processus et de l'équipement de production et de récupération du plutonium, a répondu aux nombreuses questions spécifiques soulevées par du Pont et a étudié et approuvé les décisions et les conceptions finales de du Pont.

7.10. L'objectif principal de la semi-usine Clinton était la mise au point de méthodes d'exploitation pour la récupération du plutonium. Les semi-usines devaient comporter, bien sûr, une unité de production de plutonium, afin de fournir du plutonium à récupérer expérimentalement. À l'époque et avec les informations disponibles, l'unité de production de Clinton ne pouvait pas être conçue pour être une première édition des unités de production de Hanford qui, par conséquent, devaient être conçues, construites et exploitées sans une orientation majeure de l'expérience de Clinton. En fait, même les

unités de récupération de Hanford ont dû être très avancées dans la conception et l'approvisionnement en équipement avant que les résultats de Clinton ne soient disponibles. Cependant, les semi-usines Clinton se sont avérées être un outil extrêmement important dans la solution des nombreux problèmes complètement nouveaux rencontrés à Hanford. Il a également produit de petites quantités de plutonium qui, avec les données du Laboratoire métallurgique sur les propriétés du plutonium, ont permis d'avancer de plusieurs mois dans la recherche sur l'utilisation de ce matériau.

CHOIX DU SITE DE L'USINE

7.11. Une fois que l'échelle de production a été convenue et que les responsabilités ont été attribuées, il a fallu décider de la nature de l'usine et de son emplacement. Le site de la vallée du Tennessee, connu sous le nom de Clinton Engineer Works, avait été acquis par l'armée pour l'ensemble du programme, comme recommandé dans le rapport au président (voir chapitre V).

7.12. Un réexamen à la fin de 1942 a conduit General Groves à la conclusion que ce site n'était pas suffisamment isolé pour une usine de production de plutonium à grande échelle. À cette époque, il était concevable que des conditions puissent se produire dans lesquelles un grand tas pourrait répandre des matières radioactives sur une zone suffisamment grande pour mettre en danger les centres de population voisins. En plus de l'exigence d'isolement, il restait l'exigence d'une grande alimentation électrique qui avait initialement déterminé le choix du site du Tennessee. Pour répondre à deux exigences, un nouveau site a été choisi et acquis sur le fleuve Columbia, dans la partie centrale de l'État de Washington, près de la ligne électrique de Grand Coulee. Ce site était connu sous le nom de Hanford Engineer Works.

7.13. Étant donné que le fleuve Columbia est la meilleure source d'eau pure et froide de ce pays, le site de Hanford convenait bien à l'usine refroidie à l'hélium prévue à l'origine ou à l'usine refroidie à l'eau qui a été construite. Les grandes distances qui séparaient le siège social de du Pont à Wilmington, dans le Delaware, l'usine pilote de Clinton, dans

le Tennessee, le laboratoire métallurgique de Chicago et le site de Hanford étaient extrêmement gênantes, mais cette séparation ne pouvait être évitée. Des difficultés ont également été rencontrées

inhérent à l'arrivée d'ouvriers sur le chantier et à la mise à leur disposition d'un logement.

CHOIX DU TYPE DE PLANTE

7.14. Il était vraiment trop tôt dans le développement pour prendre une décision mûrement réfléchie quant au meilleur type d'installation de production de plutonium. Pourtant, il a fallu faire un choix pour que la conception puisse commencer et que la construction puisse commencer le plus tôt possible. En fait, un choix provisoire a été fait, puis modifié.

7.15. En novembre 1942, l'usine refroidie à l'hélium est le premier choix du Laboratoire métallurgique. Sous la direction de T. Moore et de M. C. Leverett, des plans préliminaires pour une telle usine avaient été élaborés. Les études de conception associées ont servi de base au choix du site, au choix des équipements accessoires, etc. Bien que ces études aient été entreprises en partie parce qu'on avait estimé qu'elles pouvaient être réalisées plus rapidement pour une installation refroidie à l'hélium que pour une installation refroidie à l'eau, de nombreuses difficultés ont été reconnues. Dans l'intervalle, le groupe théorique dirigé par ^{M.}ligner, avec la coopération du personnel d'ingénierie, avait demandé à préparer un rapport sur une installation refroidie à l'eau et de grande puissance. Ce groupe s'était intéressé au watercooling presque dès le début du projet et a pu intégrer les résultats de ses études dans un rapport publié le 9 janvier 1943. Ce rapport contenait de nombreuses idées importantes qui ont été incorporées dans la conception de l'usine de production érigée à Hanford.

7.16. Lorsque du Pont est entré en scène, il a d'abord accepté la proposition d'une usine refroidie à l'hélium, mais après une étude plus approfondie, il a décidé en faveur du refroidissement par eau. Les raisons de ce changement sont nombreuses. Les éléments les plus souvent mentionnés étaient le risque de fuite d'un liquide de refroidissement gazeux à haute pression transportant des impuretés radioactives, la difficulté d'obtenir rapidement de grandes soufflantes, la grande quantité d'hélium

nécessaire, la difficulté de charger et de décharger l'uranium de la pile et la puissance de sortie relativement faible par kilogramme d'uranium métallique. Ces considérations devaient être mises en balance avec les inconvénients particuliers d'une installation refroidie, principalement la plus grande complexité de la pile elle-même et les dangers de corrosion.

7.17. Comme c'est souvent le cas dans le cadre de ce projet, le choix entre différents types de plantes a dû être basé sur des informations scientifiques incomplètes. Les informations sont encore incomplètes, mais il est généralement admis que le refroidissement par eau était le choix judicieux.

LES PROBLÈMES DE LA CONCEPTION DES INSTALLATIONS

SPÉCIFICATION DE L'ENSEMBLE DU PROBLÈME

7.18. Dans le chapitre II du présent rapport, nous avons essayé de définir le problème général du projet uranium tel qu'il se présentait à l'été 1940. Nous voulons maintenant définir précisément le problème de la conception d'une grande usine de production de plutonium. L'objectif avait déjà été délimité par des décisions quant à l'échelle de production, au type d'usine et au site. Dans l'état actuel des choses, le problème spécifique consistait à concevoir un tas modéré au graphite refroidi à l'eau (ou plusieurs tas de ce type) avec une usine de séparation chimique associée pour produire une quantité spécifiée et relativement importante de plutonium chaque jour, l'usine devant être construite sur le site de Hanford, au bord du fleuve Columbia. Inutile de dire que la rapidité de la construction et l'efficacité de l'exploitation étaient des considérations primordiales.

NATURE DU TREILLIS

7.19. Les réseaux que nous avons décrits jusqu'à présent étaient constitués de morceaux d'uranium incrustés dans le modérateur en graphite. Il y a deux objections à l'utilisation d'un tel type de

treillis à des fins de production : premièrement, il est difficile d'enlever l'uranium sans démonter la pile ; Deuxièmement, il est difficile de concentrer le réfrigérant sur les morceaux d'uranium, qui sont les points de production maximale de chaleur. Il était assez évident que ces deux difficultés pouvaient être évitées si l'on utilisait un réseau de barres plutôt qu'un réseau ponctuel, c'est-à-dire si l'uranium pouvait être concentré le long de lignes passant par le modérateur au lieu d'être situé simplement en des points. Il n'y avait guère de doute que la disposition des tiges serait excellente structurellement et mécaniquement, mais il y avait un doute réel quant à savoir s'il était possible de construire un tel réseau qui aurait encore un facteur de multiplication k supérieur à l'unité. Cela est devenu un problème pour les physiciens théoriciens et expérimentaux. Les physiciens théoriciens devaient calculer quel était l'espacement et le diamètre optimaux des barres d'uranium ; Les physiciens expérimentaux ont dû effectuer des expériences exponentielles sur des réseaux de ce type afin de vérifier les résultats du groupe théorique.

CHARGEMENT ET DÉCHARGEMENT

7.20. Une fois acceptée l'idée d'un réseau à symétrie cylindrique, il est devenu évident que le tas pouvait être déchargé et rechargé sans démontage puisque l'uranium pouvait être poussé hors des canaux cylindriques dans le modérateur en graphite et que de l'uranium neuf pouvait être inséré. Il fallait décider si l'uranium devait se présenter sous la forme de longues tiges, qui présentaient des avantages du point de vue de la physique nucléaire, ou de pièces cylindriques relativement courtes, qui présentaient des avantages du point de vue de la manipulation. Dans un cas comme dans l'autre, les matières seraient si hautement radioactives que le déchargement devrait être effectué à l'aide d'une télécommande, et que l'uranium déchargé devrait être manipulé à distance à partir d'un blindage.

7.21. Si l'eau devait être utilisée comme liquide de refroidissement, elle devrait être acheminée vers les régions où la chaleur est produite par des canaux quelconques. Étant donné que les tuyaux en graphite n'étaient pas pratiques, un autre type de tuyau devrait être utilisé. Mais le choix du matériau du tuyau, comme le choix de tous les matériaux à utiliser dans la pile, a été limité par des considérations de physique nucléaire. Les tuyaux doivent être faits d'un matériau dont la section efficace d'absorption des neutrons n'était pas assez grande pour ramener la valeur de k au-dessous de l'unité. De plus, les tuyaux doivent être faits d'un matériau qui ne se désintégrerait pas sous la forte densité de rayonnement neutronique et gamma présent dans la pile. Enfin, les tuyaux doivent répondre à toutes les exigences ordinaires des tuyaux du système de refroidissement : ils ne doivent pas fuir ; ils ne doivent pas se corroder ; ils ne doivent pas se déformer.

7.22. Du point de vue de la physique nucléaire, il y avait sept matériaux possibles (Pb, Bi, Be, Al, Mg, Zn, Sn), dont aucun n'avait de sections efficaces à absorption neutronique élevée. Aucun tube en béryllium n'était disponible, et de tous les autres métaux, seul l'aluminium était considéré comme possible du point de vue de la corrosion. Mais il n'était pas du tout certain que l'aluminium serait satisfaisant, et les doutes sur la corrosion des tuyaux en aluminium n'ont pas été résolus avant que l'usine n'ait fonctionné pendant un certain temps.

7.23. Bien que le choix du matériau de la tuyauterie ait été très difficile, des choix similaires ont dû être faits pour tous les autres matériaux qui devaient être utilisés dans le pieu, faisant intervenir à la fois des critères de physique nucléaire et des critères de résistance aux rayonnements. Par exemple, les matériaux d'isolation électrique qui seront utilisés dans les instruments enterrés dans la pile ne doivent pas se désintégrer sous le rayonnement. Dans certains cas où des sondes de contrôle ou expérimentales devaient être insérées et retirées de

la pile, il fallait garder à l'esprit la probabilité que les sondes deviendraient intensément radioactives à la suite de leur exposition dans la pile et que le degré auquel cela se produirait dépendrait du matériau utilisé.

7.24. Enfin, on ne savait pas quel effet les champs de rayonnement dans le tas auraient sur le graphite et l'uranium. Il a été découvert plus tard que la résistance électrique, l'élasticité et la conductivité thermique du graphite changent toutes avec l'exposition à un rayonnement neutronique intense.

PROTECTION DE L'URANIUM CONTRE LA CORROSION

7.25. Le procédé de refroidissement le plus efficace aurait été de faire en sorte que l'eau circulant en contact direct avec l'uranium dans lequel la chaleur était produite. Tout porte à croire que c'était probablement hors de question parce que l'uranium réagirait chimiquement avec l'eau, au moins dans une mesure suffisante pour mettre en solution une quantité dangereuse de matières radioactives et probablement au point de désintégrer les boules d'uranium. Par conséquent, il était nécessaire de trouver une méthode pour protéger l'uranium du contact direct avec l'eau. Deux possibilités ont été envisagées : l'une était une sorte de revêtement, soit par galvanoplastie, soit par trempage ; l'autre consistait à sceller la boule d'uranium dans une gaine protectrice ou une « boîte ». Curieusement, ce « problème de mise en conserve » s'est avéré être l'un des problèmes les plus difficiles rencontrés dans de tels tas.

APPROVISIONNEMENT EN EAU

7.26. Le problème de la dissipation de milliers de kilowatts d'énergie n'est pas anodin. La quantité d'eau nécessaire dépendait, bien sûr, de la température maximale à laquelle l'eau pouvait être chauffée en toute sécurité et de la température maximale à laquelle on pouvait s'attendre dans la prise d'eau du fleuve Columbia ; Certes, les besoins en eau étaient comparables à ceux d'une ville de taille raisonnable. Des

stations de pompage, des installations de filtration et de traitement devaient être prévues. De plus, le système devait être très fiable ; Il était nécessaire de prévoir des confrols à fonctionnement rapide pour arrêter rapidement l'unité de réaction en chaîne DOVM en cas de défaillance de l'alimentation en eau. S'il était décidé d'utiliser le refroidissement « à passage unique » au lieu de la recirculation, un bassin de rétention serait nécessaire pour que la radioactivité induite dans l'eau puisse s'estomper avant que l'eau ne soit renvoyée dans la rivière. Le volume d'eau rejeté allait être si important que de tels problèmes de radioactivité étaient importants, et il fallait donc déterminer le temps minimum pendant lequel l'eau devait être retenue pour une sécurité absolue.

COMMANDES ET INSTRUMENTATION

7.27. Le problème de contrôle était très semblable à celui qui a été discuté à propos du premier tas à réaction en chaîne, sauf que tout était à plus grande échelle et était donc potentiellement plus dangereux. Il était nécessaire de prévoir des commandes de fonctionnement qui maintiendraient automatiquement le pieu en fonctionnement à un niveau de puissance déterminé. Ces commandes devaient être reliées à des instruments dans la pile qui mesureraient la densité neutronique ou une autre propriété qui indiquait le niveau de puissance. Il y aurait aussi eu des commandes d'urgence qui fonctionneraient presque rapidement si le niveau de puissance montrait des signes d'augmentation rapide ou s'il y avait une interruption de l'approvisionnement en eau. Il était hautement souhaitable qu'il y ait des moyens de détecter les difficultés naissantes telles que le colmatage d'un seul tube d'eau ou une rupture dans le revêtement de l'une des boules d'uranium. Toutes ces commandes et tous ces instruments devaient être actionnés derrière les épais murs de blindage décrits ci-dessous.

BLINDAGE

7.28. Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, le rayonnement dégagé par un pieu fonctionnant à un niveau de puissance élevé est si fort qu'il est tout à fait impossible pour le personnel d'exploitation de s'approcher du pieu. De plus, ce rayonnement, en particulier les neutrons, a une forte capacité à s'échapper par des trous ou des fissures dans les barrières. L'ensemble d'un pieu doit donc être enfermé dans des murs très épais de béton, d'acier ou d'un autre matériau absorbant. Mais en même temps, il doit être possible de charger et de décharger le tas à travers ces boucliers et d'acheminer l'approvisionnement en eau à l'intérieur et à l'extérieur à travers les boucliers. Les boucliers doivent non seulement être étanches aux radiations, mais aussi à l'air, car l'air exposé aux radiations dans le tas deviendrait radioactif.

7.29. Les dangers liés aux rayonnements qui nécessitent un blindage dans le tas se poursuivent dans une grande partie de l'installation de séparation. Étant donné que les produits de fission associés à la production du plutonium sont hautement radioactifs, l'uranium après éjection de la pile doit être manipulé à distance derrière un blindage et doit être protégé pendant le transport vers l'usine de séparation. Toutes les étapes de l'installation de séparation, y compris les analyses, doivent être contrôlées à distance derrière des boucliers jusqu'au point où le plutonium est relativement exempt de produits de fission radioactifs.

ENTRETIEN

7.30. Le problème de l'entretien est posé très simplement. Il ne pouvait pas y avoir d'entretien à l'intérieur du bouclier ou de la pile une fois que le

Problème-Février

pile avait fonctionné. La même remarque s'applique dans une moindre mesure à l'unité de séparation, où il était probable qu'un arrêt pour entretien puisse être effectué, à condition, bien entendu, que des procédés de décontamination adéquats et télécommandés soient effectués afin de réduire l'intensité du rayonnement en dessous du niveau dangereux pour le personnel. Le problème d'entretien des parties auxiliaires de l'usine était normal, à l'exception de l'extrême importance d'avoir un équipement de pompage et d'alimentation de secours pour éviter une panne accidentelle soudaine du système de refroidissement.

HORAIRE DE CHARGEMENT ET DE DÉCHARGEMENT

7.31. De toute évidence, la quantité de plutonium dans un tas d'exploitation non perturbé augmente avec le temps d'exploitation. Étant donné que le Pu-239 lui-même subit une fission, sa formation tend à maintenir la réaction en chaîne, tandis que la disparition progressive de l'U-235 et l'apparition de produits de fission avec de grandes sections efficaces d'absorption des neutrons tendent à arrêter la réaction. La détermination du moment où un tas de production doit être arrêté et le plutonium extrait implique un bon équilibre entre ces facteurs et les calendriers, les coûts des matériaux, l'efficacité du processus de séparation, etc. À proprement parler, il s'agit d'un problème d'exploitation plutôt que de conception de l'usine, mais il a fallu y réfléchir afin de planifier l'écoulement des boules d'uranium vers le tas et du tas vers l'usine de séparation.

TAILLE DES UNITÉS

7.32. Nous n'avons parlé de la capacité de production de l'usine qu'en termes de taux de production global. Naturellement, un taux de production donné peut être atteint dans un seul grand tas ou dans un certain nombre de plus petits. Le principal avantage des pieux plus petits serait la réduction du temps de construction

pour le premier pieu, la possibilité d'apporter des modifications aux pieux ultérieurs et, peut-être le plus important, l'improbabilité d'une rupture simultanée de tous les pieux. L'inconvénient des petits tas est qu'ils nécessitent des quantités disproportionnées d'uranium, de modérateur, etc. Il y a, en fait, une « taille naturelle » préférée de la pile qui peut être grossièrement déterminée sur des bases théoriques.

NATURE GÉNÉRALE DE L'INSTALLATION DE SÉPARATION

7.33. Comme nous l'avons déjà souligné, les limaces provenant du tas sont hautement radioactives et doivent donc être traitées à distance dans des compartiments blindés. Le plan général à suivre a été suggéré à la fin de 1942, en particulier en ce qui concerne les plans de l'usine de séparation de Clinton. Ce projet consistait à construire un « canyon » qui consisterait en une série de compartiments avec de lourds murs de béton disposés en ligne et presque complètement enterrés dans le sol. Chaque compartiment contiendrait les réservoirs ou centrifugeuses de dissolution ou de précipitation nécessaires. Les limaces entraient dans le compartiment à l'une des extrémités du canyon ; Ils seraient ensuite dissous et passeraient par les différentes étapes de la mise en solution, de la précipitation, de l'oxydation ou de la réduction, étant pompés d'un compartiment à l'autre jusqu'à ce qu'une solution de plutonium exempte d'uranium et de produits de fission sorte dans le dernier compartiment. Comme dans le cas du pieu, tout serait actionné par télécommande depuis le sol, mais les opérations seraient beaucoup plus compliquées que dans le cas du pieu. Cependant, en ce qui concerne les opérations chimiques elles-mêmes, leur caractère général n'était pas si éloigné des champs d'activité normaux des chimistes concernés.

CONTRÔLE ANALYTIQUE

7.34. Dans les premières étapes du processus de séparation, même l'analyse de routine des échantillons nécessaires au contrôle du fonctionnement des différents procédés chimiques devait être effectuée à distance. Ces essais ont toutefois été facilités par l'utilisation de

méthodes d'analyse radioactives ainsi que d'analyses chimiques conventionnelles.

ÉLIMINATION DES DÉCHETS

7.35. La matière première (uranium) n'est pas dangereusement radioactive. Le produit souhaité (le plutonium) n'émet pas de rayonnement pénétrant, mais la combinaison de son activité de rayons alpha et de ses propriétés chimiques en fait l'une des substances les plus dangereuses connues si elle pénètre une fois dans l'organisme. Cependant, les matériaux vraiment gênants sont les produits de fission, c'est-à-dire les principaux fragments dans lesquels l'uranium est divisé par fission. Les produits de fission sont très radioactifs et comprennent une trentaine d'éléments. Parmi eux figurent le xénon radioactif et l'iode radioactif. Ceux-ci sont libérés en quantité considérable lorsque les limaces sont dissoutes et doivent être éliminés avec un soin particulier. Il faut construire des cheminées hautes qui évacueront ces gaz avec les fumées acides de la première unité de dissolution, et il faut s'assurer que le mélange des gaz radioactifs avec l'atmosphère ne mettra pas en danger le territoire environnant. (Comme dans toutes les autres questions de santé, les normes de tolérance qui ont été établies et respectées étaient si rigides qu'elles ne laissaient pas la moindre probabilité de danger pour la santé de la communauté ou du personnel d'exploitation.)

7.36. La plupart des autres produits de fission peuvent être retenus en solution, mais doivent éventuellement être éliminés. Bien sûr, une éventuelle pollution de la rivière adjacente doit être prise en compte. (En fait, les normes de sécurité établies et respectées en ce qui concerne la pollution des rivières étaient si strictes que ni les personnes ni les poissons en aval de la rivière ne peuvent être affectés.)

RÉCUPÉRATION DE L'URANIUM

7.37. De toute évidence, même si l'uranium restait dans le tas jusqu'à ce que tout l'U-235 ait subi une fission, il resterait encore

une grande quantité d'U-238 qui n'aurait pas été converti en plutonium. En fait, le processus est arrêté bien avant que cette étape ne soit atteinte. L'uranium est un matériau coûteux et l'offre totale disponible est sérieusement limitée. Par conséquent, la possibilité de le récupérer après la séparation du plutonium doit être envisagée. À l'origine, il n'y avait pas de plan de récupération, mais simplement l'intention de stocker la solution d'uranium. Plus tard, des méthodes de récupération à grande échelle ont été développées

CORROSION DANS L'INSTALLATION DE SÉPARATION

7.38. Une caractéristique inhabituelle des processus chimiques en cause est que ces processus se produisent en présence d'une forte densité de rayonnement. Par conséquent, les conteneurs utilisés peuvent se corroder plus rapidement qu'ils ne le feraient dans des circonstances normales. De plus, une telle corrosion sera grave en raison de la difficulté d'accès. Pendant longtemps, les informations sur ces dangers ont malheureusement manqué.

EFFET DES RAYONNEMENTS SUR LES RÉACTIONS CHIMIQUES

7.39. Les réactions chimiques proposées pour un procédé d'extraction ont bien sûr été testées en laboratoire. Cependant, ils n'ont pas pu être testés avec des quantités appréciables de plutonium ni en présence de rayonnements d'une intensité comparable à celle attendue. Par conséquent, on s'est rendu compte qu'un procédé qui s'avérerait efficace en laboratoire pourrait ne pas fonctionner dans l'usine.

CHOIX DU PROCÉDÉ

7.40. La description donnée ci-dessus de ce qui allait se passer dans les chambres successives du canyon était très vague. C'était nécessaire, car même en janvier 1943, aucune décision n'avait été prise quant au procédé qui serait utilisé pour l'extraction et la purification du plutonium. Le problème majeur auquel était confrontée la Division de chimie du Laboratoire métallurgique était le choix du meilleur procédé pour l'usine.

7.41. Outre les dangers normalement présents lors de la construction et de l'exploitation d'une grande usine chimique, on s'attendait à des dangers d'un nouveau genre. On s'attendait à deux types de risques liés aux rayonnements : les neutrons générés dans la pile et les particules alpha, les particules bêta et les rayons gamma émis par les produits de la pile. Bien qu'il ait été prouvé que les effets généraux de ces rayonnements étaient similaires à ceux des rayons X, on disposait de très peu de connaissances détaillées. De toute évidence, les quantités de matières radioactives à manipuler étaient beaucoup plus importantes que ce qui avait été fait auparavant.

7.42. Le groupe de santé a dû planifier trois programmes : 1) la fourniture d'instruments et de tests cliniques pour détecter tout signe d'exposition dangereuse du personnel ; 2° la recherche sur les effets des rayonnements sur les personnes, les instruments, etc. ; et (3) des estimations des mesures de protection et de sécurité qui doivent être incorporées dans la conception et le plan d'exploitation de l'usine.

LES PROPRIÉTÉS DU PLUTONIUM

7.43. Bien que nous nous lancions dans une grande entreprise de production de plutonium, nous avons encore moins d'un milligramme à étudier et nous n'avons encore qu'une connaissance limitée de ses propriétés. L'étude du plutonium demeurerait donc un problème majeur du Laboratoire métallurgique.

LA FORMATION DES OPÉRATEURS

7.44. Il est évident que l'exploitation d'une installation à grande échelle du type envisagé nécessiterait un groupe important et hautement qualifié d'opérateurs. Bien que du Pont ait acquis une vaste expérience dans l'exploitation de divers types d'usines chimiques, il s'agissait de quelque chose de nouveau et il était évident que le personnel d'exploitation aurait besoin d'une

formation spéciale. Cette formation a été dispensée en partie à Chicago et dans ses environs, mais principalement aux laboratoires Clinton.

LE BESOIN D'INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

7.45. Dans les paragraphes précédents du présent chapitre, nous avons exposé les problèmes auxquels est confronté le groupe chargé de la conception et de la construction d'une usine de production de plutonium. Le chapitre VI passe en revue les progrès accomplis dans ce domaine jusqu'à la fin de 1942. Tout au long de ces chapitres, il est clairement indiqué qu'il fallait beaucoup plus d'informations pour assurer le succès de l'usine. Les réponses obtenues à la plupart des questions n'étaient que provisoires. Par conséquent, la recherche a dû être poussée en même temps que la planification et la construction.

LE PROGRAMME DE RECHERCHE

7.46. Pour répondre au besoin d'informations complémentaires, des programmes de recherche ont été élaborés pour le Laboratoire métallurgique et le Laboratoire Clinton. Le passage suivant est un extrait du programme de 1943 du Projet Métallurgique :

« Études de production de produits. Il s'agit notamment de tous les aspects de la recherche, du développement et des études semi-industrielles nécessaires à la conception, à la construction et à l'exploitation de pieux à réaction en chaîne pour produire du plutonium ou d'autres matériaux.

Caractéristiques de la pile. Études théoriques et expériences sur les structures en treillis pour prédire le comportement dans les pieux de haut niveau, tels que la température et les effets barométriques, les caractéristiques des neutrons, l'empoisonnement des pieux, etc.

Contrôle des unités réactives. Conception et essais expérimentaux de dispositifs de contrôle de la vitesse de réaction dans les pieux.

Refroidissement des unités de réaction. Etudes physiques du liquide de refroidissement, problèmes d'ingénierie de circulation, de corrosion, d'érosion, etc. Mise au point d'instruments et de techniques de surveillance des pieux et de surveillance des rayonnements dans toute la zone de la centrale.

Protection. Blindage, effets biologiques des rayonnements sur les pieux et effets cliniques des opérations associées aux pieux.

Matériaux. Etude des propriétés physiques (mécaniques et nucléaires) des matériaux de construction et de traitement utilisés dans la construction et l'exploitation des pieux.

Enquêtes d'activation. Production de quantités expérimentales de matériaux radioactifs dans des cyclotrons et dans des tas et étude de l'activation des matériaux par les neutrons, les protons, les électrons, les rayons gamma, etc.

Opération de pieux. Etude des procédures d'opération des pieux telles que la manutention des matériaux, le fonctionnement des instruments, etc.

Conception de processus. Etude de l'ensemble des processus de production possibles conduisant à un travail détaillé dans d'autres catégories.

« Études de récupération des produits. Il s'agit notamment de tous les aspects des travaux nécessaires à la mise au point de procédés d'extraction du plutonium et d'éventuels sous-produits du matériau de la pile et de leur préparation sous forme purifiée. Au Laboratoire métallurgique, un effort important sera consacré à un seul procédé qui sera sélectionné d'ici le 1er juin 1943 pour la production de plutonium, mais des alternatives continueront d'être étudiées à la fois au Laboratoire métallurgique et à Clinton avec la main-d'œuvre disponible.

Séparation. Procédés de dissolution de l'uranium, d'extraction du plutonium et de décontamination par élimination des produits de fission.

Concentration, purification et réduction du produit. Procédés conduisant à la production de plutonium sous forme de métal pur, et étude des propriétés du plutonium nécessaires à sa production.

Déchets. Élimination et méthodes possibles de récupération des produits de fission et des métaux des déchets.

Instrumentation. Mise au point et mise à l'essai d'instruments de surveillance des processus chimiques et d'étude des rayonnements dans toute la région.

Protection. Études de blindage, détermination des effets biologiques des poussières radioactives, des liquides, des solides et d'autres matériaux de traitement, et mesures de protection.

Matériaux. Corrosion des matériaux de l'équipement et stabilité aux rayonnements. Analyse de la pureté nécessaire et de la pureté des matériaux de traitement, etc.

Récupération des matières activées. Mise au point de méthodes et récupération effective de matériaux activés (traceurs, etc.) à partir de matériaux activés par cyclotron et par pieux.

Études d'opérations. Performance des équipements, contrôle des processus, opérations de manutention, etc.

Conception de processus. Étude de l'ensemble des procédés de valorisation des produits (procédés humides, méthodes physiques) conduisant à des travaux détaillés dans d'autres catégories.

« Recherche fondamentale. Études des phénomènes physiques, chimiques et biologiques fondamentaux qui se produisent dans les pieux à réaction en chaîne, et des propriétés de base de tous les matériaux impliqués. Bien que l'accent soit mis sur les semi-travaux à Clinton, une grande partie de la recherche

fondamentale nécessitera des conditions de Clinton (intensité de rayonnement élevée, processus à grande échelle).

Physique nucléaire. Propriétés fondamentales de la fission nucléaire telles que la section efficace, le rendement neutronique, les espèces de fission, etc. D'autres propriétés nucléaires importantes pour les procédés, telles que les sections efficaces, les propriétés des modérateurs, l'effet des neutrons sur les matériaux, etc.

Physique générale. Recherche sur les instruments de base (électronique, ionisation, optique, etc.), déterminations de masse atomique, études de neutrons, de rayonnements α , β , γ , études de rayons X, etc.

Chimie des rayonnements. Effets des rayonnements sur les processus chimiques et les réactions chimiques produites par les rayonnements.

Chimie nucléaire. Traçage des produits de fission, des constantes de désintégration, des chaînes, étude des noyaux d'utilité possible à projeter.

Chimie des produits. Propriétés chimiques de divers produits et études de base en séparation et purification des produits.

Chimie générale. Chimie des matières premières et des matériaux associés au procédé, y compris les sous-produits.

Biologie générale. Etudes fondamentales des effets des rayonnements sur la matière vivante, le métabolisme des matériaux importants, etc. Les investigations de base, telles que l'hématologie, la pathologie, etc.

Etudes métallurgiques. Propriétés de U, Pu, Be, etc.

Etudes d'ingénierie. Phénomènes fondamentaux à la corrosion et études similaires essentielles à la poursuite du développement technique des procédés.

7.47. L'examen de ce programme donne une idée de l'étendue des enquêtes qui ont été considérées comme susceptibles de fournir des informations pertinentes. La plupart des sujets énumérés ne sont pas des problèmes de recherche spécifiques tels qu'ils pourraient être résolus par une petite équipe de scientifiques travaillant pendant quelques mois, mais sont des domaines d'investigation entiers qui pourraient être étudiés avec

profit pendant des années. Il était nécessaire de choisir les problèmes spécifiques qui étaient susceptibles de donner les résultats les plus immédiatement utiles, mais en même temps il était souhaitable d'essayer de découvrir des principes généraux. Par exemple, l'effet des rayonnements sur les propriétés des matériaux (« stabilité aux rayonnements ») était presque entièrement inconnu. Il était nécessaire à la fois de faire des essais empiriques sur des matériaux particuliers qui pourraient être utilisés dans un tas et d'élaborer des théories générales sur les effets observés. Tous les efforts ont été faits pour relier tous les travaux à l'objectif général : une usine de production performante.

ORGANISATION DU PROJET

7.48. Il y a eu de nombreux changements dans l'organisation et le personnel du projet. Pendant la plus grande partie de la période de construction à Clinton et Hanford, A. H. Compton fut directeur du projet métallurgique ; S. K. Allison était directeur du laboratoire métallurgique de Chicago ; et M. D. Whitaker était directeur du laboratoire Clinton. Le groupe de Chicago était organisé en quatre divisions : physique, chimie, technologie et santé. Plus tard, la division de physique a été scindée en physique générale et physique nucléaire. R. L. Doan était directeur de recherche à Clinton, mais il n'y avait pas de poste correspondant à Chicago. Parmi les autres directeurs de laboratoire ou de projet associés ou adjoints ou qui ont été directeurs de division, on peut citer S. T. Cantril, C. M. Cooper, F. Daniels, A. J. Dempster, E. Fermi, J. Franck, N. Hilberry, T. R. Hogness, W. C. Johnson, H. D. Smyth, J. C. Stearns, R. S. Stone, H. C. Vernon, W. W. Watson, et E.

Wigner. À partir de 1943, C. H. Thomas, de la Monsanto Chemical Company, présida un comité sur la chimie et la métallurgie du plutonium. Ce comité a mis en corrélation les activités du laboratoire métallurgique avec celles de Los Alamos (voir chapitre XII) et ailleurs. Plus tard, la Monsanto Chemical

Company a travaillé sur d'importants problèmes spéciaux liés aux travaux de Los Alamos.

7.49. Il incombait à ces hommes de veiller à ce que le programme de recherche décrit ci-dessus soit exécuté et que des résultats significatifs soient communiqués à du Pont. Il leur incombait également de répondre aux questions soulevées par du Pont et d'approuver ou de critiquer les plans soumis par celui-ci.

COOPÉRATION ENTRE LES INDUSTRIES MÉTALLURGIQUES

LABORATORY AND DU PONT

7.50. Étant donné que du Pont était l'organisme de conception et de construction et que le Laboratoire métallurgique était l'organisme de recherche, il était évident qu'une collaboration étroite était essentielle. Non seulement du Pont avait-il besoin de réponses à des questions précises, mais il pouvait bénéficier de critiques et de suggestions sur les nombreux points sur lesquels le groupe métallurgique était particulièrement bien informé. De même, le groupe métallurgique pouvait profiter des connaissances de du Pont sur de nombreuses questions techniques de conception, de construction et d'exploitation. Pour promouvoir ce genre de coopération, du Pont envoya un de ses physiciens, J. B. Miles, à Chicago, et fit passer une grande partie de son temps à Chicago par de nombreux autres hommes de du Pont, en particulier C. H. Greenewalt. Miles et Greenewalt assistaient régulièrement aux réunions du Conseil de laboratoire. Il n'y avait pas d'arrangement réciproque similaire, bien que de nombreux membres du laboratoire aient visité Wilmington de manière informelle. De plus, J. A. Wheeler fut transféré de Chicago à Wilmington et devint membre de l'état-major du Pont. Il y avait, bien sûr, un échange constant de rapports et de lettres, et des conférences avaient lieu fréquemment entre Compton et R. Williams de du Pont. Whitaker a passé une grande partie de son temps à Wilmington pendant la période où l'usine Clinton était en cours de conception et de construction.

RÉSUMÉ

7.51. En janvier 1943, la décision avait été prise de construire une usine de production de plutonium de grande capacité. Cela signifiait un tas développant des milliers de kilowatts et une usine de séparation chimique pour extraire le produit. La Compagnie du Pont devait concevoir, construire et exploiter l'usine ; le laboratoire métallurgique devait faire les recherches nécessaires. Un site a été choisi sur le fleuve Columbia à Hanford, dans l'État de Washington. Une décision provisoire de construire une usine refroidie à l'hélium a été annulée en faveur du refroidissement par eau. Les principaux problèmes concernaient le chargement et le déchargement des treillis, **design**, le choix des matériaux, en particulier en ce qui concerne la corrosion et les rayonnements, l'approvisionnement en eau, les commandes et l'instrumentation, les risques pour la santé, le processus de séparation chimique et la conception de l'installation de séparation. Des plans ont été élaborés pour la recherche fondamentale et technique nécessaire ainsi que pour la formation des opérateurs. Des dispositions furent prises pour assurer la liaison entre du Pont et le laboratoire métallurgique.

Problème du plutonium jusqu'en juin 1945
CHAPITRE VIII. LE PROBLÈME DU PLUTONIUM
JANVIER 1943 À JUIN 1945

INTRODUCTION

8.1. La nécessité de pousser la conception et la construction de l'usine de plutonium à grande échelle en même temps que la recherche et le développement ont inévitablement conduit à une certaine confusion et à une certaine inefficacité. Il est devenu essentiel d'étudier de nombreux processus alternatifs. Il est devenu nécessaire d'étudier toutes les causes possibles de défaillance, même lorsque la probabilité qu'elles deviennent graves était très faible. Maintenant que l'usine de Hanford produit du plutonium avec succès, nous pensons qu'il est juste de dire qu'un grand pourcentage des résultats des recherches effectuées entre la fin de 1942 et la fin de 1944 ne seront jamais utilisés, du moins pas aux fins initialement prévues. Néanmoins, si l'usine de Hanford s'était heurtée à des difficultés, n'importe laquelle des enquêtes désormais superflues aurait pu fournir les informations nécessaires pour transformer l'échec en succès. Même aujourd'hui, il est impossible de dire que les améliorations futures ne dépendront pas des résultats de recherches qui semblent aujourd'hui sans importance.

8.2. On estime qu'une trentaine de volumes seront nécessaires pour un rapport complet des résultats scientifiques significatifs des recherches menées sous les auspices du Projet Métallurgique. Des travaux ont été effectués sur tous les éléments mentionnés dans le programme de recherche présenté dans le chapitre précédent. Dans le présent exposé, il serait évidemment impossible de donner plus qu'un bref résumé de toutes ces recherches. Nous estimons que cela ne serait pas satisfaisant et qu'il est préférable de donner une discussion générale sur les unités de réaction en chaîne et les installations de séparation telles qu'elles fonctionnent actuellement, avec une discussion sur les développements antérieurs.

LA RÉACTION EN CHAÎNE DANS UN TAS

8.3. Dans le chapitre I et dans d'autres chapitres précédents, nous avons donné de brefs comptes rendus du processus de fission, de l'opération de la pile et de la production de produits chimiques.

Problème du plutonium jusqu'en juin 1945

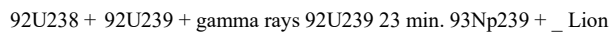
séparation. Nous allons maintenant examiner ces sujets d'un point de vue quelque peu différent avant de décrire les usines de production de plutonium elles-mêmes.

8.4. Le fonctionnement d'un pile dépend du passage des neutrons dans la matière et de la nature des collisions des neutrons avec les noyaux rencontrés. Les collisions les plus importantes sont les suivantes :

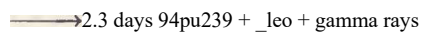
I. Collisions au cours desquelles les neutrons sont dispersés et perdent des quantités appréciables d'énergie. a) Collisions inélastiques de neutrons rapides avec des noyaux d'uranium. b) Collisions élastiques de neutrons rapides ou modérément rapides avec les noyaux légers du matériau modérateur ; Ces collisions servent à réduire l'énergie neutronique à des énergies très faibles (dites thermiques).

II. Collisions dans lesquelles les neutrons sont absorbés. a) Les collisions qui entraînent la fission des noyaux et donnent des produits de fission et des neutrons supplémentaires. b) Les collisions qui entraînent la formation de nouveaux noyaux qui se désintègrent ensuite de manière radioactive (par exemple, $^{92}\text{U}238$ qui produit $^{94}\text{Pu}239$).

8.5. Seule la deuxième catégorie de collision mérite d'être examinée plus avant. En ce qui concerne les collisions de type II (a), les plus importantes dans un tas sont les collisions entre les neutrons et l'uranium 235, mais la fission à haute énergie de l'uranium 238 et la fission thermique du Pu-239 ont également lieu. Les collisions de type II (b) sont principalement celles entre les neutrons et l'U-238. De telles collisions se produisent pour les neutrons de toutes les énergies, mais elles sont plus susceptibles de se produire pour les neutrons. La séquence des résultats de la collision de type II (b) est représentée comme suit :



89



Problème du plutonium jusqu'en juin 1945

8.6. Tous les autres procédés d'absorption autres que la fission sont importants, principalement parce qu'ils gaspillent des neutrons ; ils se produisent dans le modérateur,

132

dans l'U-235, dans le liquide de refroidissement, dans les impuretés présentes à l'origine, dans les produits de fission, et même dans le plutonium lui-même.

8.7. Puisque l'objectif de la réaction en chaîne est de générer du plutonium, nous voudrions absorber tous les neutrons en excès dans l'U-238, en laissant juste assez de neutrons pour produire la fission et ainsi maintenir la réaction en chaîne. En fait, la tendance des neutrons à être absorbés par l'isotope dominant U-238 est si grande par rapport à leur tendance à produire de la fission dans l'U-235, 140 fois plus rare, que l'effort de conception principal a dû être dirigé vers la promotion de la fission (comme en utilisant un modérateur, un réseau approprié, des matériaux de haute pureté, etc.) afin de maintenir la réaction en chaîne.

CYCLE DE VIE D'UNE GÉNÉRATION DE NEUTRONS*

8.8. Tous les pieux à réaction en chaîne conçus par le Laboratoire métallurgique ou avec sa coopération sont constitués de quatre catégories de matériaux : l'uranium métallique, le modérateur, le liquide de refroidissement et les matériaux auxiliaires tels que les tubes d'eau, les enveloppes d'uranium, les bandes ou barres de contrôle, les impuretés, etc. Tous les tas dépendent des neutrons parasites de la fission spontanée ou des rayons cosmiques pour initier la réaction.

8.9. Supposons que l'empilement soit démarré par la libération simultanée (dans l'uranium métallique) de N neutrons de haute énergie. La plupart de ces neutrons ont à l'origine des énergies supérieures au seuil d'énergie de fission de l'U-238. Cependant, lorsque les neutrons passent d'avant en arrière dans le métal et le modérateur, ils subissent de nombreuses collisions inélastiques avec l'uranium et de nombreuses collisions élastiques avec le modérateur, et toutes ces collisions servent à réduire les énergies en dessous de ce seuil. Plus précisément, dans un tas typique modéré au graphite, un neutron qui s'est échappé de

Problème du plutonium jusqu'en juin 1945

l'uranium dans le graphite parcourt en moyenne environ 2,5 cm entre les collisions et effectue en moyenne environ 200 collisions élastiques avant de passer du graphite à l'uranium. Comme à chacune de ces collisions un neutron perd en moyenne environ un sixième de son énergie, un neutron d'un Mev est réduit en thermique * Voir dessin ci-contre p. 35.

(généralement pris comme étant de 0,025 électronvolt) considérablement avant d'effectuer un seul transit à travers le graphite. Il y a, bien sûr, beaucoup de neutrons qui s'écartent de ce comportement moyen, et il y aura suffisamment de fissions produites par les neutrons rapides pour augmenter légèrement le nombre de neutrons présents. L'amélioration peut être prise en compte en multipliant le nombre initial de neutrons N par un facteur e qui s'appelle l'effet de fission rapide ou le facteur de multiplication rapide.

8.10. Comme l'énergie moyenne des neutrons N_e présents continue de diminuer, la collision inélastique dans l'uranium devient sans importance, l'énergie n'étant réduite essentiellement que dans le modérateur. Cependant, la probabilité de non-absorption par fission (capture de résonance) dans l'U-238 devient importante lorsque la région d'énergie intermédiaire ou de résonance est atteinte. En fait, un certain nombre de neutrons dans cette région d'énergie seront absorbés, quel que soit le choix de la conception du réseau. L'effet d'une telle capture peut être exprimé en multipliant N_e par un facteur p (qui est toujours inférieur à un) appelé « probabilité d'échappement de résonance » qui est la probabilité qu'un neutron donné commençant avec une énergie supérieure à la région de résonance atteigne des énergies thermiques sans absorption dans l'U-238. Ainsi, à partir des neutrons de haute énergie N originaux, nous obtenons des neutrons N_{ep} d'énergie thermique.

8.11. Une fois qu'un neutron a atteint l'énergie thermique, la probabilité qu'il perde plus d'énergie par collision n'est pas supérieure à la probabilité qu'il gagne de l'énergie. Par conséquent, les neutrons resteront à cette énergie moyenne jusqu'à ce qu'ils soient absorbés. Dans la région de l'énergie thermique, le risque d'absorption du neutron par le modérateur, le liquide de refroidissement et les

matériaux auxiliaires est plus grand qu'à des énergies plus élevées. Quoi qu'il en soit, on constate que nous introduisons peu d'erreurs dans nos calculs en supposant que toute cette absorption indésirable a lieu dans cette région d'énergie. Nous introduisons maintenant un facteur f , appelé facteur d'utilisation thermique, qui est défini comme la probabilité qu'un neutron thermique donné soit absorbé par l'uranium. Ainsi, à partir des neutrons rapides N originaux, nous avons obtenu des neutrons thermiques N_{epf} qui sont absorbés par l'uranium.

134

8.12. Bien qu'il existe plusieurs façons pour le mélange normal d'isotopes de l'uranium d'absorber les neutrons, le lecteur se rappellera peut-être que nous avons défini dans un chapitre précédent une quantité q , qui est le nombre de neutrons de fission produits pour chaque neutron thermique absorbé dans l'uranium, quels que soient les détails du processus. Par conséquent, si nous multiplions le nombre de neutrons thermiques absorbés dans l'uranium, N_{epf} , par q , nous obtenons le nombre de nouveaux neutrons à grande vitesse générés par les N neutrons à grande vitesse d'origine au cours de leur vie. Si $N_{epf}q$ est supérieur à N , nous avons une réaction en chaîne et le nombre de neutrons augmente continuellement. Il est évident que le produit $epfo = k_e$, le facteur multiplicateur déjà défini au chapitre IV.

8.13. Il convient de noter qu'il n'a pas été fait mention de neutrons s'échappant de la pile. Une telle mention a été délibérément évitée puisque la valeur de k » telle que définie ci-dessus s'applique à un réseau infini. D'après les valeurs connues et le fait que ces piles fonctionnent, on constate que le pourcentage de neutrons qui s'échappent ne peut pas être très élevé. Comme nous l'avons vu au chapitre II, l'échappement des neutrons devient relativement moins important à mesure que la taille de la pile augmente. S'il est nécessaire d'introduire dans le tas une grande quantité de matériaux auxiliaires tels que des tuyaux de système de refroidissement, il est nécessaire de construire un tas un peu plus grand pour contrer l'augmentation de l'absorption.

8.14. En résumé, un pieu fonctionne en réduisant les neutrons de haute énergie en énergies thermiques à l'aide d'un arrangement modérateur-

Problème du plutonium jusqu'en juin 1945

réseau, puis en permettant aux neutrons d'énergie thermique d'être absorbés par l'uranium, provoquant une fission qui régénère d'autres neutrons de haute énergie. La régénération des neutrons est légèrement facilitée par l'effet de neutrons rapides ; Il est entravé par l'absorption par résonance pendant le processus de réduction d'énergie, par l'absorption dans le graphite et d'autres matériaux, et par l'échappement de neutrons.

LES EFFETS DES PRODUITS DE RÉACTION SUR LE FACTEUR DE MULTIPLICATION

8.15. Même au niveau de puissance élevé utilisé dans les pieux de Hanford, seuls quelques grammes d'U-238 et d'U-235 sont consommés par jour et par

135

millions de grammes d'uranium présents. Néanmoins, les effets de ces changements sont très importants. Au fur et à mesure que l'U-235 s'épuise, la concentration de plutonium augmente. Heureusement, le plutonium lui-même est fissile par neutrons thermiques et tend donc à contrebalancer la diminution de l'U-235 en ce qui concerne le maintien de la réaction en chaîne. Cependant, d'autres produits de fission sont également produits. Ceux-ci sont généralement constitués de noyaux instables et relativement peu familiers, de sorte qu'il était à l'origine impossible de prédire l'ampleur de l'effet indésirable qu'ils auraient sur la constante de multiplication. De tels effets délétères sont appelés empoisonnement.

LES PRODUITS DE RÉACTION ET LES PROBLÈME DE SÉPARATION

8.16. Le processus de production de plutonium à Hanford comporte deux parties principales : la production proprement dite dans le tas et la séparation du plutonium des boules d'uranium dans lesquelles il se forme. ~~We~~Passons maintenant à la discussion de la deuxième partie, le processus de séparation. .

Problème du plutonium jusqu'en juin 1945

8.17. Les boules d'uranium contenant du plutonium contiennent également d'autres éléments résultant de la fission de l'uranium 235. Lorsqu'un noyau d'U-235 subit une fission, il émet un ou plusieurs neutrons et se divise en deux fragments de taille comparable et de masse totale de 235 ou moins. Apparemment, la fission en masses exactement égales se produit rarement, les fragments les plus abondants étant un fragment de masse comprise entre 134 et 144 et un fragment de masse comprise entre 100 et 90. Il existe donc deux groupes de produits de fission : un groupe lourd dont le nombre de masse s'étend approximativement de 127 à 154, et un groupe léger d'environ 115 à 83. Ces produits de fission sont pour l'essentiel des isotopes instables de la trentaine d'éléments connus dans ces gammes générales de nombres de masse. Typiquement, ils se désintègrent par des émissions bêta successives accompagnées de rayonnement gamma pour finalement former des noyaux stables connus. Les demi-vies des différents noyaux intermédiaires vont de quelques fractions de seconde à un an ou plus ; Plusieurs des espèces importantes ont des demi-vies de l'ordre d'un mois environ.

136

Une vingtaine d'éléments différents sont présents en concentration significative. Les plus abondants d'entre eux représentent un peu moins de 10 % de l'agrégat.

8.18. Outre les produits de fission radioactifs, l'U-239 et le Np-239 (produits intermédiaires dans la formation du plutonium) sont présents dans le tas et sont radioactifs. Les concentrations de tous ces produits commencent à s'accumuler au moment où le tas commence à fonctionner. Finalement, le taux de désintégration radioactive est égal au taux de formation, de sorte que les concentrations deviennent constantes. Par exemple, le nombre d'atomes d'U-239 produits par seconde est constant pour une pile fonctionnant à un niveau de puissance fixe. Selon les lois de la désintégration radioactive, le nombre d'atomes d'U-239 qui disparaissent par seconde est

Problème du plutonium jusqu'en juin 1945

proportionnel au nombre de ces atomes présents et augmente donc pendant les premières minutes ou heures suivant la mise en service de la pile. Par conséquent, il y aura bientôt pratiquement autant de noyaux qui se désintègrent chaque seconde qu'il en est formé chaque seconde. Les concentrations d'équilibre pour les autres noyaux seront abordées de la même manière, la concentration d'équilibre étant proportionnelle à la vitesse de formation du noyau et à sa demi-vie. Les produits stables ou dont la demi-vie est extrêmement longue (par exemple, le plutonium) augmenteront régulièrement en concentration pendant une période de temps considérable. Lorsque le tas est arrêté, la radioactivité continue bien sûr, mais à un taux absolu qui diminue continuellement. Les isotopes à demi-vie très courte peuvent « disparaître » en quelques minutes ou quelques heures ; D'autres, dont la demi-vie est plus longue, restent sensiblement actifs pendant des jours ou des mois. Ainsi, à tout moment, les concentrations des différents produits dans un tas récemment arrêté dépendent du niveau de puissance, de la durée de fonctionnement du tas et de la durée de son arrêt. Bien sûr, plus le tas a duré longtemps, plus la concentration de plutonium est importante et (malheureusement) plus grande est la concentration de produits de fission à vie longue. Plus la période de « refroidissement » est longue, c'est-à-dire la période entre l'enlèvement des matières de la pile et le traitement chimique, plus l'intensité du rayonnement des produits de fission est faible. Un compromis doit être fait entre des considérations telles que le désir d'un long fonctionnement et d'un refroidissement

137

le temps d'une part et le désir d'une extraction rapide du plutonium d'autre part.

8.19. Des tableaux peuvent être établis indiquant les concentrations chimiques de plutonium et des divers produits de fission en fonction du niveau de puissance, de la durée de fonctionnement et de la durée de la période de refroidissement. La demi-vie de l'U-239 est si courte que sa concentration devient négligeable peu de temps après l'arrêt de la pile. Le neptunium se convertit assez rapidement en plutonium. Bien entendu, le poids total des produits de fission, stables et

Problème du plutonium jusqu'en juin 1945

instables, reste pratiquement constant après l'arrêt de la pile. Pour les conditions d'exploitation de Clinton et de Hanford, la concentration maximale de plutonium atteinte est si faible qu'elle ajoute sensiblement à la difficulté de la séparation chimique.

LE CHOIX D'UN PROCÉDÉ DE SÉPARATION CHIMIQUE

8.20. Le problème est donc d'effectuer une séparation chimique à raison journalière, par exemple, de plusieurs grammes de plutonium à partir de plusieurs milliers de grammes d'uranium contaminés par de grandes quantités de produits de fission dangereusement radioactifs comprenant vingt éléments différents. Le problème est d'autant plus difficile que les exigences de pureté du plutonium sont très élevées.

8.21. Quatre types de méthodes de séparation chimique ont été examinés : la volatilité, l'absorption, l'extraction par solvant et la précipitation. Les travaux sur les méthodes d'absorption et d'extraction par solvant ont été considérables et ces méthodes peuvent être de plus en plus utilisées dans le processus principal ou dans la récupération des déchets, mais l'usine de Hanford était destinée à un processus de précipitation.

8.22. * Le phénomène de coprecipitation, c'est-à-dire la précipitation de petites concentrations d'un élément avec un précipité « porteur » d'un autre élément, a été couramment utilisé en chimie radioactive et a été adopté pour la séparation du plutonium. Les premiers travaux sur la chimie du plutonium, limités comme ils l'étaient à des quantités infimes de l'élément, ont fait un grand usage des précipitations

* Les paragraphes 8.22 à 8.26 sont cités ou paraphrasés d'un rapport général du Laboratoire métallurgique préparé au printemps 1945.

réactions à partir desquelles les propriétés de solubilité ont pu être déduites. Il était donc naturel que les méthodes de séparation par précipitation aient été les plus avancées au moment où la conception de l'installation a commencé. Il a été estimé que, si les différentes étapes du processus de séparation devaient être développées en partie par l'approche empirique, il y aurait moins de risques dans la mise à l'échelle d'un processus de précipitation que, par exemple, d'un processus impliquant des réactions en phase solide. De plus, les processus de précipitation à l'esprit pourraient être divisés en une séquence d'opérations répétées (appelées cycles), ce qui limiterait le nombre de pièces d'équipement différentes nécessitant une conception et permettrait des changements de processus considérables sans changement d'équipement. Ainsi, alors que la conception de base de l'usine a été faite avec une méthode à l'esprit, le choix final d'une méthode différente n'a conduit à aucun embarras.

8.23. La plupart des processus de précipitation qui ont fait l'objet d'un examen sérieux ont fait appel à une alternance entre les états d'oxydation (IV) et (VI) du plutonium. De tels processus impliquent une précipitation du plutonium (IV) avec un certain composé comme support, puis la dissolution du précipité, l'oxydation du plutonium à l'état (VI) et la reprécipitation du composé porteur pendant que le plutonium (VI) reste en solution. Les produits de fission qui ne sont pas transportés par ces composés restent en solution lorsque le plutonium (IV) est précipité. Les produits de fission qui transportent le plutonium sont éliminés de l'état (VI). Des cycles successifs d'oxydoréduction sont effectués jusqu'à ce que la décontamination souhaitée soit atteinte. Le processus d'élimination des produits de fission est appelé décontamination et le degré d'élimination est testé en mesurant le changement de radioactivité du matériau.

PROCESSUS COMBINÉS

8.24. Il est possible de combiner ou de coupler les différents types de processus. Certains avantages peuvent être obtenus de cette manière puisqu'un type de processus peut en compléter un autre. Par exemple, un procédé qui permet une bonne décontamination peut être combiné



MANHATTAN DISIK.cr



Ci-dessus : Bâtiment administratif du Manhattan Engineer District à Oak Ridge, Tennessee. Ci-dessous : Hanford, près de Pasco, Washington, qui abritait autrefois des

milliers d'ouvriers qui construisaient les usines de Hanford Engineer Works. Aujourd'hui, c'est une ville fantôme.

*yare .

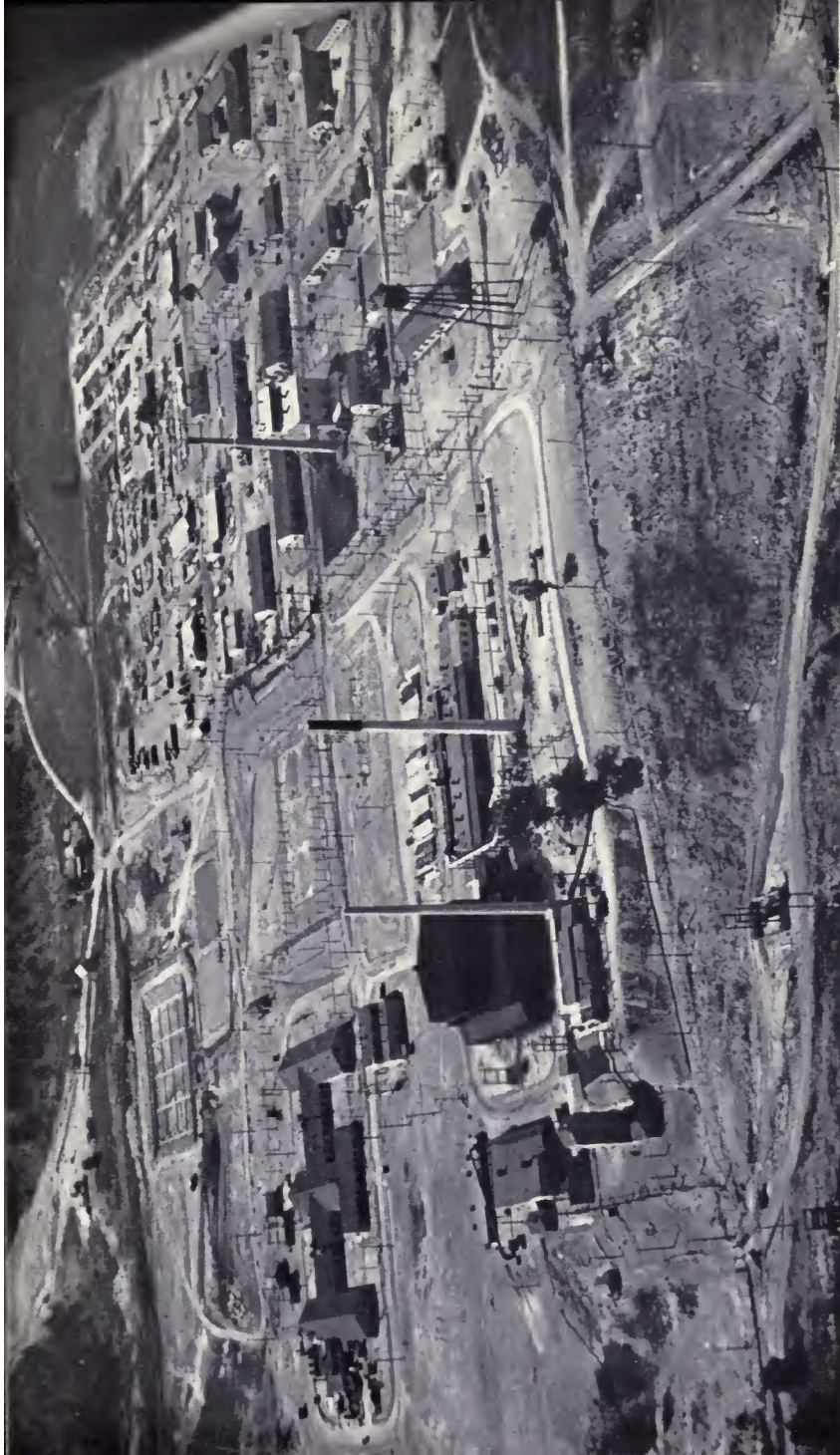
D-2047

R/CHI4ND

P A sco

SPOKAN E

Diagramme de site des Hanford Engineer M"orks près de Pasco, \Wash.



MANHATTAN DISTRICT

A pilot plant at the Clinton Engineer Works at Oak Ridge, Tenn.

Le premier - Le premier

Refu 4-



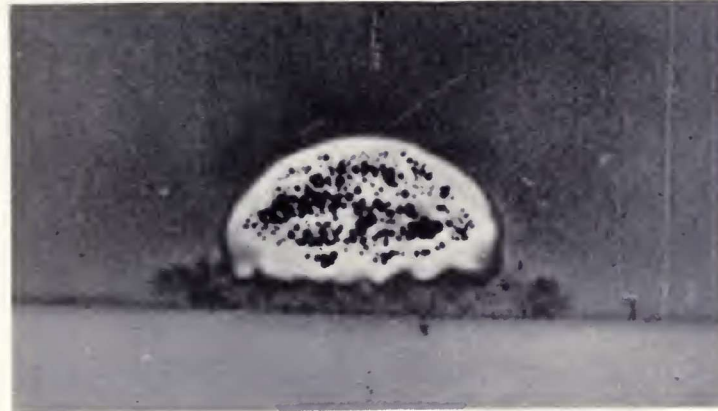
One of the production areas at the Hanford Engineer Works near Pasco, Wash.

14113 1

44141



ARMÉE AMÉRICAINÉ-ACME



Premier essai de la bombe atomique dans le New^M exico le 16 juillet, à une distance de 6 miles. Ci-dessus : Le début de l'explosion. Ce nuage s'est ensuite élevé à une hauteur de 40 000 pieds. Au centre : Nuage de couleur Xlulti de l'explosion. Les zones noires sont plus brillantes que le soleil lui-même, selon les observateurs. Ci-dessous : Une étape ultérieure du développement du cloud.



U.S. ARMY-ACME

Photograph taken at the moment the bomb exploded, from a distance of 6 miles.
The disc at the lower right corner is an accidental reflection on the camera lens.

qui, bien qu'inefficace pour la décontamination, serait très efficace pour la séparation de l'uranium.

8.25. Au moment où il est devenu nécessaire de décider du procédé qui devait servir de base à la conception de l'usine de Hanford (juin 1943), le choix, pour les raisons exposées ci-dessus, s'est limité aux processus de précipitation et se situait clairement entre deux de ces procédés. Cependant, le processus finalement choisi représentait en fait une combinaison des deux.

8.26. Le succès du processus de séparation à Hanford a dépassé toutes les attentes. Les rendements élevés et les facteurs de décontamination ainsi que la relative facilité d'utilisation ont amplement démontré la sagesse de son choix en tant que procédé. Ce choix s'est fondé sur une connaissance de la chimie du plutonium qui avait été glanée à partir de moins d'un milligramme de plutonium. D'autres développements pourraient rendre obsolète le procédé actuel de Hanford, mais l'objectif principal, qui était de disposer d'un procédé fonctionnel et efficace à utiliser dès que les piles de Hanford fourniraient du plutonium, a été atteint.

LE LABORATOIRE D'ARGONNE

8.27. Le laboratoire Argonne a été construit au début de 1943 à l'extérieur de Chicago. Le site, destiné à l'origine à une usine pilote, a ensuite été considéré comme trop proche de la ville et a été utilisé pour reconstruire la pile dite West Stands qui avait été construite à l'origine sur le terrain de l'Université de Chicago et qui était certainement inoffensive. Sous la direction de E. Fermi et de ses collègues, H. L. Anderson, W. H. Zinn, G. Weil et d'autres, cette pile a servi d'unité prototype pour les études de stabilité thermique, de contrôles, d'instruments et de blindage, et de source de neutrons pour les essais de matériaux et les études de physique des neutrons. En outre, il s'est avéré utile en tant qu'école de formation pour les opérateurs d'installations. Plus récemment, un tas d'eau lourde (voir ci-dessous) y a été construit.

8.28. Il n'est pas nécessaire de décrire en détail le premier tas d'Argonne, un tas de graphite-uranium. Les matériaux et la

structure en treillis sont presque identiques à ceux qui ont été utilisés pour l'original

Pile des Stands Ouest. La pile est un cube ; il est entouré d'un bouclier et possède des commandes et des dispositifs de sécurité quelque peu similaires à ceux utilisés plus tard à Clinton. Il n'a pas de système de refroidissement et fonctionne normalement à un niveau de puissance de seulement quelques kilowatts. Il a parfois été utilisé à des niveaux de puissance élevés pendant de très brèves périodes. Étant donné qu'il ne s'agit que d'une reconstruction de la première unité à réaction en chaîne jamais construite, il est étonnant qu'elle ait continué à fonctionner pendant plus de deux ans sans développer de problèmes majeurs.

8.29. L'une des utilisations les plus précieuses du pieu d'Argonne a été la mesure des sections efficaces d'absorption de neutrons d'une grande variété d'éléments qui pourraient être utilisés dans les pieux en tant qu'éléments structurels, etc., ou qui pourraient être présents dans les matériaux de pieux sous forme d'impuretés. Ces mesures sont effectuées en observant l'évolution des contrôles nécessaires pour que le keff soit égal à 1,00 lorsqu'une quantité connue de la substance étudiée est insérée à une position définie dans le tas. Les résultats obtenus étaient généralement exprimés en termes de « coèmes de danger ».

8.30. Une ouverture au sommet de la pile laisse sortir un faisceau très uniforme de neutrons thermiques qui peut être utilisé pour des expériences de pile exponentielle, pour des mesures directes de sections efficaces d'absorption, pour des études en chambre à brouillard de Wilson, etc.

8.31. Un phénomène intéressant qui se produit au sommet de la pile est la production d'un faisceau ou d'un flux de neutrons « froids ». Si une quantité additionnelle de graphite est interposée entre la surface supérieure de la pile et un point d'observation situé à quelques mètres au-dessus, la distribution d'énergie neutronique correspond à une température beaucoup plus basse que celle du graphite. Ceci est présumé être le résultat d'une transmission préférentielle par le graphite cristallin des neutrons les plus lents (« les plus froids »), dont la longueur

d'onde de la mécanique quantique est grande par rapport à la distance entre les plans successifs dans les cristaux de graphite.

8.32. Plus récemment, un tas utilisant de l'eau lourde comme modérateur a été construit dans le laboratoire d'Argonne. Le faisceau de neutrons de très haute intensité produit par cette pile s'est avéré bien adapté à l'étude de l'optique neutronique, c'est-à-dire de la réflexion et de la réfraction des faisceaux de neutrons comme par le graphite.

8.33. L'un des objectifs constants du Laboratoire d'Argonne a été de mieux comprendre les processus nucléaires dans l'uranium, le neptunium et le plutonium. Des expériences répétées ont été faites pour améliorer la précision de constantes telles que les sections efficaces de fission thermique de l'U-235, de l'U-238 et du Pu-239, les probabilités d'absorption de neutrons sans fission par chacun de ces noyaux et le nombre de neutrons émis par fission. .

L'USINE CLINTON

8.34. Au chapitre VI, nous avons mentionné les plans d'une usine « pilote » de production de plutonium qui sera construite sur le site de Clinton dans le Tennessee. En janvier 1943, les plans de ce projet étaient bien avancés ; La construction a commencé peu de temps après. M. D. Whitaker fut nommé directeur des laboratoires Clinton. Les plans de l'usine pilote sont réalisés en collaboration par du Pont et le Laboratoire métallurgique ; la construction a été réalisée par du Pont ; L'exploitation de l'usine a été maintenue par l'Université de Chicago dans le cadre du projet métallurgique.

8.35. L'usine Clinton avait pour principaux objectifs de produire du plutonium et de servir d'usine pilote pour la séparation chimique. En ce qui concerne la recherche, l'accent était mis à Clinton sur la chimie et sur les effets biologiques des radiations. Un grand laboratoire a été mis à disposition pour les analyses chimiques, pour la recherche sur les méthodes de purification, pour l'étude des produits de fission, pour la mise au point de

procédés d'extraction et de décontamination à échelle intermédiaire, etc. Plus tard, un « laboratoire chaud », c'est-à-dire un laboratoire pour le travail télécommandé sur des matières hautement radioactives, a été fourni. Il y a aussi un magasin d'instruments et un laboratoire qui a été utilisé très activement. Il y a des installations pour le travail clinique et expérimental de la division de la santé, qui a été très active. Il y a un petit laboratoire de physique dans lequel des travaux importants ont été effectués en utilisant des intensités neutroniques plus élevées que celles disponibles au laboratoire d'Argonne. Les principales installations construites sur le site du laboratoire Clinton étaient le pieu et l'usine de séparation ; Ceux-ci sont brièvement décrits ci-dessous.

LA PILE CLINTON

8.36. Dans toute pile fonctionnant de manière stable, le facteur de multiplication effectif k doit être maintenu à 1, quel que soit le niveau de puissance. Le meilleur k qui avait été observé dans un réseau uranium-graphite n'a pas pu être obtenu dans un tas pratique en raison de fuites de neutrons, d'un système de refroidissement, de canaux cylindriques pour l'uranium, d'un revêtement protecteur sur l'uranium et d'autres facteurs mineurs. Compte tenu du refroidissement par air et d'une température maximale de sécurité pour la surface de l'uranium, il a fallu choisir une taille de pile capable de produire 1 000 kW. Le k effectif diminuerait avec l'augmentation de la température, mais pas suffisamment pour être un facteur déterminant. Bien qu'une sphère ait été la forme idéale, des considérations pratiques recommandaient un bloc rectangulaire.

8.37. L'empilement Clinton est constitué d'un cube de graphite contenant des canaux horizontaux remplis d'uranium. L'uranium se présente sous la forme de cylindres métalliques protégés par des enveloppes étanches au gaz en aluminium. Les cylindres d'uranium ou les bouchons peuvent être glissés dans les canaux du graphite ; De l'espace est laissé pour permettre à l'air de refroidissement de circuler et pour permettre de pousser les

limaces à l'arrière du tas lorsqu'elles sont prêtes à être traitées. Outre les canaux pour les limaces, il y a divers autres trous à travers le tas pour les tiges de contrôle, les instruments, etc.

8.38. La pile de Clinton était considérablement plus grande que la première pile de Chicago (voir chapitre VI). Plus important que l'augmentation de la taille de la pile de Clinton, c'était son système de refroidissement, ses boucliers plus lourds et ses moyens de changer les limaces. L'objectif de production de l'usine de Clinton a été fixé à un chiffre, ce qui signifiait que le pieu devait fonctionner à un niveau de puissance de 1 000 kW.

8.39. L'instrumentation et les commandes sont en principe identiques à celles de la première pile. L'intensité des neutrons dans la pile est mesurée par une chambre d'ionisation BF₃ et est contrôlée par des tiges d'acier au bore qui peuvent être déplacées à l'intérieur et à l'extérieur de la pile, faisant ainsi varier la fraction de neutrons disponibles pour produire la fission.

8.40. En dépit d'un nombre impressionnant d'instruments et de dispositifs de sécurité, la caractéristique la plus frappante de la pile est la simplicité de

opération. La plupart du temps, les opérateurs n'ont rien d'autre à faire que d'enregistrer les lectures de divers instruments.

L'INSTALLATION DE SÉPARATION

8.41. Ici, comme à Hanford, les procédés de traitement du plutonium doivent être effectués à distance et derrière d'épais boucliers. L'équipement de séparation est logé dans une série de cellules adjacentes aux murs en béton épais. Ces cellules forment une structure continue (canyon) d'environ 100 pieds de long et enterrée aux deux tiers dans le sol. À côté de ce canyon se trouvent les salles de contrôle, les laboratoires d'analyse et un laboratoire pour la purification ultérieure du plutonium après qu'il ait été décontaminé jusqu'au point de sécurité relative.

8.42. Les limaces d'uranium qui ont été exposées dans le tas sont transférées sous l'eau dans la première de ces cellules et sont ensuite dissoutes. Les opérations suivantes sont effectuées en pompant des solutions ou des boues d'un réservoir ou d'une centrifugeuse à un autre.

PERFORMANCE DE LA PILE CLINTON

8.43. La pile Clinton a commencé à fonctionner le 4 novembre 1943 et, en quelques jours, elle a été portée à un niveau de puissance de 500 kW à une température maximale de surface de 110°C . L'amélioration de la circulation de l'air et l'élévation de la température maximale de surface de l'uranium à 150°C . a porté le niveau de puissance à environ 800 kW, où il a été maintenu jusqu'au printemps 1944. À partir de ce moment-là, un changement a été apporté à la distribution de l'uranium, le changement étant destiné à niveler la distribution de puissance dans le tas en réduisant la quantité de métal près du centre par rapport à celle plus éloignée et à augmenter ainsi le niveau de puissance moyen sans atteindre nulle part une température trop élevée. Dans le même temps, des améliorations ont été réalisées dans l'étanchéité des chemises anti-balles, ce qui a permis d'opérer le pieu à une température plus élevée. En conséquence, un niveau de puissance de 1 800 kW a été atteint en mai 1944 ; ce chiffre a encore été augmenté après l'installation de meilleurs ventilateurs en juin 1944.

8.44. Ainsi, la performance des pieux de juin 1944 a largement dépassé les attentes. En termes de facilité de contrôle, de stabilité de fonctionnement et d'absence de rayonnement dangereux, la pile a été des plus satisfaisantes. Il y a eu très peu de défaillances attribuables à des erreurs de conception ou de construction.

8.45. Le pieu lui-même était simple tant en principe qu'en pratique. Ce n'est pas le cas de l'usine de séparation du plutonium. Le passage de la première pile à réaction en chaîne à la pile Clinton était raisonnablement prévisible ; mais une étape beaucoup plus grande et plus incertaine était nécessaire dans le cas du processus de séparation, car l'usine de séparation de Clinton a été conçue sur la base d'expériences utilisant seulement des quantités de microgrammes de plutonium.

8.46. Néanmoins, le processus de séparation a fonctionné ! Le premier lot de limaces de la pile est entré dans l'usine de séparation le 20 décembre 1943. À la fin du mois de janvier 1944, le métal de la pile était acheminé vers l'usine de séparation

à raison de % tonne par jour. Le 1er février 1944, 190 mg de plutonium avaient été livrés et le 1er mars 1944, plusieurs grammes avaient été livrés. De plus, l'efficacité de la récupération au tout début était d'environ 50 %, et en juin 1944, elle se situait entre 80 et 90 %.

8.47. Pendant toute cette période, un grand groupe de chimistes à Clinton a travaillé à l'amélioration du procédé et à sa mise au point pour Hanford. Le problème de Hanford différait de celui de Clinton en ce sens que l'on s'attendait à des concentrations beaucoup plus élevées de plutonium. De plus, bien qu'il faille féliciter les chimistes pour le succès de l'usine Clinton, le processus est compliqué et coûteux. Toute amélioration du rendement ou de la décontamination ou de la simplification générale était très à désirer.

8.48. Outre la mise à l'épreuve de la pile et de l'usine de séparation et la production de plusieurs grammes de plutonium à des fins expérimentales à Chicago, Clinton et ailleurs, les laboratoires Clinton ont été d'une valeur inestimable en tant que centre de formation et d'essai pour Hanford, pour des expériences médicales, des études sur les piles, des études de purification et des études physiques et chimiques du plutonium et des produits de fission. 8.49. Comme c'est le cas pour le genre de problèmes auxquels on s'est attaqué là et à Chicago, les problèmes suivants, énumérés dans un seul rapport de routine pour mai 1944, sont pertinents :

Problèmes résolus au cours du mois de mai 1944 : Recherche de nouveaux oxydants

Agent, effet du rayonnement sur l'eau et les solutions aqueuses, solubilité du peroxyde de plutonium, composés de plutonium adaptés à l'expédition, distribution du produit de fission dans les solutions de traitement de l'usine, conception préliminaire du procédé pour l'extraction par adsorption, assistance aux semi-usines d'adsorption, achèvement de la conception du procédé d'adsorption.

Problèmes attribués au cours du mois de mai 1944 : analyse des nouveaux produits

Méthode, effet des rayonnements sur le graphite, amélioration du rendement, exploration de nouveaux pieux, récupération des déchets d'uranium, surveillance des gaz de cheminée,

élimination des solutions de déchets actifs, refroidissement par pulvérisation de la pile X, programme de formation à l'analyse, normalisation des méthodes d'analyse, développement de méthodes d'analyse, appareil blindé pour les essais de contrôle des procédés, expérience en chambre à brouillard, particules alpha de l'uranium 235, distribution radiale des produits, diffraction des neutrons.

L'USINE DE HANFORD

8.50. Il n'entre pas dans le cadre du présent rapport de rendre compte de la construction de l'usine d'ingénierie de Hanford, mais il faut espérer que l'histoire complète de cette entreprise extraordinaire et de l'entreprise qui l'accompagne, l'usine d'ingénierie de Clinton, sera publiée à un moment donné dans l'avenir. Le site de Hanford a été examiné par des représentants du général Groves et du Pont à la fin de 1942, et l'utilisation du site a été approuvée par le général Groves après l'avoir inspecté personnellement. C'était sur la rive ouest du fleuve Columbia, dans le centre de l'État de Washington, au nord de Pasco. Dans les premiers mois de 1943, une parcelle de 200 milles carrés dans cette région a été acquise par le gouvernement (par bail ou achat) par l'intermédiaire de la Division immobilière du bureau du chef du génie. Finalement, une zone de près de mille milles carrés a été placée sous le contrôle du gouvernement. Au moment de l'acquisition des terres, il y avait quelques fermes et deux petits villages, Hanford et Richland, sur le site, qui était par ailleurs des plaines d'armoises et des collines stériles. Le 6 avril 1943, le premier coup de pioche a été donné pour le camp de construction de Hanford. À son apogée en 1944, ce camp était une ville de 60 000 habitants, la quatrième plus grande ville de l'État. Aujourd'hui, cependant, le camp est pratiquement désert car l'équipe d'exploitation est logée à Richland.

8.51. Les travaux ont commencé sur la première pile de production de Hanford le 7 juin 1943 et l'exploitation de la première pile a commencé en septembre 1944. Le site était à l'origine prévu pour cinq pieux, mais la construction de

seulement trois a été entreprise. Outre les piles, il y a, bien sûr, des usines de séparation du plutonium, des stations de pompage et des stations d'épuration des eaux. Il y a aussi un pieu à réaction en chaîne de faible puissance pour les essais de matériaux. Non seulement les pieux eux-mêmes sont largement espacés pour des raisons de sécurité, à plusieurs kilomètres l'un de l'autre, mais les usines de séparation sont bien éloignées des pieux et les uns des autres. Les trois piles étaient en service à l'été 1945.

MISE EN CONSERVE ET CORROSION

8.52. Quiconque a vécu la période de conception et de construction de l'usine de Hanford n'est pas susceptible d'oublier le problème de la mise en conserve, c'est-à-dire le problème de l'étanchéité des boules d'uranium dans des gaines métalliques protectrices. Lors de ses visites périodiques à Chicago, l'auteur pouvait estimer grossièrement l'état du problème de la mise en conserve par l'atmosphère de tristesse ou de joie qui régnait autour du laboratoire. Il n'était certainement pas simple de trouver une gaine qui protégerait l'uranium de la corrosion de l'eau, empêcherait les produits de fission d'entrer dans l'eau, transmettrait la chaleur de l'uranium à l'eau et n'absorberait pas trop de neutrons. Pourtant, la défaillance d'une seule boîte de conserve pourrait nécessiter l'arrêt de toute une pile d'exploitation.

8.53. Les tentatives visant à satisfaire aux exigences strictes ont nécessité des travaux expérimentaux sur les procédés de galvanoplastie, les procédés de trempage à chaud, les procédés de cimentation-enrobage, les alliages d'uranium résistants à la corrosion et les procédés mécaniques de gainage ou de mise en conserve. Du point de vue de la physique nucléaire, il était possible d'utiliser des chemises mécaniques ou des boîtes d'aluminium mince, et on a choisi très tôt comme la solution la plus probable du problème. Mais le problème de l'obtention d'une liaison uniforme et conductrice de chaleur entre l'uranium et l'aluminium environnant, et le problème de la fermeture

étanche au gaz de la boîte se sont tous deux avérés très gênants. La mise au point de méthodes alternatives a dû être poussée jusqu'à la dernière minute, et même jusqu'à quelques semaines avant qu'il ne soit temps de charger les boules d'uranium dans le tas, il n'y avait aucune certitude que l'un des procédés en cours de développement serait satisfaisant. Une dernière modification mineure mais apparemment importante dans le procédé de mise en conserve préféré a été adoptée en octobre 1944, après que le premier tas ait commencé son fonctionnement expérimental. À l'été 1945, aucune défaillance de boîte n'avait été signalée.

ÉTAT ACTUEL DES USINES DE HANFORD

8.54. Au cours de l'automne 1944 et des premiers mois de 1945, les deuxième et troisième pieux de Hanford ont été achevés et mis en service, en tant qu'installations supplémentaires de séparation chimique. Il y avait, bien sûr, quelques difficultés ; Cependant, aucune des craintes exprimées quant à l'échec de la mise en conserve, à la formation d'un film ^{dans les tubes de l'évaluateur VV} ou aux effets des rayonnements dans les processus chimiques ne s'est avérée justifiée. Au début de l'été 1945, les piles fonctionnent à la puissance nominale, produisant du plutonium et réchauffant le fleuve Columbia. * Les usines chimiques séparent le plutonium de l'uranium et des produits de fission avec une meilleure efficacité que prévu. Le produit fini est en cours de livraison. La manière dont il peut être utilisé fait l'objet du chapitre XII.

LES TRAVAUX SUR L'EAU LOURDE

8.55. • Dans les chapitres précédents, il a été fait référence aux avantages de l'eau lourde en tant que modérateur. Il est plus efficace que le graphite pour ralentir les neutrons et il a une absorption de neutrons plus faible que le graphite. Il est donc possible de construire

*L'augmentation réelle de la température est si faible qu'aucun effet sur la vie des poissons ne peut être attendu. Pour s'en assurer doublement, cette attente a été confirmée par une série d'expériences élaborées.

une unité réagissant en chaîne avec de l'uranium et de l'eau lourde et d'atteindre ainsi un facteur de multiplication considérablement plus élevé, k , et une taille plus petite que ce qui est possible avec le graphite. Mais il faut avoir l'eau lourde.

8.56. Au printemps 1943, le Laboratoire métallurgique décida de mettre davantage l'accent sur les expériences et les calculs visant un tas d'eau lourde. À cette fin, un comité fut mis en place sous la direction de E. Wigner, un groupe dirigé par H. C. Vernon fut transféré de Columbia à Chicago, et H. D. Smyth, qui venait de devenir directeur adjoint du Laboratoire, fut invité à prendre la direction générale.

8.57. La première fonction de ce groupe a été d'examiner la meilleure façon d'utiliser l'eau lourde pour assurer le succès global du projet métallurgique, en tenant compte du calendrier limité de production d'eau lourde qui avait déjà été autorisé.

8.58. Il est devenu évident que le calendrier de production était si faible qu'il faudrait deux ans pour produire suffisamment d'eau lourde pour « modérer » un tas de bonne taille pour la production de plutonium. D'un autre côté, il pourrait y avoir assez d'eau lourde pour modérer un petit tas de « laboratoire », qui pourrait fournir des informations qui pourraient être précieuses. Quoi qu'il en soit, au cours de l'été 1943, les incertitudes sur la durée de la guerre et sur le succès des autres parties du projet DSM étaient si grandes qu'une étude complète des possibilités de pieux en eau lourde semblait souhaitable. Soit le calendrier de production d'eau lourde pourrait être accéléré, soit le tas expérimental plus petit pourrait être construit. Une étude approfondie de la question a été faite au cours de l'été 1943, mais en novembre, il a été décidé d'écourter le programme et la construction a été limitée à une pile de 250 kw située sur le site d'Argonne.

LE TAS D'EAU LOURDE D'ARGONNE

8.59. L'aspect le plus frappant de l'amas d'uranium et d'eau lourde de l'Argonne est peut-être sa petite taille. Même avec son

bouclier de béton environnant, il est relativement petit par rapport aux piles d'uranium-graphite.

8.60. Le 15 mai 1944, l'amas d'uranium et d'eau lourde de l'Argonne est prêt à être testé. Avec les boules d'uranium en place, il a été constaté que la réaction en chaîne dans le tas devenait auto-entretenu lorsque seulement les trois cinquièmes de l'eau lourde avaient été ajoutés. La réactivité du tas était tellement supérieure aux attentes qu'elle aurait été au-delà de la capacité des barres de contrôle si le reste de l'eau lourde avait été ajouté. Pour faire face à cette situation inhabituelle et agréable, une partie de l'uranium a été retirée et des barres de contrôle supplémentaires ont été ajoutées.

8.61. Grâce à ces modifications, il a été possible de remplir le réservoir au niveau prévu. Le 4 juillet 1944, ^{1.V.} H. Zinn a rapporté que la pile fonctionnait de manière satisfaisante à 190 kW, et le 8 août 1944, il a signalé qu'elle fonctionnait à 300 kW.

8.62. En général, les caractéristiques de ce tas différaient légèrement de celles des pieux de graphite comparables. Ce tas met plusieurs heures à atteindre l'équilibre. Il montre des fluctuations de niveau de puissance faibles (moins de 1 %) mais soudaines, probablement causées par des bulles dans l'eau. Il ne peut pas être arrêté aussi complètement ou aussi rapidement que le tas de graphite en raison de la tendance des rayons gamma retardés à produire (à partir de l'eau lourde) des neutrons supplémentaires. Comme prévu, la densité neutronique au centre est élevée. Les boucliers, les commandes, l'échangeur de chaleur, etc., ont fonctionné de manière satisfaisante.

LA DIVISION SANTÉ

8.63. L'objectif principal du groupe de santé était, en un sens, négatif, de veiller à ce qu'aucune personne concernée ne subisse de préjudice grave en raison des risques particuliers de l'entreprise. Les antécédents médicaux de personnes ayant subi des blessures graves ou la mort à la suite de radiations n'étaient absolument pas souhaités. Le succès de la division de la santé

dans la résolution de ces problèmes a été remarquable. Même dans le groupe de recherche où le contrôle est le plus difficile, les cas montrant des effets néfastes, même temporaires, étaient extrêmement rares. Les facteurs de sécurité utilisés dans la conception et l'exploitation des installations sont si importants que les risques de la maison et de la voiture familiale sont beaucoup plus importants pour le personnel que ceux résultant des usines.

8.64. Pour atteindre son objectif, le groupe de la santé a travaillé selon trois axes principaux :

Adoption d'examens physiques préalables à l'embauche et de réexamens fréquents, en particulier pour les personnes exposées aux rayonnements.

Établissement de normes de tolérance pour les doses de rayonnement et mise au point d'instruments mesurant l'exposition du personnel ; donner des conseils sur le blindage, etc. ; mesurer en permanence l'intensité des rayonnements à divers endroits des centrales ; mesurer la contamination des vêtements, des bureaux de laboratoire, des eaux usées, de l'atmosphère, etc.

Effectuer des recherches sur les effets de l'exposition directe des personnes et des animaux à divers types de rayonnements, ainsi que sur les effets de l'ingestion et de l'inhalation de diverses matières radioactives ou toxiques telles que les produits de fission, le plutonium et l'uranium.

EXAMENS DE ROUTINE

8.65. Le nombre de globules blancs a été utilisé comme critère principal pour déterminer si une personne souffrait d'une surexposition aux rayonnements. Un certain nombre de cas de numération anormalement bas ont été observés et corrélés avec le degré de surexposition. Les personnes sensiblement touchées ont été mutées à d'autres emplois ou ont pris de brèves vacances ; aucun n'a montré d'effets nocifs permanents.

8.66. Dans le même temps, il a été reconnu que le nombre de globules blancs n'est pas un critère entièrement fiable. Certains

travaux sur des animaux ont indiqué que des dommages graves pourraient survenir avant que la numération globulaire ne donne une indication de danger. En conséquence, des tests sanguins plus élaborés ont été effectués sur des individus sélectionnés et sur des animaux de laboratoire dans l'espoir de trouver un test qui donnerait un avertissement plus précoce d'une blessure imminente.

INSTRUMENTS DE MESURE DES RAYONNEMENTS

8.67. La Division de la santé a été la principale responsable de la mise au point d'appareils de mesure de poche permettant d'indiquer le degré d'exposition des personnes. Le premier de ces instruments était un simple électroscope de la taille et de la forme d'un stylo plume. Ces instruments se chargeaient électrostatiquement au début de chaque journée et étaient lus à la fin de la journée. Le degré auquel ils ont été déchargés indiquait la quantité totale de rayonnements ionisants à laquelle ils avaient été exposés. Malheureusement, ils n'étaient pas trop robustes et fiables, mais l'erreur de lecture était presque toujours dans la bonne direction, c'est-à-dire dans le sens d'une surestimation de l'exposition. Très tôt, la pratique a été établie de distribuer deux de ces compteurs de poche à toute personne entrant dans une zone dangereuse. Un registre des relevés a été tenu au moment de l'émission et aussi au moment de la remise des compteurs. Les compteurs eux-mêmes ont été continuellement améliorés, bien que progressivement. Plus tard, la Division de la santé a introduit des « badges de film », de petits morceaux de film portés dans le badge d'identification, les films étant périodiquement développés et examinés pour détecter le noircissement par rayonnement. Ces instruments pour les particuliers, tels que le compteur de poche et le badge de film, étaient des précautions supplémentaires et probablement inutiles. Dans les installations permanentes, le blindage seul offre normalement une sécurité totale. Son effet fait l'objet d'une étude fréquente à l'aide d'instruments fixes ou portatifs.

8.68. La Division de la santé a coopéré avec la Division de la physique à la mise au point et à l'utilisation de divers autres instruments. Il y avait « Sneezy » pour mesurer la concentration de poussières radioactives dans l'air et « Pluton » pour mesurer la contamination émettrice (généralement du plutonium) des bureaux et des équipements de laboratoire. Des compteurs ont été utilisés pour vérifier la contamination des blouses de laboratoire avant et après le lavage des blouses. Aux portes de sortie de certains laboratoires, des compteurs dissimulés sonnaient l'alarme au passage d'une personne dont les vêtements, la peau ou les cheveux étaient contaminés. En outre, des inspections de routine des zones de laboratoire ont été effectuées.

8.69. L'une des études réalisées concernait la météorologie. Il est devenu essentiel de savoir si les gaz de cheminée (à Clinton et à Hanford) seraient susceptibles de répandre des produits de fission radioactifs à des concentrations dangereuses. Étant donné que le comportement de ces gaz est très dépendant des conditions météorologiques, des études ont été faites à la fois à la fois et à la fin de l'année.

sur une période de plusieurs mois, et un fonctionnement satisfaisant de la cheminée a été spécifié.

RECHERCHE

8.70. Étant donné que l'ampleur et la variété des risques liés aux rayonnements dans cette entreprise étaient sans précédent, toutes les précautions raisonnables ont été prises ; mais il n'y avait pas de moyen sûr de déterminer l'adéquation des précautions. Il était essentiel de compléter les connaissances antérieures de la manière la plus complète possible. À cette fin, un vaste programme d'expérimentation animale a été mené selon trois axes principaux : (1) exposition aux rayonnements neutroniques, alpha, bêta et gamma ; 2° l'ingestion d'uranium, de plutonium et de produits de fission ; 3° l'inhalation d'uranium, de plutonium et de produits de fission. Sous la direction générale du Dr Stone, ces expériences ont été menées à Chicago, à Clinton et à

l'Université de Californie, principalement par le Dr Cole et le Dr Hamilton. Des résultats étendus et précieux ont été obtenus.

RÉSUMÉ

8.71 Les contraintes d'espace et de sécurité empêchent un rapport détaillé sur les travaux des laboratoires et des usines qui s'occupent de la production de plutonium.

8.72. Deux types d'absorption neutronique sont fondamentaux pour le fonctionnement de la centrale : d'une part, l'absorption de neutrons dans l'uranium 235 entraînant une fission, maintient la réaction en chaîne comme source de neutrons ; l'autre, l'absorption neutronique dans l'uranium 238, conduit à la formation de plutonium, le produit recherché.

8.73. Le déroulement d'une réaction nucléaire en chaîne dans un empilement hétérogène modéré en graphite peut être décrit en suivant une seule génération de neutrons. Le nombre des neutrons rapides d'origine est légèrement augmenté par fission rapide, réduit par l'absorption de résonance dans l'U-238 et encore réduit par l'absorption aux énergies thermiques dans le graphite et d'autres matériaux et par l'échappement ; les neutrons restants, qui ont été ralentis dans le graphite, provoquent la fission de l'U-235, produisant une nouvelle génération de neutrons rapides similaire à la génération précédente.

8.74. Le produit, le plutonium, doit être séparé par des procédés chimiques d'une quantité comparable de produits de fission et d'une quantité beaucoup plus importante d'uranium. Parmi plusieurs procédés de séparation possibles, celui choisi consiste en une série de réactions comprenant la précipitation avec des transporteurs, la dissolution, l'oxydation et la réduction.

8.75. La réaction en chaîne a été étudiée à faible puissance au laboratoire d'Argonne à partir du début de 1943. Les processus de réaction en chaîne et de séparation chimique ont été étudiés aux laboratoires Clinton à partir de novembre 1943, et une quantité appréciable de plutonium y a été produite.

8.76. La construction de l'usine de production principale à Hanford, dans l'État de Washington, a commencé en 1943 et le premier grand pieu a été mis en service en septembre 1944. L'ensemble de l'usine était en service à l'été 1945 et toutes les installations de pieux à réaction en chaîne et de séparation chimique fonctionnaient mieux que prévu.

8.77. Des études approfondies ont été faites sur l'utilisation de l'eau lourde comme modérateur et une pile expérimentale contenant de l'eau lourde a été construite au laboratoire d'Argonne. Le projet d'une usine de production utilisant de l'eau lourde a été abandonné.

8.78 La Division de la santé a été active dans trois domaines principaux : 1) l'examen médical du personnel ; 2° des conseils sur les risques d'irradiation et un contrôle constant des conditions de travail ; 3° la recherche sur les effets des rayonnements. La planification minutieuse et le travail de recherche exhaustif de cette division ont permis d'obtenir un dossier de santé exceptionnel à Hanford et ailleurs dans le projet.

CHAPITRE IX. DISCUSSION GÉNÉRALE SUR LE SÉPARATION DES ISOTOPES

NOTE INTRODUCTIVE

9.1. La possibilité de produire une bombe atomique d'uranium 235 a été reconnue avant la découverte du plutonium. Parce qu'il a été compris à une date précoce que la séparation des isotopes de l'uranium serait une étape directe et majeure vers la fabrication d'une telle bombe, les méthodes de séparation des isotopes de l'uranium ont été examinées pendant au moins six ans. L'attention ne s'est pas non plus limitée à l'uranium, car on s'est rendu compte que la séparation du deutérium était également d'une grande importance. Dans le présent chapitre, nous discuterons des problèmes généraux de la séparation isotopique ; Les chapitres suivants traiteront de l'application spécifique de divers procédés.

FACTEURS AFFECTANT LA SÉPARATION DES ISOTOPES

9.2. Par définition, les isotopes d'un élément diffèrent par leur masse mais pas par leurs propriétés chimiques. Plus précisément, bien que les masses et les structures nucléaires diffèrent, les charges nucléaires sont identiques et donc les structures électroniques externes sont pratiquement identiques. Dans la plupart des cas, les isotopes d'un élément ne sont donc séparables que par des processus dépendant de la masse nucléaire.

9.3. Il est bien connu que les molécules d'un gaz ou d'un liquide sont en mouvement continu et que leur énergie cinétique moyenne ne dépend que de la température, et non des propriétés chimiques des molécules. Ainsi, dans un gaz constitué d'un mélange de deux isotopes, l'énergie cinétique moyenne des molécules légères et des molécules lourdes est la même. Puisque l'énergie cinétique d'une molécule est $\frac{1}{2}mv^2$, où m est la masse et v la vitesse de la molécule, il est évident qu'en moyenne la vitesse d'une molécule plus légère doit être

supérieure à celle d'une molécule plus lourde. Par conséquent, au moins en principe, tout processus dépendant de la vitesse moyenne des molécules peut être utilisé pour séparer les isotopes. Malheureusement, la vitesse moyenne est inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse, de sorte que la différence est très faible pour les composés gazeux des isotopes de l'uranium. De plus, bien que les vitesses moyennes diffèrent, les plages de vitesse se chevauchent considérablement. Dans le cas de l'hexafluorure d'uranium gazeux, par exemple, plus de 49 % des molécules légères ont des vitesses aussi faibles que celles de 50 % des molécules lourdes.

9.4. De toute évidence, il n'existe aucun moyen réalisable d'appliquer des forces mécaniques directement aux molécules individuellement ; Ils ne peuvent pas être piqués avec un bâton ou tirés avec une ficelle. Mais ils sont soumis à des champs gravitationnels et, s'ils sont ionisés, peuvent être affectés par des champs électriques et magnétiques. Les forces gravitationnelles sont, bien sûr, proportionnelles à la masse. Dans un vide très poussé, les atomes d'U-235 et d'U-238 tomberaient avec la même accélération, mais tout comme une plume et une pierre tombent à des vitesses très différentes dans l'air où il y a des forces de frottement qui résistent au mouvement, il peut y avoir des conditions dans lesquelles une combinaison de forces gravitationnelles et intermoléculaires opposées aura tendance à déplacer les atomes lourds différemment des atomes légers. Les champs électriques et magnétiques sont plus faciles à contrôler que les champs gravitationnels ou les champs « pseudogravitationnels » (c'est-à-dire les champs de force centrifuge) et sont très efficaces pour séparer les ions de masses différentes.

9.5. Outre les forces gravitationnelles ou électromagnétiques, il y a, bien sûr, les forces interatomiques et intermoléculaires. Ces forces régissent l'interaction des molécules et affectent ainsi les vitesses des réactions chimiques, les processus d'évaporation, etc. En général, ces forces dépendent des électrons externes des molécules et non des masses nucléaires. Cependant, chaque fois que les forces entre des atomes ou

des molécules séparés conduisent à la formation de nouvelles molécules, un effet de masse (généralement très faible) apparaît. Conformément aux lois de la mécanique quantique, les niveaux d'énergie des molécules sont légèrement modifiés, et différemment pour chaque isotope. De tels effets modifient légèrement le comportement de deux isotopes dans certaines réactions chimiques, comme nous le verrons, bien que la différence de comportement soit beaucoup plus faible que les différences familières de comportement chimique entre un élément et un autre.

9.6. Tels sont donc les principaux facteurs dont il peut être nécessaire de tenir compte dans la conception d'un procédé de séparation : l'égalité de l'énergie cinétique thermique moyenne des molécules à une température donnée, les effets gravitationnels ou centrifuges proportionnels aux masses moléculaires, les forces électriques ou magnétiques affectant les molécules ionisées et les forces interatomiques ou intermoléculaires. Dans certains processus de séparation isotopique, un seul de ces effets est impliqué et le taux global de séparation peut être prédit. Dans d'autres processus de séparation isotopique, un certain nombre de ces effets se produisent simultanément, de sorte que la prédiction devient difficile.

CRITÈRES D'ÉVALUATION D'UN PROCESSUS DE SÉPARATION

9.7. Avant d'aborder des procédés particuliers adaptés à la séparation isotopique, nous devons savoir ce que l'on veut. Les principaux critères à utiliser pour juger d'un processus de séparation isotopique sont les suivants.

FACTEUR DE SÉPARATION

9.8. Le facteur de séparation, parfois appelé facteur d'enrichissement ou de fractionnement d'un procédé, est le rapport entre la concentration relative de l'isotope souhaité après traitement et sa concentration relative avant traitement. Défini plus précisément : si, avant le traitement, les nombres d'atomes des isotopes de nombre de masse m_1 et m_2 sont respectivement n_1 et n_2 (par gramme du mélange isotopique) et si, après le traitement, les nombres correspondants sont n_1' et n_2' , alors le facteur de séparation est :

$$r = \frac{n'_1/n'_2}{n_1/n_2}$$

Cette définition peut s'appliquer à une étape d'une installation de séparation ou à une installation entière composée de plusieurs étapes. Nous nous intéressons généralement soit au facteur de séparation « en une seule étape », soit au facteur de séparation « global » de l'ensemble du processus. Si r n'est que légèrement supérieur à l'unité, comme c'est souvent le cas pour un seul étage, le nombre $r - 1$ est parfois plus utile que r . La quantité $r - 1$ est appelée facteur d'enrichissement. Dans l'uranium naturel $n_1/n_2 = 235/238$, et $n'_1/n'_2 = 90/10$ environ, mais dans 90 % U-235, $n_1/n_2 = 90/10$ %. Par conséquent, dans un procédé produisant 90 % d'uranium 235 à partir d'uranium naturel, la valeur globale de r doit être d'environ 1 260.

RENDEMENT

9.9. Dans presque tous les procédés, un facteur de séparation élevé signifie un faible rendement, ce qui exige des compromis permanents. Sauf indication contraire, nous indiquerons les rendements en U-235. Ainsi, un dispositif de séparation avec un facteur de séparation de 2 – c'est-à-dire $n_1/n_2 = 2$ – et un rendement d'un grama-jour est un dispositif qui, à partir de l'uranium naturel, produit, en une journée, une matière composée de 1 gramme d'U-235 mélangé à 70 grammes d'U-238.

RETARD

9.10. La quantité totale de matières immobilisées dans une installation de séparation est appelée « hold-up ». Le blocage peut être très important dans une usine composée de plusieurs étapes.

TEMPS DE DÉMARRAGE

9.11. Dans une installation de séparation où le taux d'attente est important, il faut beaucoup de temps, peut-être des semaines ou des mois, pour que les conditions d'exploitation soient stables.

Dans l'estimation des horaires, ce temps de « démarrage » ou d'« équilibre » doit être ajouté au temps de construction de l'usine.

EFFICACITÉ

9.12. Si une certaine quantité de matière première est introduite dans une installation de séparation, une partie de la matière sera enrichie, une autre appauvrie, une autre inchangée. Des parties de chacune de ces trois fractions seront perdues et des parties récupérées. L'importance d'une récupération très efficace du matériau enrichi est évidente. Dans certains procédés, la quantité de matière inchangée est négligeable, mais dans d'autres, notamment dans la méthode électromagnétique décrite ci-dessous, elle

est la fraction la plus importante et, par conséquent, l'efficacité avec laquelle elle peut être récupérée pour le recyclage est très importante. L'importance de la récupération des matériaux appauvris varie considérablement en fonction du degré d'appauvrissement. Ainsi, en général, il y a beaucoup d'efficiences différentes à prendre en compte.

COÛT

9.13. Comme dans toutes les parties du projet d'uranium, le coût en temps était plus important que le coût en argent. En conséquence, un certain nombre d'usines de séparation à grande échelle pour l'uranium 235 et le deutérium ont été construites à des coûts supérieurs à ceux qui auraient été nécessaires si la construction avait pu être retardée de plusieurs mois ou années jusqu'à ce que des procédés plus idéaux soient mis au point.

CERTAINS PROCÉDÉS DE SÉPARATION

DIFFUSION GAZEUSE

9.14. Dès 1896, Lord Rayleigh a montré qu'un mélange de deux gaz de poids atomique différent pouvait être partiellement séparé en permettant à une partie de celui-ci de se diffuser à travers une barrière poreuse dans un espace évacué. En raison de leur vitesse moyenne plus élevée, les molécules du gaz léger diffusent plus

rapidement à travers la barrière, de sorte que le gaz qui a traversé la barrière (c'est-à-dire le « diffusat ») est enrichi en constituant plus léger et que le gaz résiduel qui n'a pas traversé la barrière est appauvri en constituant plus léger. Le gaz le plus enrichi en constituant plus léger est ce que l'on appelle le « diffusat instantané » ; C'est la partie qui se diffuse avant que l'appauvrissement du résidu ne soit devenu appréciable. Si le processus de diffusion se poursuit jusqu'à ce que presque tout le gaz ait traversé la barrière, l'enrichissement moyen du diffusat diminue naturellement. Dans le chapitre suivant, nous examinerons ces phénomènes plus en détail. Nous nous contenterons de faire remarquer ici que, dans l'hypothèse où les vitesses de diffusion sont inversement proportionnelles aux racines carrées des poids moléculaires, le facteur de séparation pour le diffusat instantané, appelé « facteur de séparation idéal » α , est donné par

$$\alpha = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

où M_1 est le poids moléculaire du gaz le plus léger et M_2 celui du plus lourd. L'application de cette formule au cas de l'uranium permettra d'illustrer l'ampleur du problème de la séparation. Étant donné que l'uranium lui-même n'est pas un gaz, un composé gazeux de l'uranium doit être utilisé. Le seul qui convienne manifestement est l'hexafluorure d'uranium, UF_6 , qui a une pression de vapeur d'une atmosphère à une température de $56^\circ C$. Comme le fluor n'a qu'un seul isotope, les deux hexafluorido d'uranium importants sont ^{235}U et ^{238}U ; leurs poids moléculaires sont 349 et 352. Ainsi, si l'on laisse une petite fraction d'une quantité d'hexafluorure d'uranium se diffuser à travers une barrière poreuse, le diffusat sera enrichi en ^{235}U d'un

facteur

$$\alpha = 1.0043$$

On est loin des 1 260 requis (voir paragraphe 9.8).

9.15. De tels calculs pourraient donner l'impression qu'il est inutile de séparer les isotopes (à l'exception, peut-être, des isotopes de l'hydrogène) par des processus de diffusion. En fait, cependant, de telles méthodes peuvent être utilisées avec succès, même pour l'uranium. C'est la méthode de diffusion gazeuse que F. W. Aston a utilisée dans la première séparation partielle des isotopes (en fait les isotopes du néon). Plus tard, G. Hertz et d'autres, en exploitant des unités de diffusion de recyclage à plusieurs étages, ont pu obtenir une séparation pratiquement complète des isotopes du néon. Étant donné que le système de recyclage en plusieurs étapes est nécessaire pour presque toutes les méthodes de séparation, il sera décrit en détail immédiatement après les remarques introductives sur les différentes méthodes auxquelles il est pertinent.

DISTILLATION FRACTIONNÉE

9.16. La séparation par distillation de composés de différents points d'ébullition, c'est-à-dire de différentes pressions de vapeur, est un procédé industriel bien connu. La séparation de l'alcool et de l'eau (entre lesquels la différence de point d'ébullition est de l'ordre de 20° C) s'effectue généralement dans un simple alambic en n'utilisant qu'un seul évaporateur et un seul condenseur. La matière condensée (condensat) peut être collectée et redistillée plusieurs fois si nécessaire. Pour la séparation de composés à peu près au même point d'ébullition, il serait trop laborieux d'effectuer le nombre nécessaire d'évaporations et de condensations successives en opérations séparées. Au lieu de cela, une séparation continue est effectuée dans une tour de fractionnement. Essentiellement, le but d'une tour de fractionnement est de produire un flux de vapeur dirigé vers le haut et un flux de liquide dirigé vers le bas, les deux flux étant en contact intime et échangeant constamment des molécules. Les molécules de la fraction ayant le point d'ébullition le plus bas ont une tendance relativement plus grande à pénétrer dans le courant de vapeur et vice versa. De telles méthodes de distillation à contre-courant peuvent être appliquées à la séparation de l'eau légère et de l'eau lourde, dont le point d'ébullition diffère de 1,4° C.

9.17. La méthode d'écoulement à contre-courant est utile non seulement dans les procédés de distillation diphasique (liquide-gaz), mais aussi dans d'autres procédés de séparation tels que ceux impliquant une diffusion résultant de variations de température (gradients) dans des systèmes monophasiques ou de forces centrifuges. Les contre-courants peuvent être constitués de deux gaz, de deux liquides ou d'un gaz et d'un liquide.

LA CENTRIFUGEUSE

9.18. Nous avons souligné que la séparation gravitationnelle de deux isotopes peut se produire puisque les forces gravitationnelles tendant à déplacer les molécules vers le bas sont proportionnelles aux poids moléculaires, et que les forces intermoléculaires tendant à résister au mouvement vers le bas dépendent de la configuration électronique, et non des poids moléculaires. Étant donné que la centrifugeuse est essentiellement une méthode d'application de forces pseudogravitationnelles de grande ampleur, elle a été très tôt considérée comme une méthode de séparation des isotopes. Cependant, les premières expériences avec des centrifugeuses ont échoué. Plus tard

Le développement de la centrifugeuse à grande vitesse par J. W. Beams et d'autres a conduit au succès. H. C. Urey a suggéré l'utilisation de centrifugeuses cylindriques hautes à flux à contre-courant ; De telles centrifugeuses ont été développées avec succès.

9.19. Dans une telle centrifugeuse à contre-courant, il y a un flux de vapeur vers le bas dans la partie extérieure du cylindre rotatif et un flux de vapeur vers le haut dans la région centrale ou axiale. Dans la région d'interface entre les deux courants, il y a une diffusion constante des deux types de molécules d'un courant à l'autre, mais le champ de force radial de la centrifugeuse agit plus fortement sur les molécules lourdes que sur les molécules légères, de sorte que la concentration des molécules lourdes augmente dans la région périphérique et diminue dans la région axiale. et vice versa pour les molécules plus légères.

9.20. Le grand intérêt de la centrifugeuse dans la séparation d'isotopes lourds comme l'uranium est que le facteur de séparation dépend de la différence entre les masses des deux isotopes, et non de la racine carrée du rapport des masses comme dans les méthodes de diffusion.

MÉTHODE DE DIFFUSION THERMIQUE

9.21. La théorie cinétique des gaz prédit l'ampleur des différences dans les vitesses de diffusion des gaz de poids moléculaires différents. La possibilité d'accomplir une séparation pratique des isotopes par diffusion thermique a d'abord été suggérée par des études théoriques sur les détails des collisions moléculaires et des forces entre molécules. De telles études faites par Enskog et par Chapman avant 1920 ont suggéré que s'il y avait un gradient de température dans un gaz mixte, il y aurait une tendance pour un type de molécule à se concentrer dans la région froide et l'autre dans la région chaude. Cette tendance dépend non seulement des poids moléculaires, mais aussi des forces entre les molécules. Si le gaz est un mélange de deux isotopes, l'isotope le plus lourd peut s'accumuler dans la région chaude ou froide ou pas du tout, selon la nature des forces intermoléculaires. En fait, le sens de séparation peut s'inverser lorsque la température ou la concentration relative est modifiée.

9.22. De tels effets de diffusion thermique ont été utilisés pour la première fois pour séparer les isotopes par H. Clusius et G. Dickel en Allemagne en 1938. Ils ont construit un tube vertical contenant un fil chauffé tendu le long de l'axe du tube et produisant une différence de température d'environ 600° C entre l'axe et la périphérie. L'effet a été double. En premier lieu, les isotopes lourds (dans les substances qu'ils ont étudiées) se sont concentrés près de la paroi extérieure froide, et en second lieu, le gaz froid à l'extérieur avait tendance à couler tandis que le gaz chaud à l'axe avait tendance à monter. Ainsi, la convection thermique a mis en place un flux à contre-courant, et la diffusion thermique a

provoqué l'écoulement préférentiel des molécules lourdes vers l'extérieur à travers l'interface entre les deux courants.

9.23. La théorie de la diffusion thermique dans les gaz est assez complexe ; celle de la diffusion thermique dans les liquides est pratiquement impossible. Il existe cependant un effet de séparation qui a été utilisé avec succès pour séparer les hexafluorures d'uranium léger et d'uranium lourd.

PROCEDE D'ECHANGE CHIMIQUE

9.24. Dans l'introduction de ce chapitre, nous avons souligné qu'il y avait des raisons d'espérer que la séparation isotopique pourrait être réalisée par des réactions chimiques ordinaires. Il a en effet été constaté que dans les réactions d'échange simples entre des composés de deux isotopes différents, la soi-disant constante d'équilibre n'est pas exactement une, et donc que dans les réactions de ce type, la séparation peut se produire. Par exemple, dans l'échange catalytique d'hydrogène gazeux entre l'hydrogène gazeux et l'eau, l'eau contient entre trois et quatre fois plus de concentration de deutérium que l'hydrogène gazeux en équilibre avec lui. Avec l'hydrogène et la vapeur d'eau, l'effet est du même type général, mais l'équilibre s'établit plus rapidement. Il est possible d'adapter cette méthode à un arrangement continu à contre-courant comme celui utilisé dans la distillation, et de tels arrangements sont effectivement utilisés pour la production d'eau lourde. La méthode générale est bien comprise, et l'on sait que les effets de séparation diminuent en général avec l'augmentation du poids moléculaire, de sorte qu'il n'y a qu'un Il y a peu de chances d'appliquer cette méthode avec succès à des isotopes lourds comme l'uranium.

MÉTHODE D'ÉLECTROLYSE

9.25. La méthode d'électrolyse de séparation des isotopes est le résultat de la découverte que l'eau contenue dans les cellules électrolytiques utilisées dans la production commerciale régulière d'hydrogène et d'oxygène a une concentration accrue de

molécules d'eau lourde. Une explication complète de l'effet n'a pas encore été élaborée. Avant la guerre, la quasi-totalité de la production d'hydrogène lourd se faisait par électrolyse. C'est en Norvège que la production était de loin la plus importante, mais c'est aux États-Unis qu'il y en avait eu assez pour de nombreuses fins expérimentales.

MÉTHODES STATISTIQUES EN GÉNÉRAL

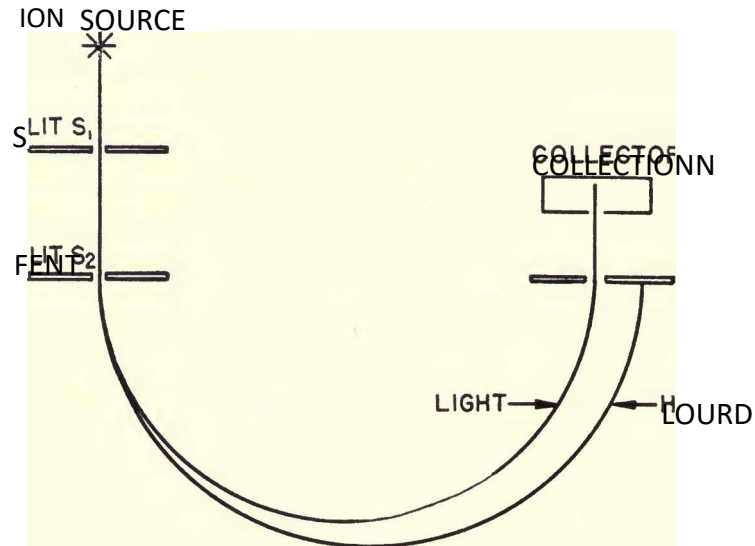
9.26. Les six méthodes de séparation isotopique que nous avons décrites jusqu'à présent (diffusion, distillation, centrifugation, diffusion thermique, réactions d'échange et électrolyse) ont toutes été essayées avec un certain degré de succès sur l'uranium ou l'hydrogène, ou les deux. Chacune de ces méthodes dépend de petites différences dans le comportement moyen des molécules de différents isotopes. Parce qu'une moyenne est par définition une question statistique, toutes ces méthodes dépendant essentiellement du comportement moyen sont appelées méthodes statistiques.

9.27. En ce qui concerne les critères établis pour juger les processus de séparation, les six méthodes statistiques sont assez similaires. Dans tous les cas, le facteur de séparation est faible, de sorte que de nombreuses étapes successives de séparation sont nécessaires. Dans la plupart des cas, des quantités relativement importantes de matériaux peuvent être manipulées dans des installations de taille moyenne. Les valeurs d'attente et de temps de démarrage varient considérablement, mais sont généralement élevées. La similitude des six méthodes fait qu'il n'est pas souhaitable de faire le choix final de la méthode sans avoir d'abord étudié en détail l'isotope particulier, le taux de production, etc., souhaité. Les méthodes de réaction d'échange et d'électrolyse ne conviennent probablement pas dans le cas de l'uranium, et aucun schéma de distillation de l'uranium n'a survécu. Les trois autres méthodes ont été mises au point avec plus ou moins de succès pour l'uranium, mais ne sont pas utilisées pour l'hydrogène.

LA MÉTHODE ÉLECTROMAGNÉTIQUE ET SES LIMITES

9.28. L'existence d'isotopes non radioactifs a été démontrée pour la première fois lors de l'étude du comportement des molécules de gaz

ionisées se déplaçant dans des champs électriques et magnétiques. Il s'agit simplement d'une



CHAMP MAGNÉTIQUE PERPENDICULAIRE AU PLAN DU DESSIN

tels champs qui constituent la base de la méthode dite de spectrographie de masse ou électromagnétique de séparation des isotopes. Cette méthode est la meilleure disponible pour déterminer l'abondance relative de nombreux types d'isotopes. La méthode est constamment utilisée pour vérifier les résultats des méthodes de séparation isotopique de l'uranium que nous avons déjà décrites. La raison pour laquelle cette méthode est si précieuse est qu'elle peut facilement effectuer une séparation presque complète des isotopes très rapidement et avec un faible retard et un temps de démarrage court. S'il en est ainsi, on peut se demander pourquoi une autre méthode de séparation est envisagée. La réponse est qu'un spectrographe de masse ordinaire

ne peut traiter que des quantités très infimes de matière, généralement de l'ordre de fractions de microgramme par heure.

9.29. Pour comprendre les raisons de cette limitation du rendement, nous exposerons le principe de fonctionnement d'un type simple de spectrographe de masse utilisé pour la première fois par A. J. Dempster en 1918. Un tel instrument est illustré schématiquement dans le dessin de la p. 164. Le composé gazeux à séparer est introduit dans la source d'ions, où certaines de ses molécules sont ionisées dans une décharge électrique. Certains de ces ions passent par la fente S1. Entre s1 et s2, ils sont accélérés par un champ électrique qui leur donne pratiquement la même énergie cinétique, des milliers de fois supérieure à leur énergie thermique moyenne. Puisqu'ils ont maintenant tous pratiquement la même énergie cinétique, les ions plus légers doivent avoir moins de moments que les ions lourds. En entrant dans le champ magnétique à la fente s2, tous les ions se déplaceront perpendiculairement au champ magnétique dans des trajectoires semi-circulaires de rayons proportionnels à leur quantité de mouvement. Par conséquent, les ions légers se déplaceront en demi-cercles plus petits que les ions lourds, et avec un positionnement correct du collecteur, seuls les ions légers seront collectés.

9.30. En remettant à plus tard l'examen détaillé d'un tel dispositif de séparation, nous pouvons signaler les principales considérations qui limitent la quantité de matière qui le traverse. Ils sont de trois ordres : Premièrement, il est difficile de produire de faibles quantités d'ions gazeux. Deuxièmement, un faisceau d'ions fortement limité est généralement utilisé (comme dans le cas illustré) de sorte que seule une fraction des ions produits est utilisée. Troisièmement, des densités trop élevées d'ions dans un faisceau peuvent provoquer des effets de charge d'espace qui interfèrent avec l'action de séparation. Les méthodes électromagnétiques développées avant 1941 avaient des facteurs de séparation très élevés, mais des rendements et des rendements très faibles. Ce sont les raisons qui, avant l'été 1941, ont incité le

Comité de l'uranium à exclure de telles méthodes de séparation à grande échelle de l'U-235. (Voir Paragraphe 4 :31.) Depuis lors, il a été démontré que les limites ne sont pas insurmontables. En fait, les premiers échantillons de taille appréciable d'U-235 pur ont été produits par un séparateur électromagnétique, comme nous le verrons dans un chapitre ultérieur.

AUTRES MÉTHODES DE SÉPARATION ISOTOPIQUE

9.31. Outre les méthodes de séparation isotopique décrites ci-dessus, plusieurs autres méthodes ont été essayées. Il s'agit notamment de la méthode de mobilité ionique qui, comme son nom l'indique, repose sur le fait suivant : dans une solution électrolytique, deux ions chimiquement identiques mais de masse différente progressent à travers la solution à des vitesses différentes sous l'action d'un champ électrique. Cependant, la différence de mobilité sera faible et facilement obscurcie par des effets perturbateurs. A. K. Brewer du Bureau of Standards a rapporté qu'il était capable de séparer les isotopes du potassium par cette méthode. Brewer a également obtenu des résultats intéressants avec une méthode d'évaporation. Deux nouvelles méthodes électromagnétiques, l'isotron et la centrifugeuse ionique, sont décrites au chapitre XI. L'isotron a produit un certain nombre d'échantillons de taille raisonnable d'uranium partiellement séparé. La centrifugeuse ionique a également produit des échantillons d'uranium montrant une séparation, mais son action était erratique.

CASCADES ET PROCÉDÉS COMBINÉS

9.32. Dans toutes les méthodes statistiques de séparation des isotopes, de nombreuses étapes successives de séparation sont nécessaires pour obtenir un matériau contenant 90 % ou plus d'U-235 ou de deutérium. Une telle série d'étapes de séparation successives est appelée cascade si l'écoulement est continu d'une étape à l'autre. (Une tour de fractionnement de plaques séparées, telle que celle qui a été décrite, est un exemple d'une simple cascade d'unités de séparation.) Une analyse complète des problèmes d'une cascade peut être présentée en termes généraux. En fait, il a été mis au point par R. P. Feynman de Princeton et d'autres pour un certain type de séparateur électromagnétique et

par K. Cohen et I. Kaplan de Columbia, par M. Benedict et A. M. Squires de la Kellogg Corporation et d'autres pour les procédés de diffusion. Pour l'instant, nous ne ferons que deux remarques sur les plantes à plusieurs stades ou « en cascade ».

9.33. Le premier point est qu'il doit y avoir recyclage. Si l'on considère une installation de séparation de l'U-235, le matériau introduit dans n'importe quel étage au-dessus du premier a déjà été enrichi en U-235. Une partie de cette matière première peut être enrichie en passant par l'étape considérée. Le reste s'appauvrira généralement, mais pas au point d'être sans valeur. Il doit être ramené à un stade antérieur et recyclé. Même le matériau appauvri de la première étape (le moins enrichi) peut valoir la peine d'être recyclé ; une partie de l'U-235 qu'il contient encore peut être récupérée (dépouillée).

9.34. Le deuxième point est que le problème du recyclage change considérablement aux stades supérieurs (plus enrichis). En supposant un fonctionnement stable de l'étage, nous voyons que le flux net d'uranium à travers le premier étage doit être au moins 140 fois plus important que le dernier étage. Le débit net d'un étage donné est proportionnel à la concentration relative d'U-238 et diminue donc avec le nombre d'étages passés. Étant donné qu'un échantillon donné de matériau est recyclé plusieurs fois, la quantité de matériau traitée à chaque étape est bien supérieure au flux net à travers cette étape, mais elle est proportionnelle à celui-ci.

9.35. Nous mentionnons ces points pour illustrer une phase du problème de la séparation qui n'est pas toujours évidente, à savoir que le processus de séparation qui est le meilleur pour un stade précoce de la séparation n'est pas nécessairement le meilleur pour un stade ultérieur. Des facteurs tels que ceux que nous avons mentionnés diffèrent non seulement d'une étape à l'autre, mais aussi d'un processus à l'autre. Par exemple, le recyclage est beaucoup plus simple dans une installation de diffusion que dans une installation électromagnétique. Une usine combinant deux ou plusieurs procédés peut très bien être la meilleure pour réaliser la

séparation globale requise. Dans les stades inférieurs (plus grands), la taille de l'équipement et la puissance requise pour celui-ci peuvent déterminer le choix du procédé. Dans les stades supérieurs (plus petits), ces facteurs sont compensés par la commodité de l'opération et le temps de retard, ce qui peut indiquer un processus différent.

LES USINES D'EAU LOURDE ; L'USINE PILOTE DE CENTRIFUGEUSES

9.36. Les deux chapitres suivants sont consacrés à la description des trois méthodes utilisées pour la séparation à grande échelle des isotopes de l'uranium. Ce sont les seules installations de séparation isotopique qui se sont avérées d'une importance majeure pour le projet jusqu'à présent. À un stade antérieur, il semblait probable que la centrifugeuse pourrait être la meilleure méthode pour séparer les isotopes de l'uranium et que l'eau lourde serait nécessaire comme modérateur. Nous décrivons brièvement l'usine pilote de centrifugeuses et les installations de production d'eau lourde.

LES PLANTES LOURDES ITVATER

9.37. Deux méthodes sont utilisées pour la concentration du deutérium. Il s'agissait de la distillation fractionnée de l'eau et de la méthode de réaction d'échange hydrogène-eau.

9.38. La première d'entre elles suit des méthodes de distillation fractionnée bien établies, sauf qu'une distillation très poussée est nécessaire en raison de la légère différence de point d'ébullition entre l'eau légère et l'eau lourde. De plus, en raison de cette même petite différence, la quantité de vapeur nécessaire est très importante. La méthode est très coûteuse en raison de ces facteurs, mais les usines pourraient être construites avec un minimum de travail de développement. Les usines ont été démarrées par du Pont en janvier 1943 et ont été mises en service vers janvier 1944.

9.39. La deuxième méthode de préparation de l'eau lourde repose sur l'échange catalytique du deutérium entre l'hydrogène gazeux et l'eau. Lorsqu'un tel échange est établi par des catalyseurs, la

concentration du deutérium dans l'eau est supérieure à celle du gaz d'un facteur d'environ trois, comme nous l'avons déjà vu.

9.40. Dans ce processus, l'eau est introduite dans une tour et s'écoule à contre-courant de l'hydrogène et de la vapeur de manière complexe. Au bas de la tour, l'eau est convertie en hydrogène gazeux et en oxygène gazeux dans des cellules électrolytiques et l'hydrogène est renvoyé au bas de la tour mélangé à de la vapeur. Ce mélange de vapeur et d'hydrogène passe à travers des lits de catalyseur et des bulles à travers l'eau qui s'écoule. Essentiellement, une partie du deutérium à l'origine dans l'hydrogène se concentre dans la vapeur, puis est transférée dans l'eau qui s'écoule vers le bas. L'usine proprement dite se compose d'une cascade de tours avec les plus grandes tours à l'extrémité d'alimentation et les plus petites tours à l'extrémité de production. Une telle cascade suit le même principe général que ceux qui ont été discutés ci-dessus en ce qui concerne ^{les} problèmes de séparation en général. Ce procédé nécessitait la sécurisation de catalyseurs très actifs pour les réactions d'échange. Le catalyseur le plus efficace de ce type a été découvert par H. S. Taylor à l'Université de Princeton, tandis qu'un deuxième catalyseur, moins actif, a été découvert par A. von Grosse. Dans le développement de ces catalyseurs, R. H. Crist de l'Université Columbia a fait les déterminations nécessaires des constantes physiques et H. R. Arnold de du Pont a fait le travail de développement sur l'un des catalyseurs.

9.41. Ce procédé était économique. L'usine a été installée dans les usines de la Consolidated Mining & Smelting Co., à Trail, en Colombie-Britannique, au Canada, en raison de la nécessité d'utiliser de l'hydrogène électrolytique. La construction de l'usine fut sous la direction de E. V. Murphree et F. T. Barr de la Standard Oil Development Co.

L'USINE PILOTE DE CENTRIFUGEUSES

9.42. Pendant longtemps, au début du projet, la méthode de diffusion gazeuse et la méthode de la centrifugeuse ont été

considérées comme les deux méthodes de séparation les plus susceptibles de réussir avec l'uranium. Les deux allaient être difficiles à réaliser à grande échelle. Après la réorganisation en décembre 1941, la recherche et le développement de la méthode de centrifugation se poursuivirent à l'Université de Virginie et au laboratoire de la Standard Oil Development Company à Bayway. Fabriquer de grandes centrifugeuses capables de fonctionner à des vitesses très élevées était une tâche majeure entreprise par la Westinghouse Electric and Manufacturing Company d'East Pittsburgh.

9.43. En raison de l'ampleur des problèmes techniques en cause, aucune usine de production à grande échelle n'a jamais été autorisée, mais une usine pilote a été autorisée et construite à Bayway. Il a fonctionné avec succès et a donné à peu près le degré de séparation prédit par la théorie. Cette usine a ensuite été fermée et les travaux sur la méthode de centrifugation ont été interrompus. Pour cela,

La raison pour laquelle il n'est pas question de la méthode de centrifugation n'est pas donnée dans le présent rapport.

SÉPARATION ISOTOPIQUE PAR RAPPORT À LA PRODUCTION DE PLUTONIUM

9.44 Les méthodes les plus importantes de séparation isotopique qui ont été décrites étaient connues en principe et avaient été mises en pratique avant que la séparation des isotopes de l'uranium ne revête une importance capitale. Ils n'ont pas été appliqués à l'uranium, à l'exception de la séparation de quelques microgrammes, et ils n'ont été appliqués à aucune substance à une échelle comparable à celle qui est maintenant requise. Mais les questions fondamentales étaient celles des coûts, de l'efficacité et du temps, et non des questions de principe ; En d'autres termes, le problème était fondamentalement technique et non scientifique. Le problème de la production de plutonium n'a atteint un stade similaire qu'après que le premier tas à réaction en chaîne auto-entretenue ait fonctionné et que les premières quantités de

microgramme de plutonium aient été séparées. Même après cette étape, de nombreuses expériences réalisées dans le cadre du projet de plutonium étaient d'un intérêt vital pour l'utilisation militaire de l'U-235 ou du plutonium, et pour le développement futur de l'énergie nucléaire. En conséquence, le projet sur le plutonium a continué d'avoir un intérêt plus général que les projets de séparation isotopique. De nombreux problèmes particuliers se sont posés dans les projets de séparation, qui étaient extrêmement intéressants et nécessitaient une grande capacité scientifique pour leur solution, mais qui doivent encore être tenus secrets. C'est pour ces raisons que le présent rapport non technique a mis l'accent sur le projet sur le plutonium et accordera moins de place aux projets de séparation. Cela ne veut pas dire que le problème de la séparation était plus facile à résoudre ou que sa solution était moins importante.

RÉSUMÉ

9.45. Sauf dans les séparateurs électromagnétiques, la séparation isotopique dépend de petites différences dans le comportement moyen des molécules. De tels effets sont utilisés dans six méthodes de séparation « statistiques » :

(1) diffusion gazeuse, (2) distillation, (3) centrifugation, (4) diffusion thermique, (5) réactions d'échange, (6) électrolyse. Il est probable que seuls (1), (3) et (4) conviennent à l'uranium ; (2), (5) et (6) sont préférés pour la séparation du deutérium de l'hydrogène. Dans toutes ces méthodes « statistiques », le facteur de séparation est faible, de sorte que de nombreuses étapes sont nécessaires, mais dans le cas de chaque méthode, de grandes quantités de matière peuvent être manipulées. Toutes ces méthodes avaient été essayées avec un certain succès avant 1940 ; cependant, aucun n'a été utilisé à grande échelle et aucun n'a été utilisé pour l'uranium. L'échelle de production par les méthodes électromagnétiques était encore plus petite, mais le facteur de séparation était plus important. Il y avait des limites apparentes d'échelle pour la méthode électromagnétique. On a présumé qu'il

y avait des avantages à combiner deux méthodes ou plus en raison des différences de performance aux différents stades de séparation. Le problème de la mise au point de l'une ou de l'autre de ces méthodes de séparation n'était pas un problème de principe, mais un problème technique d'échelle et de coût. Ces développements peuvent donc être rapportés plus brièvement que ceux du projet plutonium, bien qu'ils ne soient pas moins importants. Une usine pilote a été construite à l'aide de centrifugeuses et a fonctionné avec succès. Aucune usine à grande échelle n'a été construite. Les usines ont été construites pour la production d'eau lourde par deux méthodes différentes.

CHAPITRE X. LA SÉPARATION DES ISOTOPES DE L'URANIUM PAR GAZ DIFFUSION

INTRODUCTION

10.1. C'est en février 1940 que de petites quantités de fractions concentrées des trois isotopes de l'uranium des masses 234, 235 et 238 ont été obtenues par A. O. Nier à l'aide de son spectromètre de masse et ont été remises à E. T. Booth, A. von Grosse et J. R. Dunning pour étude avec le cyclotron de l'Université Columbia. Ces hommes ont rapidement démontré que l'U-235 était l'isotope susceptible d'être fissionné par les neutrons thermiques. Il était donc naturel que ce groupe, sous la direction de Dunning, s'intéresse plus que jamais à la séparation à grande échelle des isotopes de l'uranium.

10.2. La méthode de diffusion a apparemment été examinée sérieusement pour la première fois par Dunning dans un memorandum à G. B. Pegram, qui a été envoyé à L. J. Briggs à l'automne 1940. Ce memorandum résumait les enquêtes préliminaires menées par E. T. Booth, A. von Grosse et J. R. Dunning. Les travaux ont été accélérés en 1941 avec l'aide financière fournie par un contrat que H. C. Urey avait reçu de la Marine pour l'étude de la séparation isotopique, principalement par la méthode de centrifugation. Au cours de cette période, F. G. Slack de l'Université Vanderbilt et W. F. Libby de l'Université de Californie ont rejoint le groupe. Un contrat de l'OSRD (OEMsr-106) portant spécifiquement sur des études de diffusion est entré en vigueur le 1er juillet 1941 et a duré un an. Les travaux se sont poursuivis à une échelle croissante dans le cadre d'une série de contrats de l'OSRD et de l'armée jusqu'au printemps 1945. Jusqu'en mai 1943, Dunning était immédiatement responsable de ce travail ; Urey était responsable des méthodes statistiques en général. À partir de ce moment-là et jusqu'en février 1945, Urey était directement responsable de la partie Columbia du 172

travail de diffusion, Dunning continuant d'être directeur de l'une des principales divisions. Le 1er mars 1945, le laboratoire a été repris de Columbia par Carbide and Carbon Chemicals Corporation. Au début de 1942, à la suggestion de E. V. Murphree, la société M. W. Kellogg a été engagée pour élaborer des plans de production à grande échelle d'équipement d'usine de diffusion et, éventuellement, pour construire une usine à grande échelle. Pour mener à bien cette entreprise, une nouvelle filiale a été créée appelée Kellex Corporation. En janvier 1943, la Carbide and Carbon Chemicals Corporation se voit confier la responsabilité de l'exploitation de l'usine.

10.3. Ainsi qu'il a été dit au chapitre IV, à la fin de 1941, la possibilité de séparer les hexafluorures d'uranium avait été démontrée en principe au moyen d'une unité de diffusion à un étage utilisant une barrière poreuse (par exemple, une barrière réalisée par gravure d'une mince feuille d'alliage argent-zinc avec de l'acide chlorhydrique). Des travaux considérables sur les barrières et les pompes ont également été effectués, mais aucune réponse entièrement satisfaisante pour une exploitation à grande échelle n'a été trouvée. En outre, K. Cohen avait commencé une série d'études théoriques, auxquelles il a déjà été fait référence, sur ce qui pourrait être la meilleure façon d'utiliser le processus de diffusion, c'est-à-dire sur le nombre d'étapes nécessaires, sur la surface de barrière globale nécessaire, sur le volume de gaz qui devrait circuler. etc. Les études théoriques et le développement de procédés par M. Benedict ont beaucoup ajouté aux connaissances dans ce domaine et ont servi de base à la conception de la grande usine.

10.4. Les rapports reçus des Britanniques, ainsi que la visite du groupe britannique au cours de l'hiver 1941-1942, ont clarifié un certain nombre de points. À cette époque, les Britanniques projetaient une installation de séparation par diffusion, de sorte que les discussions avec F. Simon, R. Peierls et d'autres étaient particulièrement précieuses.

LES PRINCIPES DE LA SÉPARATION PAR DIFFUSION

UNE SEULE ÉTAPE DE DIFFUSION

10.5. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, la vitesse de diffusion d'un gaz à travers une barrière poreuse idéale est inversement proportionnelle

174

à la racine carrée de son poids moléculaire. Ainsi, si un gaz composé de deux isotopes commence à diffuser à travers une barrière dans un récipient sous vide, l'isotope le plus léger (de poids moléculaire M_1) diffuse plus rapidement que l'isotope plus lourd (de poids moléculaire M_2). Le résultat, pendant une courte période de temps, au moins, est que la concentration relative de l'isotope le plus léger est plus grande de l'autre côté de la barrière que du côté proche. Mais si l'on laisse le processus se poursuivre indéfiniment, l'équilibre s'établira et les concentrations deviendront identiques des deux côtés de la barrière. Même si le gaz diffus (le gaz qui a traversé la barrière) est aspiré par une pompe, la quantité relative de l'isotope lourd traversant la barrière augmentera puisque l'isotope léger du côté proche de la barrière a été épuisé par la première partie de la diffusion.

10.6. Pour une seule opération de diffusion, l'augmentation de la concentration relative de l'isotope léger dans le gaz diffusé par rapport au gaz d'alimentation peut être exprimée en termes de facteur de séparation r ou de facteur d'enrichissement, $r - 1$, tous deux définis au paragraphe 9.8 du chapitre précédent. On peut en déduire une équation assez simple qui donne $r - 1$ en termes de poids moléculaires et de fraction du gaz d'origine qui s'est diffusé. Si cette fraction est très petite, l'équation se réduit à $r = a$, le "facteur de séparation idéal" du paragraphe 9.14. Si la fraction diffusée est appréciable, l'équation montre la diminution attendue de la séparation. Par exemple, si la moitié du gaz se diffuse, $r - 1 = .69(a - 1)$, ou pour l'hexafluorure

d'uranium $r = 1,003$ par rapport à la valeur de $1,0043$ lorsqu'une très petite fraction du gaz d'origine s'est diffusée.

LA CASCADE

10.7. Pour séparer les isotopes de l'uranium, il faut utiliser de nombreuses étapes de diffusion successives (c'est-à-dire une cascade) puisque $a = 1,0043$ pour l' $^{235}\text{F6}$ et l' $^{238}\text{F6}$, un gaz possible pour la séparation de l'uranium. Des études menées par Cohen et d'autres ont montré que la meilleure disposition d'écoulement pour les étages successifs est celle dans laquelle la moitié du gaz pompé dans chaque étage se diffuse à travers la barrière, l'autre moitié (appauvrie) étant renvoyée à l'alimentation du suivant

étage inférieur. Pour un tel arrangement, comme nous l'avons vu, l'effet de séparation idéal entre l'alimentation et la sortie d'un seul étage est de $0,69 (a - 1)$. C'est ce qu'on appelle souvent e , « l'enrichissement global par étape ». Pour les hexafluorures d'uranium, $e = 0,003$, en théorie ; mais c'est un peu moins dans la pratique à la suite d'une « rétrodiffusion », d'un mélange imparfait du côté de la haute pression et d'imperfections de la barrière. La première séparation expérimentale des hexafluorures d'uranium (par E. T. Booth, H. C. Paxton et C. B. Slade) a donné des résultats correspondant à $e = 0,0014$. Si l'on désire produire de l'uranium $^{235}\text{F6}$ pur à 99 % et si l'on utilise une cascade dans laquelle chaque étape a un facteur d'enrichissement global raisonnable, il s'avère qu'environ 4 000 étapes sont nécessaires.

CIRCULATION DU GAZ DANS LA CASCADE

10.8. Du gaz qui traverse la barrière d'un étage donné, seule la moitié passe à travers la barrière de l'étage supérieur suivant, l'autre moitié étant renvoyée à un stade antérieur. Ainsi, la plupart des matériaux qui émergent finalement de la cascade ont été recyclés de nombreuses fois. Le calcul montre que, dans le cas d'une installation de séparation de l'uranium réelle, il peut être nécessaire de forcer à franchir les barrières du premier étage 100 000 fois le volume de gaz qui sort du haut de la cascade

(c'est-à-dire le produit souhaité $U^{235F 6}$). Les chiffres correspondants pour les étages supérieurs diminuent rapidement en raison de la réduction de la quantité de matières indésirables ($U^{238F 6}$) transportées.

LE PROBLÈME DE LA SÉPARATION À GRANDE ÉCHELLE

INTRODUCTION

10.9. Au moment de la réorganisation générale du projet de bombe atomique en décembre 1941, la théorie de la séparation isotopique par diffusion gazeuse était bien comprise. Il a donc été possible de définir les problèmes techniques qui seraient rencontrés lors de la construction d'une installation de séparation à grande échelle. Les décisions relatives à l'échelle et à l'emplacement d'une telle usine n'ont été prises qu'au cours de l'hiver 1942-1943, c'est-à-dire à peu près au même moment que la

176

Des décisions correspondantes ont été prises pour les usines de production de plutonium.

L'OBJECTIF

10.10. L'objectif général de l'installation de diffusion gazeuse à grande échelle était la production quotidienne d'un nombre déterminé de grammes d'uranium contenant de l'ordre de dix fois plus d'uranium 235 que ce qui est présent dans la même quantité d'uranium naturel. Cependant, il était évident que l'installation serait assez souple dans son fonctionnement et que des variations considérables pourraient être apportées au degré d'enrichissement et au rendement du produit final.

LE GAZ DE PROCÉDÉ

10.11. L'hexafluorure d'uranium a été mentionné comme un gaz qui pourrait être utilisé dans l'usine en tant que « gaz de

procédé » ; L'un de ses avantages n'est pas le moindre est que le fluor n'a qu'un seul isotope, de sorte que les molécules d'UF₆ d'un isotope d'uranium donné ont toutes la même masse. Ce gaz est très réactif et est en fait un solide à température ambiante et à pression atmosphérique. C'est pourquoi il était urgent d'étudier d'autres composés gazeux de l'uranium. Pour se prémunir contre l'échec de cette recherche de gaz alternatifs, il était nécessaire de poursuivre les travaux sur l'hexafluorure d'uranium, comme dans la mise au point de méthodes de production et de circulation du gaz.

LE NOMBRE D'ÉTAPES

10.12. Le nombre d'étapes nécessaires dans la cascade principale de l'installation ne dépendait que du degré d'enrichissement souhaité et de la valeur de l'enrichissement global par étape pouvant être atteint avec des barrières réelles. Des estimations ont été faites qui prévoyaient plusieurs milliers d'étapes. Il devait également y avoir une cascade de « décapage » de plusieurs centaines d'étapes, le nombre exact dépendant de la quantité d'U-235 non séparé qui pourrait économiquement être autorisée à être gaspillée.

ZONE DE LA BARRIÈRE

10.13. Nous avons vu que la valeur totale du gaz qui doit se diffuser à travers les barrières est très grande par rapport au volume du produit final. La vitesse à laquelle le gaz se diffuse à travers l'unité de surface de la barrière dépend de la différence de pression des deux côtés de la barrière et de la porosité de la barrière. Même en supposant une pression atmosphérique totale d'un côté et une pression nulle de l'autre, et en utilisant un chiffre optimiste pour la porosité, les calculs ont montré que de nombreux acres de barrière seraient nécessaires dans l'usine à grande échelle.

CONCEPTION DE LA BARRIÈRE

10.14. À la pression atmosphérique, le libre parcours moyen d'une molécule est de l'ordre du dix-millième de millimètre ou d'un dixième de micron. Pour assurer un véritable écoulement « diffusif » du gaz, le diamètre de la myriade de trous dans la barrière doit être inférieur à un dixième du libre parcours moyen. Par conséquent, le matériau barrière ne doit avoir presque pas de trous sensiblement plus grands que 0,01 micron (4×10^{-7} pouces), mais doit avoir des milliards de trous de cette taille ou moins. Ces trous ne doivent pas s'agrandir ou se boucher à la suite d'une corrosion directe ou de poussière provenant de la corrosion ailleurs dans le système. La barrière doit être capable de résister à une « tête » de pression d'une atmosphère. Il doit pouvoir être fabriqué en grande quantité et avec une qualité uniforme. En janvier 1942, un certain nombre de barrières différentes avaient été fabriquées à petite échelle et testées pour le facteur de séparation et la porosité. Certains étaient considérés comme très prometteurs, mais aucun n'avait été testé de manière adéquate pour la production réelle à grande échelle et l'utilisation de plantes.

EXIGENCES EN MATIÈRE DE POMPAGE ET D'ALIMENTATION

10.15. Au cours d'une étape donnée, environ la moitié du matériau entrant dans l'étage passe à travers la barrière et passe à l'étage supérieur, tandis que l'autre moitié retourne à l'étage inférieur suivant. La moitié diffusée est à basse pression et doit être pompée à haute pression avant d'être introduite dans l'étape suivante. Même la partie non diffusée émerge à une pression légèrement inférieure à celle à laquelle elle est entrée et ne peut pas être renvoyée à l'étage inférieur sans pompage. Ainsi, la quantité totale de gaz par étage (comprenant le double de la quantité qui traverse la barrière) doit être mise en circulation au moyen de pompes.

10.16. Étant donné que le débit de gaz à travers un étage varie considérablement en fonction de la position de l'étage dans la cascade, les pompes varient également considérablement en

taille ou en nombre d'un étage à l'autre. Le type et la capacité de la pompe requise pour un étage donné dépendent non seulement du poids du gaz à déplacer, mais aussi de l'élévation de pression requise. Les calculs effectués à ce moment-là supposaient une pression initiale d'une atmosphère et une contre-pression (c'est-à-dire du côté basse pression de la barrière) d'un dixième d'atmosphère. On estimait que des milliers de pompes seraient nécessaires et que des milliers de kilowatts seraient nécessaires pour leur fonctionnement. Étant donné qu'un corollaire inévitable du pompage du gaz le chauffe, il était évident qu'un grand système de refroidissement devrait être prévu. Au début de 1942, de nombreux travaux préliminaires avaient été effectués sur les pompes. Les pompes centrifuges semblaient attrayantes malgré le problème de l'étanchéité de leurs arbres, mais d'autres travaux expérimentaux étaient prévus sur des pompes entièrement étanches de différents types.

FUITES ET CORROSION

10.17. Il était clair que l'ensemble du système de circulation, y compris les pompes, les barrières, la tuyauterie et les vannes, devait être étanche au vide. Si un lubrifiant ou un produit d'étanchéité est nécessaire dans les pompes, il ne doit pas réagir avec le gaz de procédé. En effet, aucun des matériaux du système ne devrait réagir avec le gaz de procédé, car une telle corrosion entraînerait non seulement l'obstruction des barrières et diverses défaillances mécaniques, mais aussi l'absorption (c'est-à-dire la quasi-disparition) de l'uranium déjà partiellement enrichi.

RÉEL VS. CASCADE IDÉALE

10.18. Dans une cascade idéale, les exigences de pompage changent d'un étage à l'autre. Dans la pratique, il n'est pas rentable de prévoir un type de pompe différent pour chaque étage. Il est nécessaire de déterminer l'ampleur de l'écart par rapport à la cascade idéale (c'est-à-dire

nombre minimum de types de pompes) doivent être utilisés dans l'intérêt de l'économie de conception, de réparation, etc. Des composants similaires sont utilisés pour d'autres composants de la cascade.

TEMPS D'ATTENTE ET DE DÉMARRAGE

10.19. Lors de la première mise en marche, l'installation doit fonctionner sans être perturbée pendant un certain temps, jusqu'à ce qu'une séparation suffisante ait été effectuée pour que chaque étage contienne un gaz d'enrichissement approprié. Ce n'est qu'une fois cette stabilisation atteinte qu'il est souhaitable de prélever de l'étage supérieur l'un quelconque des produits désirés. Tant la quantité de matériel impliqué (le retard) que le temps nécessaire (le temps de démarrage) sont suffisamment importants pour constituer des problèmes majeurs à part entière.

EFFICACITÉ

10.20. Il était évident qu'il n'y aurait que trois types de pertes de matières dans l'installation envisagées, à savoir : les pertes par fuite, les pertes dues à la corrosion (c.-à-d. combinaison et dépôt de produits chimiques) et les pertes dans les déchets de l'usine. On s'attendait à ce que les fuites puissent être maintenues très faibles et que, après une période initiale de fonctionnement, les pertes dues à la corrosion soient faibles. Le pourcentage de matière perdue dans les déchets végétaux dépendrait du nombre d'étapes de décapage.

CONCEPTION DÉTAILLÉE

10.21. Des questions relatives à l'utilisation du matériau barrière (en tubes ou en feuilles, en grandes ou en petites unités), à la manière dont le mélange devait être effectué et aux contrôles et instruments nécessaires n'avaient pas encore été tranchées. Il y avait peu de raisons de s'attendre à ce qu'elles soient irréfutables, mais il ne faisait aucun doute qu'elles nécessiteraient une étude à la fois théorique et expérimentale.

RÉSUMÉ DU PROBLÈME

10.22. En 1942, la théorie de la séparation isotopique par diffusion gazeuse avait été bien élaborée, et il est devenu clair qu'un Il faudrait une très grande usine. Les principaux équipements de cette usine étaient les barrières de diffusion et les pompes. Ni les barrières ni les pompes disponibles à l'époque ne s'étaient révélées généralement adéquates. C'est pourquoi il était particulièrement urgent de poursuivre le développement des pompes et des barrières. Il y avait aussi d'autres problèmes techniques à résoudre, ceux-ci concernant la corrosion, les joints sous vide et l'instrumentation.

ORGANISATION

10.23. Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, le travail de diffusion a été initié par J. R. Dunning. Le travail a été poursuivi sous les auspices de l'OSRD à l'Université Columbia jusqu'au 1er mai 1943, date à laquelle il a été repris par le district de Manhattan. Au cours de l'été 1943, les difficultés rencontrées pour résoudre certaines phases du projet ont conduit à une expansion considérable, en particulier du groupe chimique. H. C. Urey, alors directeur de l'œuvre, nomma H. S. Taylor de Princeton directeur associé et ajouta E. Mack, Jr. de l'État de l'Ohio, G. M. Murphy de Yale et P. H. Emmett de Johns Hopkins à l'état-major. La plupart des travaux ont été déplacés des laboratoires de Columbia vers un grand bâtiment situé à proximité. Les chimistes de Princeton qui s'étaient engagés dans des études sur l'eau lourde se sont vu confier certains des problèmes de recherche sur les barrières. Au début de 1944, L. M. Currie, de la National Carbon Company, devint un autre directeur associé pour aider Urey dans son travail de liaison et d'administration.

10.24. Comme on l'a déjà mentionné, la société M. W. Kellogg a été choisie au début de 1942 pour planifier la grande usine. A cette fin, Kellogg a créé une filiale spéciale appelée The Kellex Corporation, avec P. C. Leith en tant que responsable exécutif

et chef technique et, sous sa responsabilité, A. L. Baker en tant que chef de projet et J. H. Arnold en tant que directeur de la recherche et du développement. La nouvelle filiale exerçait des activités de recherche et de développement dans ses laboratoires de Jersey City et dans le bâtiment des laboratoires visé au paragraphe ci-dessus ; élaboré les conceptions de procédés et d'ingénierie ; et s'est procuré les matériaux nécessaires à la construction de l'usine à grande échelle et en a supervisé la construction. L'usine a été construite par le

J. A. Jones Construction Company, Incorporated, de Charlotte, en Caroline du Nord.

10.24-a. La Kellex Corporation, contrairement aux entreprises industrielles conventionnelles, était une coopérative de scientifiques, d'ingénieurs et d'administrateurs recrutés dans pratiquement toutes les branches de l'industrie et rassemblés dans le but exprès de poursuivre ce seul travail. Le service se faisait sur une base volontaire, les personnes éminentes de l'industrie renonçant librement à leurs tâches et responsabilités normales pour se consacrer à plein temps aux activités de Kellex. Au fur et à mesure que leurs tâches respectives sont accomplies, ces hommes retournent à leurs anciennes fonctions dans l'industrie.

10.25. En janvier 1943, la Carbide and Carbon Chemicals Corporation a été choisie pour être l'exploitant de l'usine achevée. Leurs ingénieurs ont rapidement commencé à jouer un rôle important non seulement dans la planification et la construction, mais aussi dans les travaux de recherche.

RECHERCHE, DÉVELOPPEMENT, CONSTRUCTION ET PRODUCTION, 1942 À 1945

PRODUCTION DE BARRIÈRES

10.26. Avant même 1942, on avait mis au point des barrières que l'on croyait satisfaisantes. Cependant, les barrières mises au point pour la première fois par E. T. Booth, H. C. Paxton et C. B. Slade n'ont jamais été utilisées à grande échelle en raison de

leur faible résistance mécanique et de leur faible résistance à la corrosion. En 1942, sous la supervision générale de Booth et F. G. Slack et avec la coopération de divers scientifiques, dont F. C. Nix des Bell Telephone Laboratories, des barrières d'un type différent ont été produites. À une certaine époque, une barrière mise au point par E. O. Norris et E. Adler a été jugée suffisamment satisfaisante pour être spécifiée pour l'utilisation des plantes. D'autres barrières ont été développées en combinant les idées de plusieurs hommes des laboratoires Columbia (maintenant baptisés les laboratoires SAM), Kellex, Bell Telephone Laboratories, Bakelite Corporation, Houdaille-Hershey Corporation, et d'autres. Les premiers spécimens du type de barrière sélectionné pour un usage général dans l'usine ont été préparés par C. A. Johnson de Kellex, et la barrière a été perfectionnée sous la supervision générale de H. S. Taylor. Une modification de cette barrière développée par les Laboratoires SAM a représenté une nette amélioration de la qualité et est utilisée dans un grand nombre d'étapes de l'usine. En 1945, le problème n'était plus de répondre à peine aux spécifications minimales, mais d'apporter des améliorations permettant d'augmenter le taux de production ou d'économiser l'exploitation.

10.27. Dans l'ensemble, l'histoire du développement des barrières rappelle à l'auteur l'histoire du problème de la « mise en conserve » du projet de plutonium. Dans chaque cas, les méthodes ont été en grande partie mises à l'épreuve, et des solutions satisfaisantes ou presque satisfaisantes ont été annoncées à plusieurs reprises ; Mais dans chaque cas, une solution vraiment satisfaisante n'a été trouvée qu'à la dernière minute et s'est alors avérée bien meilleure que ce qui avait été espéré.

POMPES ET JOINTS

10.28. Les premiers travaux sur les pompes ont été en grande partie sous la supervision de H. A. Boorse de l'Université Columbia. Lorsque Kellex est entré en scène en 1942, ses

ingénieurs, notamment G. W. Watts, J. S. Swearingen et O. C. Brewster, ont occupé des positions de premier plan dans le développement de pompes et de joints. Il ne faut pas oublier que ces pompes doivent fonctionner sous pression réduite, qu'elles ne doivent pas fuir, qu'elles ne doivent pas se corroder et qu'elles doivent avoir un volume aussi petit que possible. De nombreux types de pompes centrifuges et de pompes à piston ont été essayés. Dans l'une des pompes pour les plus grands étages, la roue est entraînée par un accouplement contenant un type de joint très nouveau et ingénieux. Un autre type de pompe est complètement fermé, sa roue centrifuge et son rotor étant actionnés de l'extérieur, par induction.

DÉVELOPPEMENTS DIVERS

10.29. Comme dans le cas du plutonium, il y avait là aussi de nombreuses questions de corrosion, etc., à étudier. De nouveaux liquides de refroidissement et lubrifiants ont été mis au point par A. L. Henne et ses associés, par G. H. Cady, par W. T. Miller et ses collaborateurs, par E. T. McBee et ses associés, et par des scientifiques de divers horizons.

sociétés telles que Hooker Electrochemical Co., du Pont Co. et Harshaw Chemical Co. La recherche et le développement ainsi que les exigences de l'usine pour ces matériaux et d'autres produits chimiques spéciaux ont été coordonnés par R. Rosen, d'abord sous l'égide de l'OSRD, puis pour Kellex. Des méthodes de prétraitement des surfaces contre la corrosion ont été élaborées. Parmi les différents instruments conçus ou adaptés pour l'utilisation d'un projet, le spectrographe de masse mérite une mention spéciale. Le projet a eu la chance d'avoir l'aide de A. O. Nier de l'Université du Minnesota et plus tard de Kellex dont les méthodes d'analyse isotopique par spectrographe de masse ont été considérablement avancées pour devenir d'une grande valeur pour le projet. comme dans l'analyse d'échantillons d'uranium enrichi. Les spectrographes Nfass ont également été utilisés pour pré-tester les pièces pour détecter les

fuites de vide et pour détecter les impuretés dans le gaz de procédé de l'usine.

USINES PILOTES

10h30. A proprement parler, il n'y avait pas d'installation pilote. C'est-à-dire qu'il n'y avait pas de système de séparation à petite échelle mis en place en utilisant les mêmes types de soufflantes, de barrières, de fixations de barrières, de refroidissement, etc., qui ont été mis en place dans l'usine principale. Un tel système n'a pas pu être mis en place parce que les différents éléments de l'usine n'étaient pas tous disponibles avant la construction de l'usine elle-même. Pour procéder à la construction de l'usine à grande échelle dans ces circonstances, il a fallu faire preuve de prévoyance et d'audace.

10.31. Il y avait cependant toute une série d'installations dites pilotes qui servaient à tester divers composants ou groupes de composants de l'installation finale. L'usine pilote n° 1 était une installation à 12 étages utilisant un type de barrière assez semblable à celui utilisé dans l'usine à grande échelle, mais le matériau de barrière n'était pas fabriqué sous la forme spécifiée pour l'usine et les pompes utilisées étaient des pompes à piston scellées par sylphon, et non des pompes centrifuges. Les travaux de cette usine en 1943 ont permis de tester non seulement les barrières et le système général de séparation, mais aussi de fournir des informations sur les vannes de régulation, les manomètres, la tuyauterie, etc. L'usine pilote n° 2, une édition plus grande de la n° 1 mais avec seulement six étages, a été utilisée à la fin de 1943 et au début de 1944, en particulier comme unité d'essai pour les instruments. L'installation pilote n° 3a, utilisant des soufflantes centrifuges et des diffuseurs factices, était également destinée principalement à l'essai des instruments. L'usine pilote n° 3b était une véritable usine pilote pour une section particulière de l'usine à grande échelle. Des installations pilotes utilisant de l'équipement à grande échelle sur le site de l'usine ont démontré l'étanchéité au vide, la

résistance à la corrosion et l'opérabilité générale de l'équipement.

AUTORISATION D'INSTALLATION

10.32. En décembre 1942, la société Kellogg a été autorisée à procéder à la conception préliminaire de l'usine et, en janvier 1943, la construction d'une usine a été autorisée.

LE SITE

10.33. Comme nous l'avons indiqué dans un chapitre précédent, un site dans la vallée du Tennessee avait été choisi à l'origine pour toutes les usines du district de Manhattan, mais l'usine de plutonium a en fait été construite ailleurs. Il restait l'usine pilote de plutonium déjà décrite, l'usine de diffusion gazeuse, l'usine de séparation électromagnétique (voir chapitre XI), et plus tard l'usine de diffusion thermique qui ont toutes été construites dans la vallée du Tennessee sur le site de Clinton, connues officiellement sous le nom de Clinton Engineer Works.

10.34. Ce site a été examiné par le colonel Marshall, le colonel Nichols et des représentants de la Stone and Engineering Corporation en juillet 1942, et son acquisition a été recommandée. Cette recommandation a été approuvée par le Comité exécutif de l'OSRD S-1 lors d'une réunion en juillet 1942. L'approbation finale a été donnée par le major-général L. R. Groves après une inspection personnelle du site de 70 milles carrés. En septembre 1942, les premières démarches ont été entreprises pour acquérir la parcelle, qui se trouve sur la rivière Clinch à une trentaine de milles de Knoxville, dans le Tennessee, et qui a finalement dépassé considérablement les 70 milles carrés. L'usine pilote de plutonium est située dans une vallée, l'usine de séparation électromagnétique dans une vallée adjacente et l'usine de séparation par diffusion dans une troisième.

10.35. Bien que le développement de l'usine et du site de Hanford soit très impressionnant, il est entièrement sous l'autorité d'une seule société qui ne s'occupe que d'une seule

opération générale, de sorte qu'il est à certains égards moins intéressant que Clinton, qui a une grande multiplicité d'activités. Décrire le site de Clinton, avec son grand nombre de nouvelles usines, ses nouveaux quartiers résidentiels, ses nouveaux théâtres, son nouveau système scolaire, ses mers de boue, ses nuages de poussière et son agitation générale, dépasse le cadre de ce rapport.

DATES DE DÉBUT DES TRAVAUX

10.36. La construction de la centrale à vapeur pour la centrale à diffusion a commencé le 1er juin 1943. C'est l'une des plus grandes centrales de ce type jamais construites. La construction d'autres bâtiments et usines importants a commencé entre le 29 août 1943 et le 10 septembre 1943.

OPÉRATION

10.37. Contrairement à Hanford, l'usine de diffusion se compose d'un si grand nombre d'unités plus ou moins indépendantes qu'elle a été mise en service section par section, selon l'état d'avancement de la construction et des essais. Il n'y a donc pas eu de date de démarrage dramatique ni d'incident fâcheux pour le marquer. L'usine fonctionnait avec succès avant l'été 1945.

10.38. Pour les hommes qui travaillaient sur la diffusion gazeuse, ce fut une longue période de traction de 1940 à 1945, qui n'a pas été allégée par des marques à mi-chemin aussi excitantes que la première pile à réaction en chaîne à Chicago. Peut-être plus que tout autre groupe du projet, ceux qui ont travaillé sur la diffusion gazeuse méritent d'être félicités pour leur courage et leur persévérance ainsi que pour leurs capacités scientifiques et techniques. Pour des raisons de sécurité, nous n'avons pas été en mesure de dire comment ils ont résolu leurs problèmes, même dans de nombreux cas, nous avons trouvé plusieurs solutions, comme assurance contre les pannes dans l'usine. Il s'agit d'une réalisation remarquable. Au cours de ces cinq années, il y a eu des périodes de découragement et de pessimisme. Ils oublient en grande partie que l'usine ne se contente pas de fonctionner, mais qu'elle fonctionne de manière cohérente, fiable et avec des performances supérieures à celles prévues.

SOMMAIRE

10.39. La formation de l'Université Columbia sur la séparation des isotopes par diffusion gazeuse a commencé en 1940 et, à la fin de 1942, les problèmes de la séparation à grande échelle de l'uranium par cette méthode étaient bien définis. Étant donné que la quantité de séparation pouvant être effectuée par un seul étage était très faible, plusieurs milliers d'étapes successives étaient nécessaires. Il s'est avéré que la meilleure méthode pour relier les nombreux étages nécessitait un recyclage approfondi afin que des milliers de fois plus de matériaux passent à travers les barrières des étages inférieurs que ce qui apparaîtrait finalement comme produit de l'étage le plus élevé.

10.40. Les principaux problèmes ont été la mise au point de barrières et de pompes satisfaisantes. Des centaines de barrières et des milliers de pompes ont été nécessaires. Le gaz de procédé évident était l'hexafluorure d'uranium, dont les difficultés de production et de manipulation étaient si grandes qu'on a cherché une alternative. Comme une grande partie de la séparation devait être effectuée à basse pression, des problèmes de technique du vide se sont posés, et à une échelle jamais vue auparavant. De nombreux problèmes d'instrumentation et de contrôle ont été résolus ; Diverses formes de spectrographe de masse ont été largement utilisées. -

10.41. Les recherches ont été effectuées principalement à Columbia sous la direction de Dunning et Urey. En 1942, la société M. W. Kellogg a été choisie pour développer le procédé et l'équipement, ainsi que pour concevoir l'usine et créer la Kellogg Corporation à cet effet. L'usine a été construite par la J. A. Jones Construction Company. La Carbide and Carbon Chemicals Corporation a été choisie comme société d'exploitation.

10.42. Une barrière très satisfaisante a été mise au point, bien que le choix définitif du type de barrière n'ait été fait qu'au moment où la construction de l'usine était bien avancée à Clinton Engineer Works dans le Tennessee. Deux types de soufflantes centrifuges ont été développés au point de pouvoir

répondre aux besoins de pompage. L'usine a été mise en service avec succès avant l'été 1945.

CHAPITRE XL. ÉLECTROMAGNÉTIQUE

SÉPARATION DE L'URANIUM

ISOTOPES

INTRODUCTION

11.1. Dans le chapitre IV, nous avons dit que la possibilité d'une séparation à grande échelle des isotopes de l'uranium par des moyens électromagnétiques a été suggérée à l'automne 1941 par E. O. Lawrence de l'Université de Californie et H. D. Smyth de l'Université de Princeton. Dans le chapitre IX, nous avons décrit les principes d'une méthode de séparation électromagnétique et énuméré les trois limites de cette méthode : la difficulté à produire des ions, la fraction limitée d'ions réellement utilisés et les effets de charge d'espace.

11.2. À la fin de décembre 1941, lorsque la réorganisation de l'ensemble du projet d'uranium fut effectuée, Lawrence avait déjà obtenu quelques échantillons d'isotopes séparés de l'uranium et, dans le cadre de cette réorganisation, il fut officiellement chargé de la préparation d'autres échantillons et de la réalisation de diverses mesures physiques associées. Cependant, tout comme le Laboratoire métallurgique a très vite déplacé son objectif de la physique de la réaction en chaîne vers la production à grande échelle de plutonium, l'objectif de la division de Lawrence s'est immédiatement déplacé vers la séparation à grande échelle des isotopes de l'uranium par des méthodes électromagnétiques. Ce changement a été provoqué par le succès des premières expériences en Californie et par le développement en Californie et à Princeton d'idées sur d'autres méthodes possibles. Parmi les nombreux schémas électromagnétiques proposés, trois ont rapidement été reconnus comme étant les plus prometteurs : le séparateur de masse « calutron », le séparateur de type magnétron qui s'est développé plus tard en « centrifugeuse ionique » et la méthode « isotron » pour « regrouper » un faisceau d'ions. Les deux premières de ces

approches ont été suivies en Californie et la troisième à Princeton. Après les premiers

187

Pendant quelques mois, le plus grand effort a été mis sur le calutron, mais certains travaux sur la centrifugeuse ionique ont été poursuivis en Californie au cours de l'été 1942 et ont été poursuivis par J. Slepian aux laboratoires Westinghouse à Pittsburgh à petite échelle pendant l'hiver 1944-1945. Les travaux sur l'isotron se sont poursuivis à Princeton jusqu'en février 1943, date à laquelle la majeure partie du groupe a été transférée à d'autres travaux. La majeure partie de ce chapitre sera consacrée au calutron, car c'est la méthode qui a abouti à la production à grande échelle d'U-235. Une brève description sera également donnée de l'installation de diffusion thermique construite pour fournir un matériau d'alimentation enrichi à l'installation électromagnétique.

11.3. Les exigences de sécurité ne permettent pas, ici comme pour d'autres parties du projet, de présenter un grand nombre des détails techniques les plus intéressants. L'importance de l'aménagement est considérablement plus grande que ne l'indique la quantité d'espace qui lui est accordée ici.

SÉPARATEURS DE MASSE ÉLECTROMAGNÉTIQUES

TRAVAUX PRÉLIMINAIRES

11.4. Le spectrographe de masse d'A. O. Nier a été mis en place principalement pour mesurer l'abondance relative des isotopes, et non pour séparer de grands échantillons. En utilisant de la vapeur de bromure d'uranium, Nier avait préparé plusieurs petits échantillons d'isotopes séparés de l'uranium, mais son taux de production était très faible, car son courant ionique s'élevait à moins d'un micro-ampère. (Un spectrographe de masse dans lequel un micro-ampère d'ions d'uranium normaux passe à travers les champs de séparation jusqu'aux collecteurs recueillera environ un microgramme d'U-235 par jour de 16 heures.) Le grand besoin d'échantillons d'U-235 enrichi pour l'étude nucléaire a été reconnu très tôt par Lawrence, qui a décidé de voir ce qui pouvait être fait à l'aide de l'aimant (cyclotron) de

37 pouces à Berkeley. Les premières étapes de ce travail ont été facilitées par une subvention de la Research Corporation of New York, qui a été remboursée par la suite. À partir du 1er janvier 1942, tout le soutien est venu de l'OSRD par l'intermédiaire du Comité S-1. Plus tard, comme dans d'autres parties du projet d'uranium, les contrats ont été repris par le district de Manhattan.

11.5. À Berkeley, après quelques semaines de planification, le cyclotron de 37 pouces a été démantelé le 24 novembre 1941 et son aimant a été utilisé pour produire le champ magnétique requis dans ce que l'on a appelé un « calutron » (un nom représentant une contraction de « California University cyclotron »). Une source d'ions constituée d'un faisceau d'électrons traversant la vapeur d'un sel d'uranium a été mise en place, correspondant à la source d'ions représentée dans le dessin du chap. IX, p. 164. Les ions ont ensuite été accélérés jusqu'à la fente s_2 à travers laquelle ils sont passés dans la région de séparation où le champ magnétique a courbé leurs trajectoires en demi-cercles se terminant à la fente du collecteur. Le 1er décembre 1941, des faisceaux d'ions moléculaires à partir du gaz résiduel ont été obtenus, et peu de temps après, le faisceau constitué d'ions d'uranium chargés individuellement (U^{+}) a été porté à une force appréciable. Il a été constaté qu'une proportion considérable des ions quittant la source étaient des ions I-J⁺. Pour le. Afin de tester le prélèvement d'échantillons séparés, un collecteur à deux poches a été installé, les deux poches étant séparées par une distance appropriée aux numéros de masse 235 et 238. Deux petits prélèvements à l'aide de faisceaux I-J⁺ de faible résistance ont été effectués en décembre, mais les analyses subséquentes des échantillons n'ont montré qu'un faible facteur de séparation. À la mi-janvier 1942, un essai avait été effectué avec une force de faisceau raisonnable et un débit global d'une quantité appréciable qui montrait un facteur de séparation nettement amélioré. Au début de février 1942, des faisceaux d'une résistance beaucoup plus grande ont été obtenus, et Lawrence a rapporté que de bons facteurs de séparation étaient

possibles avec de tels faisceaux. Au début du mois de mars 1942, le courant ionique avait encore augmenté. Ces résultats tendaient à confirmer les espoirs de Lawrence que la charge d'espace pourrait être neutralisée par ionisation du gaz résiduel dans la chambre magnétique.

INITIATION D'UN GRAND PROGRAMME

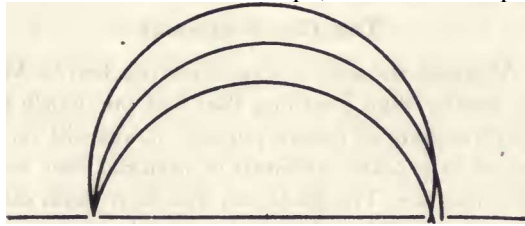
Il .6. À ce moment-là, il était clair que le calutron était potentiellement capable d'effectuer des séparations à une échelle beaucoup plus grande que ce qui avait jamais été approché auparavant par une méthode électromagnétique. Il était évidemment souhaitable d'explorer tout le domaine de la séparation électromagnétique. Dans ce but, Lawrence a mobilisé son groupe au Radiation Laboratory de l'Université de Californie à Berkeley et a commencé à appeler d'autres personnes à l'aide. Parmi ceux qui ont d'abord fréquenté Berkeley, il y avait D. Cooksey, P. C. Aebersold, W. M. Brobeck, F. A. Jenkins, K. R. MacKenzie, W. B. Reynolds, D. H. Sloan, F. Oppenheimer, J. G. Backus, B. Peters, A. C. Helmholtz, T. Finkelstein et W. E. Parkins, Jr. Lawrence a rappelé certains de ses anciens élèves, dont R. L. Thornton, J. R. Richardson, et d'autres. Parmi ceux qui travaillèrent à Berkeley pendant diverses périodes, il y avait L. P. Smith de Cornell, E. U. Condon et J. Slepian de Westinghouse, et I. Langmuir et K. H. Kingdon de General Electric. Au cours de cette première période, J. R. Oppenheimer était encore à Berkeley et a apporté quelques idées importantes. À l'automne 1943, le groupe fut encore renforcé par l'arrivée d'un certain nombre de physiciens anglais sous la direction de M. L. Oliphant de l'Université de Birmingham.

11.7. Dans un premier temps, un grand nombre de méthodes différentes ont été envisagées et de nombreuses expériences exploratoires ont été réalisées. Cependant, l'effort principal s'est rapidement dirigé vers le développement du calutron, l'objectif étant un facteur de séparation élevé et un courant important dans le faisceau d'ions positifs.

11.8. Des trois limitations apparentes énumérées dans le premier paragraphe, la difficulté de produire des ions, la fraction limitée des ions réellement utilisés et les effets de charge spatiale, seule la dernière avait cédé à l'attaque préliminaire. Apparemment, la charge d'espace dans le voisinage du faisceau d'ions positifs pourrait être annulée dans une très large mesure. Il restait comme objectifs immédiats une source d'ions plus productive et une utilisation plus complète des ions.

11.9. Les facteurs qui contrôlent l'efficacité d'une source d'ions sont nombreux. La conception de la source proprement dite et la méthode d'extraction des ions à partir de celle-ci sont impliquées. Les problèmes à résoudre ne peuvent pas être formulés simplement et doivent être attaqués par des méthodes largement empiriques. Même si les restrictions de sécurité permettaient d'exposer les innombrables formes de sources d'ions et de systèmes d'accélération qui ont été essayées, une telle exposition serait trop technique pour être présentée ici.

11.10. En ce qui concerne le problème de l'utilisation plus complète des ions, nous devons examiner en détail le principe de fonctionnement du calutron. Le calutron dépend du fait que les ions chargés individuellement se déplaçant dans un champ magnétique uniforme perpendiculaire à leur direction de mouvement sont courbés en trajectoires circulaires de rayon proportionnel à leur quantité de mouvement. Si l'on considère maintenant un seul isotope, il est évident que les ions



passant par les deux fentes (et passant ainsi dans la grande région évacuée dans laquelle le champ magnétique est présent) ne suivent pas initialement une seule direction, mais ont de nombreuses directions

initiales situées dans un petit angle, dont la taille dépend de la largeur des fentes. Heureusement, cependant, comme tous les ions de l'isotope en question suivent des trajectoires courbes de même diamètre, les ions commençant dans des directions légèrement différentes ont tendance à se rencontrer à nouveau – ou presque – après avoir complété un demi-cercle. C'est, bien sûr, à cette position de convergence que le collecteur est placé. Naturellement, les ions d'un autre isotope (par exemple, les ions de masse 238 au lieu de 235) se comportent de manière similaire, sauf qu'ils suivent des cercles de diamètre légèrement différent. Des échantillons des deux isotopes sont capturés dans des collecteurs aux deux positions différentes de reconvergence. Maintenant, l'utilisation d'une plus grande fraction des ions produits à l'origine peut être accomplie assez facilement en élargissant les deux fentes mentionnées. Mais pour élargir considérablement les fentes sans sacrifier la netteté de la mise au point lors de la recon-

La vergence n'est pas facile. En effet, cela ne peut être accompli qu'en utilisant des variations d'espace soigneusement proportionnées dans l'intensité du champ magnétique. Heureusement, de telles variations ont été élaborées avec succès.

11.11. Un autre problème, moins immédiat mais néanmoins reconnu comme important pour toute installation de production, est celui d'une utilisation plus efficace du champ magnétique. Étant donné que les grands électroaimants sont coûteux à construire et à exploiter, il était naturel d'envisager d'utiliser le même champ magnétique pour plusieurs faisceaux d'ions. La réalisation expérimentale d'un tel schéma économique est devenue une tâche majeure du laboratoire.

L'AIMANT GÉANT

11.12. Bien que l'échelle de séparation atteinte en mars 1942 soit beaucoup plus grande que tout ce qui avait été fait jusqu'alors avec un séparateur de masse électromagnétique, elle était encore très loin de celle nécessaire pour produire des quantités de matériaux d'importance militaire. Les problèmes qui ont été esquissés devaient non seulement être résolus, mais ils devaient être résolus à grande échelle. L'aimant cyclotron de 37 pouces

qui avait été utilisé était encore capable de fournir des informations utiles, mais un équipement plus grand était souhaitable. Heureusement, un aimant beaucoup plus grand, destiné à un cyclotron géant, était en construction à Berkeley. Cet aimant, d'un diamètre de pôle de 184 pouces et d'un espace de pôle de 72 pouces, devait être le plus grand existant. Les travaux avaient été interrompus à cause de la guerre, mais ils étaient déjà très avancés, de sorte qu'ils pourraient être achevés en quelques mois si des priorités adéquates étaient accordées. Mis à part l'aimant lui-même, le bâtiment associé, les laboratoires, les magasins, etc., étaient presque idéaux pour le développement du cyclotron. Inutile de dire que le travail a repris sur l'aimant géant et à la fin du mois de mai 1942, il était prêt à l'emploi.*

La construction du cyclotron géant a été entreprise avec des fonds privés en grande partie fournis par la Fondation Rockefeller, augmentés par des dons de la Research Corporation, de la Fondation John et Mary Markel et de l'Université de Californie. Afin de pousser la construc-

DÉVELOPPEMENT JUSQU'EN SEPTEMBRE 1942

11.13. Les premières expériences utilisant l'aimant de 37 pouces ont été décrites dans un paragraphe précédent. Les développements ultérieurs se sont déroulés principalement dans ces deux directions : la construction et l'installation d'une unité de séparation correctement conçue pour l'aimant de 37 pouces, et la conception et la construction d'unités de séparation expérimentales pour entrer dans le grand aimant.

11.14. Outre l'augmentation progressive de la force du faisceau d'ions et du facteur de séparation résultant d'une série de développements dans la source d'ions et dans le système d'accélération, l'amélioration espérée de l'utilisation des ions a été obtenue au cours de l'été 1942, en utilisant l'aimant géant. De plus, il a été possible de maintenir plus d'un faisceau d'ions dans la même région de séparation magnétique. Les expériences sur ce dernier problème se sont toutefois heurtées à quelques difficultés, et il est apparu qu'il pouvait y avoir des limitations

sur le nombre de sources et de récepteurs qui pouvaient être mis dans une seule unité ainsi que sur le courant qui pouvait être utilisé dans chaque faisceau sans gêner la séparation.

11.15. Il était évident qu'un grand nombre d'unités séparatrices seraient nécessaires pour obtenir une quantité de production d'importance militaire. C'est pourquoi on a envisagé divers systèmes de combinaison de groupes d'unités dans le cadre d'arrangements économiques. Un schéma a été élaboré qui a ensuite été utilisé dans les usines de production et qui s'est avéré satisfaisant.

AVANTAGES DU SYSTÈME ÉLECTROMAGNÉTIQUE

11.16. En septembre 1942, la méthode de diffusion gazeuse et la méthode centrifuge de séparation isotopique de l'uranium avaient fait l'objet d'études intensives, et ce pendant une période plus longue que dans le cas de la méthode électromagnétique. Ces deux méthodes, la diffusion gazeuse et la centrifugeuse, semblaient réalisables pour la production à grande échelle d'U-235, mais les deux nécessiteraient des centaines d'étapes pour obtenir une séparation à grande échelle. Ni l'un ni l'autre n'avaient réellement produit

Des heures supplémentaires ont été nécessaires le plus rapidement possible, moyennant des frais supplémentaires. Pour couvrir ces coûts, la Fondation Rockefeller a fait un crédit supplémentaire.

quantités appréciables d'U-235 séparé. Aucune usine à grande échelle pour la production de plutonium n'était en cours de construction, et la réaction en chaîne auto-entretenu qui devait produire du plutonium n'avait pas encore été prouvée. Mais dans le cas de la méthode électromagnétique, après la séparation réussie des quantités de milligrammes, il n'y avait aucun doute quant à la faisabilité scientifique. Si une unité pouvait séparer 10 mg par jour, 100 000 000 d'unités pourraient séparer une tonne par jour. Les questions portaient sur le coût et le temps. Chaque unité devait être un dispositif électromagnétique compliqué nécessitant un vide poussé, des tensions élevées et des champs magnétiques intenses ; Et beaucoup de travail de recherche et de

développement serait nécessaire avant que des unités complètes et à grande échelle puissent être construites. De nombreux opérateurs qualifiés seraient probablement nécessaires. Dans l'ensemble, à l'époque, cela semblait très cher, mais cela semblait aussi certain et relativement rapide. De plus, l'exiguïté des unités présentait l'avantage de permettre le développement, d'apporter des modifications en cours de construction ou, dans certaines limites, après la construction, et d'augmenter la capacité en construisant de nouvelles unités.

QUESTION DE POLITIQUE

11.17. Sur la base d'informations scientifiques et d'ingénierie assez incomplètes sur toutes les méthodes et sur la base d'estimations de coûts tout aussi douteuses, des décisions ont dû être prises sur trois questions : 1) la construction d'une centrale électromagnétique ; (2) la taille d'une telle plante ; (3) à quel stade de développement la conception doit être gelée.

APPROBATION DE LA CONSTRUCTION DE L'USINE

11.18. Sur la base des résultats rapportés sur les expériences menées à Berkeley au cours de l'été 1942, le Comité exécutif du S-1, lors d'une réunion à Berkeley les 13 et 14 septembre 1942, recommanda que l'armée s'engage à construire une usine de séparation électromagnétique sur le site de la vallée du Tennessee (Clinton Engineer Works). Il a été recommandé qu'il soit convenu que les engagements pour cette usine pourraient être annulés sur la base d'informations ultérieures. Il a été recommandé qu'une usine pilote soit érigée sur le site de la vallée du Tennessee dès que possible. (Cependant, cette recommandation a été retirée par la suite et une telle usine pilote n'a jamais été construite.) La construction d'une usine de production a été autorisée par General Groves le 5 novembre 1942, étant entendu que la conception des premières unités devait être congelée immédiatement.

11.19. En décrivant la production de plutonium, nous avons discuté de la répartition des responsabilités entre le Projet métallurgique et la Compagnie du Pont. L'usine de séparation électromagnétique a été planifiée et construite selon un schéma d'organisation quelque peu différent. La responsabilité a été répartie entre six grands groupes. Le Radiation Laboratory de l'Université de Californie était responsable de la recherche et du développement. la Westinghouse Electric and Manufacturing Company pour la fabrication des pièces mécaniques, c'est-à-dire les sources, les récepteurs, les pompes, les réservoirs, etc. ; la General Electric Company pour l'équipement électrique et les commandes ; la société Allis-Chalmers pour les aimants ; la Stone and Webster Engineering Company pour la construction et l'assemblage ; et la Tennessee Eastman Company pour l'exploitation. Les cinq entreprises industrielles ont maintenu des groupes d'ingénieurs à Berkeley, de sorte qu'un système de conférences informelles fréquentes et de recouplements a été mis en place. Ainsi, la majeure partie de la planification a été faite en coopération dans un seul groupe, même si les détails peuvent être laissés aux bureaux d'origine des différentes sociétés.

LES BAI DES DÉCISIONS TECHNIQUES

11.20. Curieusement, bien que la théorie de la pile auto-entretenu à réaction en chaîne soit déjà bien élaborée, la théorie de la décharge gazeuse, après cinquante ans d'études intensives, est encore insuffisante pour prédire le comportement exact des ions dans un calutron. La quantité d'U-235 collectée par jour et la pureté de la matière collectée sont influencées par de nombreux facteurs, notamment : (1) la largeur, l'espacement et la forme du collecteur, (2) la pression dans l'espace magnétique, (3) l'intensité et l'uniformité du champ magnétique, (4) la forme et l'espacement des fentes de définition et du système d'accélération, (5) la tension d'accélération, (6) la taille et la forme de la fente dans la

source d'arc d'où proviennent les ions, (7) le courant dans l'arc, (8) la position de l'arc dans la chambre de l'arc, (9) la pression de la vapeur dans la chambre à arc, (10) la nature chimique de la vapeur. De toute évidence, il n'y avait pas de temps pour une étude systématique de toutes les combinaisons possibles de variables. Le développement devait être en grande partie intuitif. Diverses conditions ont dû être étudiées et un certain nombre d'interprétations partielles ont dû être faites. Ensuite, l'expérience accumulée par le groupe, le « ressenti » du problème, devaient être traduits en plans et recommandations spécifiques.

DÉCISIONS TECHNIQUES REQUISES

11.21. (a) Le nombre d'étapes. Comme dans toutes les méthodes, un compromis doit être fait entre le rendement et le facteur de séparation. Dans le système électromagnétique, le facteur de séparation est beaucoup plus élevé que dans d'autres systèmes, de sorte que le nombre d'étapes nécessaires est faible. Il était possible qu'une seule étape soit suffisante. Les premières études ont indiqué que les tentatives de pousser le facteur de séparation si haut qu'il était possible de fonctionner en une seule étape réduisaient le rendement à un chiffre peu pratique.

11.22. (b) Spécifications. Les informations et l'expérience acquises sur les variables telles que celles mentionnées ci-dessus devaient être traduites en décisions sur les points principaux suivants avant que la conception puisse réellement commencer : (1) la taille d'une unité déterminée par le rayon de courbure du trajet ionique, la longueur de la fente de la source et la disposition des sources et des récepteurs ; 2° l'intensité maximale du champ magnétique requise ; (3) l'utilisation ou non d'une grande divergence de faisceaux d'ions ; 4° le nombre de sources et de récepteurs d'ions par unité ; 5° si la source doit être à haut potentiel ou à potentiel souterrain ; 6° le nombre d'électrodes accélératrices et les potentiels maximaux à leur appliquer ; 7° les besoins en énergie pour les arcs, les tensions d'accélération, les

pompes, etc. ; 8° les exigences en matière de pompage ; 9° le nombre d'unités par écartement des pôles ; 10° le nombre d'unités par bâtiment.

UNITÉS EXPÉRIMENTALES À BERKELEY

11.23. La plupart des caractéristiques de conception de la première usine ont dû être gelées à l'automne 1942 sur la base des résultats obtenus avec des essais effectués à l'aide de l'aimant géant de Berkeley. La conception de l'usine, cependant, nécessitait des unités d'un type quelque peu différent. Bien qu'il n'y ait aucune raison de supposer que ces changements introduiront une différence de performance, il était évidemment souhaitable de construire une unité prototype à Berkeley. La construction de cette unité a été approuvée à peu près au même moment que les premières unités de l'usine ont été commandées, de sorte que l'expérience avec elle n'a eu aucune influence sur la conception fondamentale, mais elle a été terminée et opérationnelle en avril 1943, c'est-à-dire six mois avant la première unité de l'usine. Par conséquent, il était d'une valeur inestimable à des fins de test et de formation. Plus tard, un troisième aimant a été construit dans le grand bâtiment de Berkeley. Au total, il y a eu six unités de séparation disponibles simultanément à des fins expérimentales ou pilotes à Berkeley. De nombreux travaux auxiliaires ont également été effectués à l'extérieur des unités complètes.

LE SÉPARATEUR ISOTRON

11.24. Comme nous l'avons déjà dit, H. D. Smyth de Princeton s'intéressa aux méthodes électromagnétiques de séparation à la fin de l'été et à l'automne 1941. Il était particulièrement intéressé par la mise au point d'une méthode permettant d'utiliser une source et un faisceau d'ions étendus au lieu d'un faisceau limité essentiellement à une dimension par un système de fente comme dans le séparateur de masse du calutron. Une méthode pour réaliser la séparation à l'aide d'une source d'ions étendue a été

suggérée par R. R. Wilson de Princeton. L'appareil qui résulte des idées de Wilson reçut le nom délibérément dénué de sens d'« Isotron ».

11.25. L'isotron est un séparateur de masse électromagnétique utilisant une source étendue d'ions, contrairement aux sources à fente utilisées dans les spectrographes de masse ordinaires. Les ions de la source étendue sont d'abord accélérés par un champ électrique constant de haute intensité

et sont ensuite accélérés par un champ électrique de faible intensité variant à la radiofréquence et à la manière d'une « dent de scie ». L'effet du champ électrique constant est de projeter un fort faisceau d'ions dans un tube avec une énergie cinétique uniforme et donc avec des vitesses inversement proportionnelles à la racine carrée des masses d'ions. La variation du champ électrique, d'autre part, introduit de petites variations périodiques de la vitesse des ions et a pour effet de provoquer le « regroupement » des ions à une certaine distance dans le tube. (Ce même principe est utilisé dans l'oscillateur haute fréquence klystron, où les électrons sont « groupés » ou « modulés en vitesse ».) Les paquets d'ions de masses différentes voyagent à des vitesses différentes et se séparent donc. À la position (en fait sur la zone perpendiculaire au faisceau) où cela se produit, un analyseur applique un champ électrique focalisant transversalement avec une composante radiofréquence synchronisée avec l'arrivée des paquets. La synchronisation est telle que la composante variable de l'intensité du champ transversal est nulle lorsque les paquets d'ions U-235 traversent et un maximum lorsque les paquets d'ions U-238 traversent. Les faisceaux U-235 sont focalisés sur un collecteur, mais les faisceaux U-238 sont déviés. Ainsi s'accomplit la séparation.

11.26. Ce plan a été décrit lors de la réunion du Comité de l'uranium du 18 décembre 1941 et immédiatement après, il a été discuté plus en détail avec Lawrence, qui s'est rendu à Princeton. Les promesses de la méthode semblaient suffisantes pour justifier des travaux expérimentaux, qui commencèrent immédiatement dans le cadre d'un contrat de l'OSRD et se

poursuivirent jusqu'en février 1943. Étant donné qu'il s'agissait d'une idée nouvelle, deux questions restaient en suspens : (1) la question de savoir si la méthode fonctionnerait vraiment ; (2) s'il pourrait être développé pour une production à grande échelle assez rapidement pour concurrencer les méthodes plus orthodoxes déjà en cours de développement.

11.27. Un isotron expérimental a été construit et mis en service à la fin de janvier 1942. Des expériences préliminaires à l'époque ont indiqué que les isotopes du lithium pouvaient être séparés par cette méthode. La première collecte réussie d'isotopes d'uranium partiellement séparés a été effectuée au printemps 1942.

11.28. Malheureusement, les progrès au cours de l'été et de l'automne 1942 ne furent pas aussi rapides qu'on l'avait espéré. En conséquence, il a été décidé de fermer le projet de Princeton afin de permettre l'envoi du personnel sur le site où le laboratoire de bombes atomiques était sur le point de démarrer. Avant que le groupe ne quitte Princeton, un petit isotron expérimental a recueilli plusieurs échantillons d'uranium partiellement séparé. Ainsi, la méthode a fonctionné ; Mais son applicabilité à grande échelle n'a pas été pleinement étudiée.

LE MAGNÉTRON ET LA CENTRIFUGEUSE IONIQUE

11.29. En décembre 1941, alors que toute la question de la séparation isotopique était discutée à Berkeley, le magnétron a été suggéré comme séparateur de masse possible. Dans l'intervalle, Smyth de Princeton avait été en contact avec L. P. Smith de Cornell et avait découvert que Smith et ses étudiants avaient fait une quantité considérable de travaux – et avec des preuves de succès – sur la séparation des isotopes du lithium par une telle méthode. Thi; a été rapporté à Lawrence à Washington lors d'une des réunions de décembre 1941 du Comité de l'uranium. Lawrence entra immédiatement en contact avec Smith, de sorte que Smith travailla sur la méthode à Berkeley de février 1942 à juin 1942. J. Slepian, du Westinghouse Research

Laboratory à East Pittsburgh, vint à Berkeley pendant l'hiver 1941-1942 à l'invitation de Lawrence et s'intéressa à une modification du magnétron, qu'il appela centrifugeuse ionique. Slepian resta à Berkeley la plupart du temps jusqu'à l'automne 1942, après quoi il retourna à East Pittsburgh où il continua son travail.

11.30. Aucune séparation de l'uranium n'a été tentée dans le magnétron. Des expériences avec du lithium avec de faibles courants ioniques ont montré une certaine séparation, mais aucun résultat cohérent n'a été obtenu avec des courants ioniques élevés. Dans le cas de la centrifugeuse ionique, des échantillons d'uranium ont été prélevés montrant une séparation appréciable, mais les résultats n'ont pas été clairs ou cohérents.

LA SITUATION AU DÉBUT DE 1943

11.31. Avec la quasi-élimination de l'isotron et de la centrifugeuse ionique du programme de développement, le séparateur de calutrons est devenu la seule méthode électromagnétique sur laquelle on a travaillé de manière intensive. La construction des premières unités d'une centrale avait été autorisée et les plans avaient été gelés pour de telles unités, mais l'ensemble du programme électromagnétique n'existait que depuis un peu plus d'un an et il était évident que les conceptions disponibles étaient basées sur des suppositions astucieuses plutôt que sur des recherches adéquates. Une situation similaire aurait pu se produire avec la pile à réaction en chaîne si des quantités illimitées d'uranium et de graphite avaient été disponibles avant que la théorie n'ait été élaborée ou avant que les constantes nucléaires n'aient été bien déterminées. Heureusement, la nature des deux projets était très différente, ce qui rendait moins spéculative la construction d'une unité d'usine électromagnétique à la hâte que cela n'aurait été le cas pour la pile. La poursuite de la recherche et du développement pourrait se poursuivre avantagement même pendant la construction et l'exploitation des premières unités de l'usine.

LA CONSTRUCTION ET L'EXPLOITATION ; MARS 1943
À JUIN 1945

COMPARAISON AVEC LES USINES DE DIFFUSION ET DE PLUTONIUM

11.32. Les chapitres précédents montrent que la fin de l'année 1942 a été une période de décision pour l'ensemble du projet d'uranium. Car c'est à cette époque qu'une réaction en chaîne auto-entretenu a été produite pour la première fois, que la construction de l'usine de plutonium de Hanford, de l'usine de diffusion de Clinton et de l'usine électromagnétique de Clinton a été autorisée. L'usine de diffusion était plus flexible que l'usine de plutonium, car l'usine de diffusion pouvait être décomposée en sections et en étapes, construites en tout ou en partie, pour produire des quantités variables d'U-235 à des degrés d'enrichissement variables. L'installation électromagnétique était encore plus flexible, car chaque unité de séparation était pratiquement indépendante des autres unités. Le processus de séparation consistait à charger une charge dans une unité, à faire fonctionner l'unité pendant un certain temps, puis à l'arrêter et à retirer le produit. Certes, les unités étaient construites en groupes, mais la plupart des commandes étaient séparées pour chaque unité. Cette caractéristique a permis de construire l'usine par étapes et de commencer à exploiter la première partie avant même que la seconde ne soit commencée. Il a également été possible de modifier la conception des unités subséquentes au fur et à mesure de la construction ; Dans certaines limites, il était même possible de remplacer les unités obsolètes des premiers groupes par de nouvelles unités améliorées.

NATURE ET ORGANISATION DES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT

11.33. La construction de la première série d'unités électromagnétiques à Clinton a commencé en mars 1943 et cette partie de l'usine était prête à fonctionner en novembre 1943. Le groupe de Berkeley a continué à améliorer les sources d'ions, les récepteurs et les équipements auxiliaires, en visant toujours des

courants ioniques plus importants. En fait, les rapports de Berkeley décrivent pas moins de soixante et onze types différents de sources et cent quinze types différents de récepteurs, qui ont tous atteint le stade de la conception et dont la plupart ont été construits et testés. Dès que la valeur d'un changement de conception donné a été prouvée, tous les efforts ont été faits pour l'intégrer dans la conception de nouvelles unités.

11.34. De tels développements ont nécessité un échange constant d'informations entre les laboratoires, les groupes d'ingénierie, de construction et d'exploitation. Heureusement, la liaison était excellente. Les compagnies avaient des représentants à Berkeley, et les membres du groupe de recherche à Berkeley ont effectué des visites fréquentes et prolongées à l'usine de Clinton. En fait, certains des chercheurs ont été transférés à la paie de la Tennessee Eastman Company qui exploitait l'usine de Clinton, et un groupe de plus d'une centaine de physiciens et d'ingénieurs de recherche toujours conservés sur la liste de paie de Berkeley ont été affectés à Clinton. Particulièrement dans les premiers stades de l'opération, les hommes de Berkeley stationnés à Clinton ont été d'une aide inestimable en tant que « dépanneurs » et en instruisant les opérateurs. Une section de l'usine a continué d'être maintenue en tant qu'unité pilote pour tester l'équipement modifié et les procédures d'exploitation révisées, et a été gérée conjointement par le groupe Berkeley et par Tennessee Eastman. En plus du groupe britannique d'Oliphant déjà mentionné, il y avait un groupe de chimistes britanniques à Clinton sous J. W. Baxter.

PROBLÈMES CHIMIQUES

11.35. À l'origine, les sels d'uranium utilisés comme sources de vapeur pour les arcs producteurs d'ions n'avaient pas fait l'objet d'études approfondies à Berkeley, mais au fur et à mesure que le procédé se développait, de nombreux travaux ont été effectués sur ces sels et la recherche d'un composé d'uranium qui serait meilleur que celui utilisé

à l'origine a été effectuée. Des études précieuses ont également été faites sur les méthodes de production du composé choisi.

11.36 Le problème chimique de loin le plus important était la récupération des composés d'uranium traités dans les unités de séparation. Ce problème de récupération a eu des phases Ovo. Dans les unités du premier étage, il était essentiel de récupérer l'uranium séparé des récepteurs avec une efficacité maximale ; tandis que la récupération de l'uranium non séparé dispersé dans d'autres parties de l'unité était moins importante. Mais si des unités d'étage supérieur sont utilisées, même le matériau de départ contient une forte concentration d'U-235, et il est essentiel de récupérer tout le matériau de l'unité à la fin de chaque essai, c'est-à-dire le matériau restant dans la source d'ions et le matériau déposé sur les électrodes accélératrices, sur les parois de la chambre magnétique, et sur les parois du récepteur.

L'INSTALLATION DE DIFFUSION THERMIQUE

11.37. Pendant près d'un an, l'installation électromagnétique a été la seule en activité. Par conséquent, l'envie d'augmenter son taux de production était énorme. On s'est rendu compte que toute méthode d'enrichissement, même légèrement enrichissante, de la matière à introduire dans l'usine augmenterait sensiblement le taux de production. Par exemple, une unité électromagnétique capable de produire un gramme par jour d'uranium 235 pur à 4 % à partir d'uranium naturel pourrait produire deux grammes par jour d'uranium 235 à 80 % si la concentration d'U-235 dans la matière première était le double de la concentration naturelle (1,4 % au lieu de 0,7 %).

11.38. Nous avons déjà mentionné les travaux de P. H. Abelson, du Naval Research Laboratory, sur la séparation des isotopes de l'uranium par diffusion thermique dans un composé liquide de l'uranium. Au printemps 1943, Abelson avait mis en place une usine pilote qui permettait de séparer sensiblement une quantité considérable de composés d'uranium. Il a donc été proposé de construire une installation de diffusion thermique à grande échelle. Une telle usine serait moins chère

que n'importe laquelle des autres centrales à grande échelle, et elle pourrait être construite plus rapidement. Son principal inconvénient était son énorme consommation de vapeur, ce qui le rendait impraticable pour tout le travail de séparation.

11.39. Non seulement une usine pilote était déjà en service au Naval Research Laboratory, mais une deuxième usine, un peu plus grande, était en construction au chantier naval de Philadelphie. Grâce à la coopération de la Marine, les services d'Abelson et les plans d'une usine à grande échelle ont été mis à la disposition du district de Manhattan. Il a été décidé de construire la grande usine de diffusion thermique à Clinton (en utilisant la vapeur de la centrale électrique construite pour l'usine de diffusion gazeuse) et d'utiliser le produit de l'usine de diffusion thermique comme matériau d'alimentation pour l'installation électromagnétique.

11.40. Cette nouvelle installation de diffusion thermique a été érigée en un temps étonnamment court à la fin de l'été 1944. Malgré quelques déceptions, l'exploitation de cette usine a réussi à atteindre son objectif d'augmenter considérablement le taux de production de l'installation électromagnétique. Il a également stimulé les travaux sur le problème de la récupération de l'uranium. L'avenir de cette usine est incertain. Le fonctionnement de l'installation de diffusion gazeuse rend difficile l'obtention d'une quantité suffisante de vapeur pour faire fonctionner l'installation de diffusion thermique, mais fournit également un autre utilisateur pour son produit.

N° MISCELLANEOUS PROBLÈMES

11.41. Bien que les problèmes scientifiques et techniques auxquels se sont heurtés les groupes de Berkeley n'aient probablement pas été aussi variés ni aussi nombreux que ceux rencontrés à Chicago et à Columbia, ils n'en étaient pas moins nombreux. C'est ainsi que de nombreux problèmes se sont posés la conception des circuits d'alimentation et de contrôle électriques, des champs magnétiques, des isolateurs, des pompes à vide, des réservoirs, des collecteurs et des sources. De nombreux équipements ont dû être

conçus à partir de zéro, puis produits en série dans le cadre d'une priorité élevée.

SITUATION ACTUELLE

11.42. L'usine de séparation électromagnétique fonctionnait à grande échelle pendant l'hiver 1944-1945 et produisait de l'U-235 d'une pureté suffisante pour être utilisé dans les bombes atomiques. Son efficacité opérationnelle est continuellement améliorée. Les travaux de recherche se poursuivent, bien qu'à une échelle réduite.

RÉSUMÉ

11.43. Dans les premiers temps du projet sur l'uranium, les méthodes électromagnétiques de séparation isotopique ont été rejetées principalement en raison des effets attendus de la charge spatiale. À l'automne de 1941, la question fut rouverte ; Des expériences menées à Berkeley ont montré que les effets de la charge spatiale pouvaient être largement surmontés. C'est ainsi qu'un vaste programme de développement de méthodes électromagnétiques a été entrepris.

11.44. Parmi les différents types de méthodes électromagnétiques proposées, le calutron (mis au point à Berkeley) a retenu l'attention principale. Deux autres méthodes nouvelles ont été étudiées, l'une à Berkeley et l'autre à Princeton. Le séparateur de masse de calutron se compose d'une source d'ions à partir de laquelle un faisceau d'ions d'uranium est aspiré par un champ électrique, d'un système d'accélération dans lequel les ions sont accélérés à des vitesses élevées, d'un champ magnétique dans lequel les ions se déplacent en demi-cercles de rayon en fonction de la masse des ions, et d'un système récepteur. Les principaux problèmes de cette méthode concernaient la source d'ions, le système d'accélération, la divergence du faisceau d'ions, la charge d'espace et l'utilisation du champ magnétique. Les principaux avantages du calutron étaient un facteur de séparation élevé, un faible retard, un temps de

démarrage court et une flexibilité de fonctionnement. À l'automne 1942, des progrès considérables avaient été accomplis pour justifier l'autorisation de la construction de l'usine et, un an plus tard, les premières unités de l'usine étaient prêtes à être testées à l'usine Clinton Engineer Works dans le Tennessee.

11.45. Les travaux de recherche et de développement sur le calutron ont été effectués principalement au Radiation Laboratory de l'Université de Californie, sous la direction de Lawrence. Westinghouse, General Electric et Allis Chalmers construisirent la majorité des pièces ; Stone et Webster ont construit l'usine, et Tennessee Eastman l'a exploitée.

11.46. Etant donné que la méthode de séparation par calutrons consistait en des opérations discontinues dans un grand nombre d'unités largement indépendantes, il a été possible d'apporter des améliorations importantes même après le début de l'exploitation de l'usine.

11.47. Au cours de l'été 1944, une installation de séparation par diffusion thermique a été construite à l'usine d'ingénierie Clinton afin de fournir des matières premières enrichies pour l'usine électromagnétique et d'augmenter ainsi le taux de production de cette dernière usine. La conception de l'usine de diffusion thermique a été basée sur les résultats des recherches menées au Naval Research Laboratory et sur l'usine pilote construite par le département de la Marine au chantier naval de Philadelphie.

11.48. Bien que les travaux de recherche sur le calutron aient commencé plus tard que sur les systèmes de centrifugation et de diffusion, l'usine de calutron a été la première à produire de grandes quantités d'isotopes séparés de l'uranium.

CHAPITRE XII. LES TRAVAUX SUR LA BOMBE ATOMIQUE

L'OBJECTIF

12.1. L'objectif des travaux décrits dans les chapitres précédents était d'explorer la possibilité de créer des bombes atomiques et de produire les matières fissiles concentrées qui seraient nécessaires dans de telles bombes. Dans le présent chapitre, nous décrivons la dernière étape des travaux : la mise au point de la bombe atomique elle-même à Los Alamos. Comme dans les autres parties du projet, il y a deux phases à considérer : l'organisation, et le travail scientifique et technique lui-même. L'organisation sera décrite brièvement ; Le reste du chapitre sera consacré aux problèmes scientifiques et techniques. Des considérations de sécurité empêchent de discuter de bon nombre des phases les plus importantes de ce travail.

HISTOIRE ET ORGANISATION

12.2. La réorganisation du projet qui a eu lieu au début de 1942 et le transfert progressif des travaux de l'OSRD au district de Manhattan ont été décrits au chapitre V. On se rappellera que les responsabilités du Metallurgical Laboratory de Chicago comprenaient à l'origine une étude préliminaire de la physique de la bombe atomique. Certaines études de ce type ont été réalisées en 1941 ; Au début de 1942, G. Breit fit commencer l'étude expérimentale des problèmes qui devaient être résolus avant de progresser dans la conception des bombes (voir chapitre VI, paragraphe 6.38). Comme nous l'avons mentionné au chapitre VI, J. R. Oppenheimer, de l'Université de Californie, a réuni un groupe au cours de l'été 1942 pour approfondir ses recherches théoriques et a également entrepris de coordonner ce travail expérimental. Ce groupe a été officiellement

sous l'égide du Metallurgical Laboratory, mais le groupe théorique a fait la plupart de ses travaux à l'Université de Californie. À la fin de l'été 1942, lorsque le général L. R. Groves prit en charge l'ensemble du projet, il fut décidé d'étendre considérablement les travaux et, le plus tôt possible, de créer un laboratoire séparé.

12.3. Dans le choix de l'emplacement de ce laboratoire de bombes atomiques, les considérations les plus importantes étaient le secret et la sécurité. Il a donc été décidé d'établir le laboratoire dans un endroit isolé et de rompre les liens inutiles avec le monde extérieur.

12.4. En novembre 1942, un site avait été choisi, à Los Alamos, au Nouveau-Mexique. Il était situé sur une mesa à environ 30 miles de Santa Fe. L'un des atouts de ce site était la disponibilité d'une surface considérable pour les terrains d'essai, mais au départ, les seules structures sur le site consistaient en une poignée de bâtiments qui constituaient autrefois un petit pensionnat. Il n'y avait pas de laboratoire, pas de bibliothèque, pas de magasin, pas de centrale électrique adéquate. Le seul moyen d'accès était une route de montagne sinueuse. Le fait que les handicaps du site aient été surmontés dans une large mesure est un hommage aux efforts inlassables du personnel scientifique et militaire.

12.5. J. R. Oppenheimer est directeur du laboratoire depuis le début. Il est arrivé sur le site en mars 1943 et a rapidement été rejoint par des groupes et des individus de l'Université de Princeton, de l'Université de Chicago, de l'Université de Californie, de l'Université du Wisconsin, de l'Université du Minnesota et d'ailleurs. Avec le soutien vigoureux du général L. R. Groves, J. B. Conant et d'autres, Oppenheimer continua à rassembler autour de lui des scientifiques aux capacités reconnues, de sorte qu'à la fin de 1944 trouva une extraordinaire galaxie d'étoiles scientifiques rassemblées sur cette mesa du Nouveau-Mexique. Le recrutement de personnel scientifique et de techniciens subalternes était plus difficile, car pour ces personnes, les inconvénients du site n'étaient pas toujours compensés par une appréciation de l'ampleur de l'objectif ;

l'utilisation du personnel du détachement spécial du génie a considérablement amélioré la situation.

12.6. Naturellement, la tâche d'assembler les appareils, les machines et l'équipement nécessaires était énorme. Trois wagons remplis d'appareils du projet de Princeton ont répondu à certains des besoins les plus urgents. Un cyclotron de Harvard, deux générateurs Van de Graaff du Wisconsin et un appareil à haute tension Cockcroft-Walton de l'Illinois arrivèrent bientôt. À titre d'illustration de la rapidité avec laquelle le laboratoire a été mis en place, nous pouvons noter que la pièce du pôle inférieur de l'aimant du cyclotron n'a été posée que le 14 avril 1943, mais que la première expérience a été réalisée au début du mois de juillet. D'autres appareils ont été acquis en quantité ; Des laboratoires annexes ont été construits. Aujourd'hui, c'est probablement le laboratoire de recherche en physique le mieux équipé au monde.

12.7. Le laboratoire a été financé dans le cadre d'un contrat entre le district de Manhattan et l'Université de Californie.

ÉTAT DES CONNAISSANCES EN AVRIL 1943

DISCUSSION GÉNÉRALE DU PROBLÈME

12.8. Dans le chapitre II, nous avons exposé les conditions générales requises pour produire une réaction en chaîne auto-entretenu. Il a été souligné qu'il existe quatre processus en compétition pour les neutrons : (1) la capture des neutrons par l'uranium, ce qui entraîne la fission ; (2) le captage de l'uranium par la non-fission ; (3) la capture de non-fission par les impuretés ; et (4) l'échappement des neutrons du système. Par conséquent, la condition pour obtenir une telle réaction en chaîne est que le processus (1) produise autant de nouveaux neutrons qu'il en consomme ou en perd dans les quatre processus. Il a été souligné que (2) peut être réduit par l'élimination de l'U-238 ou par l'utilisation d'un réseau et d'un modérateur, que (3) peut être réduit en atteignant un degré élevé de pureté chimique, et que (4) peut être réduit (relativement) par l'augmentation de la taille du système. Dans nos discussions précédentes sur les réactions en

chaîne, il a toujours été tenu pour acquis que le système de réaction en chaîne ne devait pas exploser. Maintenant, nous voulons réfléchir à la façon de le faire exploser.

12.9. Par définition, une explosion est une libération soudaine et violente d'une grande quantité d'énergie dans une petite région. Pour produire une explosion importante dans une bombe atomique, les parties de la bombe ne doivent pas se séparer sensiblement avant qu'une fraction substantielle de l'énergie nucléaire disponible n'ait été libérée, car l'expansion entraîne une augmentation de l'échappement des neutrons du système et donc une fin prématurée de la réaction en chaîne. En d'autres termes, l'efficacité de la bombe atomique dépendra du rapport entre (a) la vitesse à laquelle les neutrons générés par les premières fissions pénètrent dans d'autres noyaux et produisent une fission supplémentaire, et (b) la vitesse à laquelle la bombe se désagrège. En utilisant les principes connus de la génération d'énergie, de l'élévation de la température et de la pression, et de la dilatation des solides et des vapeurs, il a été possible d'estimer l'ordre de grandeur de l'intervalle de temps entre le début et la fin de la réaction nucléaire en chaîne. Presque toutes les difficultés techniques du projet proviennent de l'extraordinaire brièveté de cet intervalle de temps.

« 12.10. Dans les chapitres précédents, nous avons déclaré qu'aucune réaction en chaîne auto-entretenu ne pouvait être produite dans un bloc d'uranium métal pur, quelle que soit sa taille, en raison de la capture parasite des neutrons par l'U-238. Cette conclusion a été confirmée par divers calculs théoriques et aussi par l'expérience directe. Dans le but de produire un tas non explosif, l'astuce consistant à utiliser un réseau et un modérateur suffit, en réduisant considérablement la capture parasite. Cependant, pour les besoins de la production d'une unité explosive, il s'avère que ce processus n'est pas satisfaisant à deux égards. Tout d'abord, les neutrons thermiques mettent tellement de temps (tant de microsecondes) à agir qu'il n'en résulterait qu'une faible explosion. Deuxièmement, une pile est généralement beaucoup trop grande pour être transportée. Il est

donc nécessaire de réduire la capture parasitaire en retirant la plus grande partie de l'U-238 ou d'utiliser du plutonium.

12.11. Naturellement, ces principes généraux — et d'autres — étaient bien établis avant la mise en place du projet de Los Alamos.

TAILLE CRITIQUE

12.12. Le calcul de la taille critique d'une unité réagissant en chaîne est un problème qui a déjà été discuté en ce qui concerne les pieux. Bien que le calcul soit plus simple pour une unité métallique homogène que pour un réseau, des imprécisions subsistent au cours des premiers travaux, à la fois en raison d'un manque de connaissance précise des constantes et de difficultés mathématiques. Par exemple, les sections efficaces de diffusion, de fission et d'absorption des noyaux impliqués varient toutes avec la vitesse des neutrons. Les détails de cette variation n'étaient pas connus expérimentalement et il était difficile d'en tenir compte dans les calculs. Au printemps 1943, plusieurs estimations de la taille critique avaient été faites à l'aide de diverses méthodes de calcul et en utilisant les meilleures constantes nucléaires disponibles, mais les limites d'erreur restaient importantes.

LE RÉFLECTEUR OU LE TAMPER

12.13. Dans un tas à réaction en chaîne uranium-graphite, la taille critique peut être considérablement réduite en l'entourant d'une couche de graphite, car une telle enveloppe « réfléchit » de nombreux neutrons dans le tas. Une enveloppe similaire peut être utilisée pour réduire la taille critique de la bombe, mais ici l'enveloppe a un rôle supplémentaire : son inertie même retarde l'expansion de la matière réactive. Pour cette raison, une telle enveloppe est souvent appelée un bourreau. L'utilisation d'un pilon permet clairement une explosion plus durable, plus énergétique et plus efficace. Le pilon le plus efficace est celui qui a la densité la plus élevée ; Une résistance élevée à la traction s'avère sans importance. C'est une heureuse coïncidence que les

matériaux de haute densité soient également excellents comme réflecteurs de neutrons.

EFFICACITÉ

12.14. Comme on l'a déjà remarqué, la bombe a tendance à voler en éclats au fur et à mesure de la réaction, ce qui tend à arrêter la réaction. Il est relativement simple de calculer à quel point la bombe doit se dilater avant que la réaction ne s'arrête. Le calcul de la durée de cette expansion et de l'ampleur de la réaction dans ce laps de temps est beaucoup plus difficile.

12.15. Bien que l'effet d'un sabotage soit d'augmenter l'intensité à la fois en réfléchissant les neutrons et en retardant l'expansion de la bombe, l'effet sur l'efficacité n'est pas aussi important que sur la masse critique. La raison en est que le processus de réflexion prend relativement du temps et peut ne pas se produire de manière prolongée avant la fin de la réaction en chaîne.

DÉTONATION ET ASSEMBLAGE

12.16. Comme indiqué au chapitre I, il est impossible d'empêcher qu'une réaction en chaîne ne se produise lorsque la taille dépasse la taille critique. Car il y a toujours suffisamment de neutrons (provenant des rayons cosmiques, des réactions de fission spontanées ou des réactions induites par les particules alpha dans les impuretés) pour initier la chaîne. Ainsi, jusqu'à ce que la détonation soit désirée, la bombe doit être constituée d'un certain nombre de pièces distinctes, dont chacune est inférieure à la taille critique, soit en raison de sa petite taille, soit en raison de sa forme défavorable. Pour produire une détonation, les pièces de la bombe doivent être assemblées rapidement. Au cours de ce processus d'assemblage, la réaction en chaîne est susceptible de commencer, en raison de la présence de neutrons parasites, avant que la bombe n'ait atteint sa forme la plus compacte (la plus réactive). Dès lors, l'explosion tend à empêcher la bombe d'atteindre cette forme la plus compacte. Ainsi, il peut s'avérer que l'explosion est si inopportune qu'elle est relativement inutile. Le problème est donc double : (1) réduire au minimum le temps

de montage ; et (2) réduire au minimum le nombre de neutrons parasites (prédétonation).

12.17. On a tenu compte du danger de produire un « raté » ou une détonation si inefficace que la bombe elle-même ne serait pas complètement détruite. Cela présenterait, bien sûr, à l'ennemi une réserve de matériel de grande valeur.

EFFICACITÉ

12.18. Dans les chapitres II et IV, il a été souligné que la quantité d'énergie libérée n'était pas le seul critère de la valeur d'une bombe. Il n'y avait aucune garantie qu'une bombe à l'uranium libérant une énergie égale à l'énergie libérée par 20 000 tonnes de TNT serait aussi efficace pour produire une destruction militaire que, disons, 10 000 bombes de deux tonnes. En fait, il y avait de bonnes raisons de croire que l'effet destructeur par calorie libérée diminue à mesure que la quantité totale d'énergie libérée augmente. D'autre part, dans les bombes atomiques, la quantité totale d'énergie libérée par kilogramme de matière fissile (c'est-à-dire l'efficacité de la libération d'énergie) augmente avec la taille de la bombe. Ainsi, la taille optimale de la bombe atomique n'était pas facile à déterminer. Un aspect tactique qui complique encore la situation est l'avantage de la destruction simultanée d'une grande partie du territoire ennemi. Dans une évaluation complète de l'efficacité d'une bombe atomique, il faut également prêter attention aux effets sur le moral. * La bombe explose en combat à une hauteur au-dessus du sol telle qu'elle donne le maximum d'effet de souffle contre les structures et qu'elle disperse les produits radioactifs sous forme de nuage. En raison de la hauteur de l'explosion, pratiquement tous les produits radioactifs sont transportés vers le haut dans la colonne ascendante d'air chaud et dispersés sans danger sur une large zone. Même dans l'essai du Nouveau-Mexique, où la hauteur de l'explosion était nécessairement faible, seule une très petite fraction de la radioactivité s'est déposée immédiatement sous la bombe.

12.19 Étant donné que l'on avait estimé la vitesse à laquelle les masses sous-critiques d'uranium 235 se réuniraient assez rapidement pour éviter la prédétonation, on avait beaucoup réfléchi aux méthodes pratiques pour y parvenir. La méthode évidente de très rapidement. L'assemblage d'une bombe atomique consistait à tirer une partie comme projectile dans un canon contre une deuxième partie comme cible. La masse, la vitesse et le calibre du canon requis n'étaient pas très éloignés de la portée de la pratique standard de l'artillerie, mais de nouveaux problèmes ont été introduits par l'importance d'obtenir un contact soudain et parfait entre le projectile et la cible, par l'utilisation de sabotages et par l'exigence de portabilité. Aucun de ces problèmes techniques n'avait été étudié de manière appréciable avant la création du laboratoire de Los Alamos.

12.20. On s'était également rendu compte qu'il était probable que l'on pourrait mettre au point des systèmes permettant d'incorporer dans la bombe des absorbeurs de neutrons de telle sorte qu'ils seraient rendus moins efficaces par les premiers stades des réactions en chaîne. Ainsi, la tendance à la

* Le reste de ce paragraphe est tiré d'un communiqué du ministère de la Guerre postérieur à la première utilisation de bombes atomiques contre le Japon.

Si la bombe explosait prématurément et de manière inefficace, cela serait minimisé. De tels dispositifs permettant d'augmenter l'intensité de la bombe sont appelés auto-catalytiques.

RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES EN DATE D'AVRIL 1943

12.21. En avril 1943, les informations d'intérêt disponibles concernant la conception des bombes atomiques étaient préliminaires et inexacts. Des travaux théoriques plus approfondis sur la taille critique, l'efficacité, l'effet de l' sabotage, la méthode de détonation et l'efficacité étaient nécessaires de toute urgence. Les mesures des constantes nucléaires de l'uranium 235, du plutonium et des matériaux d'effraction ont dû être étendues et améliorées. Dans le cas de l'uranium 235 et du

plutonium, des mesures provisoires ont dû être effectuées en utilisant seulement des quantités infimes jusqu'à ce que des quantités plus importantes soient disponibles.

12.22. Outre ces problèmes de physique théorique et expérimentale, il y avait une foule de problèmes chimiques, métallurgiques et techniques qui avaient à peine été abordés. Des exemples étaient la purification et la fabrication de l'U-235 et du plutonium, ainsi que la fabrication du pylon. Enfin, il y avait des problèmes d'assemblage instantané de la bombe d'une complexité stupéfiante.

LES TRAVAUX DU LABORATOIRE

INTRODUCTION

12.23. Pour des raisons administratives, le personnel scientifique de Los Alamos a été réparti en sept divisions, qui ont été réorganisées à diverses époques. Au printemps 1945, les divisions étaient les suivantes : la division de physique théorique sous la direction de H. Bethe, la division de physique nucléaire expérimentale sous la direction de R. R. Wilson, la division de chimie et de métallurgie sous la direction de J. W. Kennedy et C. S. Smith, la division de l'artillerie sous la direction du capitaine W. S. Parsons (USN), la division des explosifs sous la direction de G. B. Kistiakowsky, la division de physique des bombes sous la direction de R. F. Bacher et une division de développement avancé sous la direction de E. Fermi. Toutes les divisions relevaient de J. R. Oppenheimer, directeur du laboratoire de Los Alamos, qui a été assisté dans les tâches suivantes :

coordonnant les recherches de S. K. Allison depuis décembre 1944. J. Chadwick d'Angleterre et N. Bohr de Danemark ont passé beaucoup de temps à Los Alamos et ont donné de précieux conseils. Chadwick était à la tête d'une délégation britannique qui contribua matériellement au succès du laboratoire. Pour des raisons de sécurité, la plupart des travaux du laboratoire ne peuvent être décrits qu'en partie.

12.24. Deux considérations ont donné une importance inhabituelle aux travaux de la Division de physique théorique sous la direction de H. Bethe. Le premier d'entre eux était la nécessité d'effectuer le développement simultané de tout, depuis les matériaux fondamentaux jusqu'à la méthode de leur utilisation, le tout en dépit de la quasi-indisponibilité des principaux matériaux (U-235 et plutonium) et de la nouveauté complète des procédés. La deuxième considération était l'impossibilité de produire (comme à des fins expérimentales) une explosion atomique « à petite échelle » en utilisant seulement une petite quantité de matière fissile. (Il n'y a pas d'explosion du tout à moins que la masse de la matière fissile ne dépasse la masse critique.) Il était donc nécessaire de partir des données obtenues lors d'expériences sur des quantités infinitésimales de matériaux et de les combiner avec les théories disponibles aussi précisément que possible afin de faire des estimations sur ce qui se passerait dans la bombe. Ce n'est qu'ainsi qu'il a été possible de faire des plans judicieux pour les autres parties du projet et de prendre des décisions sur la conception et la construction sans attendre des expériences élaborées sur de grandes quantités de matériaux. Pour ne prendre que quelques exemples, il a fallu des travaux théoriques pour déterminer grossièrement les dimensions du canon, pour guider les métallurgistes dans le choix des matériaux anti-sabotage et pour déterminer l'influence de la pureté de la matière fissile sur l'efficacité de la bombe.

12.25. La détermination de la taille critique de la bombe était l'un des principaux problèmes de la Division de physique théorique. Au fil du temps, plusieurs améliorations ont été apportées à l'approche théorique, ce qui a permis de prendre en compte pratiquement tous les phénomènes complexes impliqués. On a d'abord considéré que la diffusion des neutrons était similaire à la diffusion de la chaleur, mais cette analogie naïve a dû être abandonnée. Dans les premiers travaux théoriques, les hypothèses ont été faites selon lesquelles les neutrons avaient

tous la même vitesse et étaient tous diffusés de manière isotrope. C'est ainsi qu'une méthode a été mise au point qui a permis de calculer la taille critique pour différentes formes de matière fissile, à condition que le libre parcours moyen des neutrons soit le même dans le matériau d'altération que dans le matériau fissile. Cette méthode a ensuite été améliorée, d'abord en tenant compte de la dépendance angulaire de la diffusion et, d'autre part, en tenant compte de la différence dans le libre parcours moyen entre les matériaux à noyau et les matériaux tamper. Plus tard encore, on a trouvé des moyens de prendre en compte les effets de la distribution en vitesse des neutrons, les variations des sections efficaces avec la vitesse et la diffusion inélastique dans le noyau et les matériaux d'sabotage. Ainsi, il est devenu possible de calculer des tailles critiques en supposant presque n'importe quel type de matériau d'inviolabilité.

12.26. Il est possible de calculer la vitesse à laquelle la densité neutronique diminue dans les modèles de bombes dont la taille est inférieure à la taille critique, et de tenir compte de toutes les variables mentionnées ci-dessus. La vitesse d'approche de la condition critique lorsque la partie projectile de la bombe se déplace vers la partie cible de la bombe a été étudiée par des méthodes théoriques. De plus, la meilleure répartition des matières fissiles dans le projectile et la cible a été déterminée par des études théoriques.

12.27. Des techniques ont été mises au point pour faire face à des montages dans lesquels le nombre de neutrons est si faible qu'une analyse statistique minutieuse des effets des neutrons doit être effectuée. Le problème le plus important à cet égard était la détermination de la probabilité que, lorsqu'une bombe est plus grande que la taille critique, un neutron parasite déclenche une réaction en chaîne continue. Un problème connexe était la détermination de l'amplitude des fluctuations de la densité neutronique dans une bombe dont la taille est proche de la taille critique. À l'été 1945, de nombreux calculs de ce type avaient été vérifiés par des expériences.

12.28. De nombreux travaux théoriques ont été effectués sur l'équation de l'état de la matière aux températures et pressions élevées auxquelles on peut s'attendre dans les bombes atomiques qui explosent. La dilatation des différentes parties constitutives de la bombe pendant et après le moment de la réaction en chaîne a été calculée. Les effets des rayonnements ont fait l'objet d'études très détaillées.

12.29. Après avoir calculé l'énergie libérée lors de l'explosion d'une bombe atomique, on veut naturellement estimer les dommages militaires qui seront produits. Il s'agit de l'analyse des ondes de choc dans l'air et dans la terre, de la détermination de l'efficacité d'une détonation sous la surface de l'océan, etc.

12.30. En plus de tous les travaux mentionnés ci-dessus, un travail considérable a été accompli pour évaluer les expériences préliminaires. C'est ainsi qu'une analyse a été faite de la rétrodiffusion des neutrons par les différents matériaux d'altération proposés. Une analyse a également été faite des résultats d'expériences sur la multiplication des neutrons en quantités sous-critiques de matière fissile.

PHYSIQUE NUCLÉAIRE EXPÉRIMENTALE DIVISION

12.31. Les expériences réalisées par le groupe de physique nucléaire expérimentale de Los Alamos étaient de deux types : les expériences « différentielles » pour déterminer la section efficace de la fission d'un isotope spécifique par des neutrons d'une vitesse spécifique, et les expériences « intégrales » pour déterminer la diffusion moyenne des neutrons de fission à partir d'un sabotage réel.

12.32. De nombreuses constantes nucléaires avaient déjà été déterminées au Laboratoire métallurgique de l'Université de Chicago et ailleurs, mais un certain nombre de constantes importantes n'étaient pas encore déterminées, en particulier celles impliquant des vitesses de neutrons élevées. Voici quelques-unes des questions en suspens :

Quelles sont les sections efficaces de fission de l'U-234, de l'U-235, de l'U-238, du Pu-239, etc. ? Comment varient-ils avec la vitesse des neutrons ?

Quelles sont les sections efficaces de diffusion élastique pour les mêmes noyaux (également pour les noyaux de matériaux d'inviolabilité) ? Comment varient-ils avec la vitesse des neutrons ?

Quelles sont les sections efficaces inélastiques des noyaux mentionnés ci-dessus ?

Quelles sont les sections efficaces d'absorption pour les processus autres que la fission ?

Combien de neutrons sont émis par fission dans le cas de chacun des noyaux mentionnés ci-dessus ?

Quelle est l'explication complète du fait que le nombre de neutrons émis par fission n'est pas un nombre entier ?

Quelle est l'énergie initiale des neutrons produits par fission ?

Le nombre ou l'énergie de ces neutrons varie-t-il avec la vitesse des neutrons incidents ?

Les neutrons de fission sont-ils émis immédiatement ?

Quelle est la probabilité de fission spontanée des différents noyaux fissiles ?

En plus d'essayer de trouver les réponses à ces questions, la Division de physique nucléaire expérimentale de Los Alamos a étudié de nombreux problèmes d'un grand intérêt scientifique qui étaient censés jouer un rôle dans leur dispositif final. Quoi qu'il en soit, le stock de connaissances ainsi accumulé par la Division constitue une partie intégrante et inestimable de toute réflexion sur les problèmes nucléaires.

Méthodes expérimentales. Les chapitres précédents ne contiennent que peu ou pas de discussion sur les techniques expérimentales, à l'exception de celles destinées à l'observation des particules rapides (chargées) (voir appendice 1). Pour obtenir des réponses aux dix questions posées ci-dessus, nous aimerions pouvoir :

déterminer le nombre de neutrons d'une énergie donnée ;

produire des neutrons de n'importe quelle énergie désirée ;
déterminer les angles de déviation des neutrons diffusés ;
déterminer le nombre de fissions qui se produisent ;
détecter d'autres conséquences de l'absorption neutronique, par exemple la radioactivité artificielle.

Nous indiquerons brièvement comment ces observations sont faites.

Détection des neutrons. Il existe trois façons de détecter les neutrons : par l'ionisation produite par des noyaux atomiques légers entraînés vers l'avant à grande vitesse par des collisions élastiques avec des neutrons, par la désintégration radioactive de noyaux instables formés par l'absorption de neutrons, et par la fission résultant de l'absorption de neutrons. Ces trois processus conduisent à la production d'ions et l'ionisation qui en résulte peut être détectée à l'aide d'électroscopes, de chambres d'ionisation, de compteurs Geiger-Müller, de chambres à brouillard Wilson, de traces en émulsion photographique, etc.

Si la simple détection des neutrons n'est pas difficile, la mesure des vitesses des neutrons l'est nettement plus. La méthode de la chambre à brouillard de Wilson et la méthode de l'émulsion photographique donnent les résultats les plus directs, mais sont fastidieuses à appliquer. Le plus souvent, diverses combinaisons d'absorbeurs sélectifs sont utilisées. Ainsi, par exemple, si une feuille connue pour absorber des neutrons d'une seule gamme particulière d'énergies est insérée sur le trajet des neutrons et est ensuite retirée, son degré de radioactivité est vraisemblablement proportionnel au nombre de neutrons dans la gamme d'énergie particulière concernée. Un autre projet consiste à étudier la radioactivité induite dont on sait qu'elle n'est produite que par des neutrons dont l'énergie est supérieure à un certain seuil.

Un schéma élégant pour étudier les effets des neutrons d'une seule vitesse choisie arbitrairement est la méthode du « temps de vol ». Dans cette méthode, une source de neutrons est modulée, c'est-à-dire que la source est amenée à émettre des neutrons en courtes « rafales » ou « impulsions ». Dans chaque impulsion, il y a un grand nombre de neutrons, d'une très large gamme de

vitesse. Le matériau cible et le détecteur sont situés à une distance considérable de la source (plusieurs pieds ou mètres de celle-ci). Le détecteur est "modulé" aussi, et avec la même périodicité. La synchronisation ou le phasage est fait de telle sorte que le détecteur ne réagisse que pendant un court intervalle commençant un certain temps après que l'impulsion de neutrons ait quitté la source. Ainsi, tous les effets enregistrés par le détecteur (par exemple, les fissions dans une couche d'uranium déposée sur une surface interne d'une chambre d'ionisation) ne sont que le résultat de neutrons qui arrivent juste au moment de la réactivité et ont donc voyagé depuis la source dans un certain intervalle de temps. En d'autres termes, les effets mesurés ne sont dus qu'au fait que les neutrons ont la vitesse appropriée.

Production de neutrons. Tous les neutrons sont produits à la suite de réactions nucléaires, et leur vitesse initiale dépend du bilan énergétique de la réaction particulière. Si la réaction est endothermique, c'est-à-dire si la masse totale des particules résultantes est supérieure à celle des particules initiales, la réaction ne se produit que si la particule de bombardement a une énergie cinétique supérieure au « seuil ». À des énergies de bombardement plus élevées, l'énergie cinétique des particules résultantes, en particulier des neutrons, augmente avec l'augmentation de l'énergie cinétique de la particule de bombardement au-dessus de la valeur seuil. Ainsi, la réaction ${}^7\text{Li} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + n$ absorbe 1,6 Mev d'énergie puisque les particules de produit sont plus lourdes que les particules initiales. Toute énergie supplémentaire des protons incidents est convertie en énergie cinétique des produits, de sorte que la vitesse maximale des neutrons produits augmente avec la vitesse des protons incidents. Cependant, pour obtenir des neutrons d'une gamme de vitesse de l'ordre du milliard, une cible mince doit être utilisée, les neutrons doivent tous se détacher au même angle et les protons doivent tous frapper la cible à la même vitesse.

Bien que les mêmes lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement s'appliquent aux réactions nucléaires exothermiques, la libération d'énergie est généralement

importante par rapport à l'énergie cinétique des particules de bombardement et détermine donc essentiellement la vitesse du neutron. Souvent, il y a plusieurs plages de vitesse à partir d'une même réaction. Certaines réactions produisent des neutrons de très haute énergie (près de 15 Mev).

Étant donné qu'il existe un nombre limité de réactions nucléaires utilisables pour les sources de neutrons, il n'y a que certaines plages de vitesses de neutrons qui peuvent être produites à l'origine. Il n'y a pas de difficulté à ralentir les neutrons, mais il est impossible de les ralentir uniformément, c'est-à-dire sans étaler la distribution des vitesses. Le schéma le plus efficace **slowing-down** est l'utilisation d'un modérateur, comme dans le tas de graphite ; en fait, le tas lui-même est une excellente source de neutrons thermiques (c'est-à-dire à très basse vitesse) ou presque thermiques.

Détermination des angles de déviation. Les difficultés dans la mesure des angles de déviation des neutrons sont en grande partie d'intensité et d'interprétation. Le nombre de neutrons diffusés dans une direction particulière peut être relativement faible, et les neutrons « diffusés » comprennent presque toujours de nombreux neutrons errants qui ne proviennent pas de la cible visée.

Détermination du nombre de fission. La détermination du nombre de fissions produites par les neutrons ou qui se produisent spontanément est relativement simple. Des chambres d'ionisation, des tubes de comptage et de nombreux autres types de détecteurs peuvent être utilisés.

Détection des produits de capture des neutrons. Souvent, il est souhaitable de trouver en détail ce qui est arrivé aux neutrons qui sont absorbés mais qui n'ont pas produit de fission, par exemple, la résonance ou la capture « radiative » des neutrons par l'U-238 pour former l'U-239 qui conduit à la production de plutonium. De telles études impliquent généralement une combinaison de séparations microchimiques et d'analyses de radioactivité.

Quelques expériences sur les constantes nucléaires. Au moment de la création du laboratoire de Los Alamos, une grande quantité de travaux avait été effectuée sur les effets des neutrons lents sur

les matériaux alors disponibles. Par exemple, la section efficace de fission neutronique thermique de l'uranium naturel a été évaluée, de même que les isotopes séparés de l'uranium et du plutonium. Des données sur les sections efficaces de fission de neutrons à grande vitesse ont été publiées, et des informations complémentaires sont disponibles dans les laboratoires du projet. Afin d'étendre et d'améliorer ces données, Los Alamos a perfectionné l'utilisation du générateur Van de Graaff pour la réaction ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$, afin de produire des neutrons de n'importe quelle énergie souhaitée se situant dans la gamme de 3 000 électronvolts à deux millions d'électronvolts. On a également réussi à moduler le faisceau cyclotronique et à mettre au point la méthode du temps de vol neutronique pour produire des effets de plusieurs intervalles de vitesse à la fois. Des méthodes spéciales ont été mises au point pour combler les lacunes dans la gamme d'énergie des neutrons. L'affinement des mesures a été particulièrement important lorsque de plus grandes quantités d'U-235, d'U-238 et de plutonium ont commencé à être reçues. Dans l'ensemble, la valeur de la section efficace de fission en fonction de l'énergie neutronique de pratiquement zéro électronvolt à trois millions d'électronvolts est maintenant assez bien connue pour ces matériaux.

Quelques expériences intégrales. Deux « expériences intégrales » (expériences sur des systèmes assemblés ou intégrés comprenant des matières fissiles, un réflecteur et peut-être aussi un modérateur) peuvent être décrites. Dans la première de ces expériences intégrales, un système de réaction en chaîne a été construit qui comprenait une quantité relativement importante d'U-235 en solution liquide. Il a été conçu pour fonctionner à un très faible niveau de puissance et n'avait pas de système de refroidissement. Son but était de vérifier les effets prévus pour les systèmes réactifs contenant de l'uranium 235 enrichi. Les résultats ont été très proches des attentes.

La deuxième expérience intégrale a été réalisée sur un tas contenant un mélange d'uranium et d'un modérateur hydrogène. Dans cette première forme, le tas était donc un tas à neutrons lents réagissant en chaîne. Le tas a ensuite été reconstruit en utilisant

moins d'hydrogène. Dans cette version de la pile, la fission à neutrons rapides est devenue importante. La pile a été reconstruite plusieurs fois, avec moins d'hydrogène utilisé à chaque fois. Par une telle série de reconstructions, le caractère de la réaction a été successivement modifié, de sorte que la fission thermique des neutrons est devenue de moins en moins importante tandis que la fission des neutrons rapides est devenue de plus en plus importante, se rapprochant des conditions que l'on trouve dans la bombe.

Résumé des résultats sur la physique nucléaire. Les constantes nucléaires de l'U-235, de l'U-238 et du plutonium ont été mesurées avec un degré raisonnable de précision sur la gamme des énergies neutroniques allant de l'énergie thermique à trois millions d'électronvolts. En d'autres termes, les questions 1, 2, 3, 4 et 5 des dix questions posées au début de cette section ont reçu une réponse. Le spectre de fission (question 7) de l'U-235 et du Pu-239 est raisonnablement bien connu. La fission spontanée (question 10) a été étudiée pour plusieurs types de noyaux. Des résultats préliminaires sur les questions 6, 8 et 9, portant sur les détails du processus de fission, ont été obtenus.

DIVISION CHIMIE ET MÉTALLURGIE

12.48. La Division de la chimie et de la métallurgie du Laboratoire de Los Alamos était sous la direction conjointe de J. W. Kennedy et de C. S. Smith. Il était responsable de la purification finale des matières fissiles enrichies, de la fabrication du noyau de la bombe, du sabotage, etc., et de diverses autres questions. Dans tous les travaux de cette division sur les matières fissiles enrichies, il a fallu veiller tout particulièrement à ne pas perdre des quantités appréciables de matières qui valent beaucoup plus que l'or. Ainsi, les procédés déjà bien établis à Chicago et ailleurs ^{pour la} purification et la fabrication de l'uranium naturel n'étaient souvent pas satisfaisants pour la manipulation d'échantillons hautement enrichis en uranium 235.

12.49. L'exposé ci-dessus des travaux des Divisions de physique théorique, de physique nucléaire expérimentale et de chimie et de métallurgie est très incomplet parce que des aspects importants de ces travaux ne peuvent être discutés pour des raisons de sécurité. Pour les mêmes raisons, aucun des travaux des divisions de physique des munitions, des explosifs et des bombes ne peut être discuté du tout.

RÉSUMÉ

12.50. Au printemps 1943, un laboratoire entièrement nouveau a été établi à Los Alamos, au Nouveau-Mexique, sous la direction de J. R. Oppenheimer, dans le but d'étudier la conception et la construction de la bombe atomique, depuis le stade de la réception de l'U-235 ou du plutonium jusqu'au stade de l'utilisation de la bombe. Le nouveau laboratoire a amélioré le traitement théorique des problèmes de conception et de performance, a affiné et étendu les mesures des constantes nucléaires impliquées, a mis au point des méthodes de purification des matériaux à utiliser et, enfin, a conçu et construit des bombes atomiques opérationnelles.

CHAPITRE XIII. RÉSUMÉ GÉNÉRAL

SITUATION GÉNÉRALE ACTUELLE

13.1. À la suite des travaux de l'organisation du district de Manhattan à Washington et dans le Tennessee, des groupes scientifiques de Berkeley, de Chicago, de Columbia, de Los Alamos et d'ailleurs, des groupes industriels de Clinton, de Hanford et de beaucoup d'autres endroits, la fin du mois de juin 1945 nous voit nous attendre de jour en jour à entendre parler de l'explosion de la première bombe atomique conçue par l'homme. On pense que tous les problèmes ont été résolus au moins assez bien pour rendre une bombe praticable. Une réaction en chaîne neutronique soutenue résultant de la fission nucléaire a été démontrée ; les conditions nécessaires pour qu'une telle réaction se produise de manière explosive ont été établies et peuvent être réunies ; Des usines de production de différents types sont en activité, constituant un stock de matières explosives. Bien que nous ne sachions pas quand la première explosion se produira ni dans quelle mesure elle sera efficace, l'annonce de sa survenue précédera la publication du présent rapport. Même si la première tentative est relativement inefficace, il ne fait guère de doute que les efforts ultérieurs seront très efficaces ; On s'attend à ce que la dévastation causée par une seule bombe soit comparable à celle d'un raid aérien majeur par les méthodes habituelles.

13.2. Un ^{Xvveapon} a été mis au point qui est potentiellement destructeur au-delà des cauchemars les plus fous de l'imagination ; une arme si parfaitement adaptée à une attaque soudaine et inopinée que les grandes villes d'un pays pourraient être détruites du jour au lendemain par une puissance ostensiblement amie. Cette arme n'a pas été créée par l'inspiration diabolique d'un génie déformé, mais par le travail ardu de milliers d'hommes et de femmes normaux travaillant pour la sécurité de leur pays. Bon nombre des principes qui ont été utilisés étaient connus du monde scientifique international

en 1940. Développer les processus industriels nécessaires à partir de ces principes

223

a coûté cher en temps, en efforts et en argent, mais les processus que nous avons sélectionnés pour un effort sérieux ont fonctionné et plusieurs que nous n'avons pas choisis pourraient probablement fonctionner. Nous avons un avantage initial dans le temps car, pour autant que nous le sachions, d'autres pays n'ont pas été en mesure de mener des développements parallèles pendant la période de guerre. Nous avons aussi un avantage général sur le plan scientifique et surtout sur le plan industriel, mais un tel avantage peut facilement être rejeté.

13.3. Avant la capitulation de l'Allemagne, il y avait toujours une chance que les scientifiques et les ingénieurs allemands puissent mettre au point des bombes atomiques qui seraient extrêmement efficaces pour modifier le cours de la guerre. Il n'y avait donc pas d'autre choix que d'y travailler dans ce pays. Au départ, de nombreux scientifiques pouvaient espérer et espéraient qu'un principe émergerait qui prouverait que les bombes atomiques étaient intrinsèquement impossibles. Cet espoir s'est peu à peu évanoui ; heureusement, dans la même période, l'ampleur de l'effort industriel nécessaire a été démontrée, de sorte que la crainte d'un succès allemand s'est affaiblie avant même que la fin ne soit arrivée. De même, la plupart d'entre nous sont certains que les Japonais ne peuvent pas développer et utiliser efficacement cette arme.

PRONOSTIC

13.4. En ce qui concerne l'avenir, on peut supposer que l'évolution technique se fera selon deux axes. Du point de vue militaire, il est à peu près certain qu'il y aura des améliorations tant dans les procédés de production des matières fissiles que dans leur utilisation. Il est concevable que l'on puisse découvrir des méthodes totalement différentes pour convertir la matière en énergie, car il ne faut pas oublier que l'énergie libérée par la

fission de l'uranium ne correspond qu'à l'utilisation d'environ un dixième d'un pour cent de sa masse. Si l'on imaginait un plan pour convertir en énergie, ne serait-ce que quelques pour cent de la matière d'une matière commune, la civilisation aurait les moyens de se suicider à volonté.

13.5. Les utilisations possibles de l'énergie nucléaire ne sont pas toutes destructrices, et la deuxième direction dans laquelle on peut s'attendre au développement technique est celle de la paix. À l'automne 1944, le général

Groves nomma un comité chargé d'examiner ces possibilités, ainsi que celles d'importance militaire. Ce comité (Dr R. C. Tolman, président ; Le contre-amiral E. W. Mills (USN) avec le capitaine T. A. Solberg (USN) comme adjoint, le Dr W. K. Lewis et le Dr H. D. Smyth) reçut une multitude de suggestions d'hommes sur les divers projets, principalement dans le sens de l'utilisation de l'énergie nucléaire pour l'énergie et l'utilisation de sous-produits radioactifs à des fins scientifiques, médicales et industrielles. Bien que l'on s'entende généralement pour dire qu'une grande industrie pourrait éventuellement voir le jour, comparable peut-être à l'industrie électronique, il y a eu un désaccord quant à la rapidité avec laquelle une telle industrie se développerait ; Le consensus était que la croissance serait lente sur une période de plusieurs années. Du moins, il n'y a pas de perspective immédiate de faire fonctionner des voitures à l'énergie nucléaire ou d'éclairer des maisons avec des lampes radioactives, bien qu'il y ait une bonne probabilité que l'énergie nucléaire à des fins spéciales puisse être développée d'ici dix ans et que des approvisionnements abondants en matières radioactives puissent avoir un effet profond sur la recherche scientifique et peut-être sur le traitement de certaines maladies au cours d'une période similaire.

13.6. Pendant la guerre, on s'est efforcé d'obtenir le maximum de résultats militaires. Il est évident depuis un certain temps qu'une certaine forme de contrôle et de soutien gouvernemental dans le domaine de l'énergie nucléaire doit se poursuivre après la guerre. Beaucoup d'hommes associés au projet ont reconnu ce fait et ont présenté diverses propositions, dont certaines ont été examinées par le Comité Tolman, bien qu'il ne s'agisse que d'un comité consultatif temporaire relevant du général Groves. Un comité intérimaire de haut niveau est actuellement en train d'élaborer des plans pour une organisation permanente. Ce comité discute également de questions de politique générale qui préoccupent beaucoup des hommes les plus réfléchis du projet depuis le début des travaux et surtout depuis que le succès est devenu de plus en plus probable.

LES QUESTIONS QUI SE POSENT AU PEUPLE

13.7. Nous nous trouvons avec un explosif qui est loin d'être complètement perfectionné. Pourtant, les possibilités futures de tels explosifs sont épouvantables, et leurs effets sur les guerres futures et les affaires internationales sont d'une importance fondamentale. Voici un nouvel outil pour l'humanité, un outil d'une puissance destructrice inimaginable. Son développement soulève de nombreuses questions auxquelles il faudra répondre dans un avenir proche.

13.8. En raison des restrictions imposées à la sécurité militaire, le Congrès ou le peuple n'ont eu aucune chance de débattre de ces questions. Elles ont été sérieusement examinées par toutes les parties concernées et vigoureusement débattues parmi les scientifiques, et les conclusions auxquelles elles sont parvenues ont été transmises aux plus hautes autorités. Ces questions ne sont pas des questions techniques ; Ce sont des questions politiques et sociales, et les réponses qui y sont données peuvent affecter toute l'humanité pendant des générations. En pensant à eux, les hommes du projet ont pensé comme des citoyens des États-Unis qui s'intéressent de manière vitale au bien-être de la race humaine. Il a été de leur devoir, ainsi que celui des hauts fonctionnaires responsables du gouvernement, qui ont été informés, de regarder au-delà des limites de la guerre actuelle et de

ses armes pour voir les implications ultimes de ces découvertes. C'était une lourde responsabilité. Dans un pays libre comme le nôtre, de telles questions doivent être débattues par le peuple et les décisions doivent être prises par le peuple par l'intermédiaire de ses représentants. C'est l'une des raisons de la publication de ce rapport. Il s'agit d'un rapport semi-technique que les hommes de science de ce pays pourront, nous l'espérons, utiliser pour aider leurs concitoyens à prendre de sages décisions. La population du pays doit être informée si elle veut s'acquitter de ses responsabilités avec sagesse.

ANNEXE 1. MÉTHODES D'OBSERVATION DE PARTICULES RAPIDES PROVENANT DE RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Dans le chapitre I, nous avons souligné l'importance de l'ionisation dans l'étude de la radioactivité et mentionné l'électroscope. Dans cette annexe, nous mentionnerons une méthode d'importance historique comparable à l'électroscope, mais qui n'est plus utilisée, puis nous passerons en revue les différentes méthodes actuellement utilisées pour observer les particules alpha, les particules bêta (ou positrons), les rayons gamma et les neutrons, ou leurs effets.

SCINTILLATIONS

L'approche la plus proche que l'on puisse faire de la « vision » d'un atome est de voir l'éclair de lumière brillant qu'une particule alpha ou un proton à grande vitesse produit lorsqu'il frappe un écran fluorescent. Tout ce qu'il faut, c'est un morceau de verre recouvert de sulfure de zinc, un microscope de faible puissance, une chambre noire, un œil bien reposé et une source de particules alpha. La plupart des expériences célèbres de Rutherford, y compris celle mentionnée au paragraphe 1.17, impliquaient le « comptage » des scintillations, mais la méthode est fastidieuse et, pour autant que l'auteur le sache, a été entièrement remplacée par des méthodes électriques.

LE PROCESSUS D'IONISATION

Lorsqu'une particule chargée à grande vitesse comme une particule alpha ou un électron à grande vitesse traverse la matière, elle perturbe les molécules qu'elle frappe en raison des forces électriques entre la particule chargée et les électrons de la molécule. Si le matériau est gazeux, les fragments ou ions résultants peuvent s'écarter et, s'il y a un champ électrique, les électrons éjectés des molécules se déplacent dans une direction et les ions positifs résiduels dans une autre direction. Une particule bêta d'une énergie d'un million d'électronvolts produira environ 18 000 atomes ionisés avant d'être

227

1

s'est complètement arrêté puisqu'en moyenne, il consomme environ 60 volts d'énergie à chaque collision ionisante. Étant donné que chaque processus d'ionisation donne à la fois un ion positif et un ion négatif, il y a un total de 36 000 charges libérées par un électron à grande vitesse, mais comme chaque charge n'est que de $1,6 \times 10^{19}$ coulomb, le total n'est que d'environ 6×10^{15} coulomb et est encore très infime. Le meilleur galvanomètre peut être fait pour mesurer une charge d'environ 10¹⁰ coulomb. Il est possible de pousser la sensibilité d'un électromètre à environ 10¹⁶ coulomb, mais l'électromètre est un instrument très peu pratique à utiliser.

Une particule alpha produit des quantités d'ionisation comparables à celles de la particule bêta. Il est arrêté plus rapidement, mais il produit plus d'ions par unité de trajet. Un rayon gamma est beaucoup moins important qu'un ioniseur car le processus est très différent. Il libère parfois un électron d'une molécule par diffusion Compton ou effet photoélectrique, et cet électron secondaire a suffisamment d'énergie pour produire l'ionisation. Un neutron, comme nous l'avons déjà mentionné dans le texte, ne produit l'ionisation qu'indirectement en donnant une grande vitesse à un noyau par collision élastique, ou en perturbant un noyau avec l'ionisation résultante par les fragments.

Si l'on veut détecter les effets ionisants de ces particules, il faut évidemment utiliser l'effet résultant d'un grand nombre de particules ou disposer de moyens très sensibles pour mesurer les courants électriques.

L'ÉLECTROSCOPE

Essentiellement, l'électroscope détermine dans quelle mesure l'air qui l'entoure immédiatement est devenu conducteur à la suite des ions qui y sont produits.

La forme la plus simple de l'électroscope est une bande de feuille d'or de quelques centimètres de long, suspendue par une charnière à une tige isolée verticale. Si la tige est chargée, la feuille d'or prend également la même charge et se détache à un angle en raison de la répulsion de charges similaires. Au fur et à mesure que la charge s'échappe, la feuille se balance progressivement contre la tige, et la vitesse à laquelle elle se déplace est une mesure de la conductivité de l'air qui l'entoure.

Une forme plus robuste d'électroscope a été conçue par C. C. Lauritsen, qui a substitué une fibre de quartz à la feuille d'or et

utilisé l'élasticité de la fibre comme force de rappel au lieu de la gravité. La fibre est rendue conductrice par une fine couche de métal. Encore une fois, l'instrument est chargé et la fibre, après une déviation initiale, revient progressivement à sa position non chargée. La position de la fibre est lue dans un microscope de faible puissance. Ces instruments peuvent être rendus portables, robustes et assez sensibles. Il s'agit de l'instrument de terrain standard pour tester le niveau de rayonnement gamma, en particulier comme protection contre une exposition dangereuse.

CHAMBRES D'IONISATION

Une chambre d'ionisation mesure le nombre total d'ions produits directement dans celle-ci. Il se compose généralement de deux électrodes planes entre lesquelles il y a un champ

électrique suffisamment fort pour attirer tous les ions vers les électrodes avant qu'elles ne se recombinent, mais pas assez fort pour produire des ions secondaires comme dans les instruments que nous allons décrire maintenant.

Grâce à une conception soignée et à l'utilisation d'amplificateurs sensibles, une chambre d'ionisation peut mesurer un nombre d'ions aussi faible que celui produit par une seule particule alpha, ou elle peut être utilisée un peu comme un électroscope pour mesurer la quantité totale de rayonnement ionisant présent instantanément, ou elle peut être organisée pour donner la quantité totale d'ionisation qui s'est produite sur une période de temps.

COMPTEURS PROPORTIONNELS

Bien qu'il soit possible de fabriquer des chambres d'ionisation qui répondent à des particules alpha uniques, il est beaucoup plus pratique d'utiliser un dispositif d'auto-amplification, c'est-à-dire de faire en sorte que les ions produits à l'origine produisent d'autres ions dans la même région afin que les circuits d'amplification n'aient pas besoin d'être aussi sensibles.

Dans un compteur proportionnel, l'une des électrodes est un fil fin le long de l'axe de la deuxième électrode, qui est un cylindre creux. L'effet du fil est de donner de fortes intensités de champ électrique à proximité de celui-ci, même pour des différences de potentiel relativement faibles entre lui et l'autre électrode. Ce champ fort accélère rapidement la

!

Les ions primaires formés par la particule alpha ou bêta ou le photon, et ces ions primaires accélérés (en particulier les électrons) forment à leur tour des ions secondaires dans le gaz

avec lequel le compteur est rempli, de sorte que l'impulsion totale de courant est considérablement augmentée.

Il est possible de concevoir et de faire fonctionner de tels compteurs de manière à ce que le nombre total d'ions formés soit proportionnel au nombre d'ions primaires formés. Ainsi, après amplification, une impulsion de courant peut être vue sur un oscilloscope, dont la hauteur indiquera l'efficacité de l'ioniseur de la particule initiale. Il est assez facile de distinguer de cette manière les particules alpha et les particules bêta et les photons, et les circuits peuvent être disposés pour ne compter que les impulsions d'une magnitude supérieure à une magnitude choisie. Ainsi, un compteur proportionnel peut compter les particules alpha sur un fond de bêtas ou même ne compter que les particules alpha ayant plus d'une certaine énergie.

COMPTEURS GEIGER-MÜLLER

Si la tension d'un compteur proportionnel est élevée, il arrive un moment où les ions primaires d'une seule particule alpha, d'une seule particule bêta ou d'un seul photon déclencheront une décharge à travers l'ensemble du compteur, et ne se contenteront pas de multiplier le nombre d'ions primaires dans la région où ils sont produits. Il s'agit d'une action de déclenchement et le courant est indépendant du nombre d'ions produits ; De plus, le courant se poursuivrait indéfiniment si aucune mesure n'était prise pour l'éteindre. La trempe peut être entièrement réalisée en disposant les circuits externes de manière à ce que la tension chute dès que le courant passe ou en utilisant un mélange de gaz dans le compteur qui « empoisonne » la surface de l'électrode dès le passage de la décharge et empêche temporairement l'émission ultérieure d'électrons, ou en combinant les deux méthodes.

Le compteur Geiger-Müller l'était. Développé avant le compteur proportionnel, il reste l'instrument le plus sensible pour détecter les rayonnements ionisants, mais il ne fait que «

compter » les rayonnements ionisants qui le traversent, qu'il s'agisse d'une particule alpha, d'un proton, d'un électron ou d'un photon.

L'ART DE CONTRER NEASUREMENTS

C'est une chose de décrire les principes de diverses chambres d'ionisation, compteurs, etc. c'en est une autre de les construire et de les exploiter avec succès.

Tout d'abord, les parois de la chambre de comptoir doivent permettre aux particules de pénétrer dans le comptoir. Pour les rayons gamma, c'est un problème mineur, mais pour les électrons ou les positrons à vitesse relativement faible ou pour les particules alpha, les parois du compteur doivent être très minces ou il doit y avoir des fenêtres minces.

Ensuite, il y a de grandes variations dans les détails du compteur lui-même, l'espacement et la taille des électrodes, la nature du gaz remplissant la chambre, sa pression, etc.

Enfin, l'interprétation des données résultantes est une affaire délicate. L'absorption des contre-parois et des éventuels absorbeurs extérieurs doit être prise en compte ; la géométrie du compteur par rapport à la source doit être estimée pour traduire les dénombrements observés en nombre réel d'événements nucléaires ; Enfin, il faut tenir compte des fluctuations statistiques, car toutes les réactions nucléaires sont régies par des lois de probabilité.

LA CHAMBRE À BROUILLARD WILSON

Il existe une méthode d'observation des particules nucléaires qui dépend directement de l'ionisation, mais qui n'est pas une méthode électrique. Il utilise le fait que la vapeur sursaturée se condensera plus facilement sur les ions que sur les molécules neutres. Si l'air saturé de vapeur d'eau est refroidi par expansion juste après le passage d'une particule alpha, de minuscules gouttes d'eau se condensent sur les ions formés par la particule alpha et réfléchissent une lumière vive suffisamment forte pour

être vue ou photographiée afin que la trajectoire réelle de la particule alpha soit enregistrée.

Cette méthode développée par C. T. R. Wilson à Cambridge, en Angleterre, vers 1912, a été extrêmement utile pour étudier le comportement des particules individuelles, des alphas, des protons, des électrons, des positrons, des mésotrons, des photons et des atomes rapides causés par des collisions avec des alphas, des protons ou des neutrons. À l'inverse de la scintillement,

1

Méthode de l'OTAN, son compagnon depuis de nombreuses années, elle n'a pas été dépassée et est encore largement utilisée, notamment pour étudier les détails des collisions entre particules nucléaires et atomes.

LA MÉTHODE PHOTOGRAPHIQUE

Les traces des particules individuelles traversant la matière peuvent également être observées dans les émulsions photographiques, mais les longueurs de trajet sont si petites qu'elles doivent être observées au microscope, où elles apparaissent comme une série de grains développés marquant le passage de la particule. Cette méthode d'observation ne nécessite pratiquement aucun équipement mais est fastidieuse et d'une utilité limitée. Il est toutefois possible d'utiliser le noircissement général d'un film photographique comme mesure de l'exposition totale aux rayonnements, une procédure qui a été utilisée pour compléter ou remplacer les électroscopes pour le contrôle de sécurité dans de nombreuses parties du projet.

L'OBSERVATION ET LA MESURE DES NEUTRONS

Aucune des méthodes que nous avons décrites n'est directement applicable aux neutrons, mais toutes sont indirectement applicables puisque les neutrons produisent indirectement des ions. Cela se produit de deux manières : par collision élastique et par réaction nucléaire. Comme nous l'avons déjà décrit, un

neutron rapide, en traversant la matière, s'approche parfois d'un noyau atomique de si près qu'il lui confère une grande quantité de quantité de mouvement et d'énergie selon les lois de la collision élastique. Le noyau devient ainsi une particule chargée à grande vitesse qui produira une ionisation dans une chambre d'ionisation, un compteur ou une chambre à brouillard. Mais si le neutron a une faible vitesse, par exemple thermique, le noyau frappé ne recevra pas assez d'énergie pour provoquer l'ionisation. Si, en revanche, le neutron est absorbé et que le noyau résultant se brise avec la libération d'énergie, l'ionisation sera produite. Ainsi, pour la détection de neutrons à grande vitesse, on a le choix entre les collisions élastiques et la réaction nucléaire, mais pour les vitesses thermiques, seule la réaction nucléaire servira.

La réaction la plus couramment utilisée est la réaction $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ qui libère environ 2,5 Mev d'énergie partagée entre la particule alpha résultante et le noyau ^7Li . C'est amplement suffisant pour produire de l'ionisation. Cette réaction est utilisée en remplissant une chambre d'ionisation ou un compteur proportionnel avec du trifluorure de bore gazeux afin que la réaction se produise dans la région où l'ionisation est souhaitée ; Comme alternative, l'intérieur de la chambre ou du compteur est revêtu de bore. La chambre d'ionisation sert alors d'instrument pour mesurer le flux global de neutrons, tandis que le compteur proportionnel enregistre le nombre de neutrons individuels.

L'une des méthodes les plus précieuses de mesure des densités neutroniques par réactions nucléaires repose sur la production de noyaux radioactifs artificiels. Une feuille connue pour être rendue radioactive par bombardement neutronique est insérée en un point où l'intensité neutronique est souhaitée. Après un certain temps, il est retiré et son activité mesurée par un électroscope ou un compteur. Le degré d'activité qui a été accumulé est alors une mesure du nombre de neutrons qui ont été absorbés. Cette méthode a l'inconvénient évident de ne pas

donner une réponse instantanée comme le font la chambre d'ionisation et le compteur.

L'une des méthodes les plus intéressantes développées dans le cadre du projet consiste à utiliser la fission de l'uranium comme réaction nucléaire pour la détection des neutrons. De plus, en séparant les isotopes, les neutrons rapides et lents peuvent être différenciés.

Étant donné que la probabilité qu'une réaction neutronique se produise est différente pour chaque réaction et pour chaque vitesse de neutron, les difficultés de traduire les comptages ou les mesures de courant en nombre et en vitesse des neutrons présents sont encore plus grandes que pour les autres particules nucléaires. Personne n'a besoin d'être surpris si deux enquêteurs compétents donnent des chiffres différents pour soi-disant le même commandant nucléaire. Ce n'est que par une série complexe d'expériences imbriquées, soigneusement comparées et interprétées, que les faits fondamentaux peuvent être démêlés des variables expérimentales et instrumentales.

ANNEXE 2. LES UNITÉS DE MASSE, DE CHARGE ET D'ÉNERGIE

MASSE

Étant donné que le proton et le neutron sont les particules fondamentales à partir desquelles tous les noyaux sont construits, il semblerait naturel d'utiliser la masse de l'un ou de l'autre d'entre eux comme unité de masse. Le choix se porterait probablement sur le proton, qui est le noyau d'un atome d'hydrogène. Il y a de bonnes raisons, historiques et autres, pour lesquelles ni le proton ni le neutron n'ont été choisis. Au lieu de cela, l'unité de masse utilisée en physique atomique et nucléaire est un seizième de la masse de l'isotope prédominant de l'oxygène, O^{16} , et est égale à $1,6603 \times 10^{-24}$ gramme. Exprimée en termes de cette unité, la masse du proton est de 1,00758 et la masse du neutron est de 1,00893. (Les chimistes utilisent généralement une unité de masse très légèrement différente.)

CHARGER

L'unité de charge électrique utilisée en science nucléaire est la charge positive du proton. Elle est égale en magnitude mais en signe opposé à la charge sur l'électron et est donc souvent appelée charge électronique. Une charge électronique est de $1,60 \times 10^{-19}$ coulomb. On peut rappeler qu'un courant d'un ampère circulant pendant une seconde transporte une charge d'un coulomb ; c'est-à-dire qu'une charge électronique équivaut à $1,60 \times 10^{-19}$ ampères seconde.

ÉNERGIE

L'unité d'énergie utilisée en physique nucléaire est l'électron-volt, qui est défini comme égal à l'énergie cinétique qu'une particule portant une charge électronique acquiert en tombant librement à travers une chute potentielle d'un volt. Il est souvent commode d'utiliser l'unité un million de fois plus grande : le million d'électronvolts (MeV).

Unités de masse, de charge, d'énergie

Les relations entre l'électron-volt et d'autres unités d'énergie courantes sont présentées dans le tableau suivant :

MULTIPLIER	PAR	POUR OBTENIR
Mev	$1,07 \times 10^3$	Unités de masse
	$1,60 \times 10^6$	Ergs
	$3,83 \times 10^{-14}$	G. Cal.
	$4,45 \times 10^20$	Kw.
Unités de masse	$9,31 \times 10^2$	Heures. MCV (en anglais seulement)
	$1,49 \times 10^4$	Ergs
	$3,56 \times 10^{11}$	G. Cal.
	$4,15 \times 10^{17}$	Kw.
Ergs	$6,71 \times 10^2$	Heures. Unités de masse
	$6,24 \times 10^5$	Mev
	$2,39 \times 10^8$	G. Cal.
	$2,78 \times 10^{14}$	Kw.
G. Cal.	$2,81 \times 10^{10}$	Heures. Unités de masse
	$2,62 \times 10^{13}$	Mev
	$4,18 \times 10^7$	Ergs
	$1,16 \times 10^6$	Kw.
Kw. Heures.	$2,41 \times 10^{16}$	Heures. Unités de masse
	$2,25 \times 10^{19}$	Mev
	$3,60 \times 10^{13}$	Ergs
	pouces. $8,60 \times 10^5$	G. Cal.

ANNEXE 3. NEUTRONS RETARDÉS DE LA FISSION DE L'URANIUM

Comme nous l'avons souligné au chapitre VI, le contrôle d'une pile à réaction en chaîne est grandement facilité par le fait que certains des neutrons résultant de la fission de l'uranium ne sont émis que plus d'une seconde après la fission. Il était donc important d'étudier expérimentalement cet effet. De telles expériences ont été décrites par Snell, Nedzel et Ibser dans un rapport daté du 15 mai 1942 dont nous citons ce qui suit :

La présente expérience se compose de deux parties interdépendantes, l'une portant sur la courbe de désintégration et l'autre concernée autre sur l'intensité des neutrons retardés mesurée par rapport à celle des neutrons de fission « instantanés ».

LA COURBE DE DÉSINTÉGRATION DES NEUTRONS RETARDÉS

La source de neutrons était la cible en béryllium du cyclotron de l'Université de Chicago, frappée par un faisceau allant jusqu'à 20 PA de deutérons de 8 Mev. Près de la cible était placée une coquille creuse en fer étamé et contenant 106 livres d'uranium 308. Celui-ci était entouré d'environ 2 pouces de paraffine. L'intérieur de la coquille était rempli de paraffine, à l'exception d'un trou axial qui accueillait un compteur proportionnel BF garni. Le compteur était relié par un amplificateur à un circuit d'échelle (échelle de 64) équipé de lumières interpolées et d'un compteur d'impulsions Cencó. Une minuterie de dixième de seconde, entraînée par un moteur synchrone, et un chronomètre de centième de seconde étaient montés sur le panneau de l'échelleur, à proximité des lumières d'interpolation et du compteur d'impulsions. Ce groupe de cadrans et de lumières a été photographié à une vitesse variable appropriée par un appareil photo Sept actionné à la main. Le résultat a été un enregistrement sur film des temps et des comptes, à partir duquel les courbes de décroissance ont été tracées.

236

Neutrons retardés de la fission de l'uranium

« La procédure réelle était la suivante : pendant le bombardement, le chronomètre était mis en marche et le chronomètre fonctionnait en continu ; Le compteur et l'amplificateur étaient allumés, mais les impulsions sortant de l'amplificateur étaient mises à la terre. Le scaler a été mis à zéro. Après un signal d'avertissement, le cyclotron a été éteint par un opérateur, tandis qu'un autre opérateur a commuté la sortie de l'amplificateur de la masse dans le détartreur et a commencé à prendre des photos. Il était facile de prendre la première photo dans la demi-seconde qui suivait l'arrêt du cyclotron. Soixante à une centaine de photographies ont été prises au cours d'une course typique. La nécessité d'utiliser à la fois un chronomètre et une minuterie est née du fait que la précision de la centième de seconde du chronomètre était nécessaire pour les petits intervalles de temps entre les photographies pendant la première partie de la course, mais la montre s'est éteinte et s'est arrêtée avant que le décompte ne soit terminé. La minuterie a ensuite donné une précision suffisante pour les intervalles de temps ultérieurs.

« Une quarantaine d'essais ont été effectués dans des conditions expérimentales variables. De courtes activations d'une ou deux secondes ont été données pour une meilleure résolution des courtes périodes. Des bombardements longs et intenses, d'une durée de 15 à 20 minutes, aussi près que possible de la cible, ont été effectués pour que les activités de longue période se manifestent avec une intensité maximale. Des bombardements de 5 minutes ont ^{été effectués,}
en maintenant le faisceau cyclotron aussi stable que possible, afin d'étudier les intensités de saturation relatives des différentes activités ; dans ces activations, le faisceau cyclotron a été réduit à 1 ou 2 pour éviter que la vitesse de comptage initiale ne devienne trop élevée pour un compteur (300 par seconde a été considérée comme une limite supérieure raisonnable pour un comptage fiable). Deux compteurs BF3 étaient disponibles, l'un ayant une section efficace de neutrons thermiques de 2,66 cm² et l'autre de 0,43 cm². Après une forte activation, nous avons pu suivre la désintégration des neutrons retardés pendant environ 13 minutes. Des comptages de fond (probablement principalement dus aux neutrons de fission

spontanée) ont été effectués et soustraits des lectures. Ils s'élevaient à environ 0,4 compte par seconde pour le grand compteur. L'étude de toutes les courbes de désintégration donne comme tableau général des activités émettrices de neutrons présentes :

3

TABLEAU 1
INTENSITÉ INITIALE RELATIVE
ACTIVÉ JUSQU'À SATURATION

DEMI-VIE	INTENSITÉ INITIALE RELATIVE ACTIVÉ JUSQU'À SATURATION
57 ± 3 s	0.135
24 ± 2 sec.	1.0
7 seconde.	1.2
2.5 seconde.	1.2

« Toute activité d'une période supérieure à 57 secondes n'est pas apparue même après le bombardement le plus intense que nous ayons pu donner, d'une durée de 20 minutes. Les intensités initiales relatives indiquées sont les valeurs moyennes obtenues à partir de trois courbes.

« Ces résultats donnent l'équation suivante pour la courbe de désintégration, des neutrons retardés après activation jusqu'à saturation :

$$\text{Activité} = \text{constante} (1.2e^{-0.28t} + 1.2e^{-0.099t} + 1.0e^{-0.012t})$$

+ 0,135e^{-0.012t} où t est en secondes.'»

La deuxième partie de l'expérience a mesuré le nombre total de neutrons émis dans l'intervalle de temps de 0,01 sec à 2,0 min. après l'arrêt du cyclotron. En supposant que tous les neutrons retardés observés appartenaient aux quatre groupes mesurés dans la première partie de l'expérience, ce deuxième résultat indique que 1,0 ± 0,2 % des neutrons émis lors de la fission de l'uranium sont retardés d'au moins 0,01 seconde et qu'environ 0,07 % sont retardés d'une minute. En concevant la valeur effective de k, le facteur de multiplication, pour qu'une pile d'exploitation typique ne soit que de 1,01 avec toutes les commandes retirées et que la variation totale de k d'une barre de contrôle soit de 0,002, le nombre de neutrons retardés est additionnel pour permettre un contrôle facile.

ANNEXE 4. LE PREMIER PIEU AUTOPORTANT À RÉACTION EN CHAÎNE

Dans le chapitre VI, la construction et l'exploitation du premier pieu autoportant à réaction en chaîne ont été brièvement décrites. Bien que les détails ne soient pas divulgués pour des raisons de sécurité, les paragraphes suivants donnent une description un peu plus complète basée sur un rapport de Fermi. Cette pile a été érigée par Fermi et ses collaborateurs à l'automne 1942.

DESCRIPTION DE LA PILE

Le plan original prévoyait un pieu approximativement sphérique avec les meilleurs matériaux près du centre. En fait, les mesures de contrôle ont montré que la taille critique avait été atteinte avant que la sphère ne soit achevée, et la construction a été modifiée en conséquence. La structure finale peut être grossièrement décrite comme un sphéroïde aplati au sommet, c'est-à-dire comme une poignée de porte. On souhaitait que les morceaux d'uranium ou d'oxyde d'uranium soient espacés dans un réseau cubique encastré dans du graphite. Par conséquent, le graphite a été découpé en briques et construit en couches, dont les couches alternées contenaient des morceaux d'uranium aux coins des carrés. La taille critique a été atteinte lorsque le pieu a été construit à une hauteur qui n'était que des trois quarts de celle nécessaire selon les estimations les plus prudentes. Par conséquent, une seule couche supplémentaire a été ajoutée. Le graphite utilisé provenait principalement de la National Carbon Company et de la Speer Graphite Company. Le tas contenait 12 400 livres de métal, dont une partie était fournie par Westinghouse, une partie par Metal Hydrides et une partie par Ames. Comme il y avait beaucoup plus de points de treillis que de morceaux de métal, les autres étaient remplis de morceaux d'oxyde pressés.

À des fins de contrôle et d'expérimentation, il y avait dix fentes qui traversaient complètement la pile. Trois d'entre eux se trouvaient près de la

239

4

ont été utilisés pour les tiges de contrôle et de sécurité. De plus, pour faciliter l'expérience, en particulier le retrait des échantillons, une rangée de briques de graphite transportant de l'uranium et passant près du centre de la pile a été disposée de manière à pouvoir être complètement poussée hors de la pile.

L'ensemble de cette sphère de graphite était soutenu par une charpente en bois reposant sur le sol d'un court de squash sous les tribunes ouest du Stagg Field.

PERFORMANCES PRÉVUES DE LA PILE

Le réseau métallique au centre de la pile et les deux autres réseaux majeurs constituant la majeure partie du reste de la pile ont chacun été étudiés séparément dans des expériences exponentielles {18, #27 et #29. Ceux-ci avaient donné un facteur de multiplication de 1,07 pour le réseau métallique et de 1,04 et 1,03 pour les réseaux d'oxydes, la différence entre les deux derniers résultant de la différence dans la teneur du graphite utilisé. Il faut se rappeler que ces chiffres sont des facteurs de multiplication pour des réseaux de taille infinie. Par conséquent, une prédiction du facteur de multiplication effectif réel k_{eff} pour la pile telle qu'elle est construite dépendait de la validité de la déduction de k à partir des expériences exponentielles, d'une moyenne correcte pour les différents réseaux, et d'une déduction correcte de k_{eff} à partir de la moyenne k pour une taille infinie. Bien que la conception originale de la pile ait été délibérément généreuse, son succès, alors qu'il n'était que partiellement achevé, indiquait que les valeurs des facteurs de multiplication, calculés à partir d'expériences exponentielles, avaient été trop faibles. Le facteur

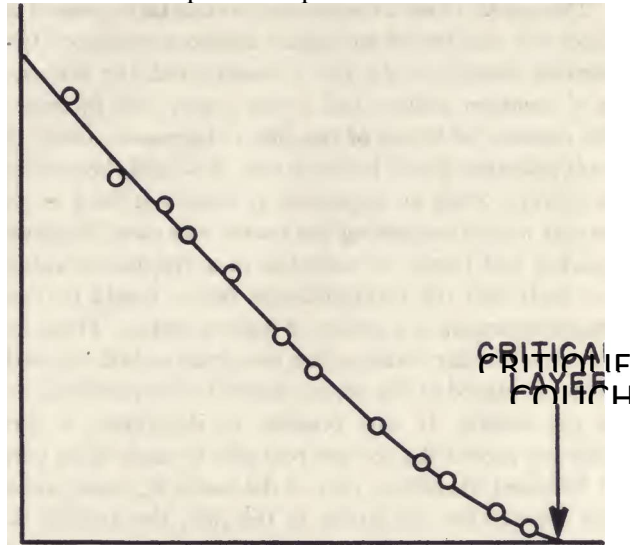
de multiplication effectif observé de la partie de la structure prévue effectivement construite était d'environ 1,0006 lorsque tous les absorbeurs de neutrons ont été retirés.

MESURES EFFECTUÉES PENDANT LA CONSTRUCTION

Une série de mesures a été effectuée lors de l'assemblage de la pile afin de s'assurer que les dimensions critiques n'ont pas été atteintes par inadvertance. Ces mesures ont également permis de vérifier les propriétés de multiplication neutronique de la structure

lors de l'assemblage, ce qui permet de prédire l'endroit où le point critique serait atteint.

En général, n'importe quel détecteur de neutrons ou de rayonnement gamma peut être utilisé pour mesurer l'intensité de la réaction. Les détecteurs de neutrons sont quelque peu préférables car ils donnent plus de réponse



NOMBRE DE COUCHES TERMINÉES

FIGURE I

rapidement et ne sont pas affectés par les radiations des produits de fission après l'arrêt. En fait, il s'agit à la fois de détecteurs de neutrons (compteurs de trifluorure de bore) et de chambres d'ionisation de rayons gamma réparties dans et autour de la pile. Certaines des chambres d'ionisation ont été utilisées pour faire

fonctionner des instruments d'enregistrement et des commandes de sécurité automatiques.

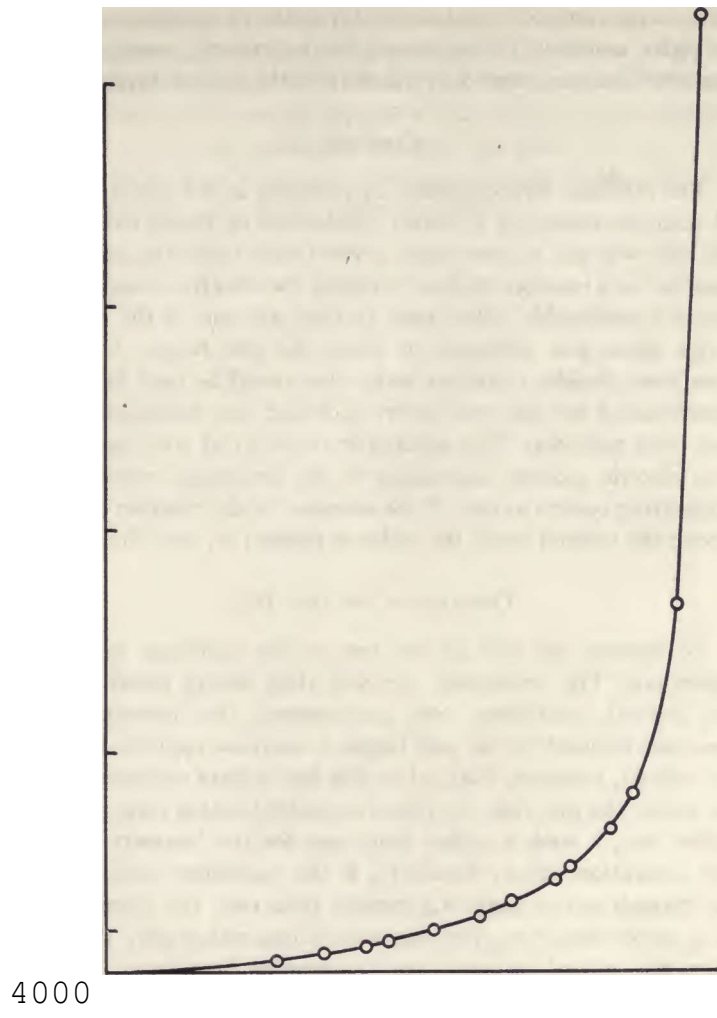
Dans le tas lui-même, les mesures ont été effectuées avec deux types de détecteurs. Un compteur de trifluorure de bore a été inséré dans une fente d'environ

43 » du sol et ses lectures prises à intervalles fréquents. De plus, une feuille d'indium a été irradiée chaque nuit dans une position aussi proche que possible du centre effectif de la pile, et son activité induite a été mesurée le lendemain matin et comparée aux lectures du compteur de trifluorure de bore.

Les résultats de ces mesures peuvent être exprimés de deux manières. Étant donné que le nombre de neutrons secondaires produits par la fission augmentera régulièrement au fur et à mesure que la pile sera construite, l'activité A induite dans une feuille d'indium standard au centre augmentera régulièrement à mesure que le nombre de couches de la pile augmentera. Une fois que le facteur de multiplication effectif est supérieur à un, A augmenterait théoriquement jusqu'à l'infini. Une telle approche de l'infini est difficile à observer, c'est pourquoi une deuxième façon d'exprimer les résultats a été utilisée. Supposons que l'espacement du réseau et la pureté des matériaux d'une structure graphite-uranium soient tels que le facteur de multiplication serait exactement un si la structure était une sphère de rayon infini. Ensuite, pour une sphère réelle de construction similaire mais de rayon fini, l'activation d'un détecteur placé au centre serait proportionnelle au carré du rayon. Il a été possible de déterminer un rayon effectif R_{eff} correspondant pour le pieu réel à chacun de ses différents stades. Il s'ensuivait donc que, si le facteur était précisément égal à un sur la moyenne du réseau dans la pile, l'activité A du détecteur au centre augmenterait avec l'augmentation de R_{eff} de telle sorte que R_{eff}^2/A restât constant, mais, si k_{eff} pour le réseau était supérieur à un, alors, à mesure que la taille de la pile approchait de la valeur critique, c'est-à-dire qu'à mesure que k_{eff} s'approche de un, A doit s'approcher de l'infini et donc R_{eff}^2/A s'approcher de zéro. Par conséquent, en extrapolant une

courbe de $R^{2\text{eff}/A}$ en fonction de la taille de la pile, c'est-à-dire du nombre de couches, à l'endroit où elle coupe l'axe, il a été possible de prédire à quelle couche le keff deviendrait un. Une telle courbe, représentée à la figure 1, indiquait à quelle couche la taille critique serait atteinte. La façon la moins utile mais la plus directe et la plus spectaculaire d'enregistrer les résultats est illustrée à la figure 2, qui montre la croissance de l'activité neutronique de la pile au fur et à mesure que des couches ont été ajoutées.

Au cours de la construction, sensiblement avant d'atteindre cette couche critique, des bandes de cadmium ont été insérées dans des fentes appropriées.



3000 z

2000

z o

1000

200

NOMBRE DE COUCHES TERMINÉES
GRAPHIQUE 2

Appendice

4

Ils ont été retirés une fois par jour avec les précautions appropriées afin de vérifier l'approche des conditions critiques. La construction a ainsi été portée jusqu'à la couche critique.

CONTRÔLE

La réaction a été contrôlée en insérant dans la pile des bandes de matériau absorbant les neutrons, du cadmium ou de l'acier au bore. Lorsque le tas n'était pas en service, plusieurs de ces bandes de cadmium étaient insérées dans un certain nombre de fentes, ce qui réduisait considérablement le facteur de multiplication effectif à un niveau inférieur à un. En fait, n'importe laquelle des bandes de cadmium suffisait à elle seule à ramener le tas en dessous de l'état critique. Outre les bandes de cadmium pouvant être utilisées pour le fonctionnement manuel du pieu, deux tiges de sécurité et une tige de contrôle automatique ont été fournies. La barre de commande automatique était actionnée par deux moteurs électriques répondant à une chambre d'ionisation et à un système d'amplification, de sorte que, si l'intensité de la réaction augmentait au-dessus du niveau souhaité, la tige était poussée vers l'intérieur, et vice versa.

FONCTIONNEMENT DE LA PILE

Pour faire fonctionner le tas, toutes les bandes de cadmium, sauf une, ont été retirées. Le reste a ensuite été lentement retiré. À mesure que les conditions critiques approchaient, l'intensité des neutrons émis par la pile commençait à augmenter rapidement. Il convient toutefois de noter que, lorsque cette dernière bande de cadmium était si loin à l'intérieur de la pile que le facteur de multiplication effectif était juste au-dessous de un, il a fallu un temps assez long pour que l'intensité atteigne la valeur de saturation. De même, si la bande de cadmium était juste assez éloignée pour que le keff soit supérieur à un, l'intensité augmentait

à un rythme plutôt lent. Par exemple, si une tige n'est qu'à 1 cm de la position critique, le temps de relaxation, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'intensité double, est d'environ quatre heures. Ces longs « temps de relaxation » sont le résultat du faible pourcentage de neutrons retardés dont il a été question à l'Appendice 3, et qui permettent de maintenir relativement facilement le fonctionnement de la pile à un niveau d'intensité constant.

La pile a été utilisée pour la première fois le 2 décembre 1942 avec une production d'énergie maximale d'environ 10^6 watt. Le 12 décembre, l'intensité a été portée à environ 200 watts, mais il n'a pas été jugé sûr d'aller plus haut en raison du danger des radiations pour le personnel à l'intérieur et autour du bâtiment. Au cours de cette course à haute intensité, des mesures de l'intensité du rayonnement ont été effectuées à côté de la pile, dans le bâtiment et sur le trottoir à l'extérieur.

ANNEXE 5. EXEMPLE DE LISTE DE RAPPORTS

On trouvera ci-dessous une liste de titres de rapports représentatifs préparés au Metallurgical Laboratory de l'Université de Chicago en 1942.

Un tableau permettant de calculer le pourcentage de perte dû à la
Présence d'impuretés dans l'alliage
À propos des sources de neutrons radium-béryllium
Estimations préliminaires des rayonnements des produits de
fission
Contexte des neutrons naturels dans un tas multiplicateur
Sections efficaces d'absorption pour les neutrons Rn et Be Fast
sur les contraintes mécaniques produites par les gradients de
température dans les tiges et les sphères
Effet de la géométrie sur l'absorption par résonance des neutrons par
l'uranium
Protection contre les radiations
Planification d'expériences sur le refroidissement liquide
Rapport sur la possibilité de purifier l'uranium par carbonyle
Formation et décomposition
Sur la radioactivité de l'hélium de refroidissement
Estimation de la stabilité de l'éther dans diverses conditions de
Irradiation
Empoisonnement à l'uranium
Activités des produits transuraniens et de fission
Effets chimiques des rayonnements sur l'air entourant le tas
Une estimation des effets chimiques des rayonnements sur le
Eau de refroidissement dans le tas
La méthode d'extraction de purification du nitrate d'uranyle
La diffusion des produits de fission à partir de métal coulé à 600^{0C} et 1000^{0C}

ANNEXE 6. COMMUNIQUÉ DU MINISTÈRE DE LA GUERRE SUR L'ESSAI DU NOUVEAU- MEXIQUE, 16 JUILLET 1945

La transition réussie de l'humanité vers une nouvelle ère, l'ère atomique, a été inaugurée le 16 juillet 1945, sous les yeux tendus d'un groupe tendu de scientifiques et de militaires renommés rassemblés dans les déserts du Nouveau-Mexique pour assister aux premiers résultats finaux de leur 2.000

000 d'effort. Ici, dans une section reculée de la base aérienne d'Alamogordo, à 120 miles au sud-est d'Albuquerque, la première explosion atomique provoquée par l'homme, l'exploit exceptionnel de la science nucléaire, a été réalisée à 5h30 du matin ce jour-là. L'assombrissement des cieux, déversant de la pluie et des éclairs immédiatement jusqu'à l'heure zéro, a intensifié le drame.

Montée sur une tour d'acier, une arme révolutionnaire destinée à changer la guerre telle que nous la connaissons, ou qui peut même être l'instrument pour mettre fin à toutes les guerres, a été déclenchée avec un impact qui a signalé l'entrée de l'homme dans un nouveau monde physique. Le succès a été supérieur aux estimations les plus ambitieuses. Une petite quantité de matière, produit d'une chaîne d'énormes installations industrielles spécialement construites, a été créée pour libérer l'énergie de l'univers enfermée dans l'atome depuis le début des temps. Un exploit fabuleux avait été réalisé. La théorie spéculative, à peine établie dans les laboratoires d'avant-guerre, avait été projetée dans la pratique.

Cette phase du projet de bombe atomique, qui est dirigée par le général Leslie R. Groves, était sous la direction du Dr.

J. R. Oppenheimer, physicien théoricien de l'Université de Californie. C'est à lui que l'on doit la mise en œuvre de l'énergie atomique à des fins militaires.

La tension avant la détonation était à son paroxysme. L'échec est une possibilité toujours présente. Un trop grand succès, envisagé par certains des présents, aurait pu signifier une arme incontrôlable et inutilisable.

« L'assemblage final de la bombe atomique a commencé dans la nuit du 247

Le 12 juillet dans une vieille maison de ranch. Au fur et à mesure que divers assemblages de composants arrivaient de points éloignés, la tension entre les scientifiques atteignait son paroxysme. Le plus cool de tous était l'homme chargé de l'assemblage du noyau vital, le Dr R. F. Bacher, professeur à l'Université Cornell en temps normal.

Le coût total du projet, représentant l'érection de villes entières et d'usines radicalement nouvelles réparties sur plusieurs kilomètres de campagne, ainsi qu'une expérimentation sans précédent, a été représenté dans la bombe pilote et ses pièces. C'était là le point central de l'entreprise. Aucun autre pays au monde n'avait été capable d'une telle dépense en cerveaux et en efforts techniques.

« Il n'a pas échappé à ces hommes de science toute la signification de ces derniers instants avant le test factuel final. Ils connaissaient parfaitement leur position de pionniers dans un autre âge. Ils savaient aussi qu'un seul faux mouvement les ferait exploser, eux et tous leurs efforts, dans l'éternité. Avant le début de l'assemblée, un reçu pour l'affaire vitale a été signé par le brigadier-général Thomas F. Farrell, adjoint du général Groves. Cela a marqué le transfert formel du matériel irremplaçable des scientifiques à l'armée.

« Au cours de l'assemblage préliminaire final, quelques minutes difficiles se sont produites lorsque l'assemblage d'une section importante de la bombe a été retardé. L'ensemble de l'unité a été usiné à la mesure la plus fine. L'insertion était partiellement terminée lorsqu'elle s'est apparemment coincée fermement et n'irait pas plus loin. Le Dr Bacher, cependant, n'était pas consterné et a rassuré le groupe en leur disant que le temps résoudrait le problème. En l'espace de trois minutes, la déclaration du Dr Bacher a été vérifiée et l'assemblage de base a été complété sans autre incident.

Des équipes spécialisées, composées des hommes les plus éminents sur des phases spécifiques de la science, qui étaient toutes liées dans l'ensemble, ont pris en charge leurs parties spécialisées de l'assemblée. Dans chaque groupe, il y avait des mois et même des années d'efforts canalisés.

Le samedi 14 juillet, l'unité qui devait déterminer le succès ou l'échec de l'ensemble du projet a été élevée au sommet de la tour d'acier. Tout ce jour-là et le lendemain, le travail de préparation s'est poursuivi. En plus de l'appareil nécessaire pour provoquer le

Additionner

La détonation, l'instrumentation complète pour déterminer le battement de pouls et toutes les réactions de la bombe ont été truquées sur la tour.

^{Le} mauvais temps qui s'était abattu sur l'assemblage de la bombe eut un effet très dégrisant sur les experts rassemblés dont le travail fut accompli au milieu d'éclairs et de coups de tonnerre. La météo, inhabituelle et bouleversante, a empêché l'observation aérienne de l'épreuve. Il a même retardé d'une heure et demie l'explosion prévue à 4h00 du matin. Pendant de nombreux mois, la date et l'heure approximatives avaient été fixées et avaient été l'un des secrets de haut niveau du secret le mieux gardé de toute la guerre. Le point d'observation le plus proche a été installé à 10 000 mètres au sud de la tour, où se trouvaient les commandes pour le test dans un abri en bois et en terre. À un point situé à 17 000 mètres de la tour, à un point qui donnerait la meilleure observation, les personnages clés du projet de bombe atomique prirent leurs postes. Il s'agit notamment du général Groves, du Dr Vannevar Bush, chef du Bureau de la recherche scientifique et du développement, et du Dr James B. Conant, président de l'Université Harvard.

La détonation proprement dite a été effectuée par le Dr K. T. Bainbridge du Massachusetts Institute of Technology. Lui et le lieutenant Bush, responsable du détachement de la police

militaire, furent les derniers hommes à inspecter la tour avec sa bombe cosmique.

« À trois heures du matin, le groupe s'est avancé vers le poste de contrôle. Le général Groves et le Dr Oppenheimer consultèrent les météorologues. La décision a été prise d'aller de l'avant avec le test malgré l'absence d'assurance d'une météo favorable. L'heure a été fixée à 5 h 30.

Le général Groves rejoignit le Dr Conant et le Dr Bush, et juste avant l'heure du test, ils rejoignirent les nombreux scientifiques rassemblés au camp de base. Ici, toutes les personnes présentes ont reçu l'ordre de s'allonger sur le sol, face contre terre, la tête à l'opposé de la direction de l'explosion.

« La tension a atteint son paroxysme dans la salle de contrôle à l'approche de la date limite. Les différents points d'observation de la région étaient reliés à la salle de contrôle par radio et, à vingt minutes de l'événement, le Dr S. K. Allison, de l'Université de Chicago, a pris le contrôle du réseau radio et a fait des annonces périodiques sur l'heure.

« Les signaux horaires, moins 20 minutes, moins quinze minutes », et ainsi de suite augmentèrent la tension jusqu'au point de rupture alors que le groupe dans la salle de contrôle, qui comprenait le Dr Oppenheimer et le général Farrell, retenait sa respiration, priant tous avec l'intensité du moment qui vivra pour toujours avec chaque homme qui était là. À « moins 45 secondes », le mécanisme du robot a pris le relais et à partir de ce moment-là, toute la grande masse compliquée de mécanismes complexes a fonctionné sans contrôle humain. Posté à un poste de réserve, cependant, se trouvait un soldat scientifique prêt à tenter d'arrêter l'explosion si l'ordre était donné. L'ordre n'est jamais venu.

« À l'heure dite, il y eut un éclair aveuglant qui éclaira toute la zone plus brillante que la lumière du jour. Une chaîne de montagnes à trois milles du point d'observation se détachait en relief audacieux. Puis il y a eu un énorme rugissement soutenu et une forte onde de pression qui a renversé deux hommes à

l'extérieur du centre de contrôle. Immédiatement après, un énorme nuage multicolore a bouilli à une altitude de plus de 40 000 pieds. Les nuages sur son passage ont disparu. Bientôt, les vents changeants de la stratosphère ont dispersé la masse maintenant grise.

« Le test était terminé, le projet réussi.

« La tour d'acier avait été entièrement vaporisée. À l'endroit où se trouvait la tour, il y avait un énorme cratère en pente. Étourdis mais soulagés par le succès de leurs essais, les scientifiques ont rapidement rassemblé leurs forces pour estimer la force de la nouvelle arme américaine. Pour examiner la nature du cratère, des réservoirs spécialement équipés ont été transportés dans la zone, dont l'un transportait le Dr Enrico Fermi, scientifique nucléaire de renom. La réponse à leurs conclusions réside dans la destruction effectuée au Japon aujourd'hui lors de la première utilisation militaire de la bombe atomique.

S'il n'y avait pas eu la zone désolée où l'épreuve s'est déroulée et la coopération de la presse dans la région, il est certain que l'épreuve elle-même aurait attiré l'attention d'une grande portée. En l'état, beaucoup de gens dans cette région discutent encore de l'effet de l'écrasement. Un aspect significatif, rapporté par la presse, a été l'expérience d'une jeune fille aveugle près d'Albuquerque, à plusieurs kilomètres du Test.

qui, lorsque l'éclair de l'essai éclaira le ciel avant que l'explosion pût être entendue, s'écria : « Qu'est-ce que c'était ? »

Les interrogatoires du général Groves et du général Farrell donnent les versions suivantes de l'essai sur les lieux. Le général Groves a déclaré : « Mes impressions sur les points culminants de la nuit sont les suivantes : après environ une heure de sommeil, je me suis levé à 01h00 et à partir de ce moment-là jusqu'à environ cinq heures, j'étais constamment avec le Dr Oppenheimer. Naturellement, il était tendu, bien que son esprit travaillât avec son extraordinaire efficacité habituelle. J'ai essayé de le protéger de l'inquiétude évidente manifestée par beaucoup de ses assistants

qui étaient dérangés par les conditions météorologiques incertaines. À 3 h 30, nous avons décidé que nous pourrions probablement tirer à 5 h 30. À 4 h 00, la pluie avait cessé, mais le ciel était très couvert. Notre décision s'est renforcée au fil du temps.

« Pendant la majeure partie de ces heures, nous avons tous les deux voyagé de la salle de contrôle dans l'obscurité pour regarder les étoiles et nous assurer mutuellement que les une ou deux étoiles visibles devenaient plus brillantes. À 5 h 10, il a quitté le Dr Oppenheimer et est retourné au point d'observation principal qui se trouvait à 17 000 mètres du point d'explosion. Conformément à nos ordres, je trouvai tout le personnel qui n'était pas occupé autrement massé sur un terrain un peu élevé.

Deux minutes avant l'heure prévue du tir, toutes les personnes se sont allongées face contre terre, les pieds pointés vers l'explosion. Alors que le temps restant était appelé par le haut-parleur du poste de contrôle de 10 000 mètres, il y avait un silence complet et impressionnant. Le Dr Conant a déclaré qu'il n'avait jamais imaginé que les secondes puissent être aussi longues. La plupart des individus, conformément aux ordres, se protégeaient les yeux d'une manière ou d'une autre.

D'abord, il y eut l'éclat de lumière d'un éclat incomparable. Nous nous sommes tous retournés et avons regardé à travers des lunettes noires la boule de feu. Environ quarante secondes plus tard, l'onde de choc est venue suivie du son, qui n'a pas semblé surprenant après notre étonnement total devant l'intensité extraordinaire de la lumière.

Un nuage massif s'est formé qui a bondi et s'est élevé avec une puissance énorme, atteignant le substratosphère en environ cinq minutes.

« Deux explosions supplémentaires d'un effet mineur autre que l'éclairage se sont produites dans le nuage peu de temps après l'explosion principale.

«Le nuage a voyagé à une grande hauteur d'abord sous la forme d'une boule, puis s'est transformé en une longue colonne traînante en forme de cheminée et enfin a été envoyé dans plusieurs directions par les vents variables aux différentes altitudes.

Le Dr Conant tendit la main et nous nous serrâmes la main pour nous féliciter mutuellement. Le Dr Bush, qui était de l'autre côté de moi, a fait de même. Le sentiment de toute l'assemblée, même des non-initiés, était d'une profonde crainte. Les docteurs Conant, Bush et moi-même avons été frappés par un sentiment encore plus fort que la foi de ceux qui avaient été responsables de l'initiation et de la poursuite de ce projet herculéen avait été justifiée.

Les impressions du général Farrell sont les suivantes : « La scène à l'intérieur de l'abri était dramatique au-delà des mots. À l'intérieur et autour de l'abri, il y avait une vingtaine de personnes concernées par des arrangements de dernière minute. Il y avait le Dr Oppenheimer, le directeur qui avait supporté le grand fardeau scientifique de la mise au point de l'arme à partir des matières premières fabriquées dans le Tennessee et dans l'État de Washington, et une douzaine de ses principaux assistants, le Dr Kistiakowsky, le Dr Bainbridge, qui supervisait tous les arrangements détaillés pour l'essai ; l'expert météorologique, et plusieurs autres. En plus de ceux-ci, il y avait une poignée de soldats, deux ou trois officiers de l'armée et un officier de la marine. L'abri était rempli d'une grande variété d'instruments et de radios.

Pendant les deux heures qui précédèrent l'explosion, le général Groves resta avec le directeur. Vingt minutes avant l'heure zéro, le général Groves est parti pour son poste au camp de base, d'abord parce qu'il offrait un meilleur point d'observation et ensuite, parce que notre règle selon laquelle lui et moi ne devons pas être ensemble dans des situations où il y a un élément de danger qui existe aux deux endroits.

Juste après le départ du général Groves, des annonces ont commencé à être diffusées sur l'intervalle restant avant l'explosion

aux autres groupes participant et observant le test. Au fur et à mesure que l'intervalle de temps devenait plus petit et passait de quelques minutes à quelques secondes, le test de tension,

augmenté à pas de géant. Tout le monde dans cette pièce connaissait les terribles potentialités de la chose qu'ils pensaient être sur le point d'arriver. Les scientifiques pensaient que leur calcul devait être juste et que la bombe devait exploser, mais il y avait dans l'esprit de chacun une forte dose de doute.

«« Nous nous dirigeons vers l'inconnu et nous ne savions pas ce qui allait en résulter. On peut dire sans risque de se tromper que la plupart des personnes présentes priaient – et priaient plus fort qu'elles n'avaient jamais prié auparavant. Si le tir réussissait, c'était une justification de plusieurs années d'efforts intensifs de dizaines de milliers de personnes – hommes d'État, scientifiques, ingénieurs, fabricants, soldats et bien d'autres dans tous les milieux.

Dans ce bref instant dans le désert reculé du Nouveau-Mexique, l'énorme effort de l'intelligence et des muscles de tous ces gens s'est soudainement et étonnamment pleinement concrétisé. Le Dr Oppenheimer, sur qui reposait un très lourd fardeau, devenait de plus en plus tendu à mesure que les dernières secondes s'écoulaient. Il respirait à peine. Il s'est accroché à un poteau pour se stabiliser. Pendant les dernières secondes, il regarda droit devant lui, puis lorsque l'annonceur cria : « Et là, il y eut cet énorme éclat de lumière suivi peu de temps après par le grondement profond de l'explosion, son visage se détendit dans une expression d'immense soulagement. Plusieurs des observateurs qui se tenaient à l'arrière de l'abri pour observer les effets de lumière ont été renversés par l'explosion.

La tension dans la salle est retombée et tout le monde a commencé à se féliciter les uns les autres. Tout le monde sentait : « Ça y est, quoi qu'il puisse arriver maintenant, tout le monde savait que l'impossible travail scientifique avait été fait. La fission atomique ne serait plus cachée dans le cloître des rêves des physiciens théoriciens. Il était presque adulte à la naissance. C'était une

grande force nouvelle qui pouvait être utilisée pour le bien ou pour le mal. Il y avait dans ce refuge le sentiment que ceux qui s'intéressaient à sa nativité devaient consacrer leur vie à la mission qu'il serait toujours utilisé pour le bien et jamais pour le mal.

Le Dr Kistiakowsky jeta ses bras autour du Dr Oppenheimer et l'embrassa avec des cris de joie. D'autres étaient tout aussi enthousiastes. Toutes les émotions refoulées ont été libérées dans ces quelques

minutes et tous semblèrent immédiatement sentir que l'explosion avait largement dépassé les attentes les plus optimistes et les espoirs les plus fous des scientifiques. Tous semblaient avoir le sentiment d'avoir assisté à la naissance d'une nouvelle ère – l'ère de l'énergie atomique – et sentaient leur profonde responsabilité d'aider à guider dans les voies droites les forces formidables qui avaient été débloquées pour la première fois dans l'histoire.

«En ce qui concerne la guerre actuelle, il y avait le sentiment que, quoi qu'il puisse arriver d'autre, nous avons maintenant les moyens d'assurer sa conclusion rapide et de sauver des milliers de vies américaines. Quant à l'avenir, il y avait eu quelque chose de grand et de nouveau qui s'avérerait infiniment plus important que la découverte de l'électricité ou de toute autre grande découverte qui a tant affecté notre existence.

« Les effets pourraient bien être qualifiés d'inouïs, de magnifiques, de beaux, de prodigieux et de terrifiants. Aucun phénomène d'origine humaine d'une telle puissance ne s'était jamais produit auparavant. Les effets de lumière défient toute description. Tout le pays était éclairé par une lumière brûlante d'une intensité plusieurs fois supérieure à celle du soleil de midi. C'était doré, violet, violet, gris et bleu. Il éclairait chaque sommet, chaque crevasse et chaque crête de la chaîne de montagnes voisine avec une clarté et une beauté qui ne peuvent être décrites, mais qui doivent être vues pour être imaginées. C'est cette beauté dont rêvent les grands poètes, mais qu'ils décrivent le plus mal et le plus inadéquatement. Trente secondes plus tard, l'explosion se produisit en premier, le souffle d'air pressant fortement les gens

et les choses, pour être suivi presque immédiatement par le rugissement fort, soutenu et impressionnant qui avertissait de la fin du monde et nous faisait sentir que nous, chétifs, étions blasphematoires d'oser toucher aux forces jusqu'alors réservées au Tout-Puissant. Les mots sont des outils inadéquats pour familiariser ceux qui ne sont pas présents avec les effets physiques, mentaux et psychologiques. Il fallait en être témoin pour qu'on s'en rende compte. "

INDEX

INDEX DES PERSONNES

Les références se rapportent à un chapitre et à un paragraphe, à l'exception des références aux annexes qui sont indiquées sous la forme A-I, etc.

- Abelson, P. H., 4:36, 6:34, 11:38, 11:39
Adamson, col. K. F., 3 :4, 3 :5, **3:6**
Adler, E., 10 :26
Aebersold, C. P., 11 :6
Akers, W. A., 5 :14
Allison, S. K., 3 :14, 4 :18, 4 :19, 4:20, 4:43, 5:2, 5:4, 5:18, 6:5, 6 :22, 7 :18, 12 :23, A-6
Anderson, C. D, 1 :21
Anderson, H. L., 4:2, 4:13, 6:31, 8:27
Arnold, H. R., 9:40
Arnold, J. H., 10 :24
Aston, F. W., 13 :35, 9 :15

Bacher, R. F., 12:23, A-6
Backus, J. G., 11 :6 Baker, A. L., 10 :24
Barr, F. T., 9 :41
Baxter, J. W., 11:34
Poutres, J. W., 3 :3, 3 :9, 3 :14, 5 2, 5:4, 5:12, 5:18, 9:18
Haricots, H. T. , 4 :44
Becker, H., 1 :19
Becquerel, H., 1:6,**1:7**
Benoît, M., 9 :32, 10 :3
Béthe, H., 1 :51, 12 :23, 12 :24

Bohr, N., 1 :53, 1 :57, 3 :2, 12 :23
Boone, H. A., 10 :28
Booth, E. T., 10 :1, 10 :2, 10 :7, 10 :26
Bothe, W., 1 19
Bowen, Adm. H. G., 3:6,**3:7**
Boyd, G. E., 6 :33
Breit, G., 3 :3, 3 :8, 3 :9, 3 :14, 4 :22, 5:2, 5:4, 5:18, 6:37, 6:38, 12:2
Brewer, A. K., 9 :31
Brewster, O. C., 10 :28
Brickwedde, F. G., 1:**21**
Briggs, L. J., 3:3, 3:4, 3:5, 3:6, 3:7, 3:8, 3:9, 3:14, 3:15, 3:16, 4:3, 4:36, 5:2, 5:4, 5:6, 5:8, 5:14, 5:17, 10:2
Brobeck, F. A., 11 :6
Buckley, O. E., 3 :16
Bush, V., 3 :9, 3 :15, 3 :16, 3 :17, 3 :18, 3 :19, 3 :21, 3 :22, 5 :2, 5 :4, 5:8, 5:9, 5:13, 5:14, 5:17, 5 20, 5:21, 5:22, 5:25, 5:26, 5:27, 5 :28, 5 :33, A-6

Cady, G. H., 10 :29
Canu•il, S. T., 7 :48

Carpenter, W. S., Jr., 7:5
 Chadwick, J., 1 :19, 3 :17, 4 47,
 12:23
 Chapman, S., 9 :21
 Chilton, T. H., 3:14
 Chubb, L. W., 3:16, 5:5
 Clark, W. M., 3:3
 Clusius, H., 09 :22
 Cockcroft, J. D., 1:38, 1:40, 3:17
 Cohen, K., 4:34, 9:32, 10:3, 10:7
 Doan, R. L., 6 :5, 6 :8, 7 :48
 Dunning, J. R., 1 :53, 10 :1, .
 10 :2,
 10:23, 10:41
 Eckart, C. H., 3 :14, 4 :22
 Einstein, A., 1 :4, 1 :9, 1 :39,
 1:53,
 Eisenhart, L. P., 3:3
 Emmett, P. H., 10:23

255

Cole, Dr., 8 :70
 Compton, A. H. , 3:15, 3:16, 3:19,
 4:18, 5:4, 5:7, 5:8, 5:12, 5:14, 5:17,
 5:21, 5:31, 6:2, 6:8, 6:22, 7:1, 7:48
 Conant, J. B., 3:16, 3:18, 3:19,
 5:4, 5:6, 5:8, 5:9, 5:10, 5:14,
 5:17, 5:21, 5:25, 5:27, 5:31,
 5 :33, 12 :5, A-6
 Condon, États-Unis, 3 :14, 5 :2,
 5:4, 5 :18, 11 :6
 Cooksey, D., 11 :6
 Coolidge, W. D., 3:15, 3:16
 Cooper, C. M., 6:5,
 7:48 Coryell, C. D.,
 6:33 Creutz, E. C.,
 4:12, 6:36 crist, R. H.,
 9:40 Curie, I., 1:19,
 1:27 Curie, M., 1:6
 curie, P., 1:6 Curme, G.
 O., Jr., 5:5
 Currie, L. M., 10:23 AM
 Daniels, F., 7 :48
 Dempster, A. J., 7:48, 9:29 Dickel,
 G., 9:22
 Enskog, D., 9:21
 Farrell, Gen. T. F., 5:32, A-6
 Feld, B., 4 :13
 Fermi, E., 1 :28, 1 :52, 2 :1,
 2 :10, 2 :11, 3 :1, 3 :4, 3 :6, 3 :8,
 3 :14,
 4:2, 4:13, 4:17, 4:22, 5:12, 6:5,
 6:22, 6:31, 7:48, 8:27, 12:23,
 Feynman, R. P., 9 h 32
 Finkelstein, T., 11 :6
 Fletcher, H., 3:3
 Fowler, R. H., 3 :17, 4 :38
 Franck, J., 6 :5, 7 :48 :5,
 Fred, E. B., 3:3
 Frisch, O. R., 1 :53, 1 :54
 Gary, T. C., 6:6
 Gherardi, B., 3 :15
 Greenewalt, C. H., 6.6, 7 :50
 Grosse, A. von, 4 :39, 9 :40, 10 :1,
 10 :2
 Groves, Gen. L. R. , 5 :24, 5 :25,
 5 :27, 5 :28, 5 :31, 5 :32, 5 :33,

- 7:4, 7:5, 7:12, 8:50, 10:34,
11:18, 12:2, 12:5, 13:5, 13:6,
- Gunn, R., 3 :9, 4 :36,5:2
- Hahn, O., 1 :53, 1 :54
- Halban, H., 5 :14
- Hamilton, Dr., 8 :70
- Helmholz, A. C., 11 ans:6
- Henne, A. L., 10 :29
- Heydenburg, N. P., 4 :29
- Hertz, G., 9 :15
- Hilberry, N., 6 :8, 6 :20, 6 :33,
6:45, 7:48
- Hoffman, J. 1., 6 :12
- Porc, T., 6 :5, 7 :48
- Hoover, Comm. G. C.,3:4, 3
- Jenkins, F. A., 11 :6
- Jewett, F. B., 3 :15
- Johns, I. B., 6 :33
- Johnson, C. A. , 10 :26
- Johnson, W. C., 6:5, 7:48
- Joliot, F., 1 :19, 1 :27, 1 :53,3:2
- Kaplan, I., 9 :32
- Keith, C. P., 5 :5, 10 :24
- Kennedy, J. W., 4:24, 6:33, 6:34,
12:23, 12:48
- Kingdon, K. H., 11 :6
- Kistiakowski, G. B., 3 :16, 12 :23,
- Langmuir, I., 11 :6
- Lauritsen, C. C., 1
- Lawrence, E. O., 3 :15, 3 :16, 3 :17,
3 :19, 4 :24, 4 :25, 4 :30, 4 :31, 5 :4,
5:7, 5:8, 5:17, 5:21, 5:31,6:2,
11:1, 11:2, 11:4, 11:5, 11:6,
11:26, 11:29, 11:45
- Droit de vivre, M. C., 6 :5, 7 :15
- Lewis, W. K., 3 :16, 5•5, 6 :6, 13
5
- Libby, W. F., 10 :2
- McBee, E. T., 10 :29
- Mack, E., 10 :23
- MacKenzie, K. R., 11:6
- McMillan, E., 6 :34
- Manley, J. H., 6:39
- Marshall, gén. G. C., 5 :9, 5 21,
- Marshall, Col. J. C., 5:23, 5:28,
10:34
- Matthias, col. F. T., 5:32
- Meitner, L. , 1 :53, 1 :54
- Miles, J. B., 7 :50
- Miller, W. T., 10 :29
- Mills, Amiral E. W., 13 :5
- Mitchell, A. C. G., 4:11
- Mohier, F. L.,3:5
- Moore, T. W., 6 :5, 7 :15
- Moses, Gen. R. G., 5:26
- Mulliken, R. S., 3 :16
- Murphree, E. V., 5 :4, 5 :5, 5•8,
5:17, 6:6, 6:8, 9:41, 10 2
- Murphy, G. Nf., 1:21, 10:23
- Nichols, col. K. D., 5:32, 10:34

Index

257

Nier, A. O., 4 :29, 10 :1, 10 :29, 11 :4
 Nix, F. C., 10 :26
 Norris, E. o., 10 :26

 Oliphant, M. L. E., 3:19, 11:6,
 11:34
 Oppenheimer, F., 11:6
 Oppenheimer, J. R., 5:31, 6:37,
 6:39, 11:6, 12:2, 12:5, 12:23,
 12 :50, A-6

 Parkins, W. E., 11:6
 Parsons, Capitaine W. S., 12 :23
 Paxton, H. C., 10:7, 10:26
 Pegram, G. B., 1:53, 3:3, 3:4, 3:6,
 3:8, 3:9, 3:14, 3:20, 3:21, 3:22,
 4:2, 4:3, 4:5, 4:6, 4:46, 5:2, 5:4,
 10:2
 Peierls, R., 10 :4
 Perlman, I., 6 :33
 Peters, B. , 11 :6
 Purnell, Adm. W. R., 5 :25, 5 26,
 5:27, 5:33

 Rayleigh, Seigneur, 9 :14
 Reynolds, W. B., 11 :6
 Richardson, J. R., 11 :6
 Roberts, R. B., 3:5
 Rodden, C. J., 4 :44, 6 :16
 Roosevelt, Président F. De, 3:4,
 3:5, 3:6, 3:7, 3:9, 3:22, 3 23
 ,
 5:25, 5:33, 7:5
 Rosen, R., 10 :29
 Ruhoff, col., 6:19
 Rutherford, E., 1:6, 1:17, 1:38,
 Sachs, A., 3 :4, 3 :5, 3 :6, .3 :7
 Seaborg, G. T., 4 :24, 6 :33, 6 :34
 Segré, E., 4 :24
 serbe, Re, 6 :39
 Simon, F. , 5 :14, 10 :4
 Slack, F. G., 10 :2, 10 :26
 Slade, C. B., 10 :7, 10 :26
 Slater, J. C., 3:15
 Šlepian, J., 11 :2, 11 :6, 11 :29
 Sloan, D. H., 11 :6
 Smith, C. S., 12 :23, 12 :48
 Smith, L. S., 11 :6, 11 :29
 Smyth, H. D., 3 :14, 4 :12, 4 :27,
 4:28, 4:31, 5:2, 5:4, 5:18, 7:48,
 8:56, 11:1, 11:24, 11:29, 13:5
 Snell, A-3
 Solberg, Capitaine T. A., 13 :5
 Somervell, Gen. B., 5:25
 Spedding, F. H., 6 :5, 6 :15, 6 :17
 ,
 6:33
 Stearns, J. C., 7:48
 Squires, A. M., 9 :32 Stewart,
 I., 5 :17
 Stimson, H. L., 5:9, 5:21, 5:25,
 7:5stone, Dr. R. S., 6:5, 7:48,
 8:70 Strassmann, F. , 1:53, 1:54
 Steyer, Gen. W. D., 5 :21, 5 :22,
 5 :25, 5 :27, 5 :33
 Swearingen, J. S. , 10 :28
 Szilard, L., 2 :10, 2 :11, 3 :1,
 3 :4,
 3:5, 3:6, 3:8, 3:14,4:2

 Taylor, H. S., 9 :40, 10 :23, 10 :26
 Comte, E., 3 :1, 3 :5, 3 :9, 6 :39

Thiele, E. W., 6 :33
Thomas, C. H., 7 :48
Thomson, G. P., 3:18
Thomson, J. J., 1:35
Thornton, R. L., 11 ans:6

6:5, 6:33, 7:15, 7:48, 8:56 .
Wilhelm, H. A., 6:33
Williams, R., 6 :6, 7 :50
Wilson, C. T. R., A-I
Wilson, R. R., 4 :12, 11 :24, 12 :23

INDEX DES MATIÈRES PRINCIPALES

Tolman, R. C., 5:31, 13:5
Truman, Président H. S., 5 :34
Turner, L. A., 1:53, 1:58
Tuve, M. A., 3 :8, 3 :9, 4 :29
Urey, H. C., 1 :21, 3 :3, 3 :7, 3 :8,
3 :9, 3 :12, 3 :14, 3 :20, 3 :21,
3:22, 3:23, 4:32, 4:38, 4:46,
5:2, 5:4, 5:7, 5:8, 5:12, 5:17,
5:21, 5:31, 6:2, 6:33, 9:18,
10:2, 10:23, 10:41

Van Vleck, J. H., 3 :15
Vernon, H. C., 7 :48, 8 :56

Wahl, A. C., 4 :24, 6 :33, 6 :34
Wallace, H. A., 3 :22, 5 :9, 5 :21
Walton, E. T. S., 1 :38, 1 :40
Warren, col. S. L., 5:32
Watson, Gen. E. M., see Roosevelt,
President F. D. Watson, W. W., 7:48
watts, G. W., 10:28 Weil, G., 4:13,
8:27 Weisskopf, V. F., 3:1weed, L.
H., 3:3Wensel, H. T., 5:2, 5:4, 5:17
Wever, E. G., 3:3
Wheeler, J. A., 1:53, 1:57, 3:14,
4:12, 4:22, 6:5, 6:33, 7:50
Whitaker, M. D., 7:48, 7:50, 8:34
Wigner, E., 3:1, 3:3, 3:4, 3:5, 3:6,
3:8, 3:9, 4:12, 4:22, 4:27, 4:28,

Wilson, V. C., 6 :31

Zinn, W. H., 4 :13, 6 :31,
8 :27, 8 :61
Actinium, 1:15, 1:16
Comité consultatif sur l'uranium,
.3 :4, 3 :5, 3 :8, 3 :9. voir aussi
Comité de l'uranium (CNDR),
Section S-1 de la NDRC, Section S-
1 de l'OSRD, Comité exécutif de la
Section S-1 de l'OSRD
Allis-Chalmers Manufacturing
Company, 11 :19, 11 :45
Particule alpha, 1 :33, 2 :32,
4 :24 ; bombardement par 1 :17,
1 :19, 1 :40 ; produit de la
désintégration nucléaire ; 1 :9,
1 :15, 1 :16, 1 38 1 :51, A-I
Aluminium, 7 :22
Laboratoire d'Argonne, 8 :27, 8 :28,
8 :59
Numéro atomique, 1 :12, 1 :15
Structure atomique, 11:10, 1:11

Bakélite Corp., 10 :26
Baryum, 1:54
Bell Telephone Laboratories,
Inc., 10 :26
Béryllium, 1 :19, 1 :40, 1 :45,
2 :10,

2:13, 2:29, 2:36, 4:10, 4:14, 4:18, 4:19, 4:43, 6:8, 6:22
 Particules bêta, 1 :9, 1 :15, 1 :16, 2 :32, 4 :24, 6 :34, 8 :17, A-I
 Énergies de liaison, nucléaire, 1 :31 et suiv., 1 :36, 1 :54
 Bombe atomique, 2 :1, 2 :3, 2 :14, 2 :16, 2 :23, 2 :34, 2 :35, 2 :36, 3 :5, 4:25, 4:48, 4:49, 5:2, 5:10; 5:16, 6:1, 6:32, 6:37, 11:28, 11:42, 12 :1, 13 :1, A-6
 Boron, 1:19, 1:40, 2:10, 4:42,

259

6:11, A-I, A-3
 Cadmium, 3 :11, 4 :6, 7 :27, 8 :8, A-4
 Institut de technologie de Californie, 1 :21
 Californie, Université de, 1 :53, 3 :12, 4 :7, 4 :24, 4 :25, 6 :33, 6:34, 6:38, 11:2, 11:6, 11:12, 11:19, 11:23, 11:44, 11:45, 12:7, 13:1
 Radium et uranium canadiens Corp., 6 :10
 Carbide and Carbon Chemicals Corp., 10 :2, 10 :25, 10 :11
 Carbone, 1 :51, 2 :10, 2 :13, 3 :5, 3 :6,
 Institut Carnegie de Washington, 1 :53, 3 :12, 4 :29, 6 :38
 Séparation isotopique centrifuge, 4:32, 4:37, 4:49, 5:6, 5:15, 9:18, 9:36, 9:42, 11:16

Réaction en chaîne, 1 :50, 1 :51, 1 :56, 2 :3ff., 2 :23, 2 :31, 2 :32, 2 :33, 2 :34, 2 :36, 4 :1, 4 :2 et suiv., 4 :47, 5 :7, 6 :6, 6 :21 et suiv., 8 :3 et suiv., 12 :8
 Analyse chimique, 4 :44, 7 :34
 Méthode d'échange chimique de séparation isotopique, 4 :39, 9 :24, 9 :39
 Problèmes chimiques, 7 :39, 11 :35,
 -

Chicago, Université de, 3 :12, 4 :7, 4 :11, 4 :18, 4 :20, 5 :12, 6 :27, 6:33, 6:38, 7:8, 7:9, 8:50, 11:41, Chicago, Université de, 12 :32, 13 :1. Voir aussi Laboratoire métallurgique, 29
 Travaux de l'ingénieur Clinton, 7 :8, 10:33, 10:42, 11 :44, 11:45, 13:1
 Clinton, Tennessee, 7 :1, 8 :34, 6 :44
 Chambre à brouillard, 1 :7, 12 :35, A-I
 Université Columbia, 1 :53, 3 :6, 3 :7, 3 :10, 3 :12, 4 :2, 4 :8, 4 :9, 4:13, 4:17, 4:22, 4:32, 4:38, 4:39, 4:40, 4:41, 5:12, 8:56, 10:1, 10:23, 10:26, 10:39, 11 :41, 13:1
 Consolidated Mining and Smelting Co., 9 :41
 Contrôles, 7 :27,8:8
 Université Cornell, 3 :12, 6 :28
 Refroidissement, 6 :43, 7 :13, 7 :15, 7 :16, 7 :18, 7 :26, 8 :8, A-5

Corrosion, 7 :21, 7 :25, 7 :38, 10 :17, 8 :52
 Compteur, Geiger-Müller, 1 :7, 4 :6, 12 :35, A-I
 Compteur, proportionnel, A-I, A-3
 Coupe transversale, nucléaire, 1 :45 et suiv., 4 :6, 12 :12, A-5. Voir aussi noyaux impliqués
 Cyclotron, 1:40, 4:10

 Danger coefficients, 8:28
 Décontamination, 8 :23
 Détection de particules nucléaires, 4 :6, 4 :13, 8 :39, 8 :67, 12 :35, A-I. Voir aussi Chambre à brouillard, Compteur, Électroscope, Chambre d'ionisation
 Deutérium, voir Eau lourde
 Deuteron, 1:21, 1:40, 6:34 DSM Project, 5:23, 7:4 du Pont, E. I., de Nemours and co., Inc., 6:13, 6:18, 6:40, 7:4, 7:5, 7:6, 8:50, 9:40, 10:29, 11:19, 7:50ff.
 Méthode électrolytique de séparation isotopique, 9 :25
 Méthodes électromagnétiques de séparation isotopique, 4 :30, 5 :7, 5 :15, 9 :28, 11 :1ff. Calutron, 11 :2, 11 :10, 11:20. Source d'ions, 9 :30, 11:4, 11:5, 11:25. Isotron, 9 :31, 11 :2, 11 :24. Magnétron (centrifugeuse ionique), 9 :31, 11 :2, 11 :29. Effets de charge spatiale 9 :30, 11 :11 :8
 Électron, 1 :11, 1 :12, 1 :23
 Électroscope, 1 :12 :35, A-I
 Énergie, conservation de, 1•2
 Facteur d'enrichissement, 9 :8, 9 :14, 9 :20, 9:30, 10:6, 10:7, 11:14, 11:21
 Équilibre, radioactif, 8 :18
 Effet de fission rapide, 8 :9
 Rapport de faisabilité, 6 :6, :5, 6 :39, 6 :43, 6 :45
 Fission, 1 :3, 1 :53, 1 :55, 1 :57, 2 :3, 2 :14, 2 :19, 2 :21, 2 :35, 6 :38, 12 :16. Voir aussi Neutron, Plutonium, Uranium
 Produits de fission, 1 :53, 1 :56, 1 :57, 2 :10, 2 :32, 4 :6, 7 :29, 7 :35, 8 :17,
 Méthode de distillation fractionnée de séparation isotopique, 9 :16, 9 :38
 Rayons gamma, 1 :9, 1 :15, 1 :19, 2 :32, 8 :5, 8 :17, A-I
 Méthode de diffusion gazeuse de séparation isotopique, 4 :32, 4 :37, 4 :47, 4 :49, 5 :6, 5 :12, 5 :14, 9 :14, 10 :1 et suiv., 10 :14, 10 :26, 11 :16, 11 :32
 General Electric Co., 11 :19, 11 :45
 Université George Washington, 1 :53
 Graphite, 2 :9, 2 :19, 2 :30, 2 :31, 2 :36, 3 :5, 3 :7, 3 :11, 4 :2, 4 :4,

Index

- Graphite, 4 :6, 4 :13, 4 :42, 4 :47, 5 :14, 6 :8, 6 :28, 6 :29
- Demi-vie, 1 :16, 6 :28, 8 :17. Voir aussi Noyaux impliqués
- Hanford Engineer Works, 7 :8, 7 :12, 8 :50, 10 :78, 13 :1
- Harshaw Chemical Co., 6 :13, 10 :29
- Risques pour la santé, 2 :32, 2 :36, 4 :26, 6 :5, 7 :16, 7 :19, 7 :26, 7 :28, 7 :35, 7 :36, 7 :41, 8 :35, 8 :54, 8 :63, 8 :67, 8 :78, A-5. voir aussi Poisons radioactifs
- Eau lourde, 3 :14, 5 :6, 5 :12, 5 :14.
- En tant que modérateur, 2 :10, 2 :13, 2:28, 4:38, 4:47, 5:14, 6:8, 6:43, 6:45, 8:32, 8:55. Production, 4 :39, 9 :36
- Hélium, voir Refroidissement des particules alpha
- Hooker Electrochemical Co., 10:29
- Houdaille-Hershey Corp., 10:26
- Indiana, Université de, 4 :11, 6 :38
- Indium, 4 :6
- Iode, 4 :6 Accélérateur d'ions, 1 :40. Voir aussi cyclotron
- Chambre d'ionisation, 1 :7, 4 :6, 12 :35, A-I
- Université d'État de l'Iowa, 3 :12, 6 :16, 6 :33, A-4
- Isobares, 1 :14
- Isotopes, 1 :14, 1 :29. Séparation de, 2 :12, 5 :7, 5 :15, 6 :2, 9 :1ff., -11 :1
- J. A. Jones Construction Co., Inc., 10:24, 10:41
- Fondation John et Mary Markel, 11 :12
- Université Johns Hopkins, 1 :53, 3:12
- 261
- Comité mixte sur les nouvelles armes, 5 :26
- Institut Kaiser Wilhelm, 3 :6
- Kellex corp., 9 :32, 10 :2, 10 :24, 10 :26, 10 :41
- Treillis, 2 :11, 2 :19, 2 :31, 4 :4, 4 :6, 4 :8, 4 :13, 4 :15, 4 :16, 4 :20, 4 :22, 4:23, 4:27, 5:15, 6:21, 6:22, 6:28, 6:42, 6:43, 7:1, 7:3, 7:18, 7 :19, 7 :46, 8 :4, 8 :9, 8 :21, 8 :28, 8 :36, 8 :59, A-4. Empoisonnement de, 8 :15
- Lithium, 1 :19, 1 :38, 1 :48, 2 :10, 12 :44
- Los Alamos, Nouveau-Mexique, 7 :48, 12 :4, 12 :18, 13 :1, A-6
- Mallinckrodt Chemical Works, 6 :12, 6 :18, 6 :19, 6 :22
- District de Manhattan, 5 :23, 5 :29, 5:30, 5:32, 6:18, 7:4, 10:23, 11:11, 11:39, 12:2, 12:7, 13:1
- Masse, conservation de, 1 :2, A-I
- Équivalence masse-énergie, 1 :11 :6, 8, 1 :38
- Nombre de mesure, 1 :13, 1 :15, 1 :35

Index

- Spectrographe de masse, 1 :35, 9 :28 et suiv.
- Metal Hydrides co., 4 :41, 6 :10,
- Laboratoire métallurgique, 6 :2, 6 :33, 6 :35, 7 :1, 7 :9, 7 :10, 7 :40, 7:46, 7:50, 8:2, 8:22, 8:34, 8:56, 11:2, 11:19, 12:2, 12:32.
- Voir aussi Chicago, Université de Comité de politique militaire, 5 25
- ,
- Minnesota, Université de, 3 :12, 6 :38
- Modérateur, 2 :8 et suiv., 2 :11, 2 :13, 2 :14, 2 :19, 2 :20, 2 :28 et suiv., 4 :1,
- Modérateur, 4 :8, 8 :8, 12 :40.
- Voir aussi Béryllium, Graphite, Eau lourde
- Facteur de multiplication, 4 :13, 4 :15, 4 :16, 6 :10, 6 :11, 6 :22, 7 :19, 8 :12, 8 :15, A-4
- M. W. Kellogg co., 10 :2, 10 :23, 10 :32, 10 :11. Voir aussi Kellex Corp.
- Bureau national des normes, 3:8, 3:12, 4:36, 4:41, 4:44, 6:11, 6:16, 6:20, 6:38, 9:31
- National Carbon Co., Inc., 6:20, 10:23, A-4
- NDRC, 2 :37, 3 :4, 3 :9, 3 :10. Section S-1, 3 :14, 4 :14, 4 :31, 5 :2. Voir aussi Comité consultatif sur l'uranium
- Laboratoire de recherche navale, 4 :36, 11 :38, 11 :39, 11 :47
- Département de la Marine, 2 :1, 3 :4, 3 :6, 3 :11, 3 :12, 4 :36, 10 :2, 11 :39, 11 :47
- Neptunium, 1 :58, 2 :19, 6 :34, 8 :18
- Neutron, 1 :18ff., 1 :23ff., 1 :33, 1 :49, 2 :3, 2 :6, 2 :19, 2 :32, 12 :16. Absorption de, 1 :47, 2 :13, 1 :57, 2 :3, 2 :8ff., 2 :12, 2 :19, 8 :4, 8 :6, 12 :8, 4 :8, 4 :19, 6 :20ff., A-5. Retardé, 6 :23, A-3, A-4. Détection, voir Détection de particules nucléaires. Rapide, 1 :57, 2 :1, 2 :21, 2 :14, 2 :10, 2 :12, 4 :25, 6 :37, 8 :9. Fission induite par, 1 :52, 1 :57, 2 :21, 3 :6, 4 :6, 4 :24, 4 :25, 10 :1.
- Résonance, 2 :12, 4 :6, 4 :8.
- Sources, 1 :40, 4 :10, 4 :14, 8 :31, 8 :32, 12 :38, A-5. Thermique 1:57, 2:1, 2:9, 2:21, 2:14, 3:6, 4:6, 4:25, 8:31, 8:39, 10:1, 12 :40, A-I
- Azote, 1 :17, 1 :51
- Désintégrations nucléaires, 1 :15, 1 :20, 1 :38, 1 :49. Artificiel, 1 :17
- Réaction nucléaire, 1 :38ff. Notation pour 1 :43. Voir aussi Fission, Désintégration nucléaire, Noyaux impliqués
- Noyau, 1 :11, 1 :12. Structure de, 1 :23ff.
- Oak Ridge, Tennessee, voir Clinton Engineer Works
- OSRD, 5:2, 5:9, 10:2, 10:23, 11:26, 12:2. Section S-1, 5:3,

Index

- 5:17, 5:28, 7:1, 10:33, 11:4, 11:18.
Voir aussi Comité consultatif sur l'uranium
Oxygène, 1 :17, 1 :51
- Chantier naval de Philadelphie, 11 :39, 11 :47
- Pile, 2 :20. Voir aussi Argonne Laboratory, Clinton Engineer Works, Hanford Engineer Works, Lattice, West Stands pile
- Conseil de planification, 5 :5, 5 :6, 6 :8
- « Pluton », 8 :68
- Plutonium, 1 :58, 2 :23, 2 :36, 3 :17, 4 :24, 4 :25, 5 :7, 5 :21, 6 :1, 6 :4, 6:34, 6:35, 8:1ff., 12:10. Fission, 1 :58, 2:14, 4:24, 4:48. Production, 2:19, 5:14, 6:32, 6:41, 7:3, 7:8ff., 7:18ff., 8:1ff., 9:44, 11:32, 2 :18. Radioactivité, 1 :58, 4 :24
Gaz toxique, 4 :27
- Polonium, 1 :19
- Positron, 1:21, 1:51
- Puissance, 1 :48, 2 :3, 2 :16, 2 :34, 3 :5, 3 :14, 4 :48, 6 :29, 7 :26, 13 :5
- Université de Princeton, 3 :12, 4 :7, 4:9, 4:11, 4:12, 4:18, 4:22, 5:12, 9:40, 11:2, 11:44
- Protoactinium, 1 :57, 2 :21
-
- Proton, 1 :13, 1 :17, 1 :19, 1 :23, 1:24, 1:33, 1:38, 1:40, **1:48**, 1 :51, 4 :10, A-I
- Université Purdue, 6 :38
- Radioactivité, 1 :6, 2:32.
- Artificiel, 1 :26, 1 :30, 4 :6, 4 :26, A-I. Éléments montrant, 1 :16. Mesure de, voir Chambre à brouillard, compteur, Détection de particules nucléaires, Electroscope, Chambre d'ionisation. Effets toxiques, 4 :26, 4 :48 ; voir aussi Santé. Produit de, voir Particules alpha, Particules bêta, Rayons gamma, Désintégration nucléaire, Série radioactive
- Radium, 1 :15, 1 :16, 2 :24, 2 :32
- Comité de référence (Conseil national de recherches du Canada), 3 :3
- Réflecteur (tamper), 12 :13, 12 :24, 4:18, 4:19
- Relativité, 1 :4
- Temps de détente, A-4
- Facteur de reproduction, voir Facteur de multiplication
- Société de recherche, 11 :4
- Probabilité d'échappement de résonance, 8 :10 Comité d'examen (Académie nationale des sciences) 3 :15, 3 :16, 3 :18, 3 :21, 3 :23, 4 :23, 4:24, 4:27, 4:48, 6:6, 6:39, **7:1**
- Rhodium, 4 :6
- Institut du riz, 6 :38
- Richland, Washington, voir Hanford Engineer Works
- Fondation Rockefeller, 11 :12
- Scintillations, Blindage A-I, 7 :28, 8 :67
- 'Éternuement', 8 :68
- Speer Carbon Co., 6:20, A-4

Index

- 3:12, 5:12, 9:41, 9:42
Université de Stanford, 6 :38
Stone and Webster Engineering Corp., 10 :34, 11 :19, 11 :45
- Tamper, voir Réflecteur
Tennessee Eastman Corp., 11 : 19, 11 :34, 11 :45
Méthode de diffusion thermique de la séparation isotopique, 4 :36, 9 :21, 11 :37
Facteur d'utilisation thermique, 8 :11
Thorium, 1 :15, 1 :16, 1 :57, 2 :21, 2 :24, 2 :25
Comité Tolman, 13 :5, 13 :6
Top Policy Group, 3 :22, 5 :9
Éléments transuraniens, 4 :25
- Union Minière, 3:7
Union Carbide and Carbon Corp., 6 :18 (en anglais seulement)
États-Unis Graphite Co., 4 :42
Unités, A-I
Uranium, 1 :7, 1 :15, 2 :23, 2 :24, 2 :26, 2 :27, 6 :4, 6 :34, 11 :36.
Fission, 1 :3, 1 :52, 1 :57, 2 :1, 2 :3, 2 :10, 2 :12, 2 :13, 2 :14, 2 :32, 3 :6, 8 :8 et suiv., 2 :35, 2 :36, 4 :49, 8 :5, 10:1, 8:9, 3:16. Isotopes, 1 :16, 2:18, 2:4, 4:34, 4:47, 5:21, 6:1, 10:1, 4:24. Séparation isotopique, voir Séparation isotopique. Absorption neutronique, 2 :3, 2 :6, 2 :11, 2 :19, 4 :2, 4 :6, 4 :7, 4 :24, 4 :25, 8 :5.
Production d'uranium, 4 :41, 6 :10, 6 :12 et suiv.
Bromure d'uranium, 11 :4
Comité de l'uranium (NDRC), 3 :9, 3 :14, 4 :36, 9 :30, 11 :26, 11 :29. Voir aussi Comité consultatif sur l'uranium
Hexafluorure d'uranium, 4 :33, 4 :36, 9 :14, 10 :3, 10 :11
Virginie, Université de, 3 :12, 5 :12, 9 :42
Département iVar, 7 :5, 3 :6, 3 :12, 5:9, 11:18
Université de Washington (St. Louis), 6 :34
Westinghouse Electric and Manufacturing Co., 6 h 10, 6 h 13, 6 h 14, 9 h 42, 11 h 19, 11 h 45, A-4
Pile des tribunes Ouest, 8 :27, A-4
Wisconsin, Université de, 6 :38



