

LES MULTIPLES

LA DÉCISION DATE DE DÉCEMBRE 1941, LA PREMIÈRE UTILISATION DU 6 AOÛT 1945. VOICI COMMENT, EN MOINS DE

CHEMINS

QUATRE ANS, UNE ORGANISATION SCIENTIFIQUE ET

D'UN PROJET

TECHNIQUE D'UN TYPE NOUVEAU DIRIGÉE PAR LE MINISTÈRE DE LA GUERRE AMÉRICAIN, PLANI-

DÉMESURÉ

FIA, CONÇUT ET MIT EN SERVICE LE RÉSEAU DE BUREAUX D'ÉTUDE, DE LABORATOIRES ET D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES QUI, GRAMME PAR GRAMME, ALLAIT PRODUIRE L'ARME LA PLUS PUISSANTE DU MONDE.

PAR PIERRE RADVANYI ET MONIQUE BORDRY

Fin 1941, l'Allemagne nazie et ses alliés occupaient presque toute l'Europe : de la Sicile au Cap Nord, de Brest jusqu'à la Crète. Les troupes allemandes avaient envahi une grande partie de l'U.R.S.S., encerclaient Leningrad et se trouvaient devant Moscou. Dans la première partie de l'année 1942, elles allaient avancer plus loin encore, jusqu'à Stalingrad et au Caucase. Seule, la Grande-Bretagne, bien que bombardée, avait tenu bon.

En Extrême-Orient, les Japonais, alliés de Hitler et Mussolini, venaient de lancer une attaque surprise sur la base américaine de Pearl Harbor, dans les îles Hawaï. Le 7 décembre 1941, au petit matin, ils avaient, en plusieurs vagues d'assaut, détruit plus de la moitié de la flotte du Pacifique. Les troupes japonaises occu-

paient une partie de la Chine, l'Indochine et de nombreux archipels du Pacifique. Au cours de la première moitié de 1942, elles allaient envahir les Philippines, Singapour et les Indes Néerlandaises, la Birmanie et une partie de la Nouvelle-Guinée. Depuis le 11 décembre 1941, l'Amérique se trouvait ainsi engagée dans la guerre, contre le Japon, l'Allemagne et l'Italie.

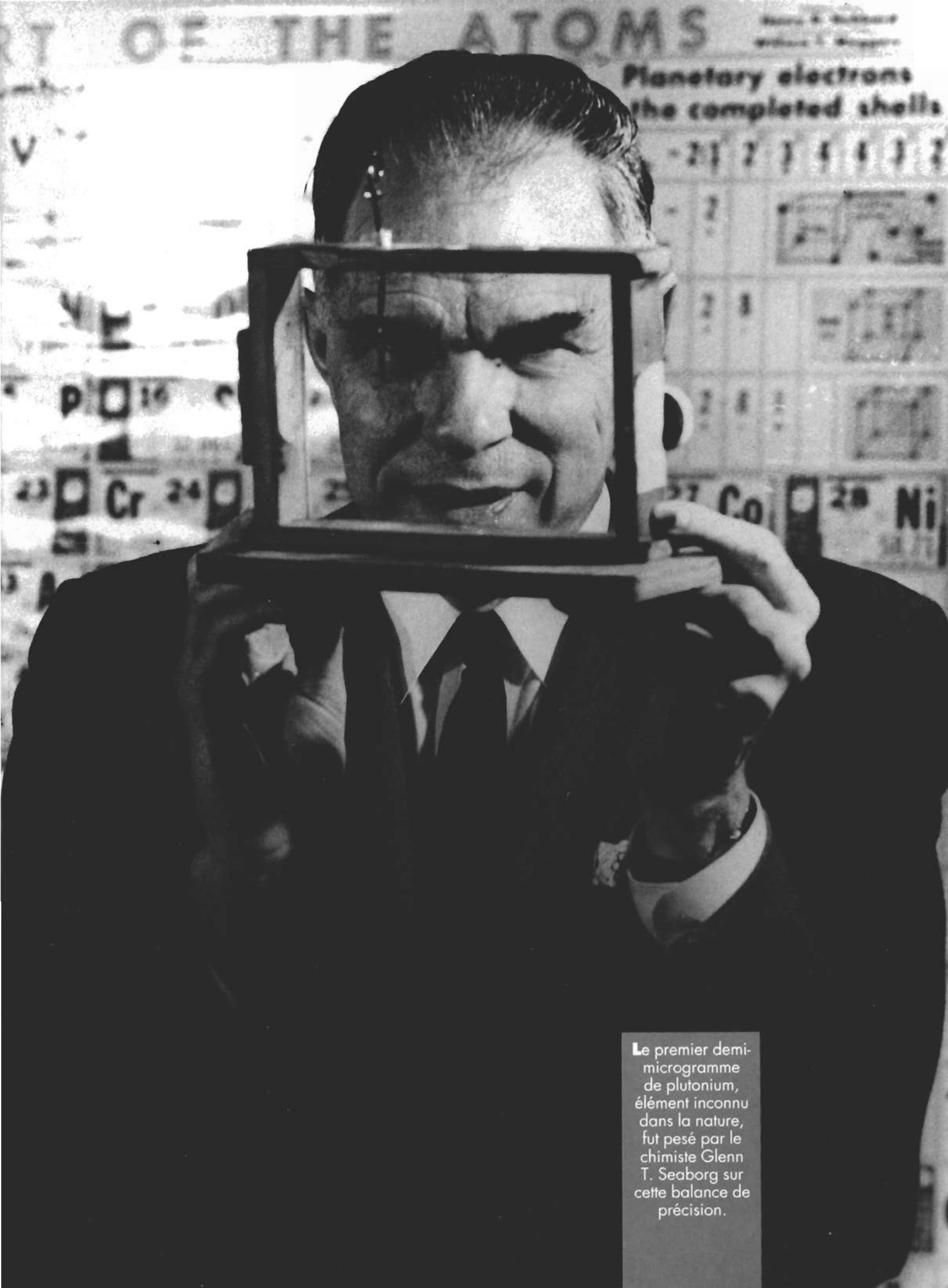
**LE 16 DÉCEMBRE 1941,
À WASHINGTON...**

Ce jour-là se réunit le *Top Policy Group*. Il avait été formé quelques mois plus tôt pour définir et suivre la politique de recherche et de développement scientifique et technique des États-Unis.

Le *Top Policy Group* comprenait le président des États-Unis Franklin D. Roose-

velt, le vice-président H.A. Wallace, le secrétaire d'État à la Guerre H.L. Stimson, le chef d'état-major le général Marshall et deux scientifiques, le Dr Vannevar Bush, président de l'O.S.R.D. (Office of Scientific Research and Development), et le Dr James B. Conant, président de l'Université Harvard, son adjoint, président du N.D.R.C. (National Defence Research Committee).

A l'ordre du jour de la réunion : l'état d'avancement des travaux sur l'uranium. Bush et Conant proposent - et cette proposition va être acceptée - que la recherche atomique aux États-Unis **change d'échelle**. Ainsi, au lieu de poursuivre simultanément des recherches sur les applications civiles de l'énergie nucléaire - une nouvelle source d'énergie - et sur ses applications militaires, on se concentrera uniquement sur ce second but :



Le premier demi-microgramme de plutonium, élément inconnu dans la nature, fut pesé par le chimiste Glenn T. Seaborg sur cette balance de précision.

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ



DITE - IPS

Le 8 décembre 41, au lendemain de Pearl Harbor, le président Roosevelt signe l'entrée en guerre des Etats-Unis contre le Japon. Le 16, il lance la recherche sur l'uranium d'où sortira la bombe atomique.

construire une bombe atomique⁽¹⁾ utilisable avant la fin de la guerre. La crainte est de voir les Allemands la réaliser les premiers.

Dès lors, il ne suffit plus d'avoir des contrats avec les laboratoires, il faut aussi envisager une nouvelle organisation qui permette d'étudier et de construire des unités de production industrielle. V. Bush recommande que des officiers de l'armée (du corps du génie, c'est-à-dire des ingénieurs) se joignent aux équipes de recherche pour se familiariser avec le problème de l'uranium.

C'est ainsi que J. B. Conant fut chargé de passer en revue l'ensemble du programme nucléaire. Son analyse (printemps 42) détailla **cinq méthodes** pour parvenir à la réalisation d'une bombe atomique. Les connaissances accumulées semblaient indiquer que toutes pourraient être utilisables. Il fut donc dé-

cidé de poursuivre le développement de ces méthodes **en parallèle**, tant qu'il ne serait pas démontré que certaines d'entre elles ne pourraient aboutir rapidement. Vannevar Bush proposa que l'armée soit introduite dans le Projet au cours de l'été 1942, pour collaborer à la construction d'usines de production.

Le 17 juin 1942, le rapport Bush fut transmis au président Roosevelt qui l'approuva le lendemain. Un colonel du génie fut chargé de former un nouveau département d'ingénieurs pour développer l'énergie atomique à des fins militaires.

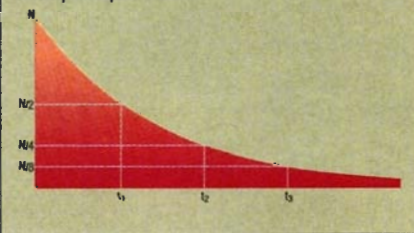
Le 11 août, il fallut donner un nom à ce nouveau département. Il n'était jusqu'alors connu que comme "Département pour le développement de matériaux de substitution" (D.S.M.). Ce nom paraissant devoir attirer la curiosité, il fut décidé de l'appeler "Manhattan Engineer District" (M.E.D.), ses bureaux devant d'abord être implantés à New York dans le quartier de Manhattan.

Ce fut le début d'un énorme effort qui coûta des milliards de dollars et mobilisa à travers tous les Etats-Unis, plus de 100.000 hommes et femmes (scientifiques, ingénieurs, militaires, techniciens, ouvriers et administratifs). En 1945, l'activité nucléaire atteindra un volume similaire à celui de toute l'industrie automobile américaine à la même époque.

Le 17 septembre 1942, le colonel Leslie Groves, du corps du génie, fut nommé par le secrétaire d'Etat à la guerre, responsable du Manhattan District. Cette responsabilité comportait les pleins pouvoirs pour l'ensemble des travaux atomiques aux Etats-Unis durant la guerre.

Son supérieur hiérarchique lui dit : "Si c'est faisable, vous êtes capable d'y parvenir". Apprenant qu'il serait promu quelques jours plus tard au grade de brigadier général, Groves demanda que sa nomination officielle à la tête du MED fut retardée d'autant, car, à son avis, il valait mieux avoir un grade élevé pour en imposer à tous les scientifiques avec lesquels il aurait à traiter. Cela fut fait le 23 septembre, et, à partir de là, le général Groves ne perdit pas une minute.

Radioactivité : propriété d'un élément chimique de se transformer spontanément en un autre, par émission de rayonnements énergétiques. Cette transformation, plus ou moins rapide, est caractérisée par sa période, temps au bout duquel la moitié des noyaux présents initialement se seront transformés. On dira donc que si, au départ, il y a par exemple 800 atomes, au bout d'une période (t_1), il en subsiste 400, au bout de deux périodes (t_2) il n'en subsiste plus que 200 et au bout de trois périodes (t_3), il n'en reste plus que 100.

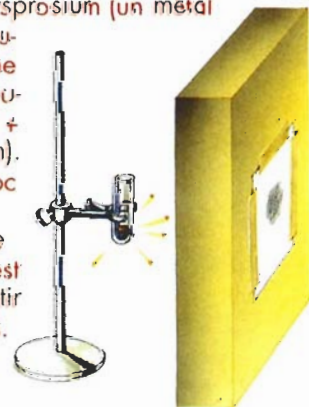


AU COURS DES ANNÉES TRENTE, EN EUROPE...

On sait, depuis 1932, à la suite des expériences du physicien britannique James Chadwick, que le noyau de l'atome est constitué de protons et de neutrons. En janvier 1934, à Paris, Frédéric et Irène Joliot-Curie découvrent que les éléments chimiques stables comme le phosphore et l'azote, ont des isotopes radioactifs que l'on peut produire artificiellement.

Peu de mois après, à Rome, Enrico Fermi et son équipe obtiennent, en bombardant des noyaux avec des neutrons, des isotopes radioactifs de la plupart des éléments chimiques connus. Ils s'attaquent alors au plus lourd d'entre eux,

Une expérience de Fermi : la formation d'un radio-élément artificiel dans le dysprosium (un métal rare). L'éprouvette contient une source de neutrons : (radium + béryllium). A droite, le bloc de paraffine supportant le dysprosium est destiné à ralentir les neutrons.

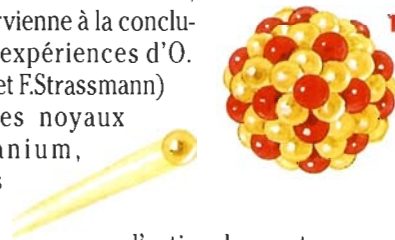


(1) Les termes "énergie atomique" et "bombe atomique" ont été utilisés par les Américains parce qu'ils apparaîtraient plus familiers au grand public qu'"énergie nucléaire" et "bombe nucléaire".

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ

l'uranium, un métal, pour tenter d'obtenir un élément chimique n'existant pas dans la nature, plus lourd que l'uranium, un "transurannique". Ils observent effectivement un grand nombre de radioactivités nouvelles mais cette quête des transuranniques n'aboutit pas.

Il fallut quatre ans de travaux intenses, en particulier ceux de l'équipe d'Irène Joliot-Curie et ceux de Otto Hahn et de Lise Meitner à Berlin pour que, fin décembre 1938, on parvienne à la conclusion (expériences d'O. Hahn et F. Strassmann) que les noyaux d'uranium, sous



l'action des neutrons lents, se scindent en deux, donnant deux noyaux plus petits.

Lise Meitner (émigrée en Suède) et son neveu Otto Frisch expliqueront peu après ce phénomène qu'ils baptiseront fission : dans un noyau d'uranium, les forces de répulsion, à longue portée, entre les 92 protons de même charge positive contrebalancent presque les forces d'attraction nucléaires à courte portée. Il suffit d'un petit apport d'énergie provenant de l'absorption du neutron incident, pour que le noyau se déforme et fissionne en deux morceaux, libérant une énergie très importante. Ces morceaux sont des noyaux plus petits, isotopes stables ou en général radioactifs d'éléments chimiques connus.

La fission était un phénomène spectaculaire et, dès le début de 1939, plusieurs groupes se lancèrent dans la course : Frédéric Joliot et ses collaborateurs au Collège de France à Paris, Enrico Fermi, émigré entre temps d'Italie aux États-Unis et Léo Szilard, Hongrois émigré d'Allemagne, à l'université de Columbia à New York. Le groupe de Joliot - avec quinze jours d'avance - et les groupes de Columbia démontrent que, dans la fission de l'uranium, de nouveaux neutrons sont libérés. On

entrevoit alors la possibilité d'une réaction en chaîne qui provoquerait le dégagement d'une énergie considérable. Une nouvelle source d'énergie apparaissait ainsi à l'horizon, mais également, et on le comprit dès

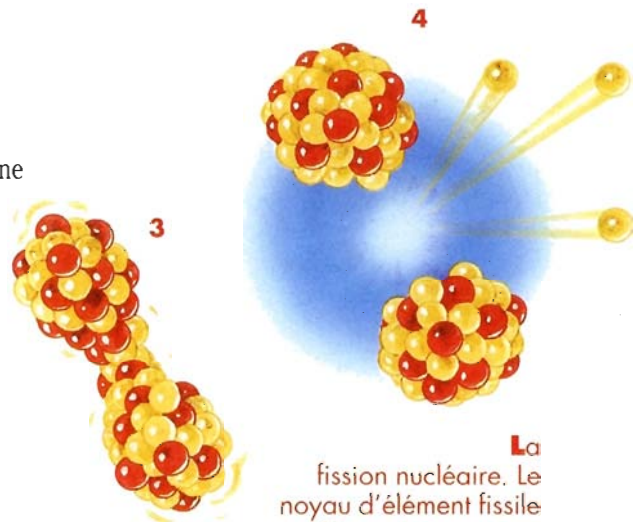


le début, la possibilité de la réalisation d'une bombe tout à fait différente de toutes celles qui existaient.

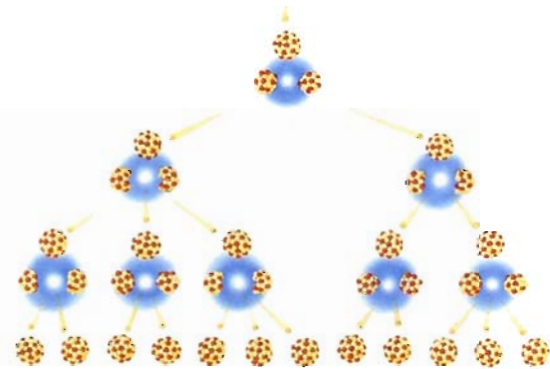
Devant cette perspective et devant l'imminence de la guerre, Léo Szilard s'efforce, au printemps 1939, d'obtenir que les nouveaux résultats ne soient plus publiés. Il n'y parvient pas, mais le secret fut tout naturellement établi, en France, à partir du début de la guerre et aux États-Unis, à partir du printemps 1940.

L'équipe Joliot réussit à démontrer

La fission mise en évidence par Joliot. Une source de neutrons (axe) est introduite dans un cylindre de laiton recouvert d'une couche d'uranium (1). Des atomes d'uranium fissionnent et leurs fragments sont projetés sur les parois du cylindre de bakélite qui contient le dispositif. En remplaçant ce dernier par un compteur Geiger-Muller (2), Joliot mesure la radioactivité des fragments.



La fission nucléaire. Le noyau d'élément fissile (1) reçoit un neutron lent. Ce noyau excité se déforme (2), puis fissionne (3) en donnant deux fragments de masses inégales (4), et en libérant plusieurs neutrons ainsi qu'une énergie très importante. Ce processus, initié dans un matériau contenant suffisamment de noyaux fissiles, peut donner lieu à une réaction en chaîne (ci-dessous).



qu'une réaction en chaîne divergente est possible dans l'uranium sous réserve d'utiliser une géométrie particulière et une taille minimum critique. Trois brevets sont pris au début de mai 1939, au nom du C.N.R.S., complétés par d'autres brevets au printemps de 1940. Pour ses expériences, le savant français obtient de l'Union minière du Haut-Katanga, à Bruxelles, environ 9 tonnes d'oxyde d'uranium. Les neutrons, pour être efficaces, doivent être ralentis dans ce que l'on appellera un modérateur. Frédéric Joliot et son équipe choisissent, pour cela,

DESSINS CLAUDE IACROIX

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ

l'eau lourde. A cette époque, elle n'est produite qu'en Norvège.

Fin février 1940, le gouvernement français envoie un commando conduit par le lieutenant Allier, pour ramener de Norvège en France le stock mondial d'eau lourde. Les travaux sont cependant interrompus par l'invasion allemande. Frédéric Joliot envoie ses collaborateurs, Halban et Kowarski, en Angleterre avec l'eau lourde. Lui-même restera à Paris.

AUX ETATS-UNIS EN 1939 ET EN 1940...

En 1939, le théoricien danois Niels Bohr - qui avait apporté outre-Atlantique la nouvelle de la découverte de la fission - montre, avec l'Américain J. A. Wheeler, que c'est ^{235}U , isotope peu abondant de l'uranium naturel, qui fissionne sous l'action des neutrons lents. A partir de là, il devint évident pour les physiciens qu'un enrichissement en ^{235}U permettrait d'obtenir plus facilement une réaction en chaîne - d'où une série de travaux sur les possibilités d'enrichissement ou de séparation de cet isotope.

Le premier contact des scientifiques avec une instance gouvernementale

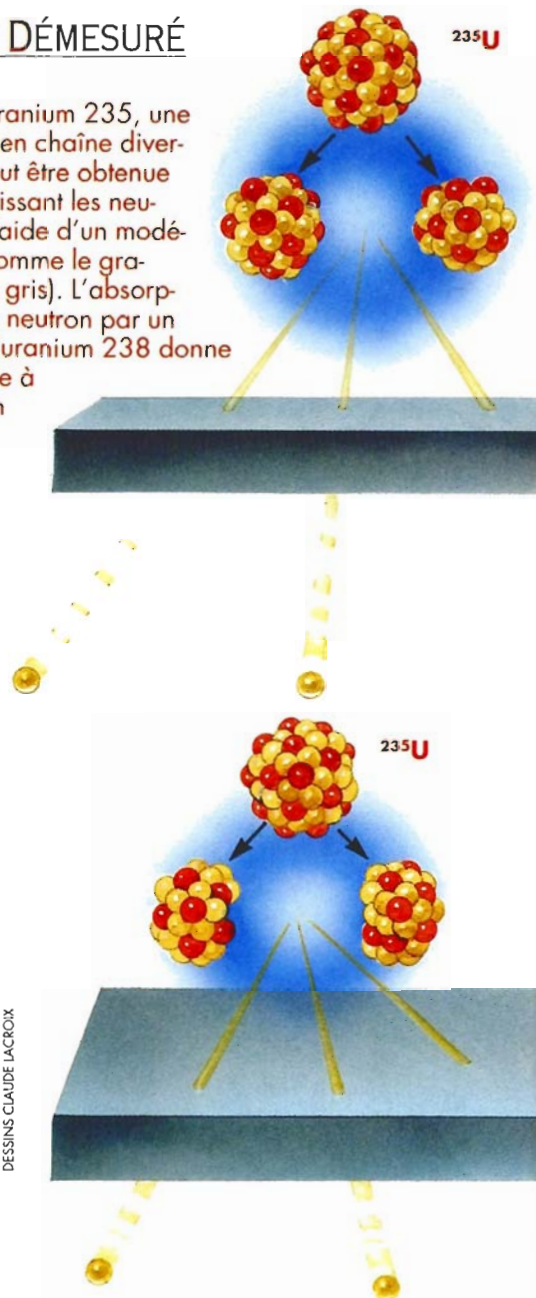
américaine date du 16 mai 1939. Ce jour-là, G. Pegram, doyen du Département de physique de l'université de Columbia, lui-même prévenu par Szilard et Fermi, avertit le ministère de la Marine. Deux mois après, en juillet-août 1939, Léo Szilard estime de son devoir d'informer d'une manière plus précise et plus pressante le gouvernement américain sur ces recherches. La fission a été découverte à Berlin et, physicien émigré, Szilard sait que des travaux se poursuivent dans ce domaine en Allemagne. Avec Eugène Wigner d'abord, puis avec Edward Teller, deux autres physiciens émigrés, il va voir Albert Einstein pour lui proposer d'écrire une lettre au président Roosevelt en vue de lui faire connaître les potentialités de l'uranium et ses dangers, de lui suggérer de s'assurer de l'approvisionnement en minerai d'uranium et d'apporter une aide aux travaux en cours.

Cette lettre célèbre datée du 2 août 1939, mais qui n'atteint son destinataire qu'au début du mois d'octobre, conduisit à la constitution d'un Comité spécifique qui, par la suite, s'appela le Comité de l'uranium.

On voit ainsi que les premiers efforts pour restreindre les publications et obtenir un appui gouvernemental furent le fait d'un petit groupe de physiciens ayant fui les pays de l'Axe. Ces physiciens, nés en Europe et dont la plupart avaient poursuivi leurs études en Allemagne, étaient particulièrement conscients de la menace nazie. Un certain nombre d'entre eux venaient tout juste d'obtenir la nationalité américaine. Beaucoup de physiciens d'origine américaine étaient, au départ, moins motivés.

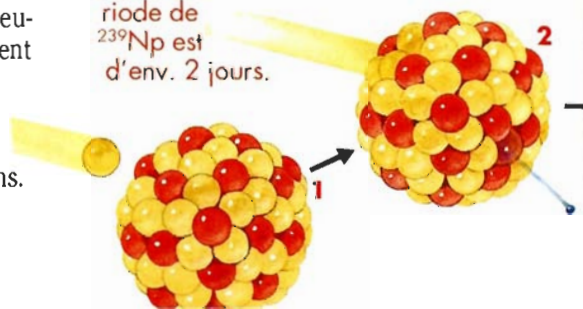
L'équipe de Columbia, autour de Fermi et de Szilard se proposait d'utiliser le graphite comme modérateur des neutrons. Il fallait du graphite extrêmement pur, en particulier exempt de bore. Les expériences montrèrent rapidement que le carbone pur absorbait effectivement très peu les neutrons.

Dans l'uranium 235, une réaction en chaîne divergente peut être obtenue en ralentissant les neutrons à l'aide d'un modérateur, comme le graphite (en gris). L'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium 238 donne naissance à l'uranium 239.

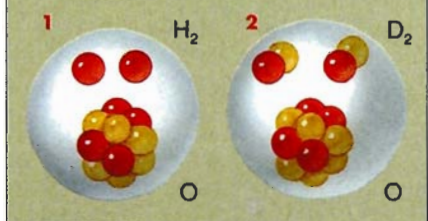


DESSINS CLAUDE LACROIX

De l'uranium 238 au plutonium : en absorbant un neutron le noyau de ^{238}U (1) se transforme en ^{239}U qui, en émettant un électron (2) gagne un proton et se transforme en neptunium (^{239}Np). Cet élément (numéroté 93) émet à son tour un électron (3) et se transforme en plutonium 239 (^{239}Pu) (4). La période de ^{239}Np est d'env. 2 jours.



Eau lourde : le gaz le plus léger de la nature, l'hydrogène, comporte deux isotopes stables : le plus abondant, l'hydrogène léger, est constitué d'un simple proton (le noyau) autour duquel tourne un électron. Dans l'hydrogène lourd, appelé deutérium, présent dans l'hydrogène naturel à 0,015%, le noyau est constitué d'un proton et d'un neutron ; sa masse est pratiquement le double de celle de l'hydrogène léger. Une molécule d'eau (1) est composée de deux atomes d'hydrogène associés à un atome d'oxygène. Dans l'eau lourde (2) les atomes d'hydrogène sont des atomes de deutérium.

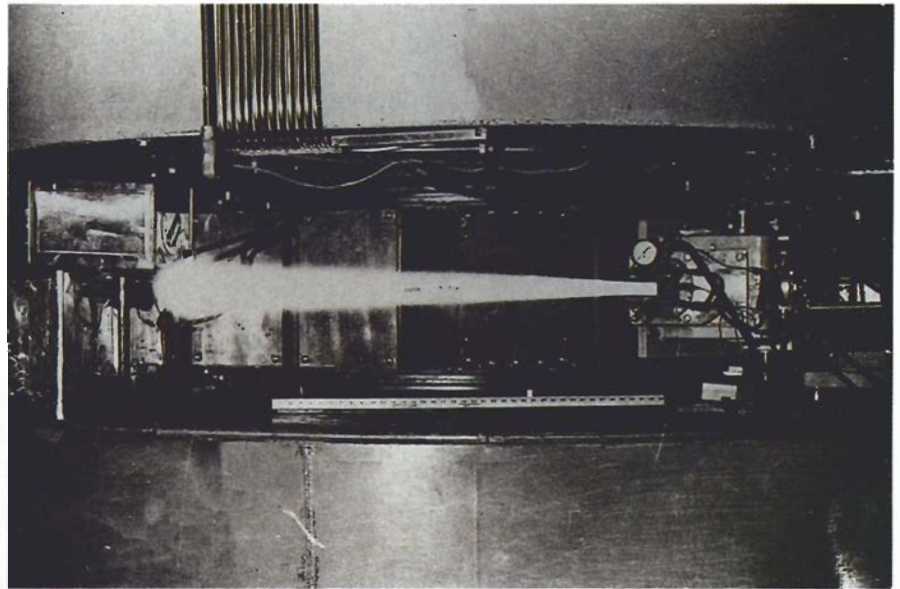
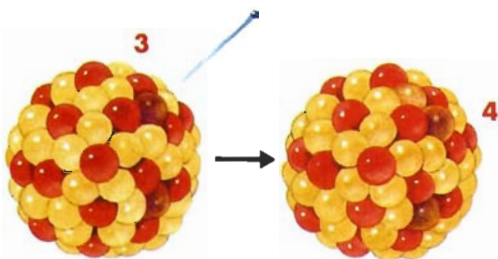


PENDANT CE TEMPS, À BERKELEY...

C'est sur la côte Pacifique, à l'université de Californie à Berkeley, près de San Francisco, que furent découverts les premiers véritables transuraniens. E. Mac Millan et P. H. Abelson (venu en visite de la côte est), trouvèrent parmi les fragments de fission, l'élément 93, qui n'existe pas dans la nature. Il fut baptisé neptunium (du nom de la planète Neptune qui se trouve après la planète Uranus (uranium)). Ce neptunium était radioactif et on pensait qu'il devait se transformer peu à peu en élément 94, encore inconnu. Ce fut le dernier travail publié (mai 1940).

En bombardant de l'uranium avec les deutons du cyclotron de 60 pouces de Berkeley, G. T. Seaborg observa la formation de l'élément 94 qui fut baptisé, par la suite, plutonium, du nom de la planète Pluton. Les travaux théoriques laissaient penser que l'isotope impair, de masse 239, de ce nouvel élément serait aussi fissile, sinon davantage, que ^{235}U . Seaborg et ses collègues mirent en évidence ^{239}Pu et montrèrent qu'il était effectivement très fissile ; ils réussirent, en mai 1941, à en séparer un demi-microgramme. Ce métal est argenté, et devient d'un jaune terne quand il est légèrement oxydé. Il est chaud au toucher par suite de sa radioactivité. Sa densité est de presque 20 g/cm^3 .

Désormais, deux voies s'ouvraient pour produire une bombe atomique : **soit séparer l'isotope ^{235}U de l'uranium naturel, soit produire du ^{239}Pu , à partir de ^{238}U , par absorption des neutrons de la réaction en chaîne.**



LAB OF PUBLIC AFFAIRS OFFICE

Jusqu'alors, les travaux se faisaient par contrats accordés par le Comité de l'uranium. Mais on se rendit compte que pour parvenir à la bombe, il fallait réussir à réunir dans un volume aussi petit que possible une quantité suffisante, appelée **masse critique**, de l'ordre de plusieurs kilogrammes, soit de ^{235}U , soit de ^{239}Pu . La réaction en chaîne, pour être explosive, doit être extrêmement rapide et s'effectuer par neutrons rapides. La réaction en chaîne par neutrons lents ne conduirait qu'à la fission d'une fraction relativement faible de la masse fissile qui se trouverait dispersée avant que les neutrons aient pu suffisamment interagir et se multiplier.

En 1941 également, des contacts furent établis avec les Anglais qui étudiaient, en laboratoire, la possibilité de séparer ^{235}U . Ils avaient hérité du stock d'eau lourde venu de France et songeaient donc davantage à un dispositif uranium plus eau lourde, dispositif qui fut réalisé par la suite au Canada.

C'est dans ces conditions qu'en décembre 1941, Vannevar Bush, assisté de J. B. Conant et de L. J. Briggs, président de la section de l'uranium de l'O.S.R.D., réorganisa son entreprise dont la direction sera désormais entre les mains d'un tout petit groupe.

A NEW-YORK, À BERKELEY ET À CHICAGO....

Trois physiciens américains de souche, tous trois Prix Nobel, furent chargés d'étudier et de développer les directions possibles :

Le cyclotron de 60 pouces conçu par Lawrence à Berkeley permit à G. Seaborg de découvrir la formation de noyaux de plutonium. On aperçoit ici, entre les pôles de l'électro-aimant, l'ionisation de l'air produite par le faisceau de particules à la sortie du cyclotron.

Isotope : un même élément chimique peut comprendre des noyaux de type différent appelés isotopes. Ces noyaux ont tous le même nombre de protons, donc la même charge électrique caractéristique de l'élément chimique, mais un nombre différent de neutrons. Certains de ces isotopes sont stables, d'autres sont radioactifs. Exemples : le cuivre a 29 protons ; il a deux isotopes stables, le cuivre 63 (29 protons et 34 neutrons) et le cuivre 65 (29 protons et 36 neutrons). On peut créer artificiellement des isotopes radioactifs comme le cuivre 64 (29 protons et 35 neutrons) de 12,8 h de période.

L'uranium naturel est composé de 3 isotopes radioactifs : ^{238}U (92 protons et 146 neutrons) de période extrêmement longue, 4,5 milliards d'années, ^{235}U (92 protons et 143 neutrons) de 710 millions d'années de période, ainsi que ^{234}U (92 protons et 142 neutrons), un descendant de ^{238}U . Le plus abondant est ^{238}U , présent à 99,3 % dans l'uranium naturel ; ^{235}U se trouve dans la nature dans une proportion de 0,7%.

Le plutonium est obtenu dans les réacteurs à partir de l'uranium. Dans ce type de réacteur, les barreaux d'uranium sont plongés dans l'eau lourde qui ralentit les neutrons. La chaleur est évacuée par un échangeur (non représenté). Deux tiges en cadmium, matériau absorbant les neutrons (au centre), permettent de contrôler la réaction en chaîne.

H. C. Urey, qui avait découvert le deutérium, étudierait, à New York, la production d'eau lourde ainsi que la séparation du ^{235}U par diffusion ou centrifugation.

Sous la direction de E. O. Lawrence, à Berkeley, seraient étudiées les propriétés du plutonium et la production de quantités importantes d' ^{235}U par séparation électromagnétique. Lawrence venait de décider de transformer l'électro-aimant de son cyclotron en un séparateur d'isotopes.

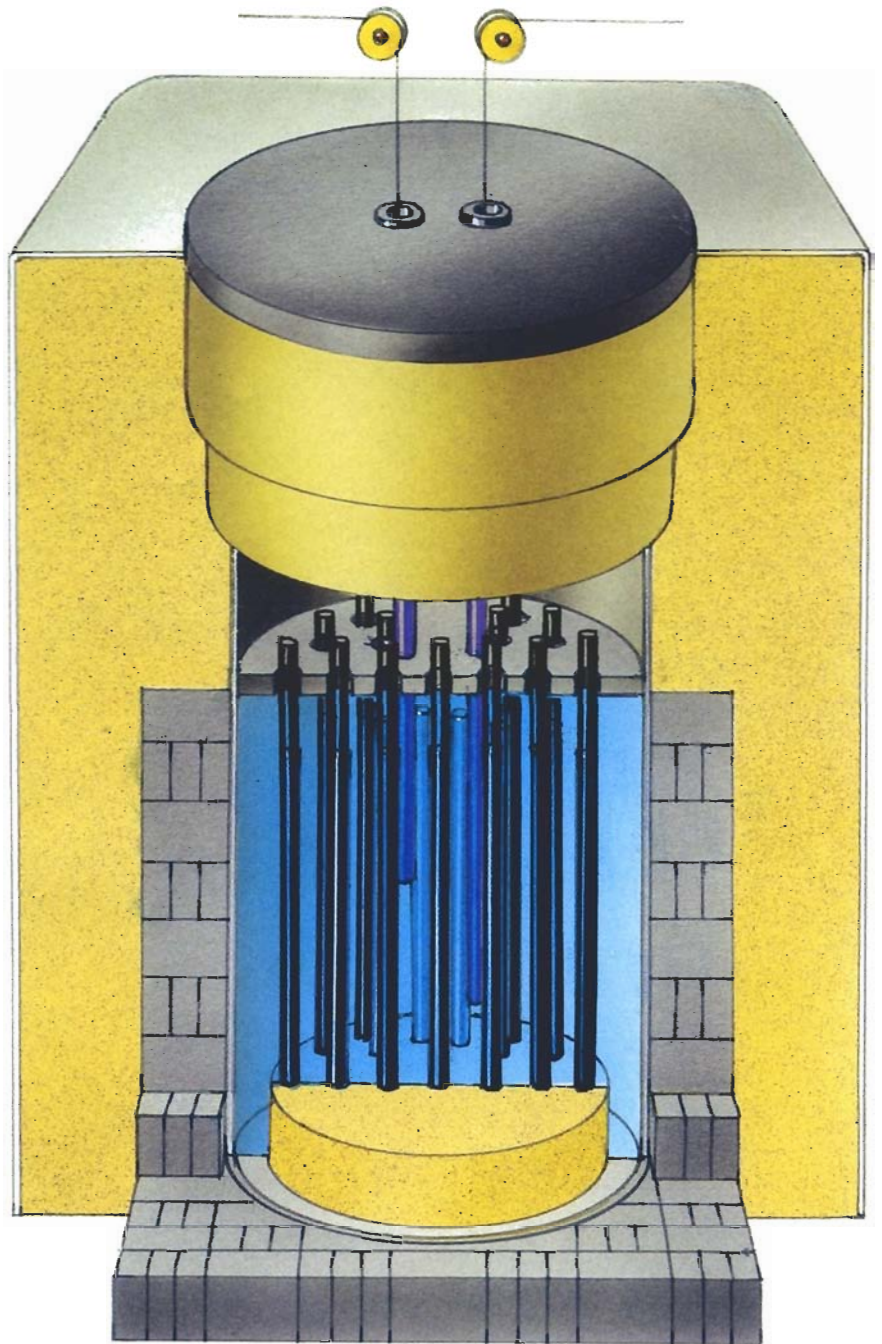
De son côté, A. H. Compton, à Chicago, fut chargé d'étudier les problèmes de physique de la réaction en chaîne et de réaliser une première pile atomique. Il concentra tous les travaux dont il était responsable à l'université de Chicago, dans ce qui fut appelé le laboratoire métallurgique. C'est là que se retrouvèrent les groupes de Fermi et de Szilard, les groupes de Columbia et de Princeton.

On voit ainsi se dessiner **les cinq méthodes** qui furent préconisées peu après par J. B. Conant : l' ^{235}U pouvait être séparé par **centrifugation, par diffusion ou par un procédé électromagnétique.**

Quant au plutonium, il pouvait être obtenu soit dans une pile **uranium plus graphite**, soit dans une pile **uranium plus eau lourde.**

Dans la course avec les Allemands, aucune de ces méthodes ne devait d'abord être sacrifiée aux autres. "Si la bombe atomique devait devenir une arme de guerre décisive, il n'y aurait virtuellement pas de limite aux efforts et aux budgets demandés. Mais on ne savait pas encore si l'arme pourrait être considérée comme décisive", écrit Groves.

Par la suite, deux méthodes de diffusion, **diffusion gazeuse d'une part et diffusion thermique dans un liquide**



DESSIN C. LAURENT / IACROIX

d'autre part, furent mises en œuvre. Au bout d'un certain temps, les Américains renoncèrent à la centrifugation, qui ne paraissait pas être opérationnelle avant la fin de la guerre. Ils renoncèrent aussi à la pile uranium et eau lourde lorsqu'il se fut avéré qu'une pile uranium et graphite fonctionnait. Au bilan, en 1944-1945, **quatre méthodes furent finalement employées en parallèle** pour produire les premières bombes atomiques.

DEUX PETITS BUREAUX, À WASHINGTON...

Le Projet Manhattan constitue, sans doute, la première grande entreprise de science lourde. Mais à toutes les caracté-

ristiques de ce type de recherche s'en ajoutaient deux particulières liées à son objectif militaire : **le secret et la rapidité.**

La nomination du général Leslie Groves marque la prise en main complète du projet par l'armée. Les scientifiques se trouveront désormais sous direction militaire.

Né en 1896, dans l'état de New York, d'une famille de militaires, Leslie R. Groves avait fait des études scientifiques à l'université de Washington et au M.I.T. avant d'entrer à l'École militaire de West Point. Au moment de sa nomination, il était l'adjoint au général du corps du génie, responsable des constructions.

Groves était de fait un remarquable organisateur de grand projet, dirigeant des

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ



LAB OF PUBLIC AFFAIRS OFFICE

milliers d'hommes, avec un sens aigu et permanent de l'objectif à atteindre. Il était probablement l'un des rares officiers capables de mener le projet à terme, comme la suite le démontrera. Il avait cepen-

dant une certaine méfiance à l'égard des scientifiques dont il voyait bien la nécessité et appréciait l'intelligence, mais dont il n'aimait pas le peu de sens de la hiérarchie : il souhaitait lui-même n'avoir affaire qu'aux responsables d'unités. Groves était aussi très soucieux des problèmes de sécurité et de secret. Rien ne devait filtrer vers l'extérieur. Chacun devait savoir à qui il avait à rendre compte, qui était son supérieur ; chacun devait connaître le strict minimum qui lui était nécessaire pour faire son travail et rien de plus. Pour cela, une "compartmentation" extrême fut introduite dans le projet, dont les scientifiques (et notamment Léo Szilard) souffrirent beaucoup. Il fallait faire vite, très vite, quels que soient les moyens humains et les dépenses mises en jeu. Groves obtint toutes les priorités nécessaires au plus haut niveau. Il écrit : "Alors que normalement la hâte conduit au gaspillage (haste makes

En septembre 1942, la direction du Projet Manhattan est confiée à l'armée. Le général Groves (au centre), entreprend la mise en place des unités de production industrielle de matériau fissile.

waste), dans ce cas, la hâte était essentielle." Après coup, on voit que si Groves avait à un moment quelconque perdu le but n'aurait pas été atteint. Il fallait sortir des

recherches en laboratoire, brûler les étapes, commencer à construire avant que les études ne soient achevées, donc avant même de savoir comment construire et quoi construire. Le résultat n'était guère acquis d'avance : jusqu'à l'essai d'Alamogordo en 1945, on ne fut jamais véritablement sûr que la bombe atomique fonctionnât réellement.

Groves, assez brutal et dépourvu de tact, terrorisait une partie de ses subordonnés auxquels il aimait rendre la vie difficile. Son manque de souplesse dut parfois être corrigé par les scientifiques responsables des laboratoires, tels que Compton ou Oppenheimer.

Pendant un certain temps, Groves dirigea le projet à partir de deux bureaux, situés au ministère de la Guerre. Au début de 1945, les deux bureaux étaient devenus sept. Groves n'aimait pas s'entourer de beaucoup de monde. Sa secrétaire devint son assistante administrative ; ses

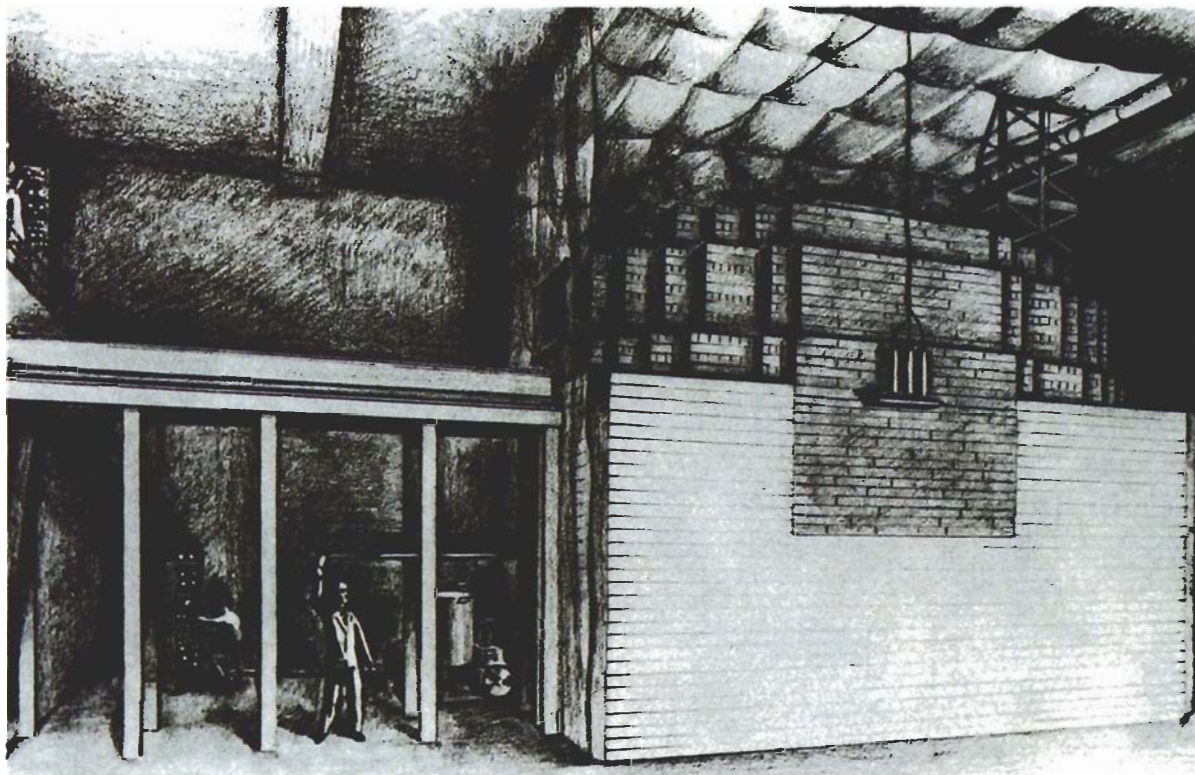
adjoints immédiats, des officiers, furent placés aux trois ou quatre points stratégiques des Etats-Unis.

**A NEW-YORK.
LE 18 SEPTEMBRE 1942...**

L'un des premiers soucis du général Groves fut de s'assurer de l'approvisionnement en uranium dont la production, en Amérique du Nord, était alors faible. Dans le monde, les principales mines étaient situées au Congo belge. Elles appartenaient à l'Union minière du Haut-Katanga. Comme nous l'avons dit, un des directeurs de cette société, E. Sengier, avait été mis au courant de l'importance de l'uranium par Frédéric Joliot, en 1939. Au début de la guerre, Sengier quitta Bruxelles pour New York où il resta jusqu'en 1945. Il avait auparavant donné l'ordre que le minerai restant dans l'usine d'Oolen, en Belgique, soit expédié outre-mer. Ses instructions ne furent toutefois pas exécutées assez rapidement, et ce stock tomba entre les mains des Allemands. Par contre, fin 1940, redoutant l'invasion allemande du Congo belge, Sengier avait fait transporter discrètement vers New York le minerai déjà extrait se trouvant sur le carreau de la mine de Shinkolobwe et l'avait fait entreposer dans des fûts à Staten Island. Il y avait là 1250 tonnes d'un minerai particulièrement riche en uranium. Par la suite, lors de discussions avec le Département d'Etat, Sengier avait en vain et à plusieurs reprises, proposé son uranium aux autorités américaines, mais les fonctionnaires, peu au courant des développements scientifiques, n'avaient pas réagi. Dès que le Manhattan District eut connaissance de cette possibilité, le colonel Nichols, adjoint de Groves, vint voir Sengier.

La rencontre eut lieu le 18 septembre 1942 et Nichols fut accueilli de la façon suivante : "Colonel, dites-moi d'abord si vous êtes venu ici simplement pour parler ou pour faire des affaires ?" Une heure plus tard, l'uranium était devenu la propriété du gouvernement des Etats-Unis

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ



LAB OF PUBLIC AFFAIRS OFFICE

DESSIN: CLAUDE LACROIX

de même que les droits sur le minerai congolais encore accessible.

Une première pile atomique, est construite à Chicago par E. Fermi (à droite) en 1942.

lui-même radioactif, avec une période nettement plus longue de 24300 ans. Le labora-

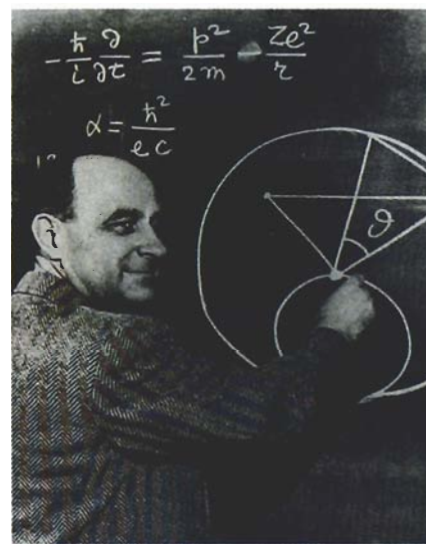
C'est ainsi que fut obtenue la matière première des travaux américains. Toutes les transactions financières à ce sujet furent tenues secrètes : l'objet des paiements fut simplement identifié par un numéro de code.

A CHICAGO, LA PREMIÈRE PILE ATOMIQUE...

Seaborg et ses collaborateurs, on s'en souvient, avaient découvert ^{239}Pu , plus fissile encore que ^{235}U . Le demi-microgramme obtenu à Berkeley leur permit d'étudier les propriétés chimiques du nouvel élément. La manière la plus efficace pour le produire était cependant la réaction en chaîne. Les neutrons absorbés dans ^{238}U forment ^{239}U , radioactif de 23,5 minutes de période qui, par décroissance radioactive devient ^{239}Np radioactif de 2,4 jours de période. Ce dernier, à son tour, se transforme en ^{239}Pu ,

toire métallurgique de Chicago reçut alors pour tâche de réaliser une réaction en chaîne divergente, c'est-à-dire de construire une première pile atomique, puis de montrer comment on pourrait séparer chimiquement le plutonium, de déterminer toutes les données nécessaires à une réaction en chaîne explosive et de préparer les plans pour la production de plutonium à grande échelle.

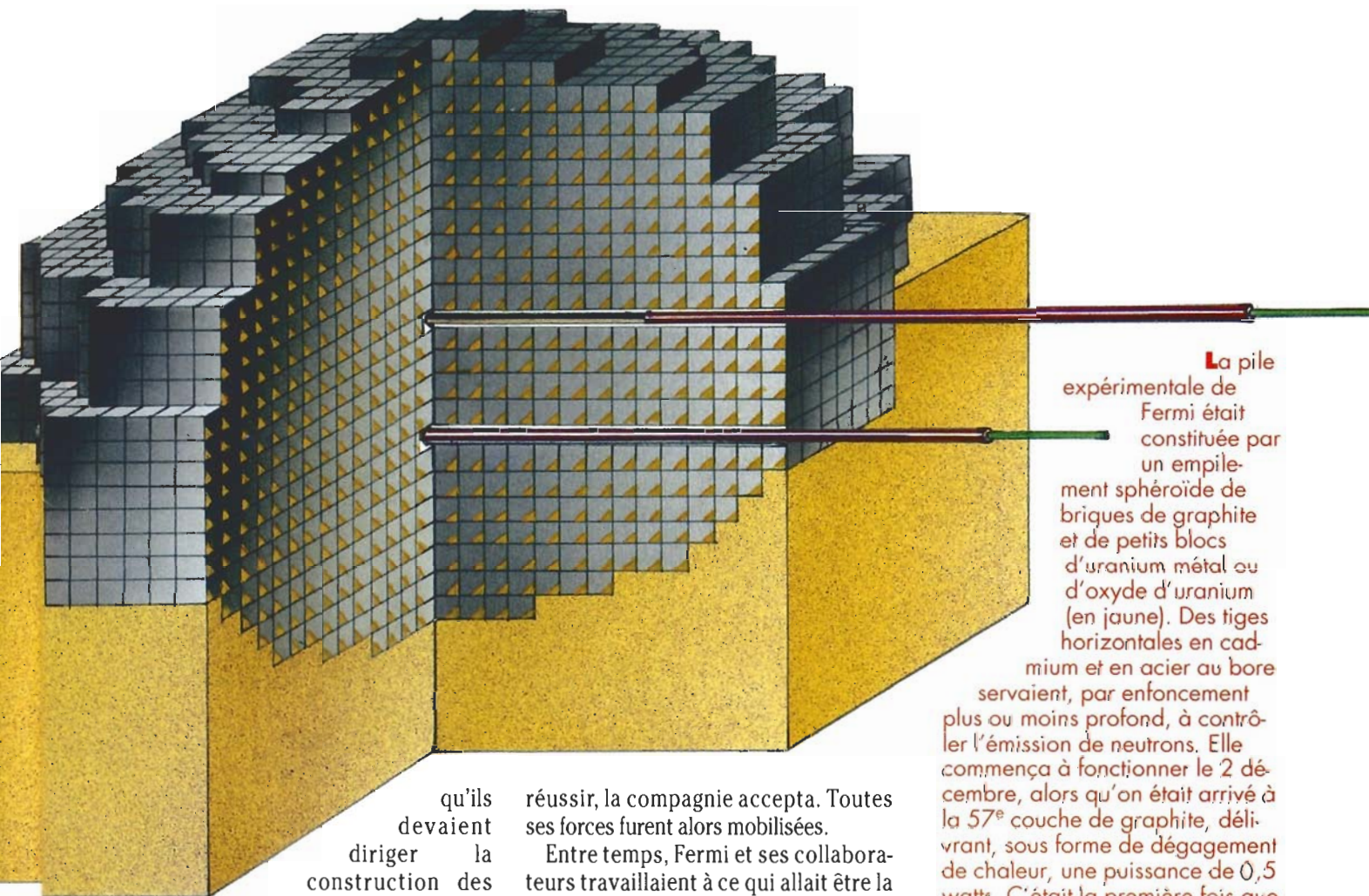
Dès le 5 octobre 1942, Groves se rendit à Chicago où il fut reçu par Compton et eut une longue discussion avec une quinzaine de physiciens seniors du laboratoire. Figuraient parmi eux Enrico Fermi et James Franck, Eugène Wigner et Léo Szilard. Tous les faits connus sont passés en revue ainsi que les théories et les hypothèses. On indique à Groves le nombre de kilogrammes que l'on estime devoir être nécessaire à une bombe au plutonium et à une bombe à ^{235}U . A la fin de la réunion, Groves s'inquiète de la préci-



LAB OF PUBLIC AFFAIRS OFFICE

sion d'une telle estimation. A son grand effroi, on lui répond qu'elle est bonne à un facteur 10 près. En fait, cette imprécision subsista pendant deux ans et demi.

On commença à étudier et à définir les grandes piles de production de plutonium **avant même d'avoir réussi à faire fonctionner la première pile expérimentale**. Les scientifiques pensaient



La pile expérimentale de Fermi était constituée par un empilement sphéroïde de briques de graphite et de petits blocs d'uranium métal ou d'oxyde d'uranium (en jaune). Des tiges horizontales en cadmium et en acier au bore servaient, par enfoncement plus ou moins profond, à contrôler l'émission de neutrons. Elle commença à fonctionner le 2 décembre, alors qu'on était arrivé à la 57^e couche de graphite, délivrant, sous forme de dégagement de chaleur, une puissance de 0,5 watts. C'était la première fois que le principe de la réaction en chaîne était mis en œuvre.

qu'ils devaient diriger la construction des usines de production, mais Groves fut d'un avis contraire. Il lui apparaissait évident que, seule, une grande entreprise industrielle serait capable de mener à bien cette deuxième étape ; aussi s'adressa-t-il à la société Du Pont de Nemours, sans doute une des plus grandes compagnies chimiques du monde. Il eut toutefois du mal à faire cesser la grogne des scientifiques et à obtenir de Du Pont qu'elle accepte la tâche.

Ces grandes piles atomiques seraient constituées de barreaux d'uranium introduits dans du graphite très pur avec un refroidissement adéquat. Il fallait pouvoir décharger et recharger les barreaux d'uranium, dans un milieu extrêmement radioactif, puis traiter chimiquement l'uranium et les produits de fission pour en extraire le plutonium lui-même, très radioactif. Il fallait étudier, construire puis faire fonctionner l'ensemble. Les experts de Du Pont et son président, Walter S. Carpenter junior, hésitèrent car s'ils avaient une grande expérience en chimie, ils n'en avaient aucune en physique nucléaire. Finalement, et en dépit de tous les risques dont celui de ne pas

réussir, la compagnie accepta. Toutes ses forces furent alors mobilisées.

Entre temps, Fermi et ses collaborateurs travaillaient à ce qui allait être la première pile atomique du monde. Elle devait d'abord être construite dans la forêt d'Argonne, à 25 kilomètres de Chicago. Un montage expérimental pour la réaction en chaîne avait toutefois été mis en place sous le stade de squash de l'université de Chicago. Les travaux de construction, à Argonne, avaient du retard. Et pourtant, le graphite très pur venait d'arriver. Compton demanda : "Pourquoi attendre Argonne ?" Après quelques expériences préliminaires, les physiciens décidèrent d'aller de l'avant sous le stade et, le 2 décembre 1942, la pile atomique expérimentale de Fermi entra en fonctionnement, donnant un excédent d'énergie d'un demi-watt. Compton envoya le message codé de réussite suivant : "Le navigateur italien vient de débarquer dans le nouveau monde. Les indigènes sont bienveillants".

Cette pile avait la forme d'un sphéroïde aplati au sommet. A l'intérieur, les briques de graphite alternaient avec les lingots d'uranium ou d'oxyde d'uranium (car on n'avait pas encore assez d'uranium métal) formant un réseau cubique. On avait empilé lentement ces briques et

ces lingots ; la dimension critique fut atteinte lorsque la pile arriva aux trois-quarts des dimensions prévues. On ajouta ensuite une seule couche. La pile contenait un peu plus de six tonnes de métal. La sphère de graphite était supportée par un échafaudage en bois. Le contrôle était assuré par des tiges de cadmium et d'acier au bore que l'on pouvait enfoncer plus ou moins dans la pile. Celle-ci fut finalement facile à contrôler.

A CLINTON, DANS LE TENNESSEE ,
PUIS À HANFORD DANS L'ETAT
DE WASHINGTON...

Il y eut là de quoi rassurer les ingénieurs de Du Pont, jusque-là un peu sceptiques. Pour vérifier et tester les conditions de production et d'extraction du plutonium, une deuxième pile expérimentale un peu plus grande, mais toujours refroidie par air, fut alors construite sur un très grand terrain acquis au cours

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ

de l'été dans l'Etat du Tennessee, près de la petite ville de Clinton. C'était une zone rurale peu peuplée ; les moyens de communication étaient bons ; une rivière permettait d'obtenir l'eau de refroidissement. Il fallut construire des logements pour le personnel à venir et le site reçut alors le nom d'Oak Ridge.

Un site différent fut choisi pour les **grandes piles de production de plutonium et les installations de séparation chimique** de ce produit particulièrement dangereux. Il fallait, pour celles-ci, un approvisionnement en eau extrêmement important (plus de 100 000 litres par minute). De plus, on avait besoin d'au moins 100 000 kilowatts d'électricité. Aucun village

site 80 kilomètres de lignes supplémentaires à 230 000 volts.

Trois piles de grande puissance furent alors mises en chantier. Pour des raisons de sécurité jugées par la suite excessives, elles étaient séparées d'un peu plus de neuf kilomètres. Le laboratoire métallurgique de Chicago devait définir ces réacteurs et faire les calculs nécessaires. Par suite de la grande énergie thermique dégagée, les piles devaient être efficacement refroidies.

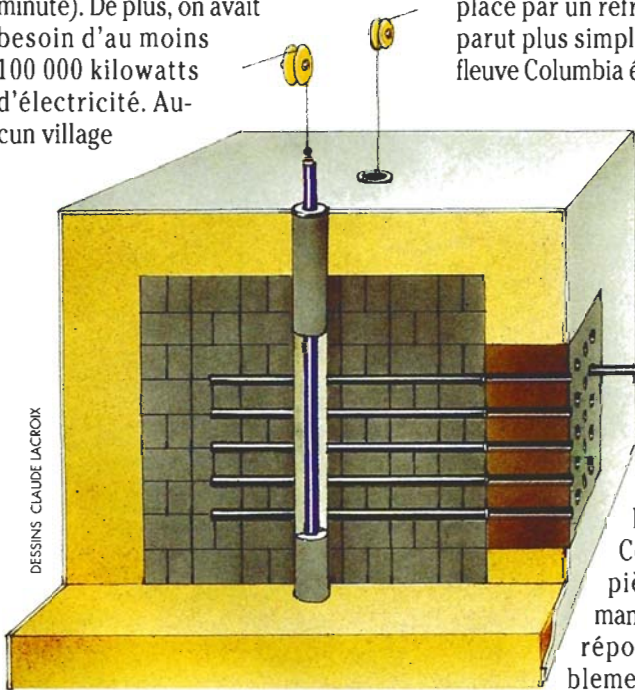
On pensa d'abord à un refroidissement à l'hélium, mais celui-ci fut abandonné en février 1943 pour être remplacé par un refroidissement à eau qui parut plus simple. Par chance, l'eau du fleuve Columbia était très pure ; à un moment donné, on craignit pourtant que cette pureté ne soit pas suffisante et l'on envisagea la construction d'une usine de déionisation de l'eau. Une nuit,

Groves discutait de ce problème avec l'ingénieur responsable, lorsque N. Hilbery, l'assistant de Compton, entra dans la pièce. Groves lui demanda son point de vue. La réponse fut que, probablement, la déionisation ne

serait pas nécessaire, mais que si jamais elle l'était, on ne pourrait pas s'en passer. Groves donna alors à l'ingénieur l'ordre de faire construire immédiatement l'installation. Hilbery lui demanda le coût de l'opération. La réponse fut : "Entre 6 et 10 millions de dollars (de l'époque)". Hilbery répliqua : "Je suis heureux de ne pas avoir connu ce montant au moment où je vous ai donné mon avis". Et l'installation fut construite, qui s'avéra par la suite inutile.

Le réseau des piles consistait en tiges d'uranium insérées dans un modérateur de graphite formant des ensembles à symétrie cylindrique. L'uranium fut manufacturé en barreaux, chacun entouré d'une gaine, ce qui posa quelques problèmes, car une partie des produits de fission formés dans l'uranium par la réaction en chaîne est constituée de gaz rares qui demeurent occlus dans le matériau et provoquent un gonflement des barreaux.

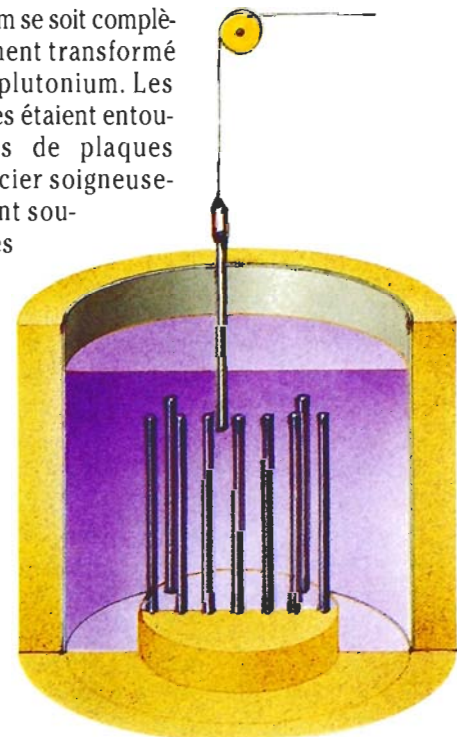
L'uranium devait reposer quelque temps après son déchargement avant d'être traité chimiquement, en attendant que le neptunium formé dans l'uranium se soit complètement transformé en plutonium. Les piles étaient entourées de plaques d'acier soigneusement soudées

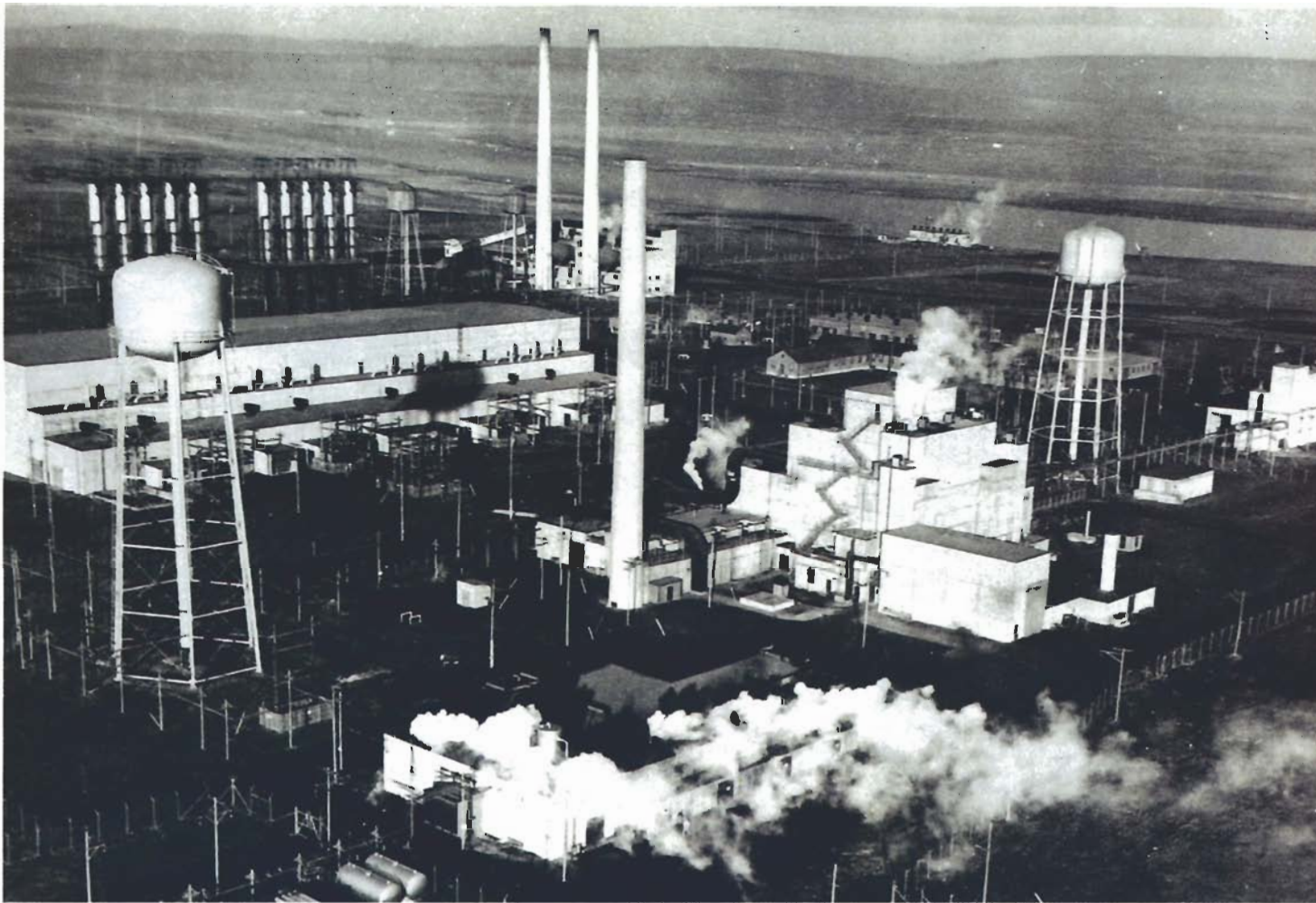


de plus de mille habitants ne devait être à une distance inférieure à trente kilomètres. La puissance de chaque pile atomique (réacteur) devait être assez importante pour que la réaction en chaîne produise suffisamment de plutonium.

Pour satisfaire ces contraintes, le gouvernement américain fit l'acquisition d'un terrain de 200 000 hectares à Hanford, au nord-ouest des Etats-Unis, dans l'Etat de Washington, sur le fleuve Columbia. Les lignes à haute tension du barrage de Grand Coulee passaient à proximité, mais on dut construire sur le

Le réacteur-pilote d'Oak Ridge (uranium-graphite) fut conçu pour l'étude de la production de plutonium. Il renfermait, dans une enveloppe de béton, un cube de graphite de 8m de côté percé de 1248 canaux. Des barres d'uranium-métal pouvaient y être insérées et retirées après irradiation. Les barres radioactives étaient déposées dans une cuve souterraine (à droite), le temps nécessaire à la transformation du neptunium en plutonium. La pile d'Oak Ridge délivrait 1 800 kW à plein rendement.





entre elles. Ce blindage devait être étanche à l'air dont l'azote devenait radioactif par le flux intense de neutrons.

L'uranium était acheminé jusqu'aux trois usines de séparation par des wagonnets de chemin de fer ; chacune de ces usines était une structure en béton d'environ 250 mètres de long, ressemblant à un canyon semi-enterré composé de compartiments entourés de murs de béton de plus de deux mètres d'épaisseur, servant aux opérations chimiques successives. L'uranium arrivant par un bout, était d'abord mis en solution ; il y avait ensuite précipitation, puis oxydation ou réduction. La solution était pompée d'un compartiment au suivant. Par suite de la radioactivité, on devait opérer par télécommande. Le plutonium est extrêmement dangereux par ingestion. Les produits de fission qui demeurent dans la séparation provoquent une grande corrosion, à cause de leur énorme radio-

C'est à Hanford (Etat de Washington) que les réacteurs destinés à produire le plutonium sont implantés. L'unité ci-dessus fonctionnera à plein rendement à partir de décembre 1944.

activité. L'uranium étant précieux, il fallait le récupérer dans le processus. Il y eut sur place une section de radioprotection et de contrôle sanitaire. Toute une procédure dut être mise au point pour éviter des accidents de santé.

Jusqu'à 45 000 personnes, logées à proximité de Hanford, travaillèrent à la construction des installations. Le personnel comprenait plusieurs milliers de femmes qui se sentaient isolées dans cet endroit perdu, une sorte de plateau couvert d'arbustes de sauge. Un responsable fut chargé de veiller au moral du personnel et de recevoir les doléances. On installa un salon de coiffure et des magasins de vêtements. Un service spécial de bus, dont certains réservés aux femmes, conduisait à la petite ville la plus proche, distante de 70 kilomètres.

C'est à Hanford que fut fabriqué le plutonium utilisé dans l'essai d'Alamogordo et dans la bombe de Nagasaki.

L'URANIUM 235 ET LA SÉPARATION DES ISOTOPES : À OAK RIDGE, UNE PREMIÈRE USINE, Y-12...

La deuxième voie pour réaliser une bombe consistait à séparer en quantité suffisante l'uranium 235, peu abondant, de l'uranium naturel. 235U et 238U sont des isotopes du même élément chimique, ce qui signifie qu'**aucune méthode chimique ne permet de les séparer et qu'il faut faire appel à une méthode physique**. C'est la masse qui distingue les deux isotopes, mais cette différence de masse n'est que de 3/238, soit 1/80.

Les trois méthodes de séparation les plus prometteuses étaient la centrifugation, la séparation électromagnétique et la diffusion. Dans le premier cas, l'uranium, sous une forme chimique appropriée, est placé dans une centrifugeuse tournant à grande vitesse : les molécules de l'isotope lourd se déplacent davantage vers la périphérie. Cette méthode fut cependant abandonnée ultérieure-

Séparation par centrifugation. L'uranium est placé sous forme liquide dans un cylindre en rotation rapide. Le ^{238}U , plus lourd, se déplace vers la périphérie.

ment, car elle ne semblait pas devoir conduire assez rapidement à des résultats.

Bien que très onéreuse, la méthode la plus directe paraissait être la **séparation électromagnétique**. En tête du séparateur se trouve une source d'ions comportant de l'uranium

(sous forme d'un sel) auquel on arrache des électrons.

On a alors affaire à des ions d'uranium chargés positivement que l'on va accélérer à travers une différence de potentiel établie entre deux fentes. On obtient ainsi un faisceau que l'on fait passer à travers un champ magnétique qui lui est perpendiculaire. Les trajectoires suivies sont circulaires. Les ions les plus légers d' ^{235}U se trouveront sur des cercles de rayon plus petit que les ions d' ^{238}U . Les ions de même charge mais de masse différente provenant de la source vont se trouver concentrés - on dit focalisés - après une demie circonférence. Les points de focalisation correspondant aux différentes masses sont séparés les uns des autres. Il suffit alors d'arrêter ^{238}U et de ramasser ^{235}U dans un collecteur placé au bon endroit.

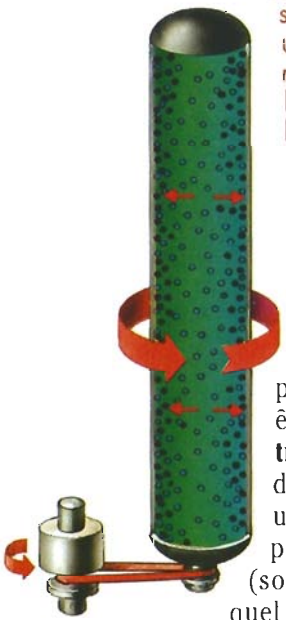
Cette méthode fut d'abord utilisée dans des spectromètres de masse. Le séparateur, quant à lui, traite des quantités

Séparation électromagnétique des isotopes. Dans une chambre à vide placée entre les pôles d'un électro-aimant (gris), une source (en rouge) injecte l'uranium sous forme de molécules ionisées. Celles-ci sont accélérées par application d'une différence de potentiel électrique. Le faisceau d'ions, infléchi par le champ magnétique, adopte un rayon de courbure légèrement différent suivant la masse des atomes. Les ions ^{235}U se retrouvent ainsi concentrés dans le collecteur (au centre).

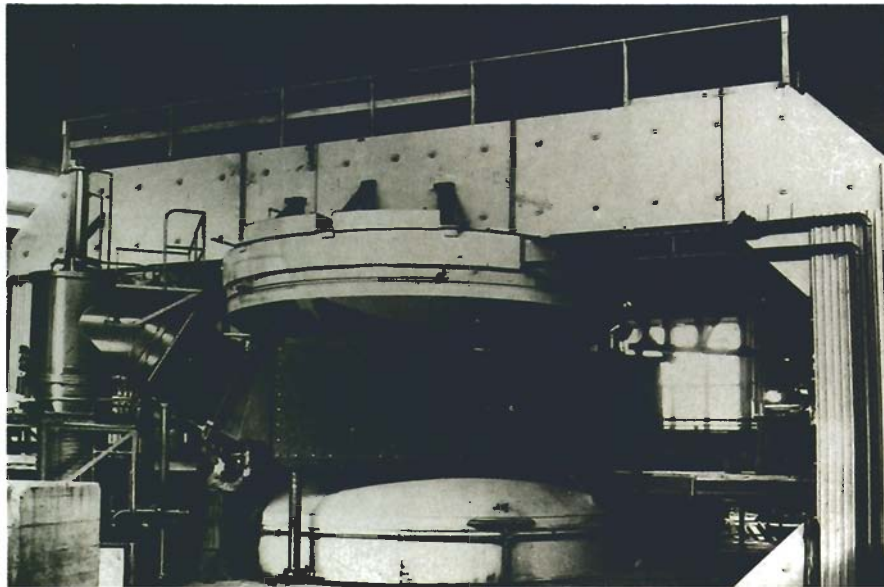
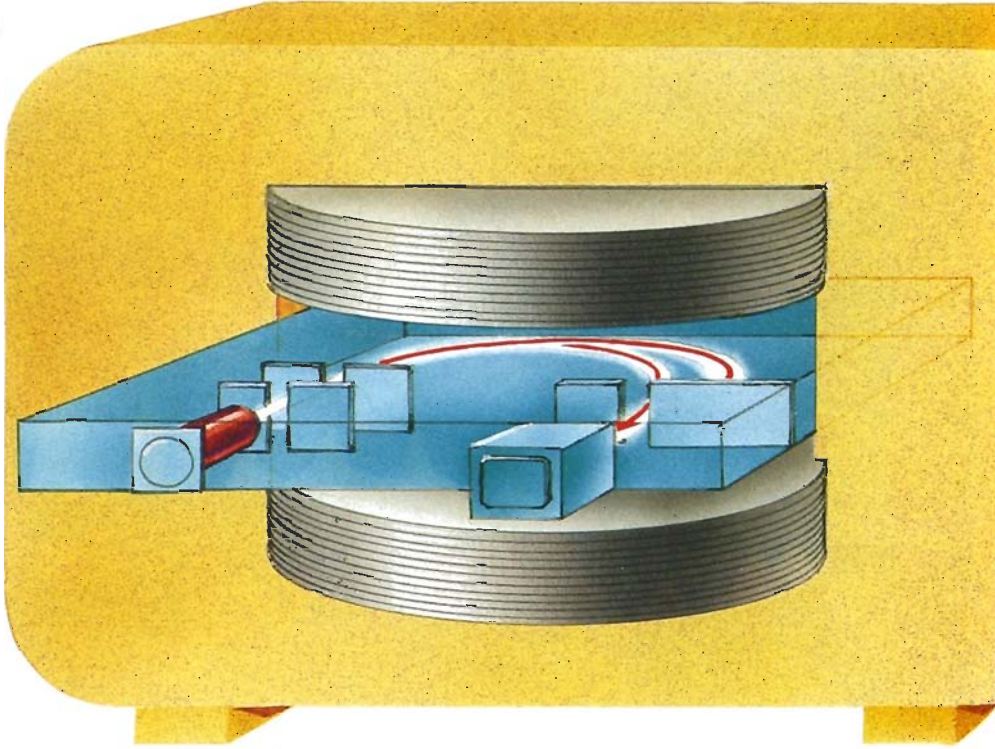
pondérables. La séparation est très bonne, mais le rendement très faible. Très bonne ne veut cependant pas dire 100 %. Pour arriver à une séparation encore meilleure, il faudra faire repasser le produit une ou deux fois dans le dispositif. D'autre part, le produit devenant de plus en plus précieux, compte tenu du travail fourni pour le séparer, il faudra le récupérer avec soin, non seulement au fond du collecteur mais partout où il se

sera déposé. Dans le spectromètre de masse de Nier, il fallait vingt heures pour obtenir un microgramme d' ^{235}U .

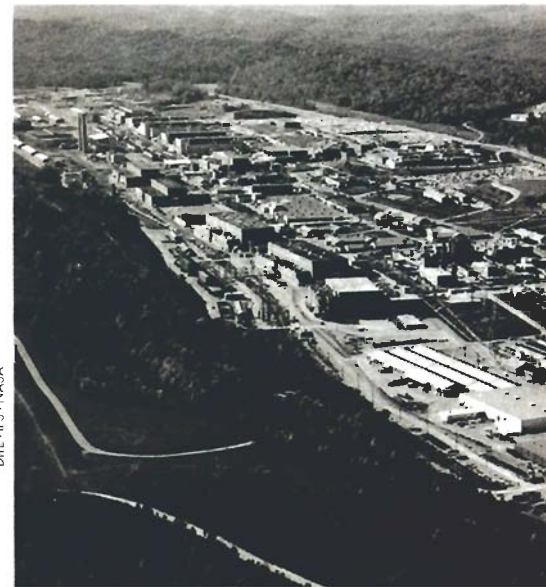
E. O. Lawrence, à Berkeley, n'hésita pas. Il décida de consacrer l'électro-aimant d'un mètre de diamètre du cyclotron à la séparation des isotopes de l'uranium. Ce fut ce que l'on appela le CALUTRON (CALifornia University CYCLOTRON). Le cyclotron fut démonté en novembre 1942 et transformé en sépara-



DESSINS CLAUDE TACROIX



LAB OF PUBLIC AFFAIRS OFFICE



DATE: IPS - NASA

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ

teur. Il fallait trouver le bon collecteur, récupérer l'uranium perdu, avoir une source et un faisceau intenses.

Un nouveau problème apparut alors, car les ions chargés positivement ont tendance à se repousser les uns les autres, c'est ce qu'on appelle l'effet de charge d'espace. Le groupe de Lawrence trouva la parade : la neutralisation de la charge d'espace par des électrons. Tous les chercheurs du laboratoire des rayonnements de Berkeley furent mobilisés. On était cependant encore loin des quantités nécessaires aux besoins militaires.

Il y avait en construction, à Berkeley, un électro-aimant de 5m de diamètre, destiné à un cyclotron géant. Il fut à son tour rapidement transformé. Comme il était difficile de construire rapidement des électro-aimants, on s'efforça de faire fonctionner un même aimant avec plusieurs sources d'ions. Au début, seul Lawrence était certain de réussir, les autres étant plus sceptiques.

Dès lors, le problème paraissait, en principe, résolu. Si une seule unité pouvait produire 10 mg par jour, 1000 unités produiraient 1 kg en 100 jours.

Ce fut le raisonnement suivi et on décida de construire des ensembles de séparateurs électromagnétiques aux Clinton Engineers Works à Oak Ridge.

Groves, dès le 5 novembre 1942, décida que les premiers modèles construits là ne comporteraient plus de modification. Cependant, l'équipe des physiciens de Berkeley continua à perfectionner le système. Ce fut l'une des installations les plus importantes d'Oak Ridge. On l'appela du nom de code Y 12.

La construction commença en février 1943 et les premières unités purent fonctionner en novembre de la même année. Il fallait mettre en œuvre des techniques de forts champs magnétiques, de haute tension, de vide poussé et, de plus, assurer un fonctionnement complexe avec des techniciens bien formés.

La compagnie Westinghouse construisit tout ce qui était mécanique, la General Electric, l'équipement électrique et les contrôles, Allis Chalmers les électro-aimants, Stone et Webster réalisèrent les assemblages. Le fonctionnement fut

confié à Tennessee Eastman, une filiale d'Eastman Kodak. Des ingénieurs des cinq compagnies vinrent à Berkeley et des physiciens allèrent à Oak Ridge pour assurer la liai-

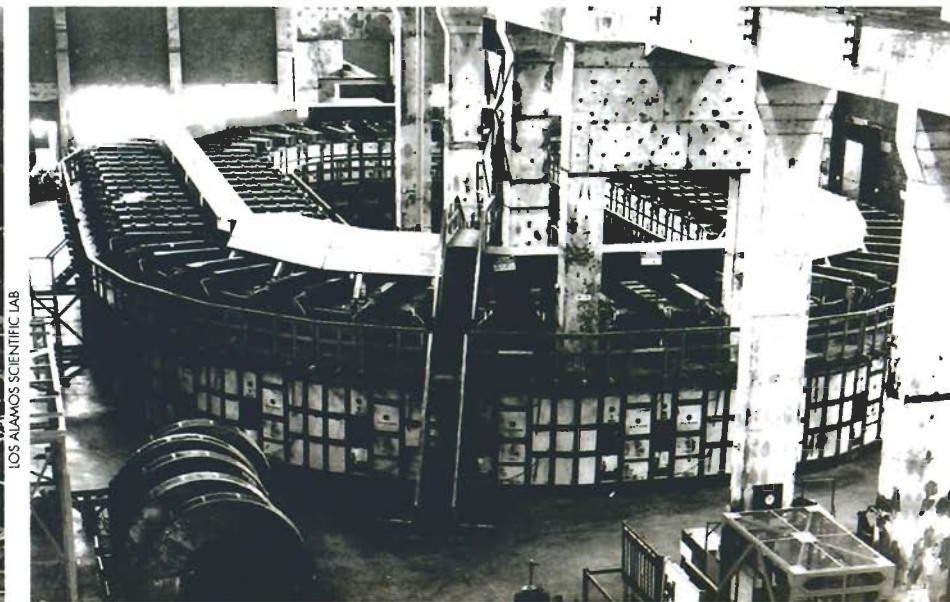
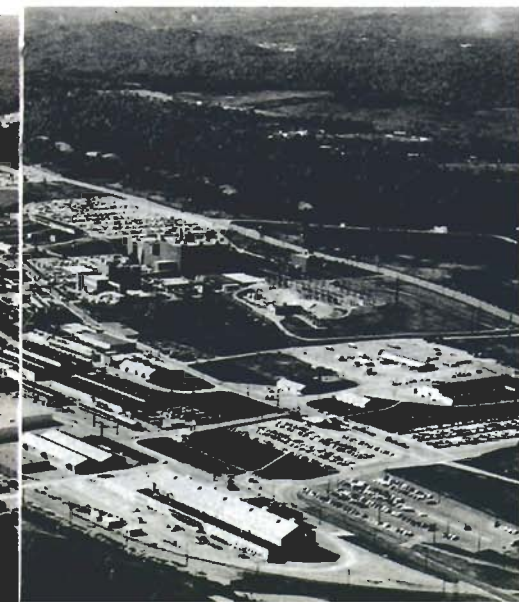
son. Des centaines de millions de dollars furent dépensés pour la séparation électromagnétique.

Pour parvenir à l'enrichissement nécessaire, on décida de travailler par étages successifs, appelés alpha et bêta. L'installation alpha permettait d'obtenir un produit déjà riche en ^{235}U , mais insuffisamment encore pour une bombe. Les séparateurs alpha furent placés les uns à côté des autres selon de grands ovales qui furent appelés champs de course. Il y avait 96 aimants par ovale, cinq bâtiments alpha comportant neuf champs de course au total et trois bâtiments bêta avec huit champs de course. Bien sûr, il fallait également des laboratoires de chimie, énormément de tuyauterie, des systèmes de pompage complexes, une grande variété de matériel électrique, le tout formant un labyrinthe.

Il y eut à Oak Ridge jusqu'à 24 000 employés. Encore une fois, la construction et l'organisation avaient dû débiter avant même que l'on sache tout ce qui serait nécessaire. On y avait naturellement construit des magasins pour les pièces détachées, y compris les pièces de rechange en cas de panne. A l'intérieur de cette enceinte protégée, les pièces technologiquement les plus secrètes, se trouvaient dans des magasins spéciaux placés sous garde armée.

Les aimants, dont la dimension globale était de plus de 6 m x 6 m x 0,7 m, furent mis en place dès que le toit en béton fut

La séparation électromagnétique est expérimentée en nov. 1942 sur le Calutron de Lawrence (à gauche). L'usine Y-12 de séparation électromagnétique d'Oak Ridge fonctionnera à partir de nov. 43 (au milieu). A droite, une unité "alpha" d'enrichissement, comprenant 96 aimants disposés en ovale.



LOS ALAMOS SCIENTIFIC LAB

LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ

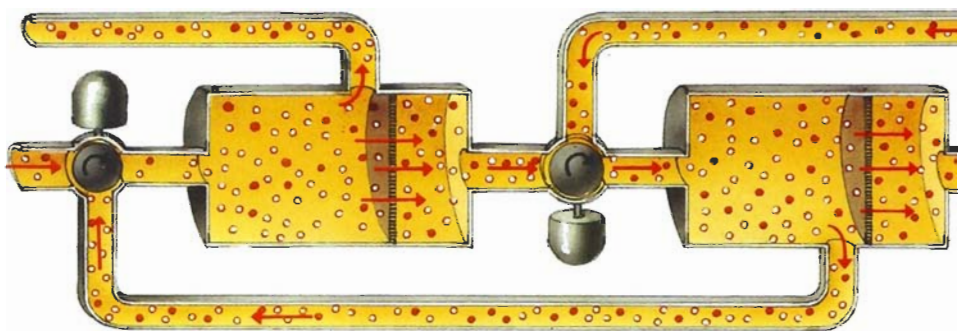
coulé et les ponts roulants installés. On eut bien sûr à corriger des erreurs. Ainsi les bobinages des premiers aimants furent rapidement en court-circuit, par suite de défauts de conception. Ils furent alors renvoyés à leur fabricant pour être modifiés et nettoyés.

Il fallait récupérer les plus petites quantités d'uranium, en particulier ^{235}U enrichi, sur les tuyauteries, les filtres, les gants de caoutchouc, les vêtements... Des inventaires des cycles alpha et bêta furent établis à intervalles réguliers.

Pour réaliser les bobinages électriques des aimants, des quantités très importantes de cuivre étaient nécessaires. Comme le cuivre était rare, l'administration décida qu'il serait remplacé par de l'argent emprunté au Département du Trésor des Etats-Unis. Plus de 14 000 tonnes d'argent furent ainsi mises à la disposition du Manhattan District. Au début des négociations, Nichols demanda des millions de tonnes d'argent. La réponse glaciale fut : "Colonel, au Trésor, nous ne parlons pas de tonne d'argent. Notre unité est l'once de Troy (31 grammes)".

Cette opération sur l'argent fut évidemment tenue secrète ; il fut convenu que le Manhattan District devrait, six mois après la fin de la guerre, rendre le métal prêté. Cela impliquait une surveillance et une garde très serrées. Finalement, sur les 300 millions de dollars d'argent métal qui furent ainsi empruntés, la perte ne fut que de 0,35 pour mille.

En dehors de la valeur de l'argent emprunté au Trésor public, le coût total de



DESSINS CLAUDE LACROIX

La séparation par diffusion gazeuse. Le composé gazeux d'uranium est pompé à travers des milliers de parois poreuses disposées en cascades. Les molécules plus légères de ^{235}U traversent plus facilement les parois que celles de ^{238}U . L'enrichissement en ^{235}U s'accroît ainsi d'étage en étage.

l'opération Y - 12, un an après la fin de la guerre, dépassa largement 500 millions de dollars.

C'est en mars 1944, quatre mois seulement après la mise en service de l'usine que fut effectuée la première livraison d'une petite quantité d'uranium enrichi à Los Alamos, l'énorme laboratoire où furent construites les bombes.

A OAK RIDGE, UNE DEUXIÈME USINE, K-25...

A Oak Ridge fut également construite l'usine appelée K-25 pour la séparation de ^{235}U par **diffusion gazeuse**.

Cette méthode repose sur le fait que si l'on pompe de l'uranium naturel sous forme d'un composé chimique gazeux - l'hexafluorure d'uranium - à travers une "barrière" poreuse, les

molécules les plus légères, celles contenant de ^{235}U , traversent plus rapidement la barrière que les molécules plus lourdes de ^{238}U . Le problème était de trouver la barrière appropriée. Ce devait être une feuille métallique ou une membrane comportant des centaines de milliers de petits trous par cm^2 , chaque trou ayant un diamètre de l'ordre de 1/100 de micron. Ces feuilles étaient contenues dans des enceintes étanches.

Pour réaliser la séparation, il faut utiliser des milliers de parois poreuses placées en cascade, c'est-à-dire employer le processus de différenciation par diffusion gazeuse des milliers de fois. L'enrichissement en ^{235}U augmente d'étage en étage.

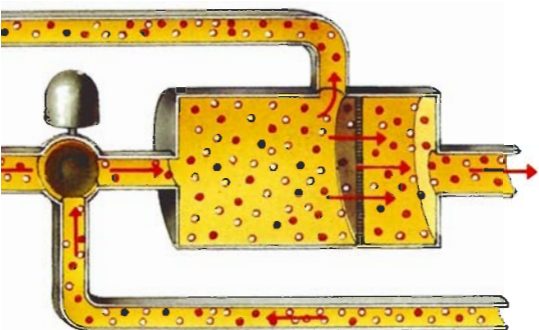
Une filiale de Kellogg fut chargée de ce projet ; Union Carbide and Carbon Corporation prit en charge le fonctionnement de l'usine. On construisit une partie importante de l'usine et on acheta l'équipement nécessaire avant même d'avoir su produire le matériau convenable pour les parois poreuses. Celles-ci ne furent fabriquées en série qu'à partir de la fin 1944. Le gaz en mouvement à travers l'installation tantôt se trouve à

basse pression, tantôt doit être recomprimé. Des milliers de

L'usine K-25 de séparation par diffusion gazeuse.



LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ



pompes de différentes dimensions étaient donc nécessaires et un système de refroidissement pour le gaz devait être prévu. Les centaines de kilomètres de tuyauterie devaient être complètement étanches. Pour résoudre ce problème extrêmement difficile à l'époque, on mit au point un détecteur de fuites à hélium comportant un petit spectromètre de masse.

Groves et ses officiers, ayant une peur constante du sabotage, avaient installé des dispositifs de sécurité et des gardes armés à tous les points sensibles.

Un an après la fin de la guerre, 275 millions de dollars avaient été dépensés pour le projet K-25.

Pour l'élaboration du processus de diffusion gazeuse, il y eut des discussions avec les représentants britanniques qui avaient travaillé sur ce sujet et qui furent mis au courant en détail du projet américain. Cependant, les solutions techniques envisagées par les Anglais, différentes de celles des Américains, ne furent pas retenues.

A OAK RIDGE, UNE TROISIÈME USINE : S-50

La **diffusion thermique** dans les liquides fut la troisième méthode de séparation mise en œuvre à Oak Ridge. Ce programme porta le nom de code de S-50. C'est sous la conduite de P. H. Abelson qu'avaient été menés, dès 1940, les essais et les expériences pour séparer les isotopes d'uranium par diffusion thermique dans l'hexafluorure liquide d'uranium. Commencés au National Bureau of Standards et à l'Institut Carnegie à Washington, puis financés par la Marine au Naval Research Laboratory, ces travaux avaient progressé de façon régulière, mais n'avaient pas été considérés

comme spectaculaires. Un prototype était en construction au chantier naval de Philadelphie.

Une colonne est remplie du liquide où s'opère la diffusion. Elle consiste en un long tube vertical refroidi extérieurement et comportant un cylindre concentrique chaud à l'intérieur. Les molécules contenant l'isotope léger ^{235}U se concentrent près de la surface chaude et tendent ensuite à monter vers le haut. L'enrichissement obtenu est faible mais l'installation est moins coûteuse que les autres et plus rapide à construire.

En juin 1944, Oppenheimer, qui dirigeait le laboratoire de Los Alamos, eut l'idée que le processus de diffusion thermique pourrait servir de **première étape dans le processus d'enrichissement**. Cette substance enrichie serait ensuite utilisée comme produit de départ pour les autres méthodes de séparation. Cette combinaison de deux méthodes fut très efficace et donna une plus grande quantité d' ^{235}U avec un enrichissement notablement plus élevé. Personne n'y avait pensé jusqu'alors. Dès que la suggestion fut faite, elle fut réalisée.

Dès la fin juin 44, la compagnie Ferguson fut chargée de réaliser une installation de diffusion thermique. Les colonnes devaient être des copies conformes de celles de Philadelphie comportant des tubes en nickel entourés par des tubes de cuivre, eux-mêmes entourés de chemises d'eau, le tout à l'intérieur de tuyaux de fer galvanisé de 10 cm de diamètre. Les colonnes de séparation, dont chacune atteignait 15 mètres de haut, furent assemblées par groupes de 102, appelés racks. Il y eut, au total, 2142 colonnes. La construction fut réalisée en quatre mois. Au début, l'ensemble était entouré d'une énorme quantité de vapeur et faisait un bruit d'enfer. On le plaça près de l'usine K-25 de manière à utiliser la vapeur de la centrale électrique construite pour l'usine de diffusion gazeuse.

Un groupe de scientifiques et d'ingénieurs fut constitué pour calculer la meilleure manière de combiner les trois

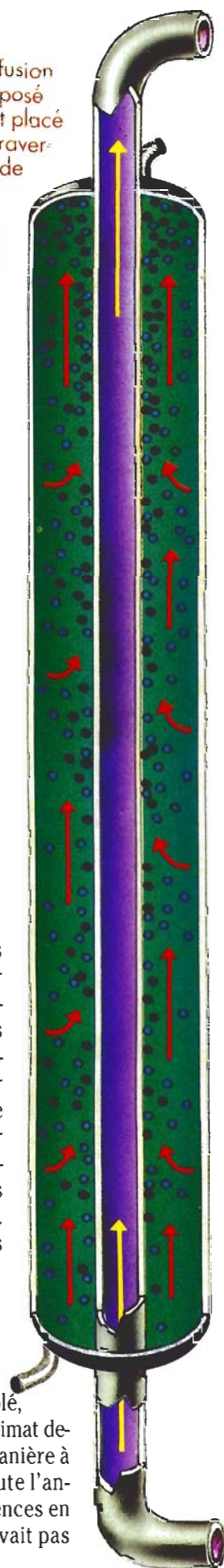
Séparation par diffusion thermique. Le composé d'uranium liquide est placé dans une colonne traversée par un conduit de vapeur chaude. Les parois sont refroidies extérieurement. L'isotope léger ^{235}U se concentre près de la surface chaude et monte vers le haut de la colonne où il est recueilli.

méthodes afin d'obtenir le plus rapidement possible le ^{235}U séparé en quantité suffisante. A la fin de la journée du 24 juillet 1945, un peu plus de la quantité de ^{235}U nécessaire à la bombe d'Hiroshima fut transporté d'Oak Ridge vers Los Alamos.

A LOS ALAMOS, DANS LE NOUVEAU- MEXIQUE : LE PROJET Y...

Une fois produites les matières premières pour les bombes, il fallut déterminer les quantités des deux produits fissiles nécessaires pour chacune d'elles, de quelle manière réaliser la réaction en chaîne explosive et construire les mécanismes appropriés. Ce furent là les tâches de l'énorme ensemble de laboratoires construits à Los Alamos, qui fut baptisé projet Y.

Le site devait être isolé, loin de tout village ; le climat devait être tempéré de manière à pouvoir construire toute l'année et faire des expériences en plein air. L'accès ne devait pas



LES MULTIPLES CHEMINS D'UN PROJET DÉMESURÉ

être trop difficile et il fallait de l'eau. L'endroit retenu se trouvait sur un plateau isolé (mesa) du Nouveau Mexique, à environ 50 km de Santa Fe. Les habitants l'appelaient *The hill* (la colline).

A leurs débuts, les travaux à Los Alamos furent surtout scientifiques et théoriques. Peu à peu, les techniques de l'ingénieur prirent de plus en plus d'importance. On ne savait pas alors si - compte tenu des difficultés de production - on utiliserait ^{235}U , ^{239}Pu ou bien les deux. On devait mesurer le nombre de neutrons par fission, calculer puis déterminer expérimentalement la masse critique de chacun des deux produits. Les mesures devaient être faites sur des quantités très petites de produit fissile.

J. R. Oppenheimer, l'adjoint de Compton, devint directeur du Centre. Comme tous ses homologues, il était né aux Etats-Unis. Les services de sécurité hésitèrent à lui donner l'habilitation nécessaire, par suite de certaines de ses activités passées, mais le général Groves, qui connaissait le détail des rapports sur lui, fut séduit par la compétence et la personnalité d'Oppenheimer et pensa que sa valeur potentielle était supérieure à tout risque de sécurité. Il demanda, en conséquence, que l'autorisation lui soit donnée sans délai.

Oppenheimer arriva sur place, avec quelques collaborateurs, le 15 mars 1943. Il s'entoura assez rapidement de nombreux scientifiques qui, parmi un personnel militaire important, travaillèrent d'arrache-pied. Les laboratoires furent placés sous l'égide de l'université de Californie.

La concentration de savants seniors et juniors à Los Alamos fut impressionnante. Travaillaient ensemble des scientifiques de grand renom, dont plusieurs Prix Nobel ou futurs Prix Nobel : L. Alvarez, R. F. Bacher, K. T. Bainbridge, H. Bethe, E. Fermi, R. Feynman, J. W. Kennedy, G. Kistiakowsky, E.M. MacMillan, E. Segré, R. Peierls, B. Rossi, E. Teller, V. F. Weisskopf, R. Wilson. Niels Bohr y séjourna plusieurs mois ; J. Chadwick y dirigea la délégation britannique.

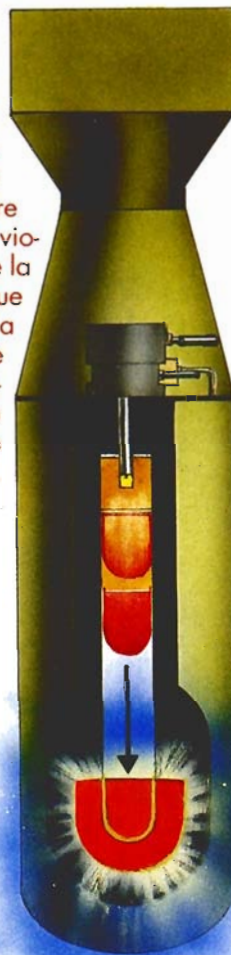
Scientifiques et ingénieurs vécurent là, avec leur famille, dans un grand isolement. Les mesures de sécurité, instituées par Groves, étaient comme toujours très strictes ; on établit la censure sur le courrier, les informations ne devaient pas filtrer d'un laboratoire MED à un autre, sauf par les personnes habilitées, munies d'instructions précises sur ce qu'elles pouvaient expliquer.

Il ne fut pas facile de faire travailler ensemble des personnalités aussi diverses et la collaboration entre scientifiques et militaires n'alla pas toujours de soi.

Un capitaine de frégate, W. S. Parsons, fut chargé de diriger la division de l'artillerie, c'est-à-dire ce qui concernait le fonctionnement même de la bombe. Des théoriciens jusqu'aux artilleurs, en passant par les physiciens, les chimistes, les ingénieurs et les spécialistes des explosifs, tous travaillèrent pour définir, étudier et réaliser la structure des bombes, comment passer rapidement d'une masse sous-critique à une masse sur-critique pour que la bombe détone.

Pour la bombe à uranium, il fut décidé de réaliser une sorte de canon qui permettrait de tirer une masse sous-critique d' ^{235}U à l'intérieur d'une cible constituée

"Little Boy", la première bombe à uranium ^{235}U (3,5 m de long, 5 tonnes) utilise le principe du "canon" : deux masses sous-critiques d'uranium (rouge) sont violemment réunies par la mise à feu d'une charge classique (en jaune). La collision doit être suffisamment violente pour que la masse critique ainsi créée soit la plus compacte possible au moment où commence l'explosion.



LOS ALAMOS SCIENTIFIC LAB

A Los Alamos, malgré les exigences de sécurité, une conférence hebdomadaire de l'ensemble des chercheurs sera maintenue par Oppenheimer (ci-dessus, 2^e rangée à gauche, lors d'une réunion en 1946).

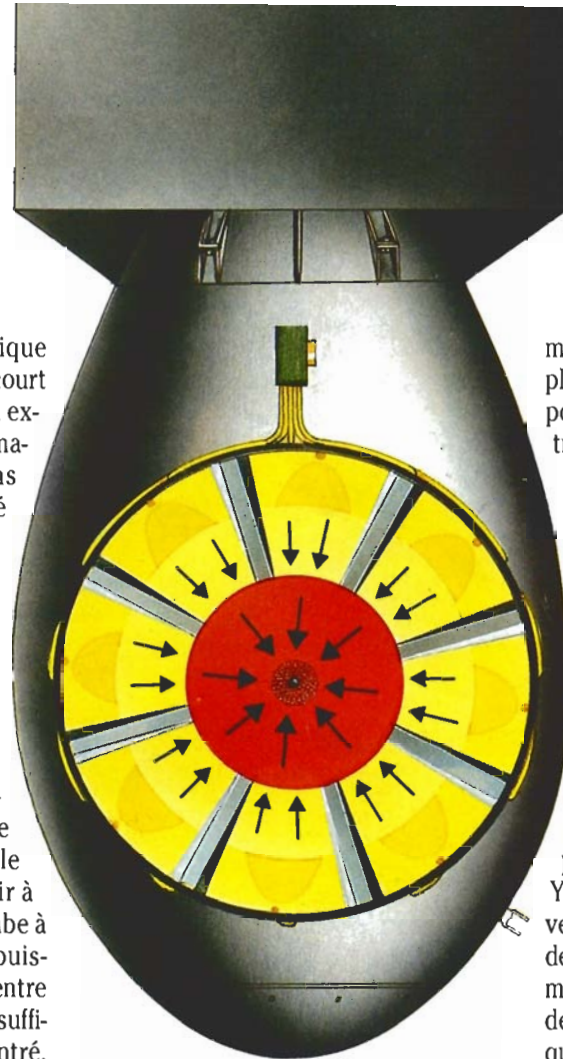


DATE COLLE P.P.P.

par une deuxième masse sous-critique du même matériau, réalisant en un court instant une masse sur-critique qui exploserait. Le tout était entouré de matériaux réfléchissant les neutrons vers l'intérieur. Ce principe fut utilisé dans le système de la bombe appelée *Thin man* (homme mince) ou *Little boy* (petit garçon), qui fut lancée sur Hiroshima.

On pensa d'abord utiliser la même méthode pour le plutonium, mais il s'avéra - à cause de certaines de ses particularités - qu'on n'arriverait pas à former assez rapidement une masse sur-critique de plutonium sans explosion partielle prématurée. Il fallut donc recourir à une autre méthode, celle de la bombe à implosion. On dirige le souffle de puissants explosifs classiques vers le centre de l'engin où se trouve une quantité suffisante de matériau fissile non concentré. Ce matériau est ainsi comprimé jusqu'à ce qu'il atteigne la masse critique et détone. Ce principe fut utilisé dans la bombe appelée *Fat Man* (gros homme) qui fut lancée sur Nagasaki.

Cette méthode avait été proposée par N. H. Neddermeyer qui, pendant des mois, fut le seul à y croire. Cependant, lorsqu'il apparut clairement que c'était là la seule façon de réaliser, d'une ma-



"Fat Man", la bombe à plutonium, est mise à feu par un dispositif d'implosion. Le plutonium peu condensé est placé au centre. Il est entouré d'une enveloppe d'uranium (en rouge) et de charges classiques (en jaune) profilées pour créer une onde de choc sphérique dirigée vers l'intérieur. L'explosion de ces charges provoque la compression du plutonium qui parvient à la masse critique. Une petite source de polonium-beryllium placée au centre initie l'émission de neutrons rapides.

nière sûre, une bombe au plutonium, des moyens très importants furent mis en œuvre. Une expérimentation conséquente et complexe, avec des charges classiques, fut entreprise, sous la direction de G. B. Kistiakowski, professeur à Harvard et spécialiste des explosifs, dans des canyons au voisinage de Los Alamos. Kistiakowski développa des

En mars 43, plus de 2.000 chercheurs, techniciens et militaires travaillent, à Los Alamos, à la mise au point de la bombe.

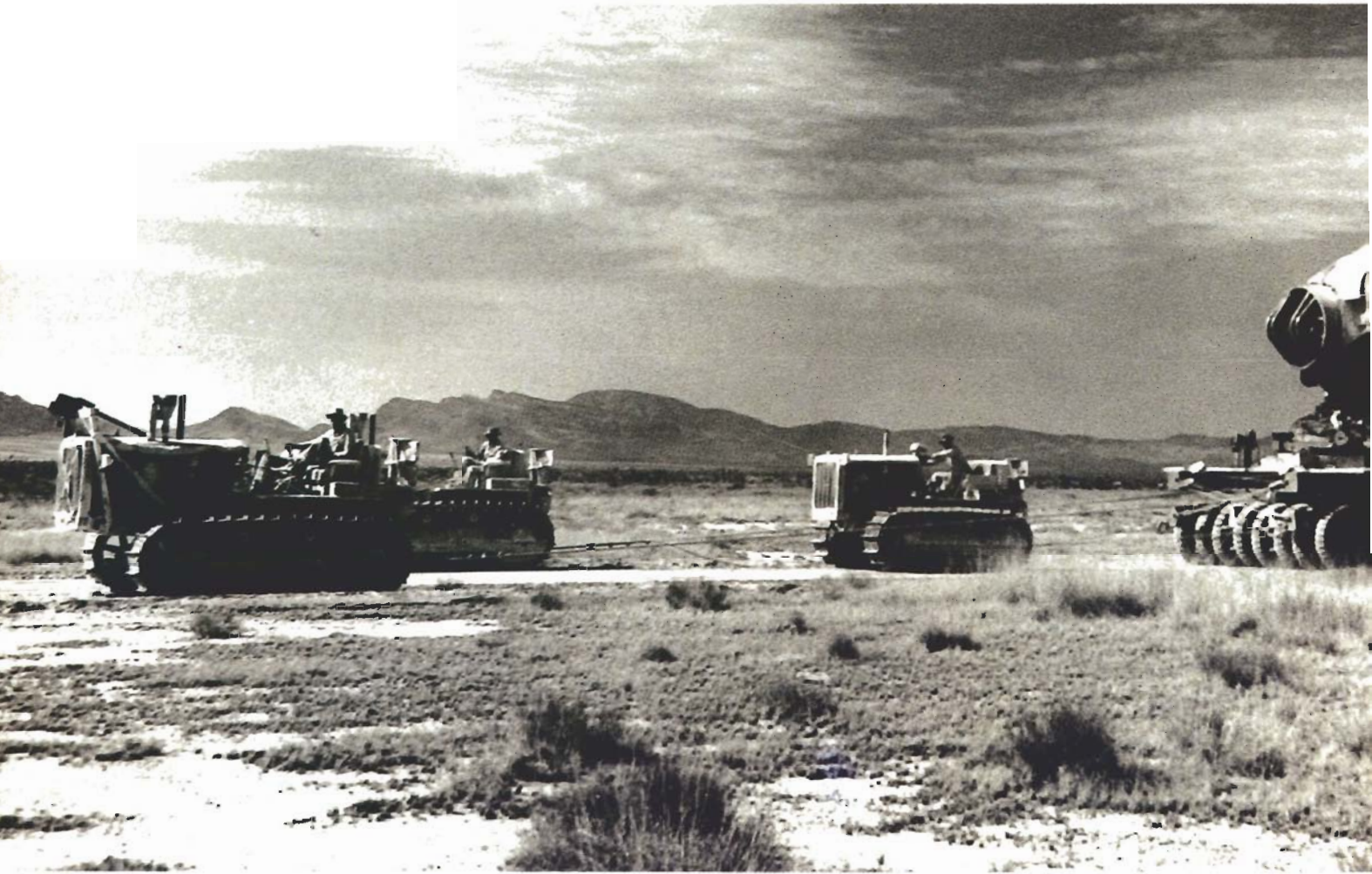
moulages spéciaux pour contenir les explosifs, réalisant des sortes de "lentilles" pour orienter correctement et concentrer l'onde de choc sur le produit fissile.

Oppenheimer et les scientifiques convainquirent Groves qu'un essai de bombe au plutonium était indispensable non seulement pour s'assurer de sa réalité, mais aussi pour vérifier son fonctionnement particulièrement complexe. L'essai fut programmé, dès le printemps 1944, à Alamogordo, près d'une base aérienne, dans le désert du sud de l'Etat du Nouveau Mexique.

Dans ses Mémoires, Groves rapporte que juste avant la conférence de Yalta, au début de février 1945, Roosevelt lui indiqua que la bombe atomique devrait être prête à être lancée sur l'Allemagne si la guerre durait. Dès que la fin de la guerre en Europe ne fut plus qu'une question de semaines, le Japon devint la seule cible. En avril 45, l'état-major prévoyait une invasion du Japon à partir de la fin octobre. Le secret sur le Projet Manhattan était tel que la plupart des responsables militaires en ignoraient tout. Ceux qui étaient au courant pensèrent que le lancement de deux bombes atomiques mettrait fin à la guerre. La production d'²³⁵U séparé ne permettait pas d'envisager un essai : il y en aurait tout juste assez pour la première bombe à partir de la fin juillet 1945. En revanche, les quantités de plutonium disponible étaient suffisantes pour faire un essai et construire une deuxième bombe. La production de plutonium devait se poursuivre à un rythme continu pour disposer d'autres bombes à partir de fin août 1945. L'urgence était telle qu'il fallait tout préparer avant même d'être sûr que cela fonctionnerait.

Dès le débarquement en Normandie, une mission de renseignement du Projet Manhattan, appelée Alsos, sous la conduite d'un colonel et du physicien S.A. Goudsmit, avait accompagné les forces alliées. Elle devait rechercher où en étaient les Allemands sur le problème de l'uranium. Lorsque le général Leclerc





entra dans Paris, une jeep américaine suivait le premier tank. C'était la mission Alsos qui, l'après-midi même, discutait avec Joliot au Collège de France. Cette mission atteignit ensuite Strasbourg puis l'Allemagne et réussit à capturer les principaux savants impliqués dans le projet allemand, dont Werner Heisenberg, et à se saisir des matières premières et de tout l'équipement, opérant à la barbe des troupes alliées. Les Allemands étaient alors très près de faire fonctionner une première pile atomique (uranium et eau lourde), mais n'avaient pas été beaucoup plus loin.

L'entraînement de l'escadrille qui devait être capable de lancer la bombe commença au milieu de 1944. Un petit comité autour de Groves eut à choisir, au printemps 1945, les cibles possibles. Il voulut inclure la ville historique et religieuse de Kyoto parmi les objectifs mais le secrétaire à la guerre, Stimson, qui connaissait Kyoto, refusa ce choix. Les matériaux fissiles et les éléments pour réaliser les deux bombes devaient être acheminés dans l'île de Tinian, dans l'ar-

chipel des Mariannes, pour se trouver à une distance acceptable du Japon pour les bombardiers B 29.

L'installation à Tinian commença en février 1945. Le convoi emportant le précieux ^{235}U et les éléments de la bombe quitta Los Alamos le 14 juillet 1945, donc avant même l'essai d'Alamogordo. Ces matériaux furent embarqués sur le croiseur Indianapolis qui arriva à Tinian le 26 juillet. Par la suite, le plutonium fut transporté jusqu'à Tinian par avion.

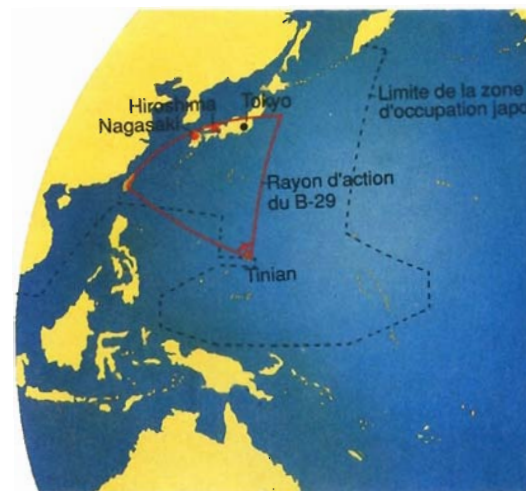
A ALAMOGORDO...

Le président Harry Truman (qui avait remplacé F. D. Roosevelt, décédé en avril) avait fait reculer de quelques jours la conférence de Potsdam, où il devait rencontrer Churchill et Staline, de manière à connaître les résultats d'Alamogordo. L'essai eut lieu à l'aube du 16 juillet 1945. Toute la nuit, Kistiakowski et quelques aides armés avaient monté la garde autour de l'engin qui avait été placé au sommet d'une tour métallique. Des scientifiques, ainsi que Groves, Bush

et Conant se trouvaient au poste d'observation, à 16 km de là. Le temps était déplorable, ce qui fit reculer l'heure de l'essai (on voulait qu'il ait lieu de nuit).

Trente minutes avant l'heure finalement fixée, Kistiakowski et ses hommes quittèrent en jeep le point O pour se poster dans un abri avancé, à 8 km. Lorsque le compte à rebours commença, tout le monde se jeta à plat ventre, face contre terre, des lunettes noires sur le nez, les pieds en direction du point O.

A 5 heures 30, se produisirent pour la première fois dans l'histoire une lumière





LOS ALAMOS SCIENTIFIC LAB

Un premier test, le projet "Trinity". Au printemps 1945, "Jumbo", un container de 214 tonnes d'acier est transporté dans le désert d'Alamogordo vers le point "zéro". Il est destiné à récupérer le plutonium en cas d'explosion partielle mais il ne sera pas utilisé. Le 14 juillet, la bombe au plutonium est hissée au sommet d'une tour de 30 mètres. L'essai aura lieu deux jours plus tard. Pendant ce temps, la bombe à uranium était déjà en route vers la base de Tinian, dans le Pacifique.



LOS ALAMOS SCIENTIFIC LAB

aveuglante et la fameuse boule de feu.

Fermi se dressa et lâcha une poignée de petits papiers. Lorsque l'onde de choc arriva, il put ainsi mesurer immédiatement la puissance de l'explosion (confirmée par l'enregistrement des mesures sophistiquées).

Tout le monde se congratula. Quelques personnes, au loin, avaient vu la lueur. Des vitres avaient volé en éclats à plus de 250 km de là. Un communiqué de presse avait été préparé, annonçant qu'un dépôt de munitions avait sauté accidentellement.

Le soir, à Los Alamos, raconta Richard Feynman, plus tard Prix Nobel, recruté par son professeur Robert Wilson : "Nous avons dansé, chanté. Je me revois encore en train de jouer de la batterie, juché à l'arrière d'une jeep. Seul Bob Wilson restait morne et silencieux dans son coin. Qu'est-ce qui ne va pas ?, lui ai-je demandé. - C'est terrible, ce que nous avons fait là. - Mais c'est pourtant vous qui nous y avez entraînés ! - Certes, mais voilà, au début nous étions lancés dans l'entreprise pour de bonnes raisons ; puis nous avons été pris par l'excitation des choses à faire et du travail à accomplir. Et alors, nous avons complètement cessé de réfléchir. Seul Bob Wilson continuait à penser."

LE 6 AOÛT 1945, À HIROSHIMA.. LE 9, À NAGASAKI

Le 6 août 1945, peu après 8 heures du matin, la forteresse volante Enola Gay lança la première bombe atomique à uranium sur la ville japonaise d'Hiroshima.

Selon les estimations, le nombre de morts, dûs surtout à l'effet du souffle et de la chaleur de l'explosion, varie de 60000 à 200000.

Trois jours plus tard, le 9 août, la deuxième bombe, au plutonium celle-là, fut lancée sur la ville portuaire de Nagasaki. Elle fit environ 60000 victimes.

Le 10 août, l'empereur du Japon décida de capituler.

Les bombes d'Hiroshima et de Nagasaki ne furent pas les seules de la Seconde Guerre mondiale à avoir fait un aussi grand nombre de victimes. Le bombardement de Tokyo, avec des bombes incendiaires, dans la nuit du 9 au 10 mars, en fit plus de 80000. Celui de Dresde, en Allemagne, la nuit du 13 au 14 février 1945, a tué de 135000 à 250000 personnes. Mais la destruction de chacun des deux ports japonais était due, chaque fois, à une seule bombe d'un type inconnu.

Sitôt après le retour de l'Enola Gay, un



Le 16 juillet 1945, "Trinity" explose dans le désert d'Alamogordo. A son maximum, la boule de feu, dont le cœur atteint une température supérieure au million de degrés, s'étend sur près de 700 m de diamètre. La puissance de l'explosion est évaluée à 18,6 KT de TNT. (les photos ne sont pas toutes à la même échelle).

communiqué de presse fut diffusé au nom du Président des Etats-Unis. Depuis plusieurs mois déjà, les responsables du projet Manhattan s'étaient assurés du concours d'un journaliste spécialement choisi du New York Times, William L. Laurence. Celui-ci, avec l'accord de son rédacteur-en-chef, mais dans le plus grand secret, s'était joint aux équipes de Los Alamos, avait assisté à l'essai d'Alamogordo, s'était rendu à Tinian, puis dans un avion d'observation au moment du lancement de la bombe sur Nagasaki. C'est lui qui prépara les communiqués de presse et les reportages qui suivirent.

Dès avril 1944, il avait été demandé à un scientifique du projet Manhattan, H. D. Smyth, professeur à Princeton, de préparer un rapport aussi complet que possible sur l'ensemble de l'entreprise. Ce rapport fut rendu public le 11 août à 9 heures du soir (heure de Washington).

Par suite des dépenses considérables du Projet, on n'avait pu tenir le Congrès des Etats-Unis dans l'ignorance complète. En février 1944, Stimson, Marshall et Bush avaient donc informé globalement et sous le sceau du secret, le Président de la Chambre des Représentants, les leaders de la majorité et de l'opposition, ainsi que, peu après, les personnalités correspondantes du Sénat.

Dans les années qui suivirent, on a beaucoup discuté, notamment aux Etats-Unis, des considérations qui avaient joué le rôle le plus important dans la décision du Président Truman de lancer les deux bombes atomiques : le souci de terminer la guerre en épargnant le maximum de vies de soldats américains, la volonté de montrer la puissance des Etats-Unis en prévision des confrontations de l'après-guerre... Sans doute aussi la nécessité d'employer, avant la fin de la guerre, une arme nouvelle qui avait coûté tant d'efforts et mobilisé tant de moyens. ■