



Acquisition des connaissances scientifiques sur la fission dans le projet Manhattan

Yves FOURNIER



Plan de l'exposé

- Les prémisses
 - La révolution de la physique dans la première moitié du XXème siècle
 - Les acteurs et les lieux d'enseignement et de recherche
 - Rappels succincts de physique et de chimie
 - Quelques outils de la recherche sur les particules
- L'engrenage
 - Le contexte historique avant la guerre
 - Découverte de la fission et du Plutonium
 - La mise en place du projet Manhattan
- Le Projet
 - Les travaux du projet et leurs vicissitudes
 - Les bombes et leur utilisation
 - Conséquences des bombardements
- Conclusions

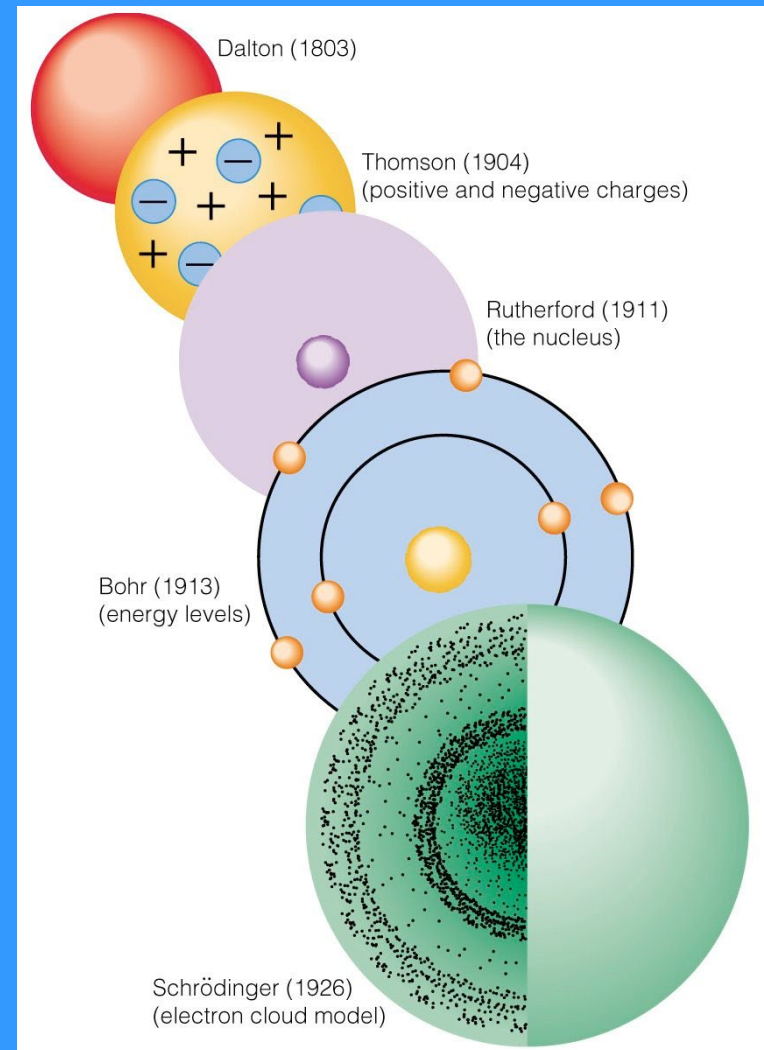


La révolution de la physique atomique au début du XXème siècle

- Les quanta
 - Energie ondes électromagnétiques ne se modifie qu'en quantités discrètes $W = h \cdot \nu$
 - Photons
- La relativité
 - Lois de la physiques identiques en tout point de l'Univers
 - $E=mc^2$

La révolution de la physique atomique au début du XXème siècle

- Structure de l'atome
 - Electron
 - Noyau
 - Proton
 - Neutron
 - Modèle de Bohr
 - Modèle de Schrödinger





La révolution de la physique atomique au début du XXème siècle

- La radioactivité
 - Le noyau peut se transformer
 - Emission énergétique sous différentes formes
 - Alpha
 - Beta + et –
 - Gamma
 - Autres particules



La révolution de la physique atomique au début du XXème siècle

- Les interactions particules noyau
 - Protons
 - Alpha (noyaux d'Hélium)
 - Neutrons
- Le neutron est le projectile idéal pour interagir avec le noyau (pas de répulsion électrique)



La révolution de la physique atomique au début du XXème siècle

- Identité de signification entre les découvertes sur l'atome et la table périodique des éléments
 - 1 élément = nombre atomique = nombre d'électrons périphériques
 - Chimie = échange d'électrons entre différents atomes
 - Physique nucléaire : ce qui se passe dans le noyau
 - Isotope (« à la même place dans le tableau »)
 - Chimie identique
 - Nombre de neutrons dans le noyau différent



Les acteurs

- Groupe de quelques dizaines de chimistes et physiciens
- Europe et USA
- Ils se connaissent tous et se rencontrent régulièrement
- Ils travaillent ensemble lors d'échanges entre laboratoires et Universités (fellowship)
- Ethique du partage de connaissances (publications)
- Nombreux prix Nobel
- Inconnus des politiques sauf quelques « vedettes » (Einstein, Curie, Conant, Urey, Compton)
- Surreprésentation des juifs
- Dynamique de la progression des connaissances indépendante des politiques ou des évènements



Les acteurs

- Théoriciens
- Expérimentateurs
- Construction endogène des outils et des instruments de mesure
- Fertilité des duos physiciens/chimistes
- Pierre et Marie Curie, Pierre Joliot et Irène Curie, Otto Hahn et Lise Meitner, Enrico Fermi et Emilio Segrè
- **En rouge** ayant participé au Projet Manhattan
- **N** ayant obtenu le Prix Nobel



Angleterre

- JJ Thomson N
- GP Thomson N
- Rutherford N
- Moseley N
- Soddy N
- Aston N
- Bragg N
- Wilson N
- Chadwick N
- Dirac N
- **Oliphant**
- **Tizard**
- Lindemann



Allemagne

- Planck N
- Einstein N
- Geiger
- Von Laue N
- Heisenberg N
- Schrödinger N
- Hahn N
- Meitner (*Autriche*)
- Frisch
- Born N
- Pauli N
- Bothe
- Gentner
- Houtermans
- von Weizsäcker
- Born N



Danemark

- Bohr Niels
- Bohr Aage

N

N



URSS

- Gamow
- Landau N
- Kapitsa N
- Kurchatov



Etats Unis

- Lawrence N
- Compton N
- Conant
- Bush
- Oppenheimer
- Booth
- Dunning
- Urey N
- Seaborg N
- Weisskopf
- Bethe N
- Feynmann N
- Rabi N
- Lamb N
- Franck N
- Kistiakowsky
- Serber
- Neddermeyer N
- Alvarez N
- Bainbridge



France

- Marie et Pierre Curie N
- Irène Curie et Pierre Joliot N
- **Kowarski**
- Perrin N
- Dautry
- **Von Halban**
- **Goldschmidt**





Italie

- Fermi
- Segrè
- Pontecorvo

N

N



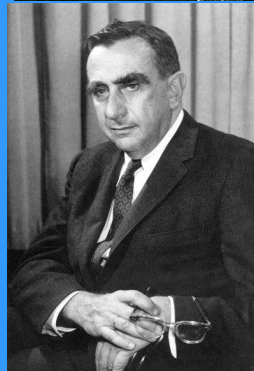


Le « complot hongrois »

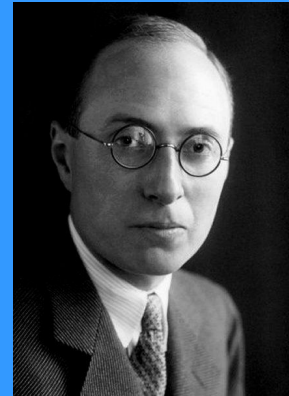
- Szilard



- Vigner



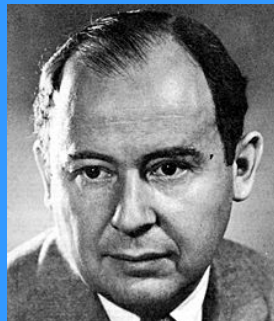
- Teller



- Rabi (*refus au départ de participer au projet Manhattan*)



- Von Neumann





Les filiations

- **Rutherford**: Bragg, Barkla, Aston, **Bohr**, **Compton**, Wilson, Dirac, **Chadwick**,
- **Bohr** : Heisenberg, Pauli, Dirac, **Fermi**, **Oppenheimer**, Gamow, Landau
- **Sommerfeld** : Heisenberg, Pauli, Debye, **Bethe**, Pauling, Rabi, Von Laue



Les Universités

- Bourses Rockefeller
- Bourses Carnegie
- 1851 Research Fellowship
- Columbia (New York)
- Princeton (New Jersey)
- Harvard (Massachusetts)
- MIT (Massachusetts)
- Ann Arbor (Michigan)
- Berkeley (San Francisco)
- Caltech (San Francisco)
- John Hopkins (Baltimore)
- Mc Gill (Montreal)
- Cambridge
- Manchester
- KWI (Berlin)
- Göttingen
- Copenhagen
- ESPC Paris
- Institut du radium Paris
- Collège de France Paris
- Rome



Les publications scientifiques

- Correspondance pour l'essentiel par lettres
- *Annalen der Physik*
- *Naturwissenschaft*
- *Zeitschrift für Physik*
- *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*
- *Nature*
- *Physical Review*
- *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*
- *Review of modern Physics*
- *Journal of Chemical Physics*
- *Ricerca Scientifica*



Les congrès scientifiques

- Voyages fréquents entre Europe et Etats-Unis (train, bateau)
- Congrès Solvay

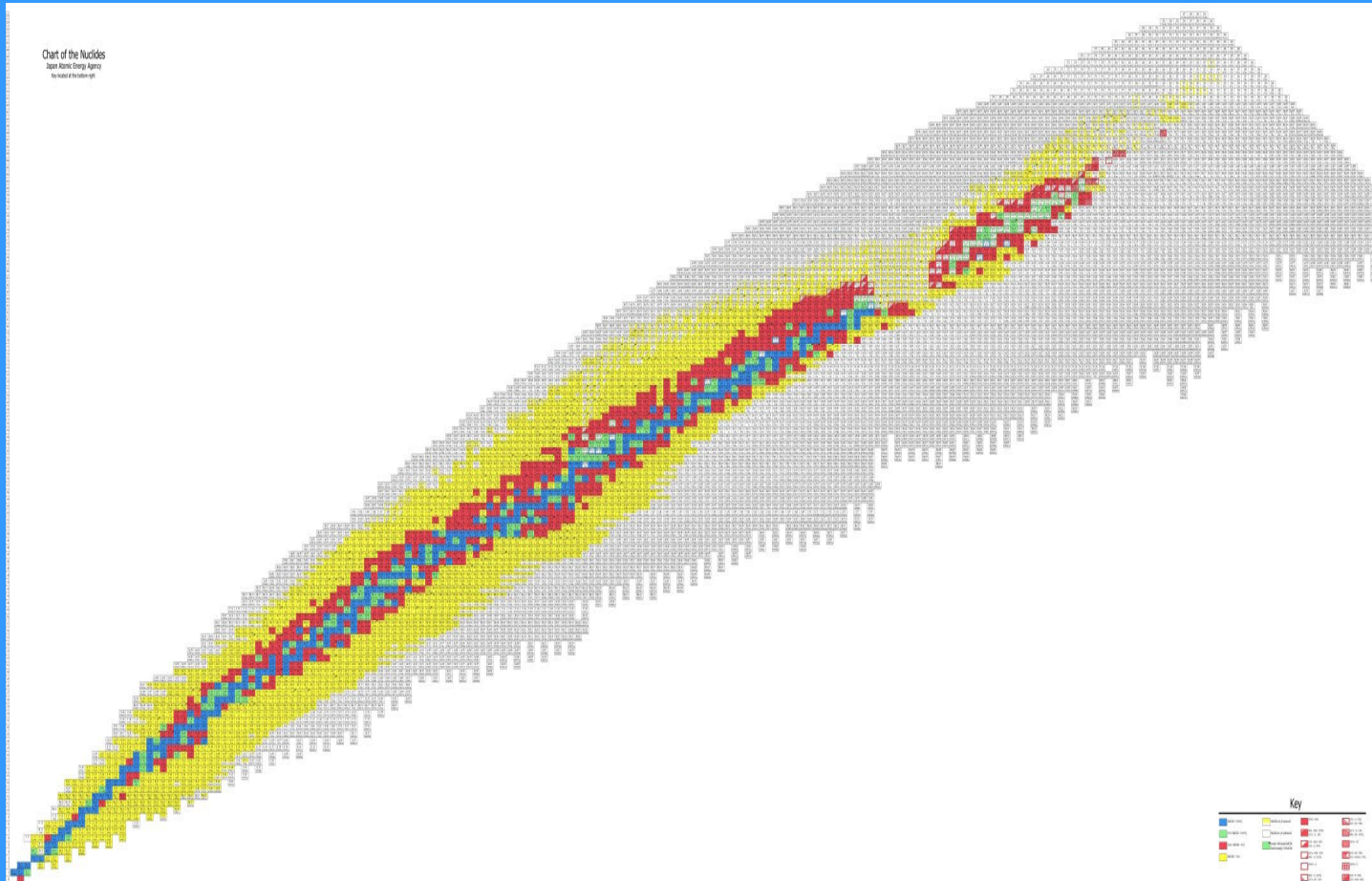
1	1911	La théorie du rayonnement et les quanta
2	1913	La structure de la matière
3	1921	Atomes et électrons
4	1924	Conductibilité électrique des métaux et problèmes connexes
5	1927	Électrons et photons
6	1930	Le magnétisme
7	1933	Structure et propriétés des noyaux atomiques



Quelques rappels de physique

Diagramme Z-M

Z = Numéro atomique = nb protons

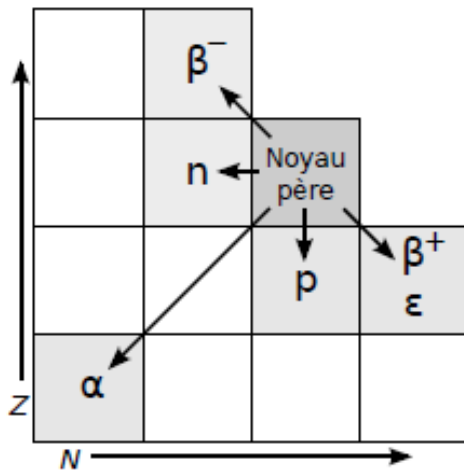


16 octobre 2023

M = Masse atomique = nb protons + nb neutrons 22

Quelques rappels de physique

Les diverses formes de désintégration

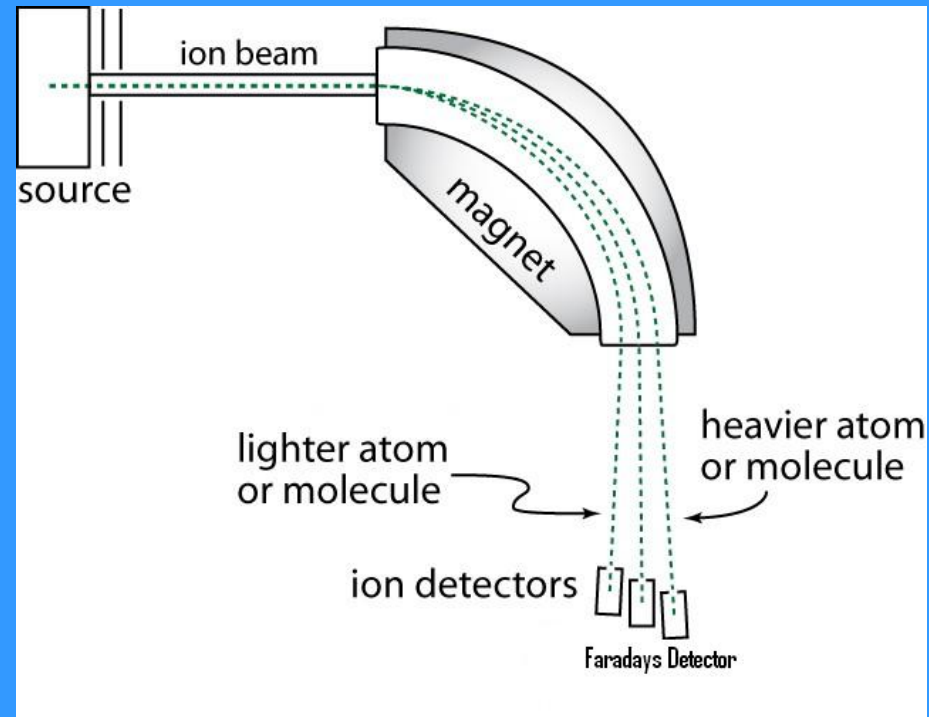


Am236 EC,α	Am237 73.0 m 5/2(-) EC,α	Am238 98 m 1+ EC,α	Am239 11.9 h (5/2)- EC,α	Am240 50.8 h (3-) EC,α	Am241 432.2 y 5/2- α,sf	Am242 16.02 h 1- EC,β* *	Am243 7370 y 5/2- α,sf
Pu235 25.3 m (5/2+) EC,α	Pu236 2.858 y 0+ α,sf	Pu237 45.2 d 7/2- EC,α* *	Pu238 87.7 y 0+ α,sf	Pu239 24110 y 1/2+ α,sf	Pu240 6563 y 0+ α,sf	Pu241 14.35 y 5/2+ β-,α,sf,...	Pu242 3.733E+5 y 0+ α,sf
Np234 4.4 d (0+) EC	Np235 396.1 d 5/2+ EC,α	Np236 1.54E5 y (6-) EC,β-,α,...* *	Np237 2.144E+6 y 5/2+ α,sf	Np238 2.117 d 2+ β-	Np239 2.3565 d 5/2+ β-	Np240 61.9 m (5+) β- *	Np241 13.9 m (5/2+) β-
U233 1.592E+5 y 5/2+ α,sf	U234 2.455E+5 y 0+ α,n,sf,... 0.0055	U235 7.038E+8 y 7/2- α, ²⁰ Ne,sf,...* 0.7200	U236 2.342E7 y 0+ α,sf	U237 6.75 d 1/2+ β-	U238 4.468E+9 y 0+ α,β-,β-,sf,... 99.2745	U239 23.45 m 5/2+ β-	U240 14.1 h 0+ β-

Tableau interactif N-Z

Le spectromètre de masse Aston (1918)

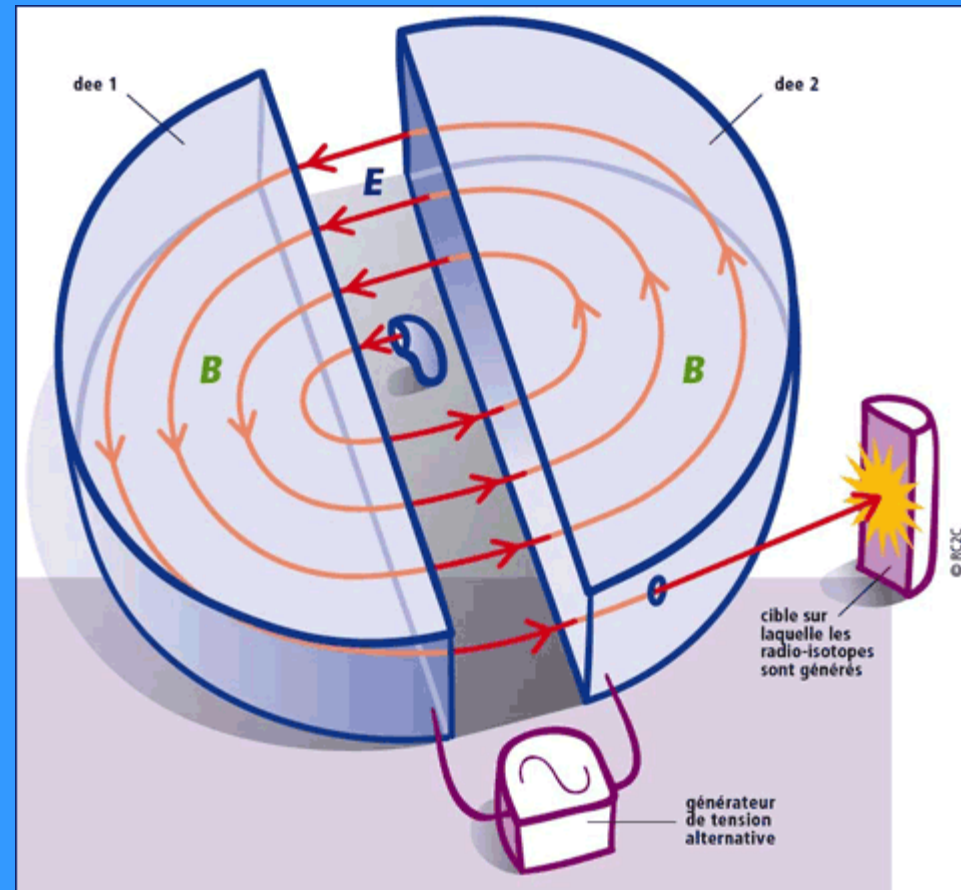
- Déviation différenciée d'un rayon de particules électrisées dans un puissant champ magnétique
- Permet de séparer les isotopes d'un même élément



Le Cyclotron

Ernest Lawrence (1932)

- Astuce pour éviter les longueurs excessives des accélérateurs linéaires
- Impulsions électriques accélératrices entre les pôles de deux aimants





L'émigration des scientifiques d'Allemagne

- Bethe 1933 (Sommerfeld)
- Einstein 1933
- Lois anti juives (Allemagne puis Italie)
- Max von Laue et Otto Hahn anti nazi
- Enrico Fermi 1938 (après son Nobel)
- Niels Bohr organise l'émigration à partir de Copenhague
- Emigre lui-même clandestinement via la Suède en octobre 1943



La découverte de la fission

- Les Curie observent du baryum après bombardement neutronique de l'Uranium
- Hahn confirme les résultats des Curie (1938)
- Incrédulité générale sur la présence d'éléments du milieu de la classification : comment un neutron de faible énergie peut-il casser un noyau énorme lié par les forces nucléaires ?
- Article Hahn-Strassmann *Naturwissenschaften* (6 janvier 1939)
- Bohr l'emporte aux USA le lendemain (Princeton)
- Papier Frish Meitner envoyé à Copenhague le 6 janvier (théorie de la goutte liquide)





La découverte de la fission

- Confirmation le vendredi 13 janvier 1939 de rayonnements énergétiques par Frisch à Copenhague
- Expérience cyclotron de Booth et Dunning à Columbia le 25 janvier
- Conférence de physique théorique à Washington le 26 janvier 1939 révélation par Bohr et commentaires par Fermi
- Diffusion très rapide de la nouvelle (presse et communauté scientifique) qui entre en « ébullition »
- Szilard demande à tous de taire les résultats sur les expériences de fission (intuition de la réaction en chaîne)

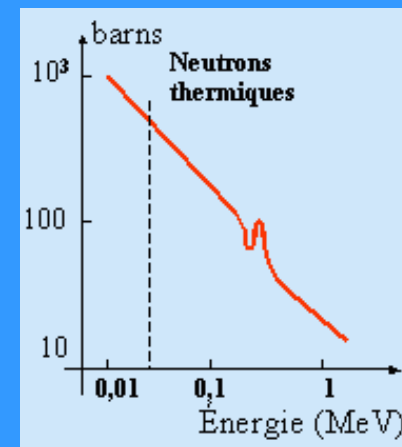
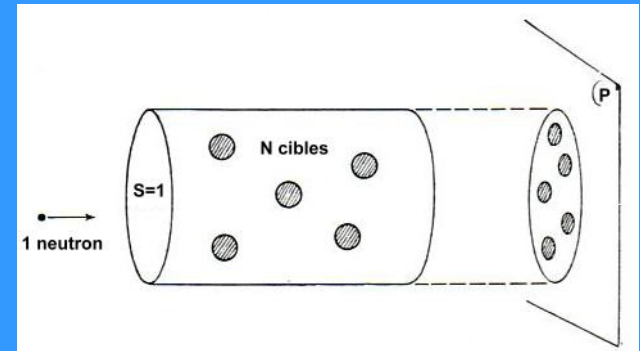


Les prémisses de l'idée de réaction en chaîne

- Découverte du neutron (1931)
- Intuition de la réaction en chaîne Szilard 1933
- Meilleure compréhension de la structure du noyau avec les outils d'accélération (cyclotron)
- Possibilité d'absorber un neutron (pas de barrière électrique)
- Croyance dans l'impossibilité de fractionner le noyau
- Essais à Columbia (Szilard, Zinn) Be-Ra avec paraffine (mars 1939)
- Essais Joliot Kowarski Von Halban (avril 1939) brevets
- Plus d'un neutron par fission par neutrons lents

Les sections efficaces

- Probabilité d'obtenir une fission en fonction de l'énergie incidente
- Etude systématique des différents isotopes Pu , U et Th
- Les isotopes à nombre impair de nucléons ont une probabilité plus forte de fissionner (Th 233, U 235, Pu 239)
- Idée de les séparer afin de réduire la masse critique nécessaire pour obtenir une réaction en chaîne entretenue
- Leur connaissance pour tous les matériaux est essentielle pour la conception des réacteurs (Absorbeurs et modérateurs)





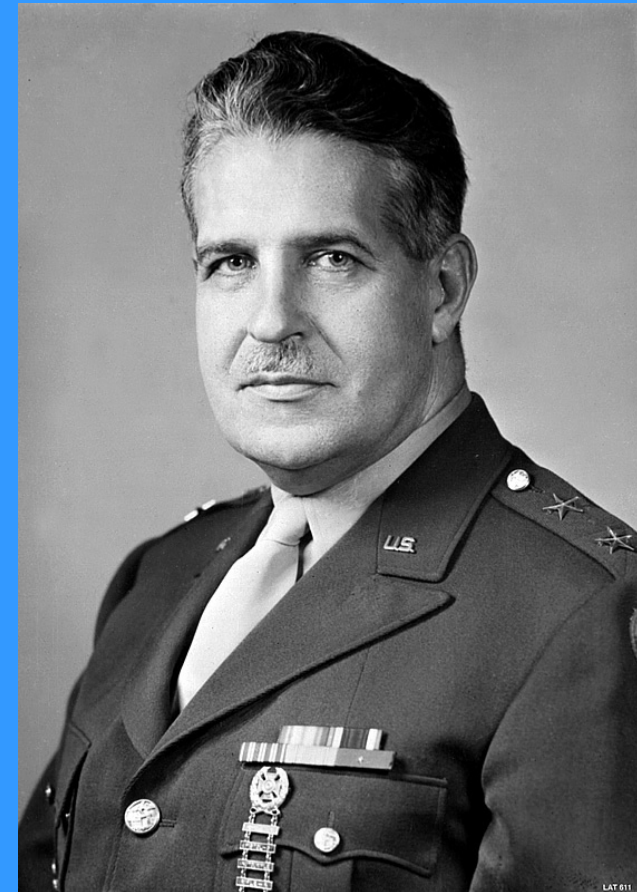
La découverte du Plutonium (1940)

- Production dans cyclotron à Berkeley par bombardement U 238 par deutérium : 14 décembre 1940
- Publication maintenue secrète jusqu'en 1946
- Seaborg (cyclotron) et Segrè (chimie)
- Propriétés fissiles « naturelles » Pu 239 prouvées en été 1941
- Compton et Seaborg sont plus favorables à la solution Pu que U235 (qui a les faveurs de Fermi et Szilard)
- Peut-être produit dans un réacteur et séparé chimiquement
- « Oublié » dans les premiers rapports tirés du rapport MAUD



Général Leslie Groves (1896-1970)

- Fils de pasteur descendant de huguenots
- MIT 1914
- West Point 1916
- Carrière classique dans différents pays (Hawaï, Nicaragua)
- Construction Division 1940
- Budget 1,7 B\$ 1940 (juillet 40-dec 41)
- Construction du Pentagone (aout 41-mai42)
- Directeur du Projet Manhattan (Sommerveld)
- Adjoint Nichols (< 5 M\$)
- « Sélection » d'Oppenheimer





Général Leslie Groves (1896-1970)

- Caractère et méthodes de travail
 - Très intelligent et en est convaincu. Egotique
 - Exigeant, cassant, sarcastique
 - Décideur rapide
 - Court-circuite les hiérarchies (vers le bas)
 - Travailleur acharné (7 jours sur 7)
 - Sait juger les possibilités des collaborateurs ou partenaires
- Le partenariat avec Oppenheimer a fonctionné contrairement à tous les pronostics



Robert Oppenheimer (1904-1967)

- Fils de famille aisée juive non pratiquante et libérale
- Elève surdoué curieux et très cultivé
- Maîtrise des langues dès l'adolescence
- Amateur de voile d'escalade et de randonnées à cheval (New Mexico)
- Harvard, chimie et physique
- Cambridge (Cavendish)
- Malhabile en expérimentation
- Doctorat physique à Göttingen (Max Born) 1927
- Mécanique quantique
- Description théorique de l'effet tunnel





Robert Oppenheimer (1904-1967)

- Retour aux USA (Harvard et Caltech) 1928 (Millikan)
- Puis Leyde, Zurich (Pauli)
- Retour aux USA 1929 enseigne à Berkeley et Caltech
- Professeur titulaire de physique théorique à Berkeley 1936
- Fréquente des milieux communistes. Surveillé par le FBI à partir de 1940
- Travaux en astrophysique
- Mariage avec Katherine Harrison (« Kitty ») 1939
- Intelligence très rapide qui peut être perçue comme méprisante
- Convoqué le 21 octobre 1941 par Compton (S1) contre l'avis de Conant
- Fait forte impression par ses analyses et commentaires
- Sera décisif pour sa nomination
- Aucune expérience administrative ni de direction de projet



La mise en place du Projet 1942

- Centralisation recherche à Chicago (Compton) 24 jan.1942
- Stone et Webster engineering pour Oak Ridge
- Été 42 colloque sur conception bombe
- Teller évoque (déjà) la bombe H
- Nomination de Groves 17 sept. 1942
- Brigadier Général et Directeur du Projet Manhattan 23 sept
- OSRD se retire et n'a plus qu'un rôle de conseil
- 18 sept priorité AAA pour approvisionnement minerais U
- 18 sept achat des terrains d'Oak Ridge
- 29 oct Groves nomme Oppenheimer Directeur scientifique
- 16 nov Visite Oppie et Groves Los Alamos et choix du site
- 2 dec Divergence de la pile de Chicago (Fermi)



Le fonctionnement des équipes scientifiques

- Concertation scientifique à haut niveau
- Conférences croisées avec niveaux collaborateurs
- Protection vis-à-vis des militaires
- Coaching d'Oppenheimer
- Approche « intégrée » (recherche, développement, construction)
- Remise en cause permanente des plannings et organisations en fonction des résultats



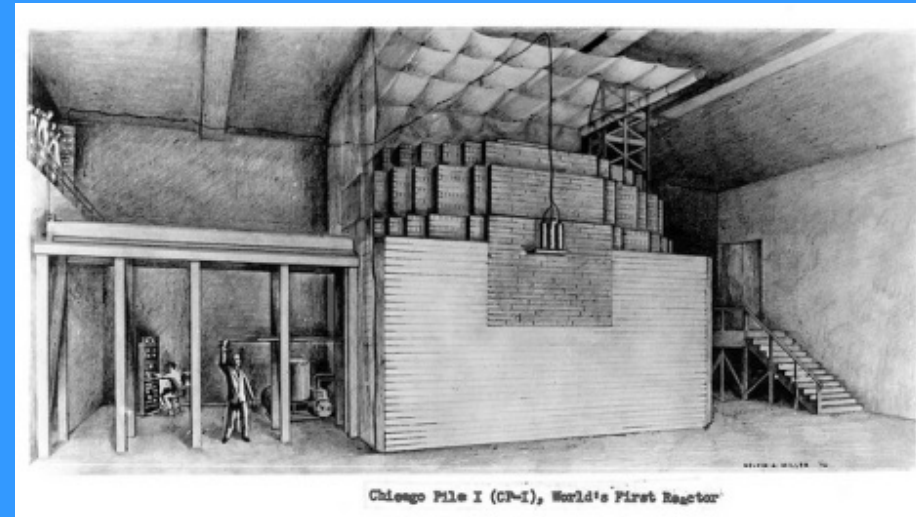
La pile de Chicago

2 décembre 1942

- Objectifs:
 - Prouver la maîtrise de la réaction en chaîne contrôlée
 - Apprendre la physique et la neutronique
- Initiative Szilard Fermi
- Graphite purifié (sans bore)
- Petit budget suite à lettre Szilard Einstein
- Piles exponentielles (2 à Columbia)
- 16 à Chicago (Anderson et Zinn)
- Courts de squash inutilisés sous les gradins du stade de foot de l'Université (centre ville)
- Fermi propose une pile critique qui sera construite là car les bâtiments d'Argonne sont bloqués par des grèves
- Risques limités grâce aux neutrons retardés

La pile de Chicago

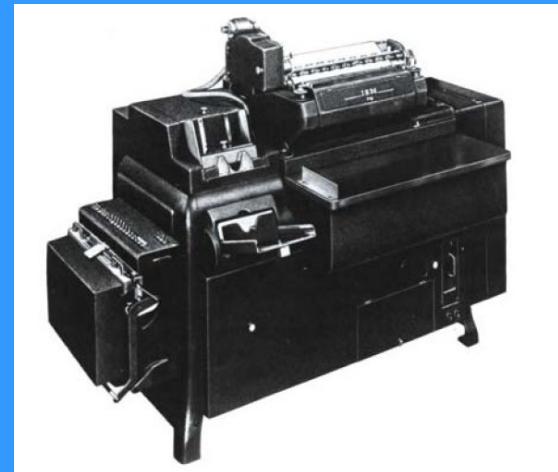
- Compton prend la décision sans en informer le Président de l'Université. Groves OK le 14 nov.
- Terminée le 1^{er} décembre
- Divergence le 2 décembre
- Maintenu 28 minutes
- 0,5 Watt puis jusqu'à 200 W
 - Compton: Le navigateur italien a atteint le nouveau monde
 - Conant : Comment sont les indigènes
 - Compton : Très sympa
- Tests jusqu'au 28 février 1943, démantèlement et transfert à Argonne





Les moyens de calcul en 1942

- Très « archaïques »
- Règle à calcul
- Calculatrices mécaniques
- Machines mécanographiques à partir d'avril 1944 (IBM) calcul de l'implosion
- Pas de semi conducteurs
- Electronique à tubes (après 1945 – ENIAC)





La séparation isotopique U235/U238

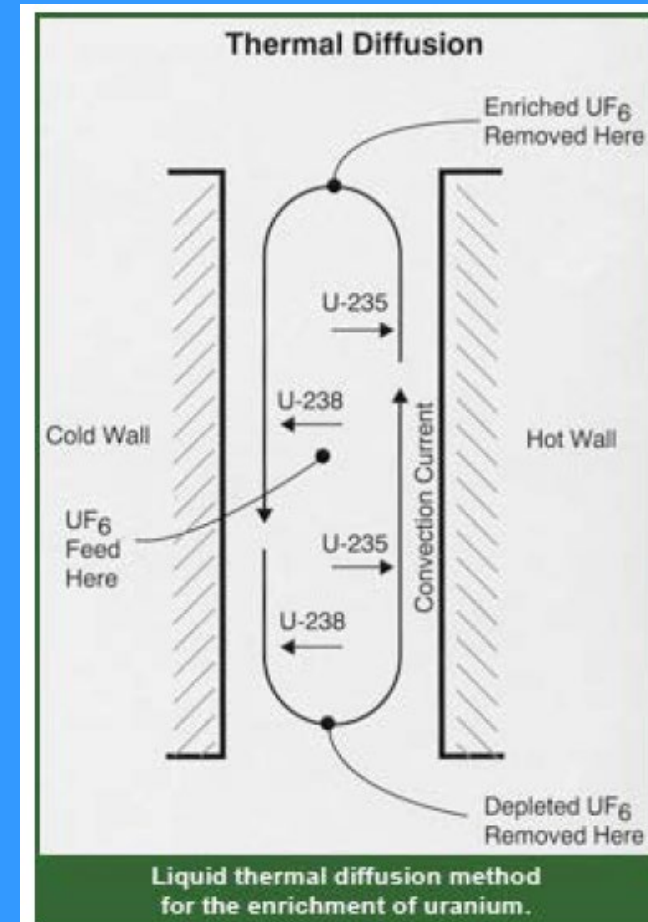
- Diffusion thermique
- Spectrométrie de masse
- Diffusion gazeuse
- Centrifugation (*abandonnée par le projet car considérée comme irréaliste – C'est celle qui supplante les autres aujourd'hui*)



La séparation isotopique

Diffusion thermique

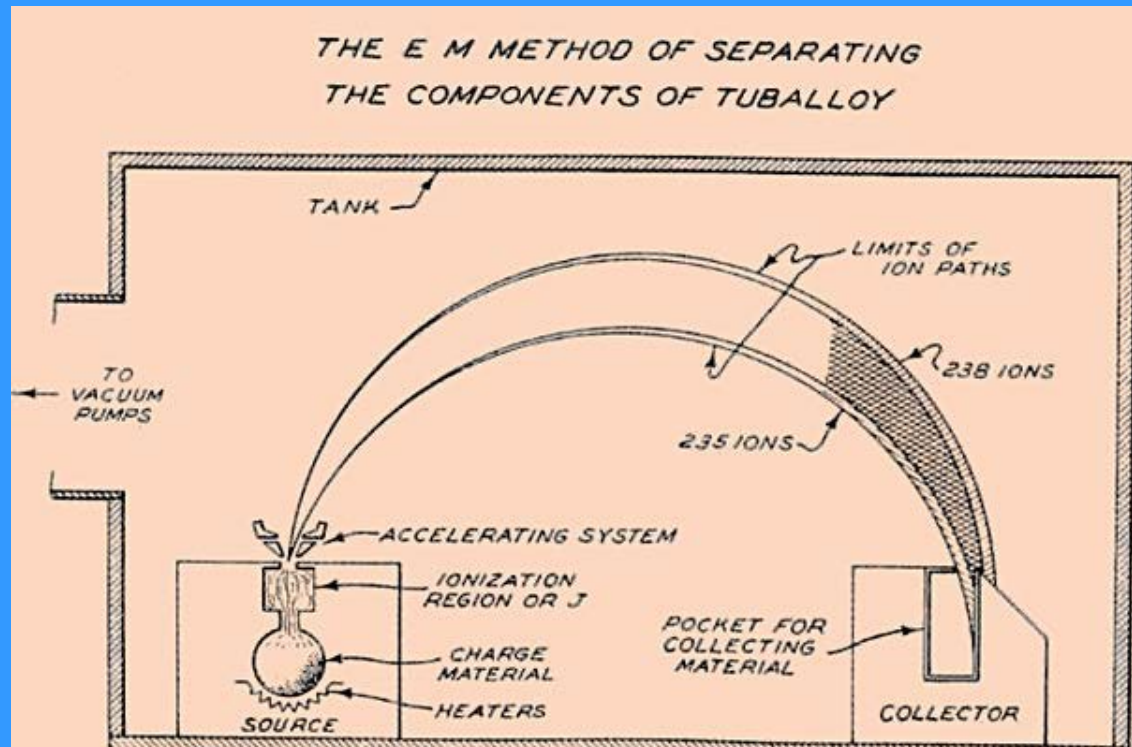
- Diffusion thermique
- Usine S 50 (avril 44)
- Donne une production de U 235 faiblement enrichi (1,4 %) qui accroît la production de Y 12 (Calutrons)
Beta Calutrons



La séparation isotopique

Calutrons

- Calutrons
- Adaptation par Lawrence d'un gigantesque spectromètre de masse
- UCl_4
- Alpha et Beta
- Fin 1943 aout 1945
- Problèmes de court circuits et de fuites de fluide de refroidissement
- Bobinages d'argent
- 22 000 opératrices





« Champs de course » « Racetracks » Y 12 Oak Ridge



Usine Alpha 5 X 500 unités doubles bobinages argent, fuites et court circuits
Puis doublé en aout 43 Alpha-II - 20 000 personnes pour construction -
Enrichi à 10 %

Usine Beta **5X1** Alimentée par Alpha, Diffusion gazeuse (fev 45) et Thermique (Jan 45), puis mise en série Thermique gazeuse puis Beta (90 %)

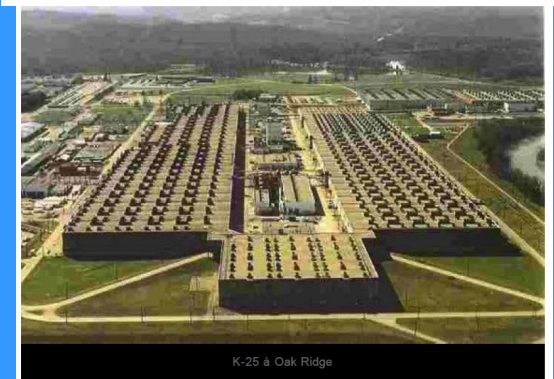
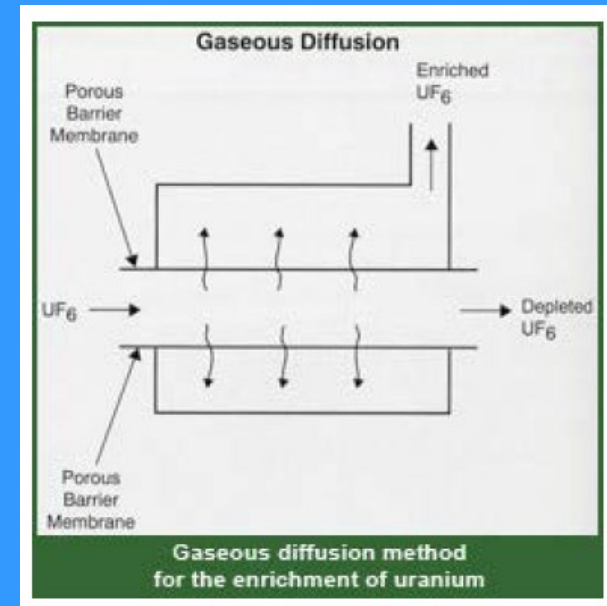


La séparation isotopique

Diffusion gazeuse

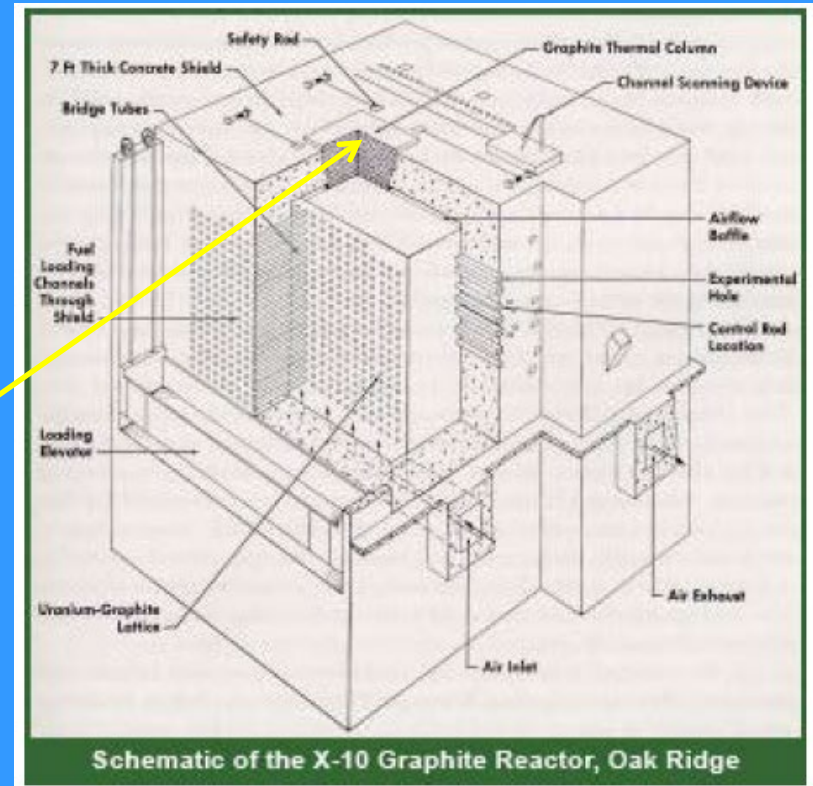
- Diffusion gazeuse
 - Dunning et Booth (Columbia) nov.41
 - UF₆ très corrosif
 - Technologie des barrières
 - Nickel fritté
 - Tuyauteries revêtues de Nickel électrodéposé puis Teflon
 - Houdaille Heshey Decatur 1^{er} avril 44 tout fabriqué à la main Inox finement percé par électrochimie
 - Usine K25 Oak Ridge
 - Début de production 20 jan 45
 - Pleine production 20 fev (Y-12 vers K25)
 - Remplace progressivement les Calutrons après 1945

16 octobre 2023



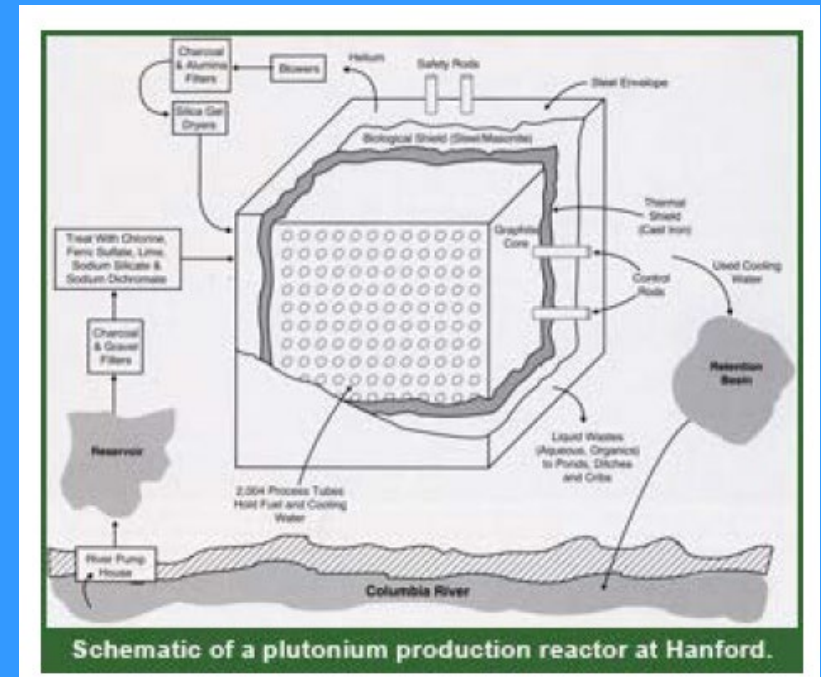
La production de Plutonium

- Réacteur test X10 à Oak Ridge
- Conçu au MetLab par Weinberg et Wigner
 - Modérateur Graphite refroidi par air
 - 500 KW
 - U métal dans gaines aluminium
 - Cube graphite de 500 t
 - Terminé le 4 nov 43 (DuPont)
 - Colonne graphite
- Labo expérimental de séparation chimique du Pu



La production de Plutonium

- Réacteur de production à Hanford
- Extrapolation du X-10 mais refroidi par eau (puissance 250 MW) rejetée à la rivière
- Personnel formé à Oak Ridge
- Pb du coefficient de vide positif
- Extrapolation du pilote de séparation chimique du plutonium



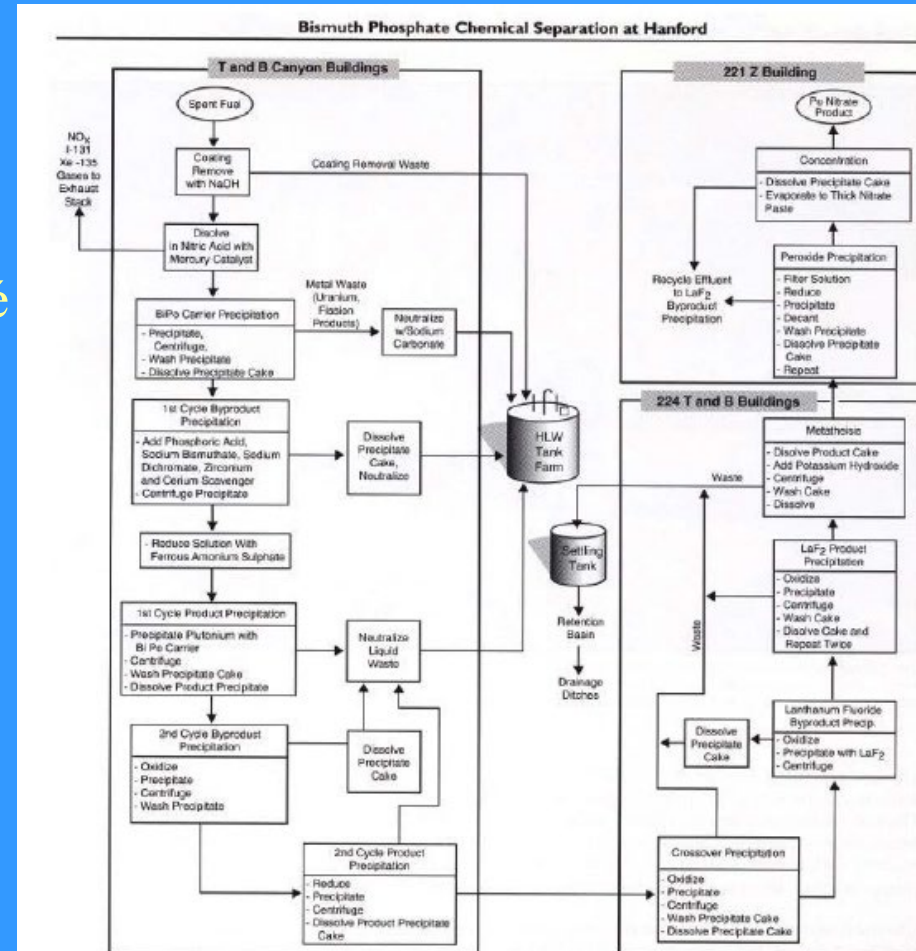


La séparation chimique du plutonium

- Procédé au phosphate de Bismuth
- 40 Cuves de 5 m de large 7 m de profondeur et couvercle de 2 m d'épaisseur
- Bâtiment inaccessible à l'homme et opéré par télé contrôle



Hanford : l'intérieur (le « canyon ») du Queen Mary B ©DoE



Sites de production et de recherche en 1945

Chemical Separations Building (T Plant), Hanford, Washington Separated plutonium out of irradiated fuel rods from Hanford reactors. Canyon-like structure 800 feet long, 65 feet wide, and 80 feet high - nicknamed Queen Mary

Metallurgical Laboratory, University of Chicago, Illinois Enrico Fermi produced first self-sustaining nuclear reaction; Glenn T. Seaborg isolated first weighable amounts of plutonium

Manhattan Project Headquarters, Washington, D.C. General Leslie R. Groves directed the Project from his office in Washington, D.C.

B-Reactor, Hanford, Washington World's first large-scale plutonium production reactor. Produced plutonium for Trinity device, the Nagasaki weapon (Fat Man), and Cold War weapons

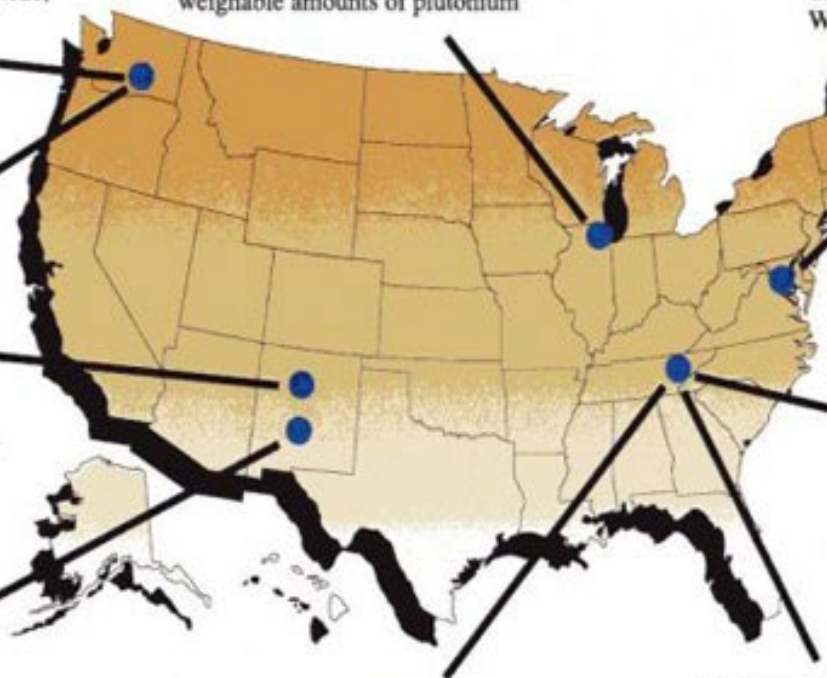
V-Site Assembly Building/Gun Site, Los Alamos, New Mexico Trinity device (prototype for Nagasaki plutonium weapon) and later weapons assembled at V-Site. Ordnance for uranium gun type Hiroshima weapon tested at Gun Site

K-25 Gaseous Diffusion Process Building, Oak Ridge, Tennessee Largest building in world at the time; demonstrated viability of gaseous diffusion for uranium enrichment

Trinity Site, Alamogordo, New Mexico Named by J. Robert Oppenheimer, the Trinity Test began the atomic age and demonstrated viability of an implosion weapon

X-10 Graphite Reactor, Oak Ridge, Tennessee Produced first significant amounts of plutonium

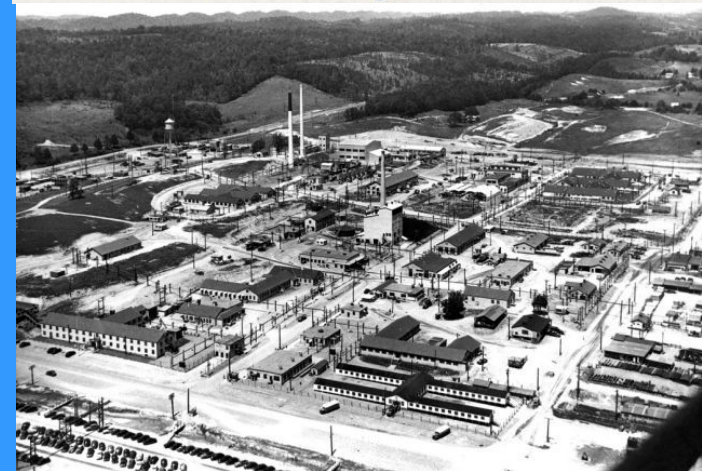
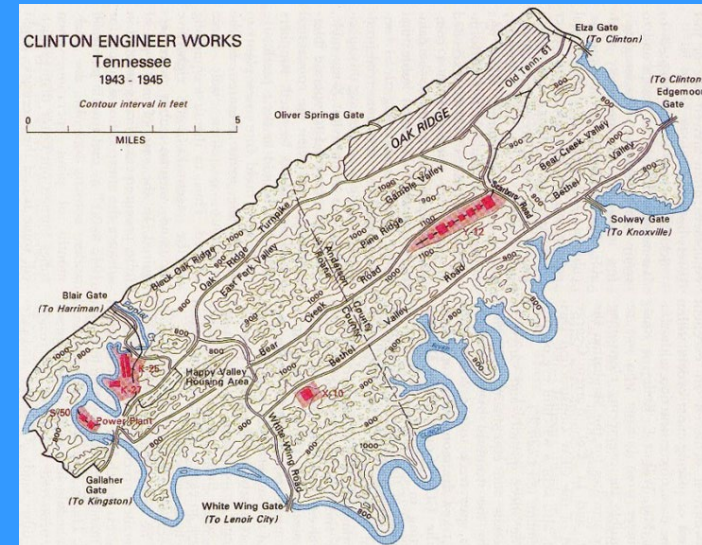
Y-12 Beta-3 Racetrack, Oak Ridge, Tennessee Produced enriched uranium for Hiroshima weapon (Little Boy) utilizing E. O. Lawrence's electromagnetic method





Oak Ridge

- X 10 réacteur modéré graphite
- K 25 Séparation par diffusion gazeuse
- Y 12 Calutrons « racetracks »
 - Alpha I
 - Alpha II
 - Beta
- S 50 séparation diffusion thermique
- Base vie importante
- Organisation des loisirs
- Plus de 45 000 personnes





Los Alamos Site Y – « The Hill »

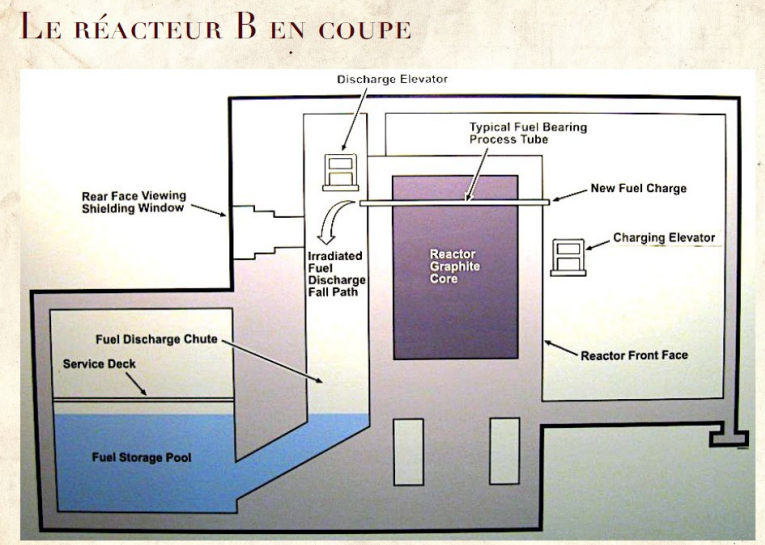
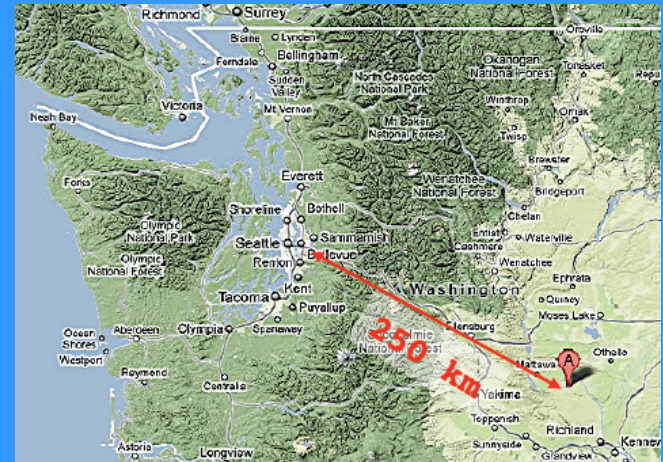
- Choisi ex-nihilo par Oppenheimer et Groves (conception bombe)
- Construction en temps record avec toutes infrastructures de vie
- Concertation des physiciens et chimistes
- PO Box 1663 Santa Fe NM
- Organisation du travail:
 - Division T Bethe
 - Division P Bacher
 - Division CM Kennedy
 - Division E Parsons
- Plus de 10 000 personnes à la fin 45



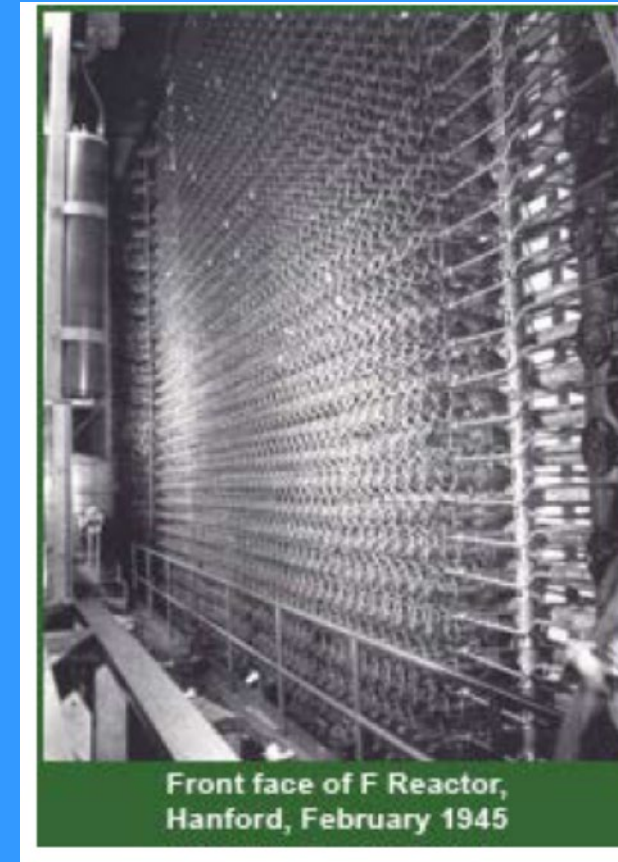
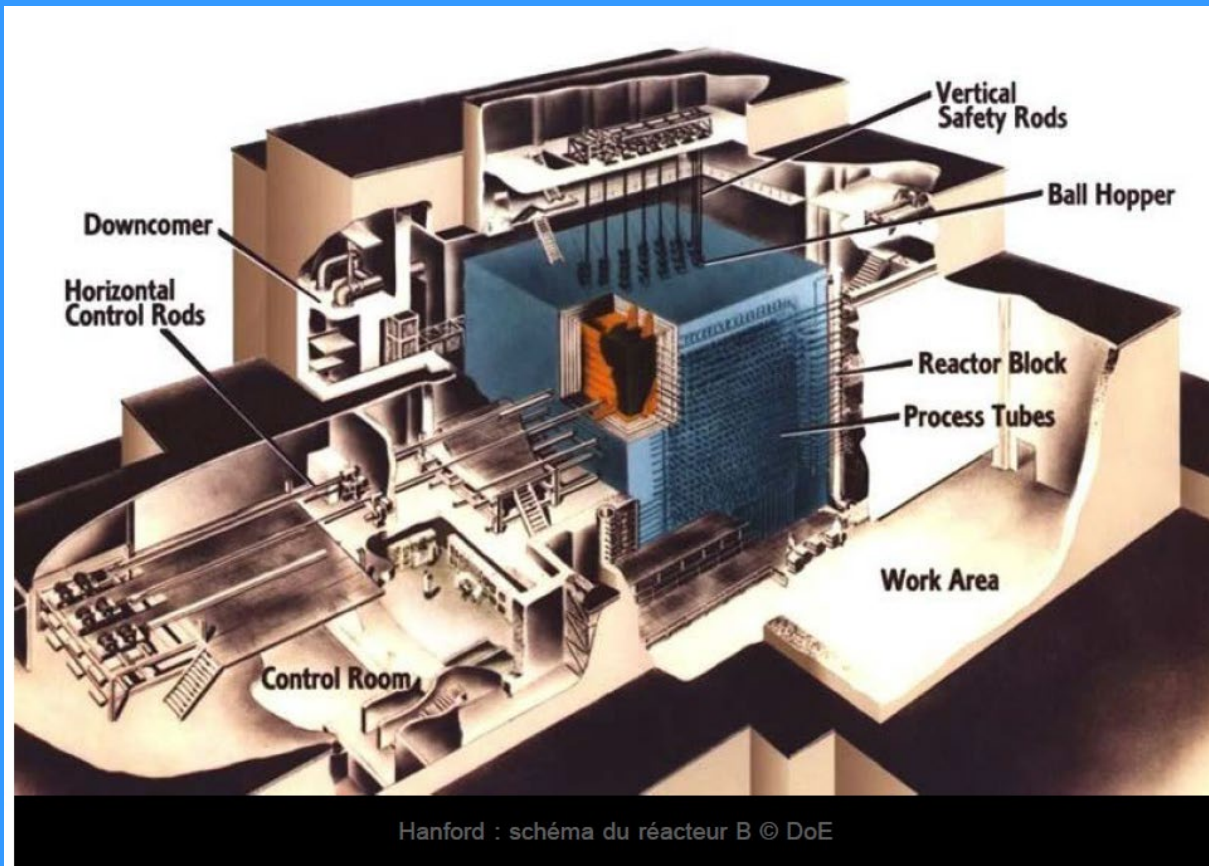


Hanford

- Lieu isolé (sécurité en cas d'accident) et avec puissance électrique (Barrage de Grand Coulee)
- Réacteurs de production (B, D et F)
- Wigner avec DuPont
- Refroidi par eau 250 MW
- 6 Kg Pu par mois à partir de juin 1945
- Divergence 26 septembre 1944
- Empoisonnement Xenon
- Usine de séparation chimique du Pu (T, B et U)
- Plus de 51 000 personnes fin 44



Hanford Réacteur B





Hanford

Usine de séparation chimique





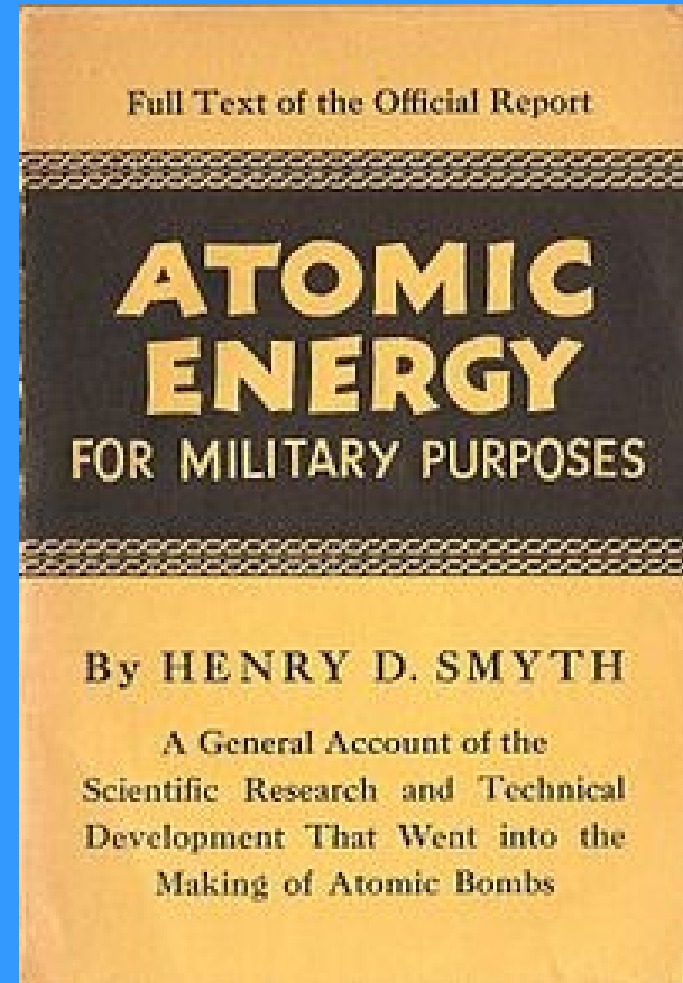
Budgets et personnels

- 130 000 personnes au maximum (1944)
- 2,6 B\$ 1945 (incluant les coûts annexes)
- Moins de 1% des dépenses de guerre américaines
- 90% construction des labos et usines



Le rapport Smyth

- Annoncé à la presse le 12 août 1945
- Premier tirage en litho 1000 exemplaires
- Commencé à la mi 1944
- Très scientifico-technique
- Vendu à plus de 130 000 exemplaires !
- *Manhattan District History*
 - Histoire officielle 35 volumes
 - 39 annexes
- Rédigé dans les années suivant la guerre





Héritage

- Réseau des laboratoires du DoE
 - Lawrence Berkeley
 - Los Alamos
 - Oak Ridge
 - Argonne
 - Ames
 - Brookhaven
 - Sandia (Albuquerque)
- Production de masse d'isotopes radioactifs (médecine et industrie)
- Naissance du nucléaire civil



Conclusions

- L'émergence de la bombe atomique était inéluctable
- Les circonstances historiques l'ont fait émerger aux USA pendant la guerre
- La culture anglo-saxonne fut favorable à son développement
- La course aux armements était en germe dans son existence (perçu par Szilard dès 1933)
- Elle n'a jamais (encore) été utilisée depuis 1945
- A engendré la théorie de la dissuasion
- Timides progrès du contrôle international des armes de destructions massives



Bibliographie

- *The making of the atomic bomb* Richard Rhodes – Simon & Schuster London - 2012 – Prix Pulitzer
- [Projet Manhattan](#) – fiche Wikipédia notée comme bon article par la communauté des lecteurs francophones
- [Manhattan Project History](#) – site interactif du Département of Energy US
- *The Manhattan Project* Cynthia C. Kelly – Black Dog & Leventhal Publishers NY – 2007 Livre de témoignages
- [The Smyth Report](#) – fiche Wikipédia en anglais
- [Manhattan District History](#) encyclopédie complète du projet (35 volumes et 39 annexes)