



# Le Projet Manhattan :

## Le développement de la « bombe atomique »

*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
  - Les 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

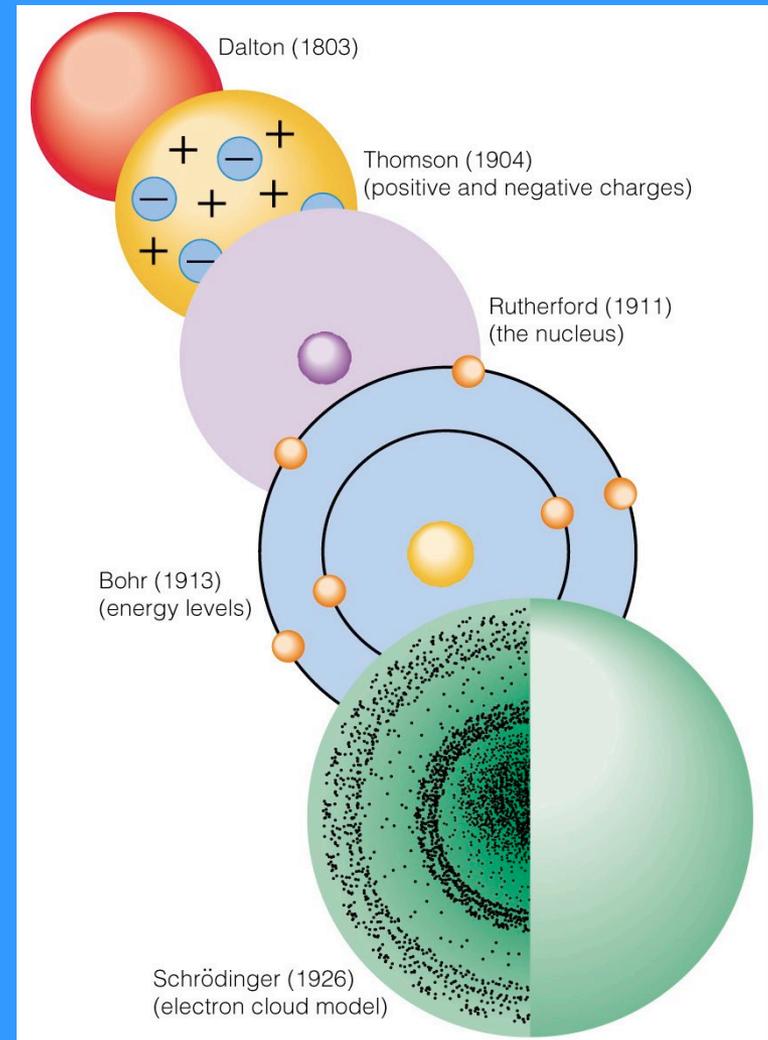


# La révolution de la physique atomique au début du XXème siècle

- 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 événements



# 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
- 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 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 (N.J)
- Harvard (MS)
- MIT (MS)
- Ann Arbor (Michigan)
- Berkeley (San Francisco)
- Caltech (San Francisco)
- John Hopkins (Baltimore)
- Mc Gill (Montreal)
- Cambridge
- Manchester
- KWI (Berlin)
- Göttingen
- Copenhague
- ESPC Paris
- Collège de France
- 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 chimie

## Table périodique des éléments

### TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

$Z$   
 Numéro atomique

$M$   
 Masse molaire atomique  
 (g.mol<sup>-1</sup>)

$X$   
 Symbole atomique

Famille

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogène 1,0																	2 He Hélium 4,0
3 Li Lithium 6,9	4 Be Béryllium 9,0																10 Ne Néon 20,2
11 Na Sodium 23,0	12 Mg Magnésium 24,3																18 Ar Argon 39,9
19 K Potassium 39,1	20 Ca Calcium 40,1	21 Sc Scandium 45,0	22 Ti Titane 47,9	23 V Vanadium 50,9	24 Cr Chrome 52,0	25 Mn Manganèse 54,9	26 Fe Fer 55,8	27 Co Cobalt 58,9	28 Ni Nickel 58,7	29 Cu Cuivre 63,5	30 Zn Zinc 65,4	31 Ga Gallium 69,7	32 Ge Germanium 72,6	33 As Arsenic 74,9	34 Se Sélénium 79,0	35 Br Brome 79,9	36 Kr Krypton 83,8
37 Rb Rubidium 85,5	38 Sr Strontium 87,6	39 Y Yttrium 88,9	40 Zr Zirconium 91,2	41 Nb Niobium 92,9	42 Mo Molybdène 95,9	43 Tc Technétium (98)	44 Ru Ruthénium 101,1	45 Rh Rhodium 102,9	46 Pd Palladium 106,4	47 Ag Argent 107,9	48 Cd Cadmium 112,4	49 In Indium 114,8	50 Sn Étain 118,7	51 Sb Antimoine 121,8	52 Te Tellure 127,6	53 I Iode 126,9	54 Xe Xénon 131,3
55 Cs Césium 132,9	56 Ba Baryum 137,3	57 La Lanthane 138,9	72 Hf Hafnium 178,5	73 Ta Tantale 183,8	74 W Tungstène 186,2	75 Re Rhenium 186,2	76 Os Osmium 190,2	77 Ir Iridium 192,2	78 Pt Platine 195,1	79 Au Or 197,0	80 Hg Mercure 200,6	81 Tl Thallium 204,4	82 Pb Plomb 207,2	83 Bi Bismuth 209,0	84 Po Polonium (209)	85 At Astate (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Uun Ununillium (269)	111 Uuu Ununium (272)	112 Uub Unbium (277)	114 Uuq Ununquadium	116 Uuh Ununhexium	118 Uuo Ununoctium			
			58 Ce Cérium 140,1	59 Pr Prasodyme 140,9	60 Nd Néodyme 144,2	61 Pm Prométhium (145)	62 Sm Samarium 150,4	63 Eu Europium 152,0	64 Gd Gadolinium 157,4	65 Tb Terbium 158,9	66 Dy Dysprosium 162,5	67 Ho Holmium 164,9	68 Er Erbium 167,3	69 Tm Thulium 168,9	70 Yb Ytterbium 173,0	71 Lu Lutétium 175,0	
			90 Th Thorium 232,0	91 Pa Protactinium 231,0	92 U Uranium 238,0	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium 244	95 Am Américium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkélium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (254)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendélium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lw Lawrencium (260)	

Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834 - 1907) est un chimiste russe connu pour ses travaux sur la classification périodique des éléments. En 1869, il publia une première version de son tableau périodique des éléments appelé aussi tableau de Mendeleïev. Il déclara que les éléments chimiques devaient être arrangés selon un modèle qui permettait de prévoir les propriétés des éléments non encore découverts.

Ministère de l'Éducation nationale  
Ministère de l'Enseignement supérieur  
Ministère de la Recherche

Centre de Recherche Interdisciplinaire  
en Chimie et en Sciences de la Matière

DELEGATION INTERNET

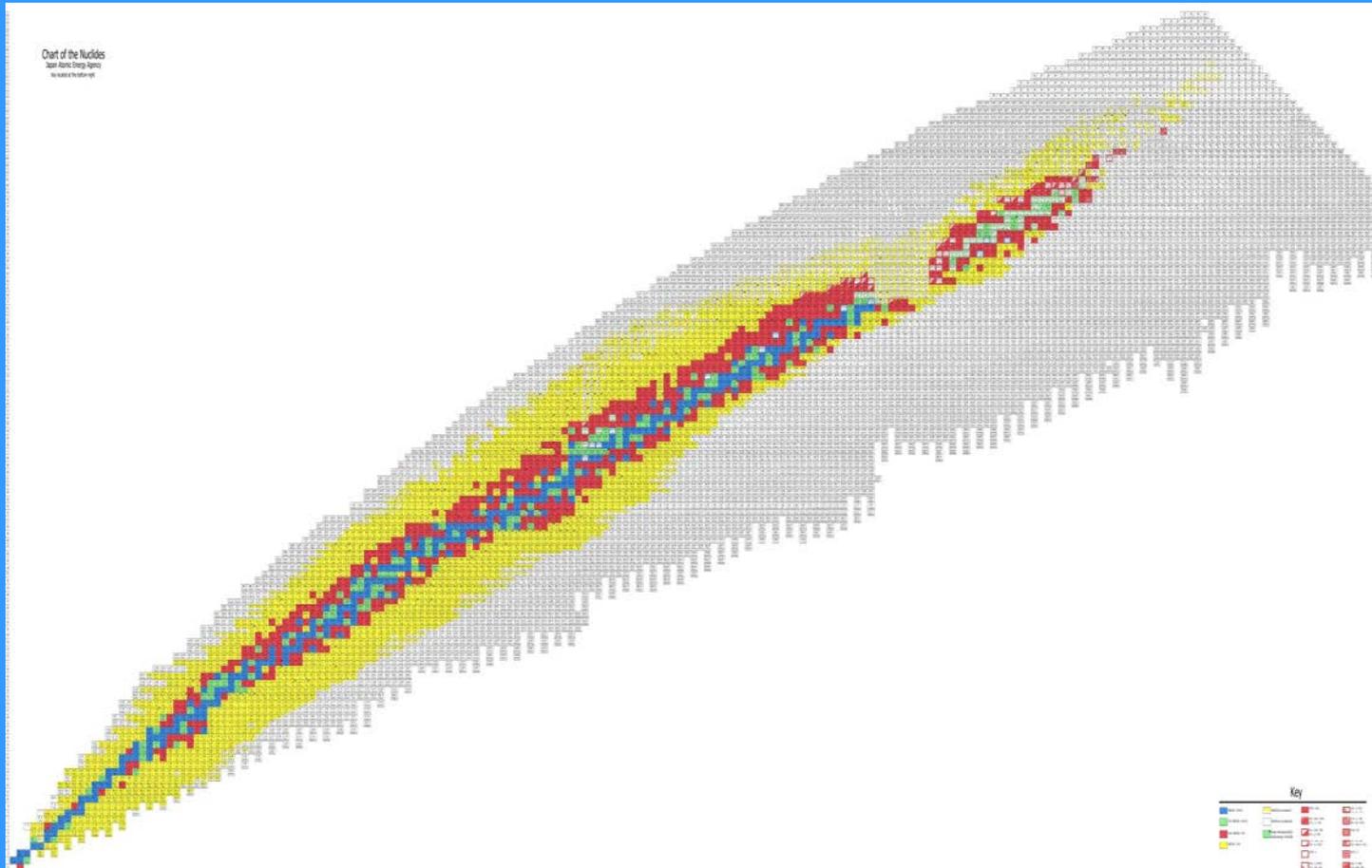
Éléments solides	Éléments liquides	Éléments gazeux	Éléments métalloïdes
Famille			
Metallalcoïdes	Métalloïdes	Métalloïdes	Métalloïdes
Alcalino-terreux	Alcalins	Alcalino-terreux	Alcalins
Métalloïdes	Alcalino-terreux	Alcalins	Alcalino-terreux
Métalloïdes	Alcalino-terreux	Alcalins	Alcalino-terreux

<http://www.science.gouv.fr>



# Quelques rappels de physique

## Diagramme N-Z





# Quelques rappels de physique

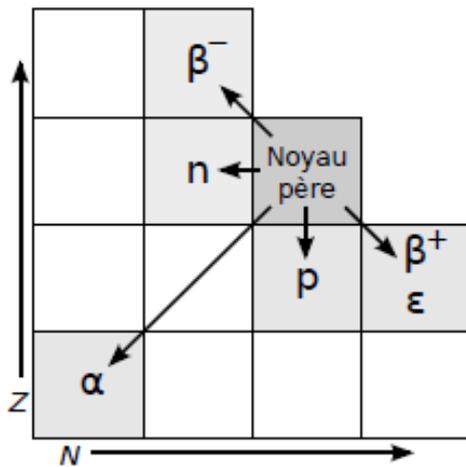
## Diagramme N-Z

	K1 60	K1 67	K1 68	K1 69	K1 70	K1 71	K1 72	K1 73	K1 74	K1 75	K1 76	
	0.00903s	0.0111s	0.0172s	0.032s	0.052s	0.064s	17.2s	27.3s	11.5m	4.29m	14.8h	
Br 63 0.00671s	Br 64 0.00824s	Br 65 0.0133s	Br 66 0.016s	Br 67 0.0251s	Br 68 0.0248s	Br 69 0.192s	Br 70 2.2s	Br 71 21.4s	Br 72 1.31m	Br 73 3.4m	Br 74 46m	Br 75 1.612h
Se 62 0.0104s	Se 63 0.0134s	Se 64 0.0225s	Se 65 0.0272s	Se 66 0.033s	Se 67 0.136s	Se 68 35.5s	Se 69 27.4s	Se 70 41.1m	Se 71 4.74m	Se 72 8.4d	Se 73 7.15h	Se 74 0.89
As 61 0.0157s	As 62 0.0205s	As 63 0.0342s	As 64 0.018s	As 65 0.128s	As 66 0.09577s	As 67 42.5s	As 68 2.527m	As 69 15.23m	As 70 52.6m	As 71 2.72d	As 72 1.083d	As 73 80.3d
Ge 60 0.0304s	Ge 61 0.04s	Ge 62 0.129s	Ge 63 0.142s	Ge 64 1.062m	Ge 65 30.9s	Ge 66 2.26h	Ge 67 18.9m	Ge 68 271d	Ge 69 1.627d	Ge 70 20.84	Ge 71 11.43d	Ge 72 27.54
Ga 59 0.046s	Ga 60 0.07s	Ga 61 0.1162s	Ga 62 0.1161s	Ga 63 32.4s	Ga 64 2.627m	Ga 65 15.2m	Ga 66 9.49h	Ga 67 3.262d	Ga 68 1.128h	Ga 69 60.108	Ga 70 21.14m	Ga 71 39.892
Zn 58 0.084s	Zn 59 0.182s	Zn 60 2.38m	Zn 61 1.485m	Zn 62 9.26h	Zn 63 38.47m	Zn 64 48.63	Zn 65 244.1d	Zn 66 27.9	Zn 67 4.1	Zn 68 18.75	Zn 69 13.76h	Zn 70 0.62
Cu 57 0.1963s	Cu 58 3.204s	Cu 59 1.358m	Cu 60 23.7m	Cu 61 3.333h	Cu 62 9.673m	Cu 63 69.17	Cu 64 12.7h	Cu 65 30.83	Cu 66 5.12m	Cu 67 2.576d	Cu 68 3.75m	Cu 69 2.85m
Ni 56 6.075d	Ni 57 1.483d	Ni 58 68.0769	Ni 59 7.6e+04y	Ni 60 26.2231	Ni 61 1.1399	Ni 62 3.6345	Ni 63 100.1y	Ni 64 0.9256	Ni 65 2.517h	Ni 66 2.275d	Ni 67 21s	Ni 68 29s
Co 55 17.53h	Co 56 77.23d	Co 57 271.7d	Co 58 70.86d	Co 59 100	Co 60 70.86d	Co 61 5.271y	Co 62 1.65h	Co 63 13.91m	Co 64 27.4s	Co 65 0.3s	Co 66 1.2s	Co 67 0.233s
Fe 54 5.84s	Fe 55 2.744y	Fe 56 91.754	Fe 57 2.119	Fe 58 0.282	Fe 59 44.49d	Fe 60 1.5e+06y	Fe 61 5.98m	Fe 62 1.133m	Fe 63 6.1s	Fe 64 2s	Fe 65 1.32s	Fe 66 0.44s
Mn 53 3.7e+06y	Mn 54 312d	Mn 55 100	Mn 56 2.579h	Mn 57 1.423m	Mn 58 1.087m	Mn 59 4.59s	Mn 60 1.77s	Mn 61 0.67s	Mn 62 0.88s	Mn 63 0.275s	Mn 64 0.09s	Mn 65 0.092s
Cr 52 83.789	Cr 53 9.501	Cr 54 2.365	Cr 55 3.497m	Cr 56 5.94m	Cr 57 -0s	Cr 58 7s	Cr 59 0.46s	Cr 60 0.49s	Cr 61 0.251s	Cr 62 0.209s	Cr 63 0.113s	Cr 64 0.043s
V 51 99.75	V 52 3.743m	V 53 1.61m	V 54 49.8s	V 55 6.54s	V 56 0.216s	V 57 0.35s	V 58 0.185s	V 59 0.097s	V 60 0.122s	V 61 0.041s	V 62 0.0335s	V 63 0.017s
Ti 50 5.18	Ti 51 5.76m	Ti 52 1.7m	Ti 53 32.7s	Ti 54 1.5s	Ti 55 1.3s	Ti 56 0.2s	Ti 57 0.098s	Ti 58 0.059s	Ti 59 0.03s	Ti 60 0.022s	Ti 61 0.0291s	Ti 62 0.0172s
Sc 49 57.18m	Sc 50 1.708m	Sc 51 12.4s	Sc 52 8.2s	Sc 53 3s	Sc 54 0.292s	Sc 55 0.105s	Sc 56 0.0809s	Sc 57 0.013s	Sc 58 0.012s	Sc 59 0.018s	Sc 60 0.0134s	Sc 61 0.00883s
Ca 48 0.187	Ca 49 8.718m	Ca 50 13.9s	Ca 51 10s	Ca 52 4.6s	Ca 53 0.09s	Ca 54 0.086s	Ca 55 0.022s	Ca 56 0.011s	Ca 57 0.0193s	Ca 58 0.0123s	Ca 59 0.01s	Ca 60 0.00674s
K 47 17.5s	K 48 6.8s	K 49 1.26s	K 50 0.472s	K 51 0.365s	K 52 0.105s	K 53 0.03s	K 54 0.01s	K 55 0.00758s	K 56 0.00602s	K 57 0.00399s	K 58 0.00318s	K 59 0.00221s
Ar 46 8.4s	Ar 47 1.23s	Ar 48 0.475s	Ar 49 0.17s	Ar 50 0.085s	Ar 51 0.0141s	Ar 52 0.00872s	Ar 53 0.00709s	Ar 54 0.00469s		Ar 56 0.00244s		Ar 58 0.00141s



# Quelques rappels de physique

## Les diverses formes de désintégration



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

Tableau interactif N-Z

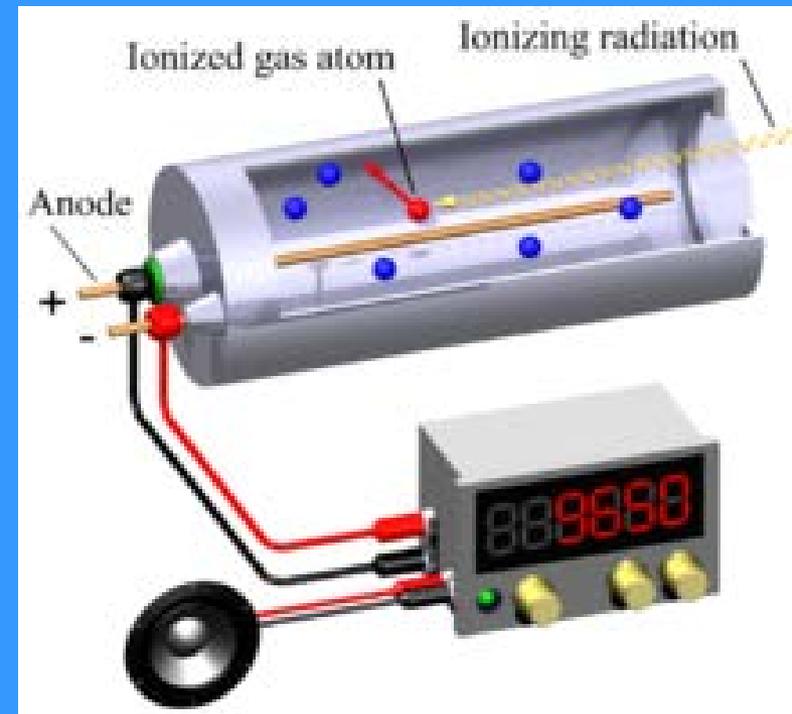


# Les outils de la physique nucléaire (1920-1940)

- Le compteur Geiger
- Le spectromètre de masse
- L'accélérateur Van de Graaf
- Le cyclotron
- La chambre à brouillard et à bulles

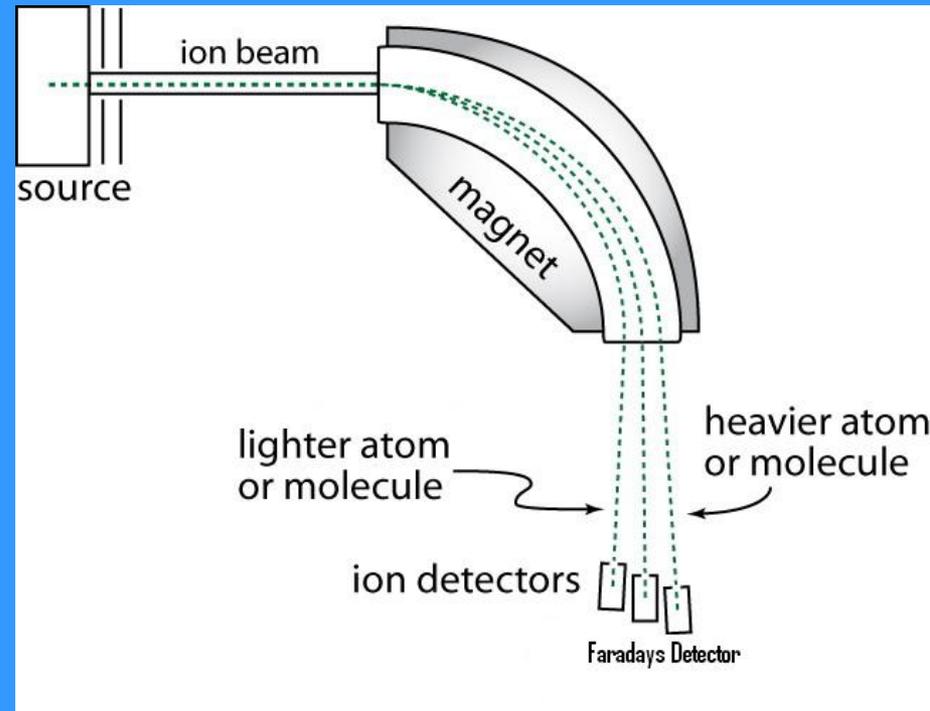
# Le compteur Geiger-Müller (1925)

- Tube avec gaz inerte sous faible pression et haute tension entre le fil central et le cylindre
- Le passage d'une particule ou d'un photon génère une ionisation amplifiée par l'effet cascade
- Compteur et Haut parleur (les clics)



# Le spectromètre de masse Aston (1918)

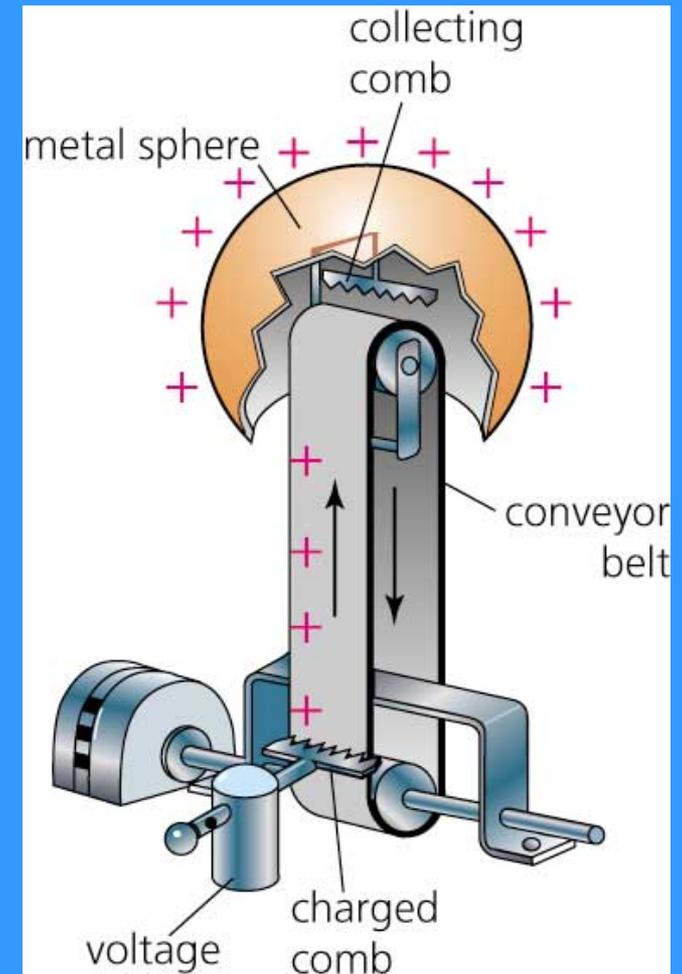
- Déviation différenciée d'un rayon de particules électrisées dans un puissant champ magnétique
- Permet de séparer les isotopes d'un même élément





# L'accélérateur Van de Graaf (1931)

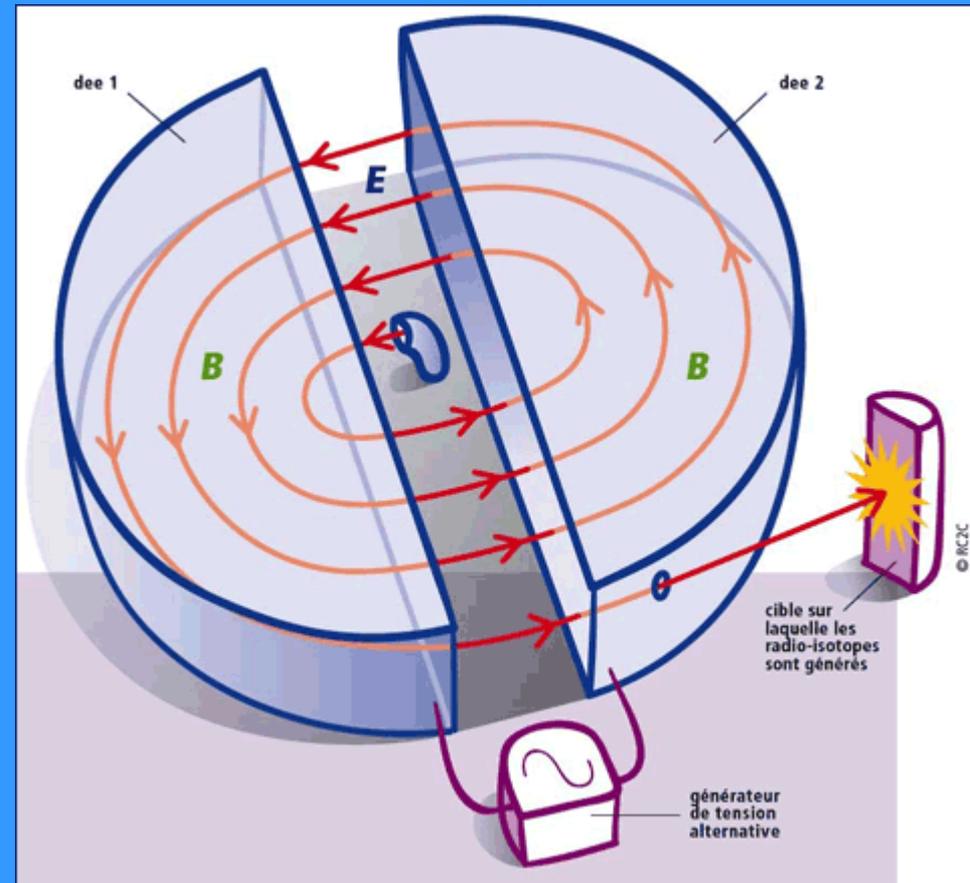
- Accumulation de charges transportées par une courroie isolante
- Jusqu'à 5 MeV
- Accélérateurs linéaires électrostatiques



# Le Cyclotron

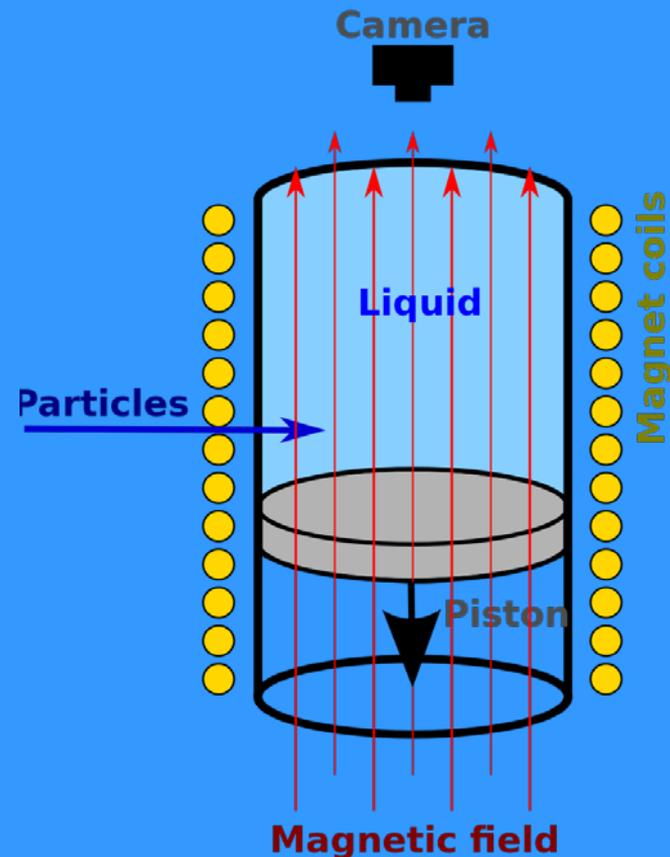
## Ernest Lawrence (1932)

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



# La chambre à brouillard et à bulles

- Liquide transparent sous pression traversé par particules auquel ont fait subir une brutale décompression
- Les trajectoires se matérialisent et sont photographiées (flash)
- Un champ magnétique permet de repérer et de mesurer les caractéristiques des particules chargées





# Le contexte historique Allemagne

- 30 janvier 1933 : Hitler Chancelier
- 27 février 1933 : Incendie du Reichstag
- 26 avril 1933 : Gouvernement par décret sans consulter le parlement pour 4 ans
- 1935 : Lois antijuives
- Mars 1938 : Anschluss
- Septembre 1938 : Sudètes



# Le contexte historique USA

- Troisième mandat de F.D. Roosevelt (non intervention en Europe)
- Conscription (1940)
- The arsenal of the Democracy (29 dec 1940)
- Four Freedoms (6 janvier 1941)
- Programme Lend-Lease (1941)
- Aide militaire à l'URSS (oct 1941)
- Attaque Pearl Harbour (7 décembre 1941)



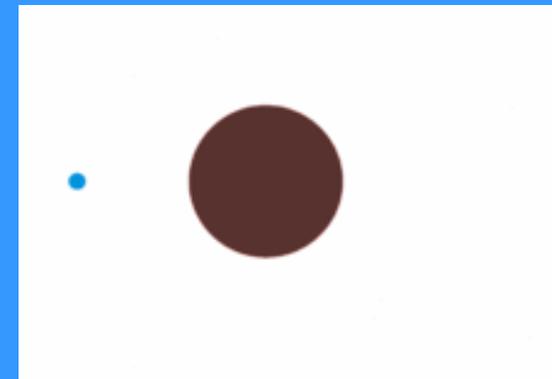
# L'émigration des scientifiques d'Allemagne

- 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 (théorie de la goutte liquide)





# La découverte de la fission

- Confirmation le vendredi 13 janvier 1938 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 1938 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)

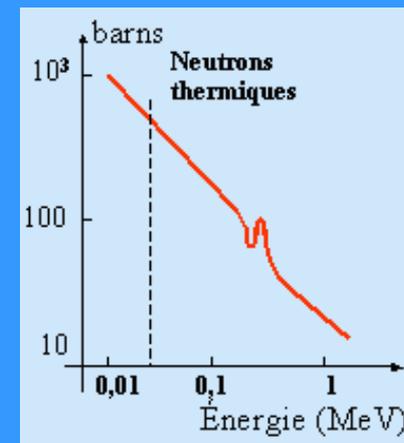
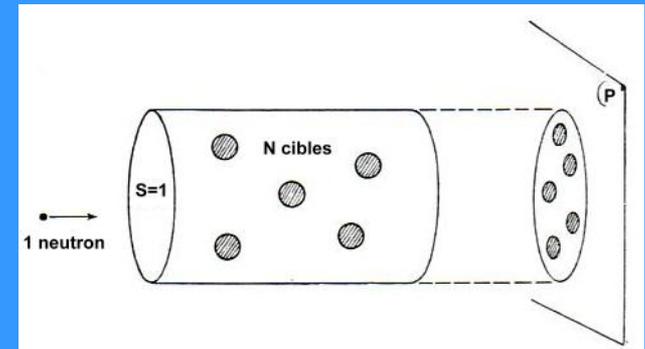


# Les prémisses de l'idée de réaction en chaîne

- 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

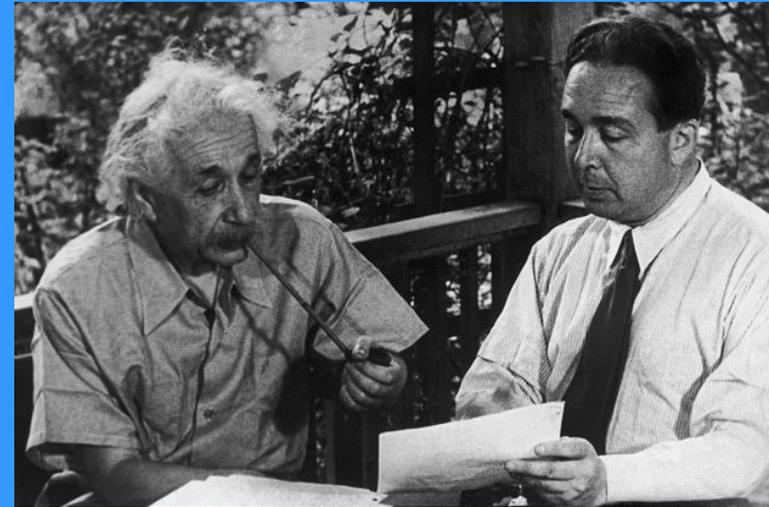
- Probabilité d'obtenir une fission en fonction de l'énergie incidente
- Etude systématique des différents isotopes Pu , U et Th
- Les isotopes à nombre impair de nucléons ont une probabilité plus forte de fissionner (Th 233, U 235, Pu 239)
- Idée de les séparer afin de réduire la masse critique nécessaire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





# La lettre Szilard-Einstein

- Trouver le moyen d'alerter les autorités politiques des USA
- Initiative (isolée) de Szilard, Utiliser la renommée d'Einstein
- Nombreuses versions entre le 16 juillet (Wigner, Teller, Einstein, Sachs) et le 1<sup>er</sup> septembre 1939 (Invasion Pologne)
- Communication orale et écrite à Roosevelt par Sachs le 11 octobre
- Comité de réflexion : Briggs, Roberts, Adamson, Szilard, Sachs, Wigner, Teller (21 octobre)
- Petit budget pour tests avec modérateur graphite (6000\$!)





# Organisation recherche militaire aux USA en 1940

- NDRC (National Defense Research Committee)
  - 27/6/1940 à 28/6/1941 (Roosevelt et V. Bush)
  - Coordination entre industrie et Armée (Stimson)
- OSRD (Office of Scientific Research and Development)
  - Insistance sur la coordination de la recherche appliquée
  - 28/07/1941/ décembre 1947



# Le Royaume Uni et la commission MAUD

- Lev Kowarski et Von Halban publient dans Nature en avril 1939 (Curies)
- Fuients la France à l'occupation en Angleterre avec leurs résultats
- Marcus Oliphant
- Otto Frisch et Rudolf Peierls mémorandum mars 1940
  - George Thomson (Chairman)
  - James Chadwick
  - John Cockcroft
  - Marcus Oliphant
  - Patrick Blackett
  - Charles Ellis
  - William Haworth
  - Philip Moon
- MAUD report juillet 1940 bombe faisable et transportable par avion



# Le Royaume Uni et la commission MAUD

- Envoyé à Briggs (USA) qui l'enterre (aout 1940)
- Court-circuit par scientifiques (Allison, Conant, Compton, Lawrence, Fermi) octobre 1940
- Urey et Pegram en Angleterre
- Amorce d'une future coopération (Accords de Québec 19 aout 1943); Echanges mais secret vis-à-vis de tous les autres pays
- Fuite NKVD en 1943 qui obtient le rapport
- Staline nomme Kurchatov directeur de cette recherche mais avec de faibles moyens



# La phase bureaucratique

- Compétition intense sur les budgets liés à la guerre
- L'effort de R & D porte essentiellement sur le Radar le Sonar et les torpilles et « gèle » de nombreux scientifiques
- Lend-Lease
- Accès aux ressources minérales
- Invasion URSS 22 juin 1941 (Barbarossa)
- Lutte de pouvoir entre la communauté des scientifiques et Vannevar Bush (OSRD)



# La phase bureaucratique

- Briggs et Bush
- Comité de revue scientifique (Compton, Lawrence, Coolidge) 17 mai 1941 concertation avec la comité Uranium des britanniques
- Conant septique veut concentrer les moyens financiers sur la guerre conventionnelle (Invasion URSS 22 juin 1941)
- Draft rapport MAUD approuvé le 15 juillet définitif octobre
- Exposé à Roosevelt le 9 octobre
- Top Policy Group: VP Wallace Sec War Stimson
- Gal. Marshall, Bush, Conant
- Choix politiques réservés au Président et ne peut être discutée qu'au sein du TCG
- Faire un plan de développement



# 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



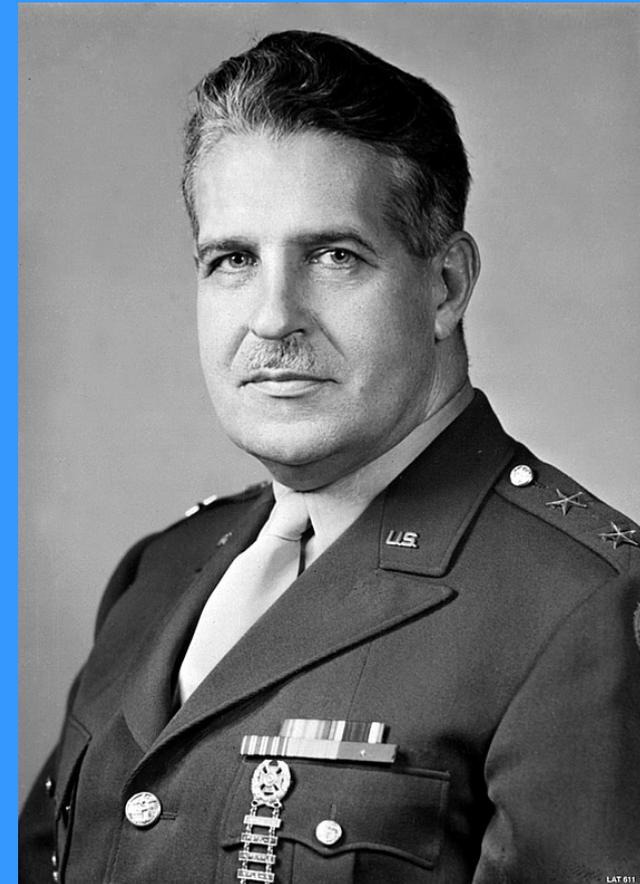
# Premiers pas du comité Uranium (S1) (dec. 1941-sept. 1942)

- 1<sup>ère</sup> réunion le 6 décembre (veille de Pearl Harbour)
- V; Bush, Samuel K. Allison, Breit, Edward U. Condon, Lloyd P. Smith Henry D. Smyth;
- Compton pour Pu, Urey pour diffusion gazeuse et Lawrence pour séparation électromagnétique
- Accélération de la mise au point du programme de recherche avec la guerre; Le délai prime la dépense (FDR)
- Nombreux essais préliminaires (séparation Pu, piles exponentielles avec U235..)
- Compétition pour la centralisation des recherches (Berkeley, Chicago, New York): Compton gagne pour Chicago.
- Décision de confier le projet conjointement OSRD et Armée.



# 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 (N.M)
- 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

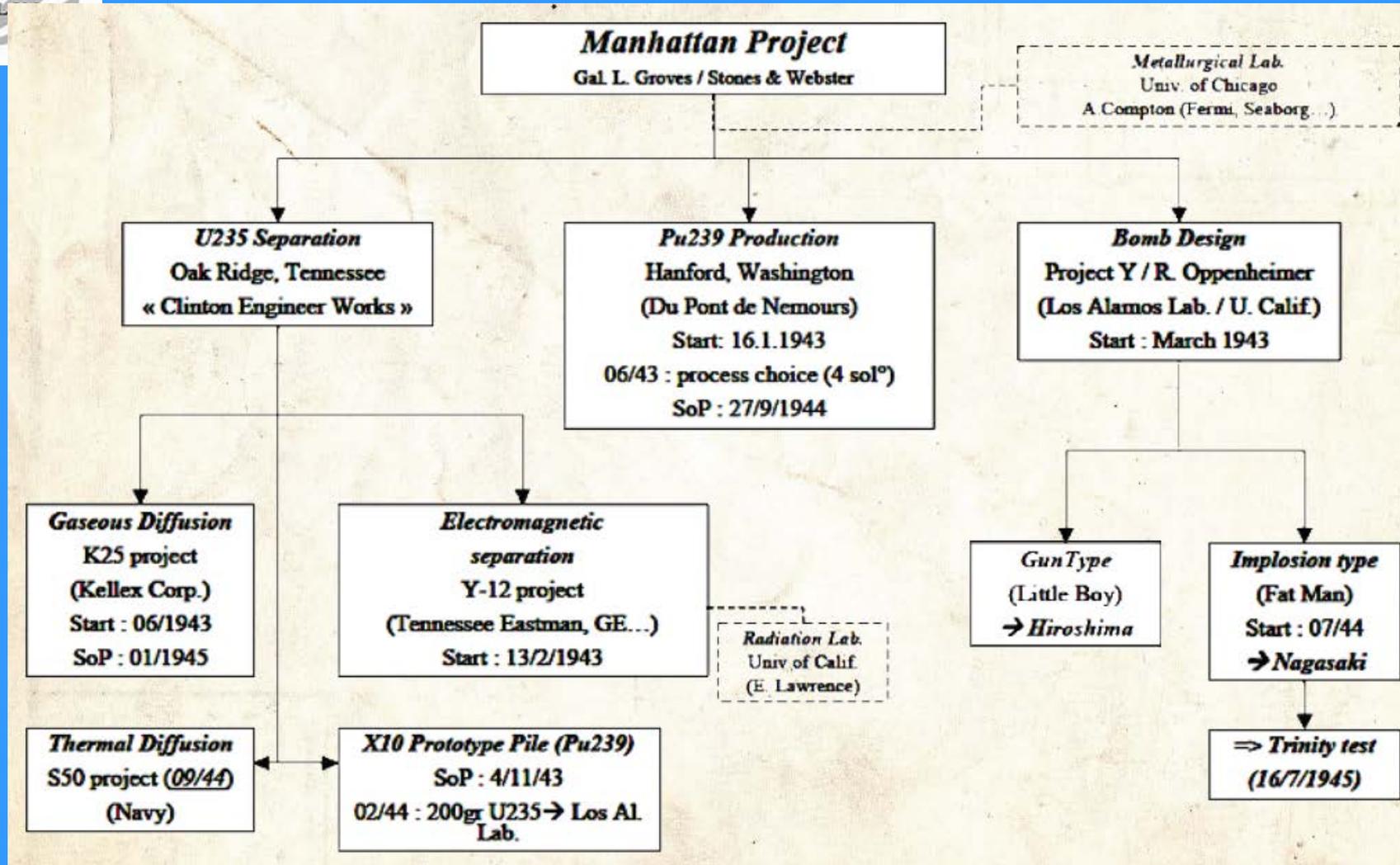
- Centralisation recherche à Chicago (Compton) 24 jan.1942
- Stone et Webster engineering pour Oak Ridge
- Été 42 colloque sur conception bombe
- Teller évoque (déjà) la bombe H
- Nomination de Groves 17 sept. 1942
- Brigadier Général et Directeur du Projet Manhattan 23 sept
- OSRD se retire et n'a plus 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)



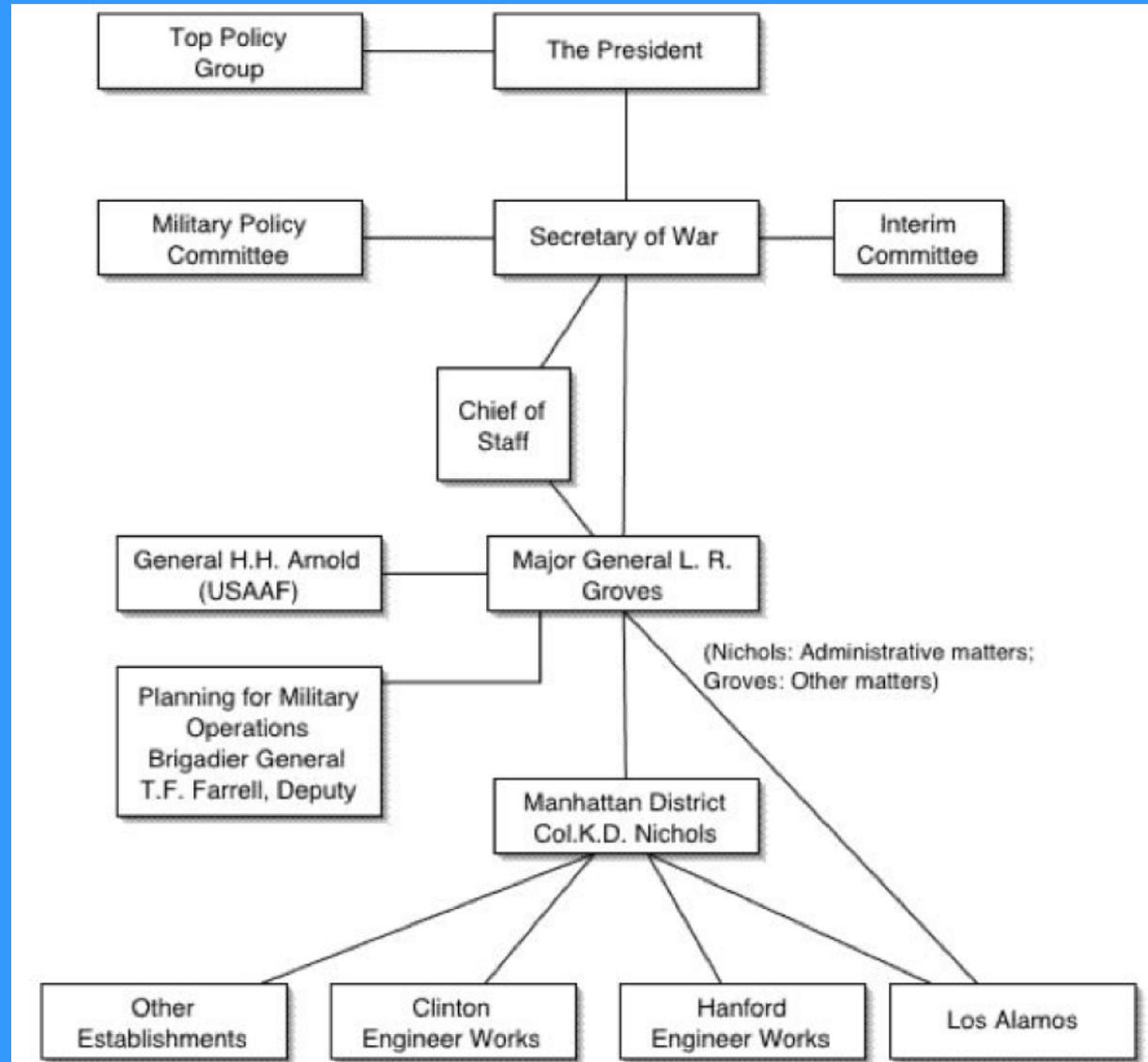
# Les débats sur l'organisation du Projet

- Approche parallèle de toutes les solutions techniques
- Objectif Bombe(s) opérationnelles juillet 1945
- Produire le plus vite possible de l'U 235 (Oak Ridge)
- Construire des réacteurs pour fabriquer du Pu et le séparer (Hanford)
- Concevoir la ou les bombes (Los Alamos)
- Accumuler une connaissance scientifique du nucléaire par tous calculs et expérimentations
- S'appuyer sur des fournisseurs et engineerings privés pour monter toutes ces activités

# Organigramme simplifié



# Organigramme fonctionnel





# 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



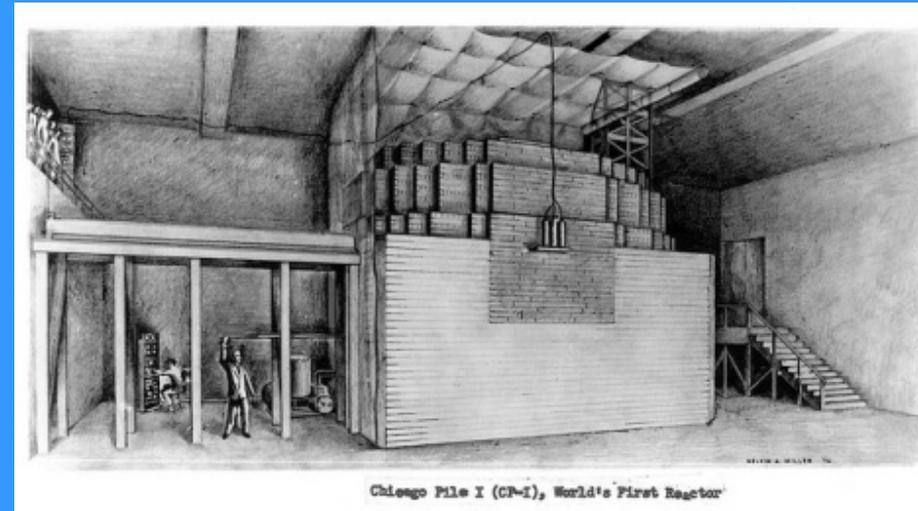
# La pile de Chicago

## 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 de l'Université
- 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<sup>er</sup> 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 fev 1943, démantèlement et transfert à Argonne





# Les débats sur l'organisation du Projet

- Statut des scientifiques
  - Militaire ou civil
- Centralisation des laboratoires
- Familles et modes de vie
- Rôle des contractants
- Sécurité et protection du secret
- Compartementalisation vs. Concertation



# 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 protection du secret

- Groves définit les objectifs
  - Secret vis-à-vis de l'ennemi
  - Monopoliser la connaissance pour la suprématie américaine après la guerre
  - Eviter les sabotages
  - Usage de la bombe limité à un très petit nombre d'officiels (éviter Congrès et autres administrations)
  - Compartementalisation
- Conflits entre Oppenheimer et la sécurité



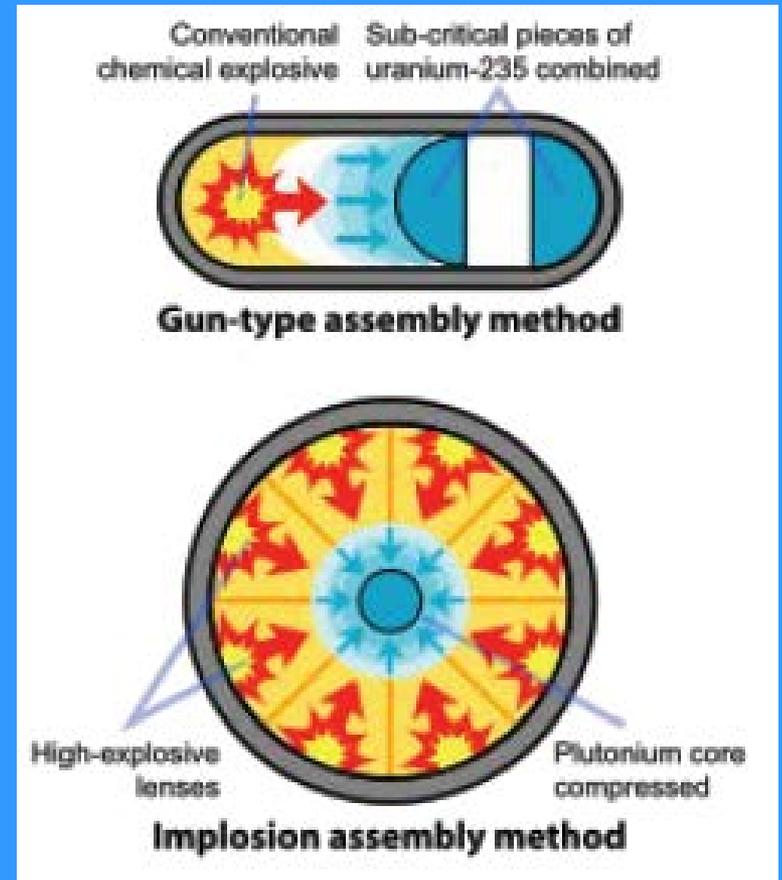
# La recherche des solutions

- **Bombe a l'Uranium**
  - Semble au départ plus accessible avec la séparation électromagnétique de l'U235
  - Conception canon sans surprise
  - Mais débit de production beaucoup trop faible
  - Complémenté par diffusion gazeuse et thermique puis par el fonctionnement calutron en cascade. On n'a que de quoi faire une bombe en 1945
  - Pas d'essai préliminaire
- **Bombe au Plutonium**
  - Plus faible masse critique
  - Demande réacteurs volumineux
  - Séparation et maîtrise de la métallurgie inconnues au départ



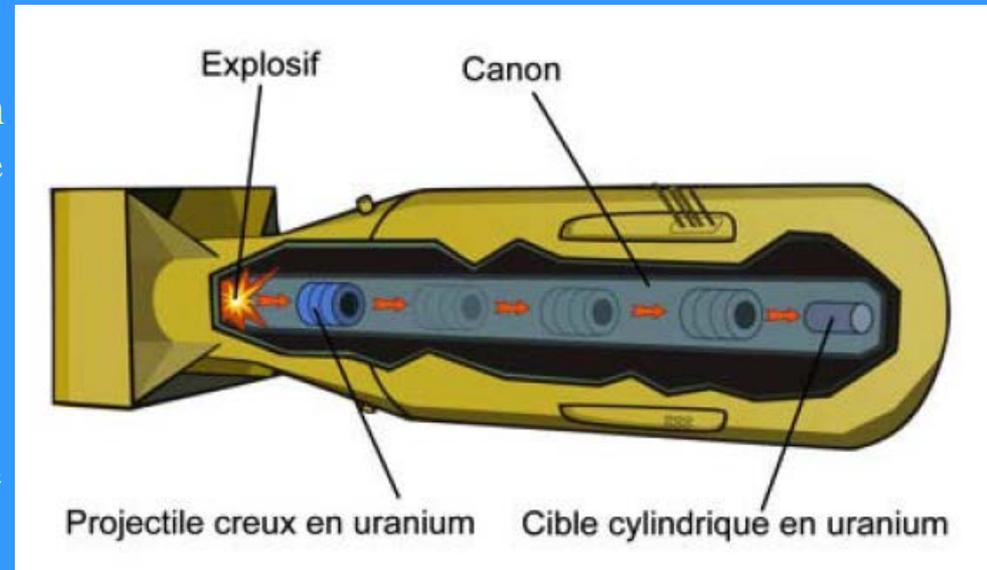
# Les deux principes de fonctionnement

- Type canon
- Type implosion
- Amorce (« allumette »)
- Vitesse de rapprochement



# La Bombe type canon

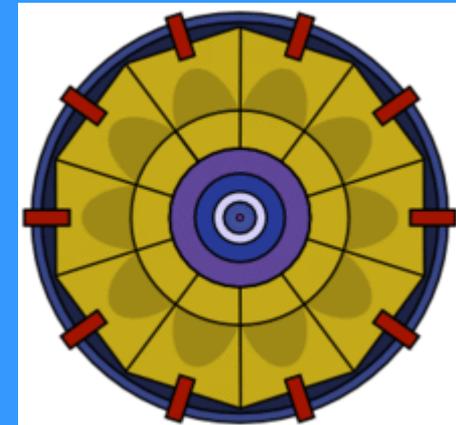
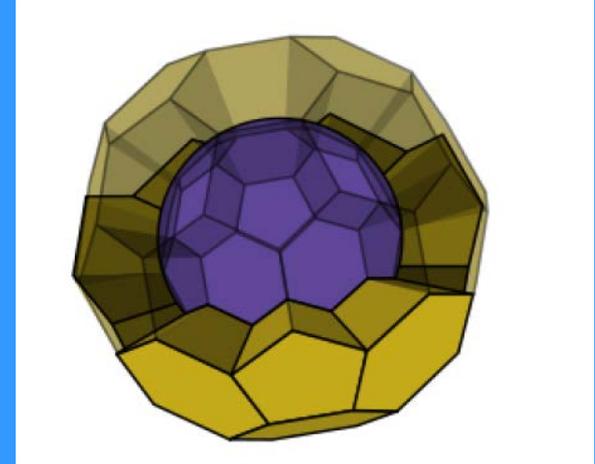
- Assemblage ultra rapide par projection d'une demi charge par explosif vers l'autre demi charge
- Création de la masse critique et réaction en chaine lancée par amorce d'un excédent de neutrons
- Contenir les matières fissiles le plus longtemps possible pour augmenter la puissance explosive
- Longueur et vitesse à l'impact de la charge
- 900 m/s puis 300 m/s) bombe plus courte
- Détermination masse critique par les essais guillotine (« chatouiller la queue du dragon »)





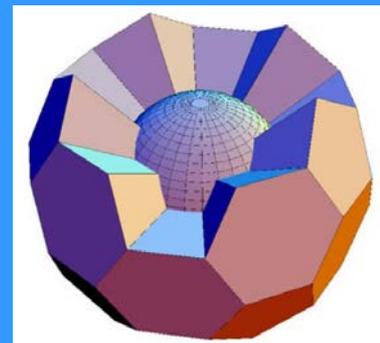
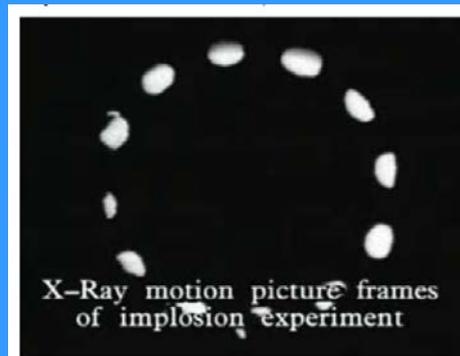
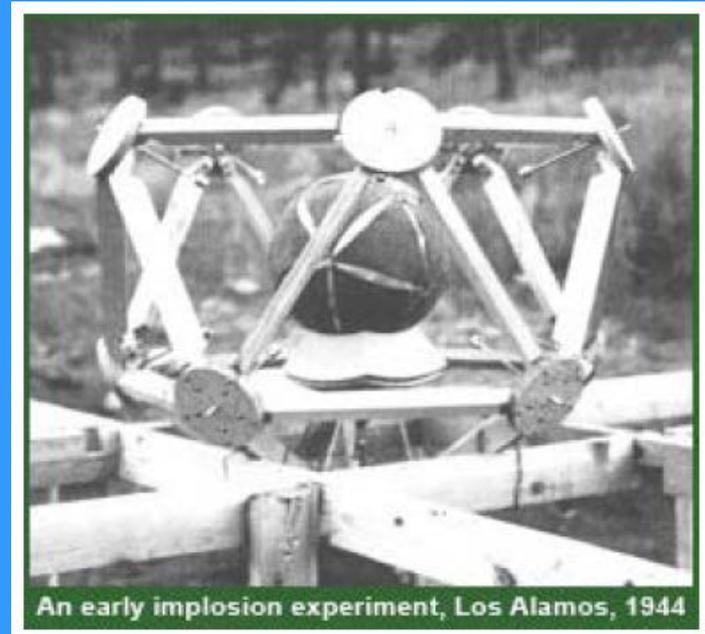
# La bombe à implosion

- Envisagée depuis 1943 pour miniaturiser la taille du noyau
- Pb des fissions spontanées du Pu 240 découvertes par Segrè en avril 1944
- La conception canon est inadaptée au Pu
- Concentration sur conception implosion
- Réorganisation des équipes (Teller, Bethe, Parsons, Neddermeyer, Kistiakowski)
- Problème de la simultanéité des explosions
- Décharge capacitive dans détonateurs EBW (Alvarez- Johnston)
- Simulations sur essais TNT (RaLa Tests)



# La bombe à implosion

- Essais de simulation TNT (RaLa)
- Vérification de la simultanéité des explosions des lentilles
- Filmé en RX et chambres d'ionisation ultra rapides
- De septembre 44 à mars 45
- Conception des blocs figée à ce stade





# La séparation isotopique U235/U238

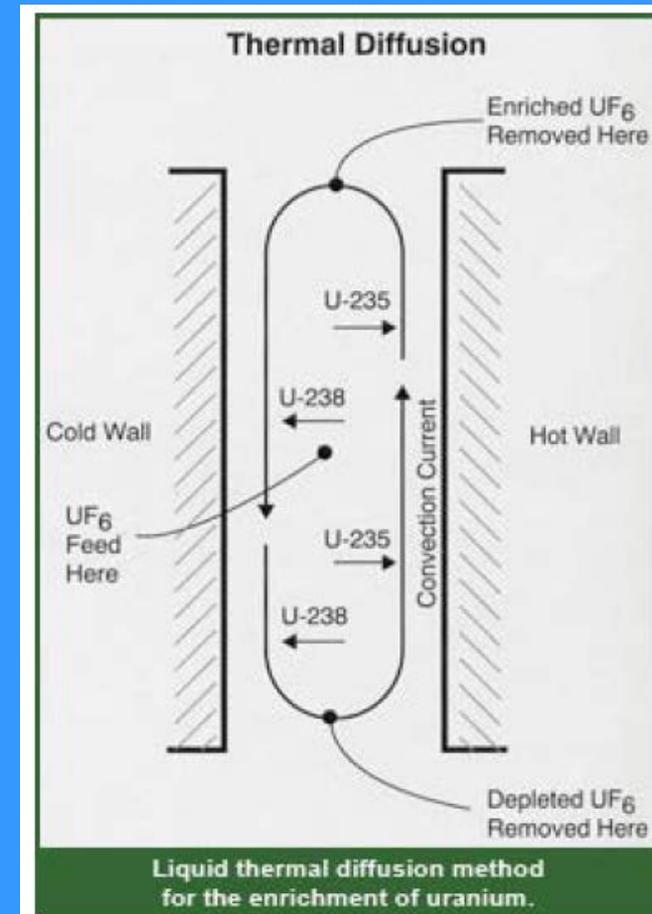
- Diffusion thermique
- Spectrométrie de masse
- Diffusion gazeuse
- Centrifugation (*abandonnée par le projet car considérée comme irréaliste – C'est celle qui supplante les autres aujourd'hui*)



# La séparation isotopique

## Diffusion thermique

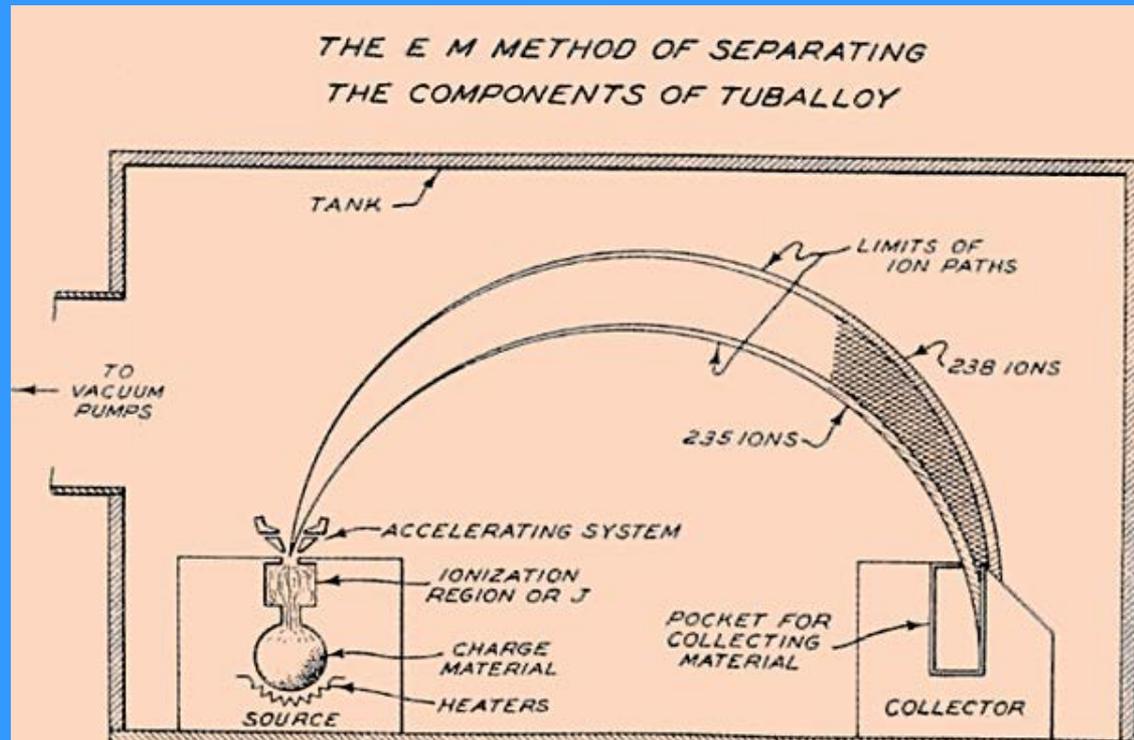
- Diffusion thermique
  - Usine S 50 (avril 44)
  - Donne une production de U 235 faiblement enrichi (1,4 %) qui accroît la production de Y 12
- Beta Calutrons



# La séparation isotopique

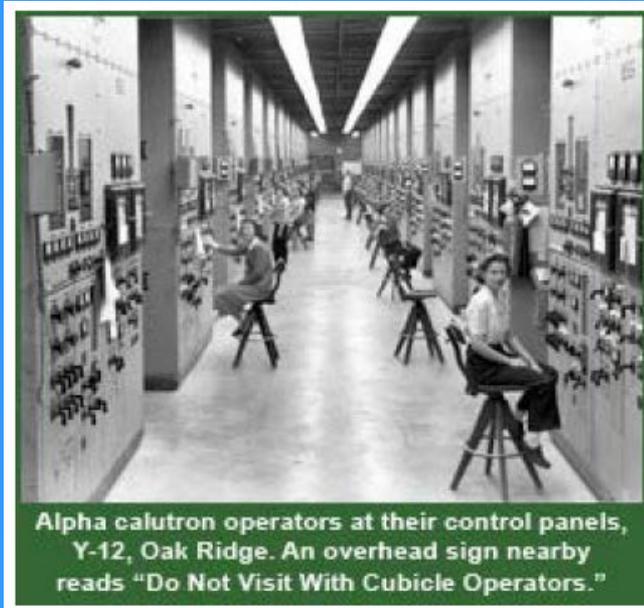
## Calutrons

- Calutrons
- Adaptation par Lawrence d'un gigantesque spectromètre de masse
- UCI4
- Alpha et Beta
- Fin 1943 aout 1945
- Problèmes de court circuits et de fuites de fluide de refroidissement
- 22 000 opératrices





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



Alpha calutron operators at their control panels, Y-12, Oak Ridge. An overhead sign nearby reads "Do Not Visit With Cubicle Operators."



Alpha Racetrack, Y-12 Electromagnetic Plant, 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 %)

19 mars 2018

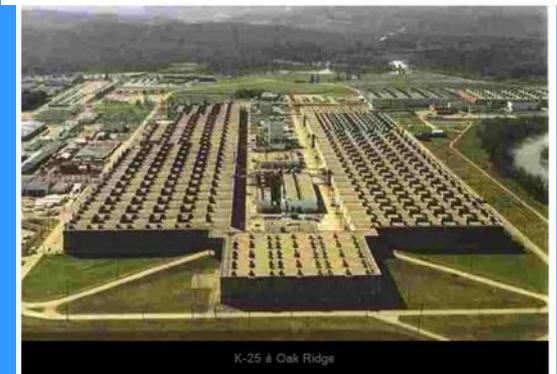
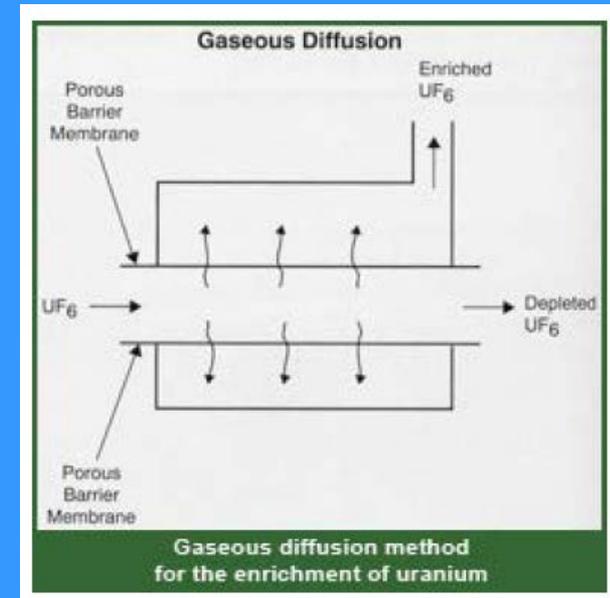


# La séparation isotopique

## Diffusion gazeuse

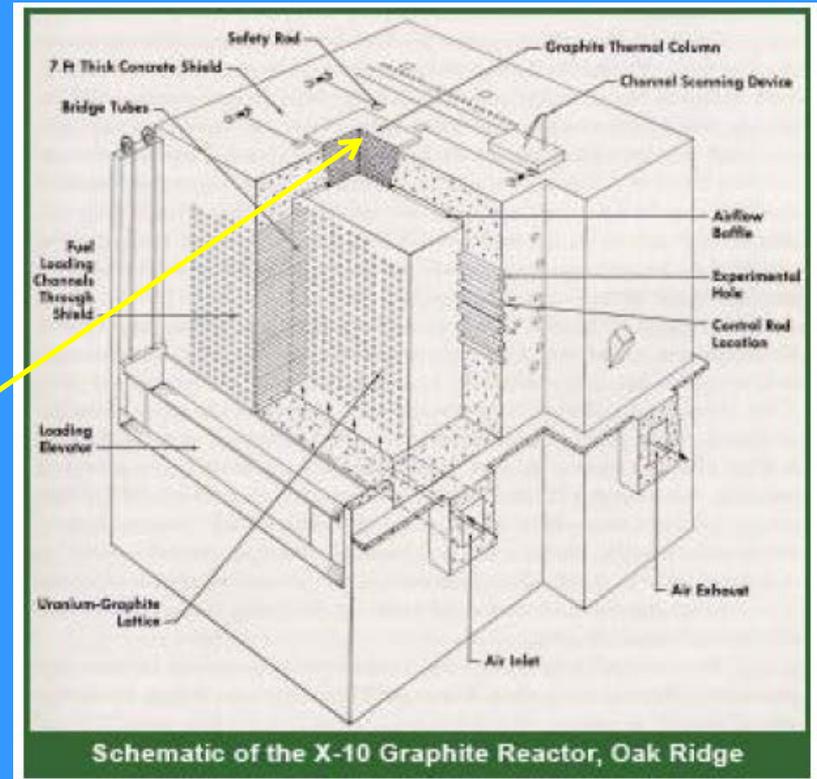
- Diffusion gazeuse
  - Dunning et Booth (Columbia) nov.41
  - UF<sub>6</sub> très corrosif
  - Technologie des barrières
    - Nickel fritté
    - Tuyauteries revêtues de Nickel électrodéposé puis Teflon
    - Houdaille Heshey Decatur 1<sup>er</sup> avril 44 tout fabriqué à la main Inox finement percé par électrochimie
  - Usine K25 Oak Ridge
  - Début de production 20 jan 45
  - Pleine production 20 fev (Y-12 vers K25)
  - Remplace progressivement les Calutrons

1945



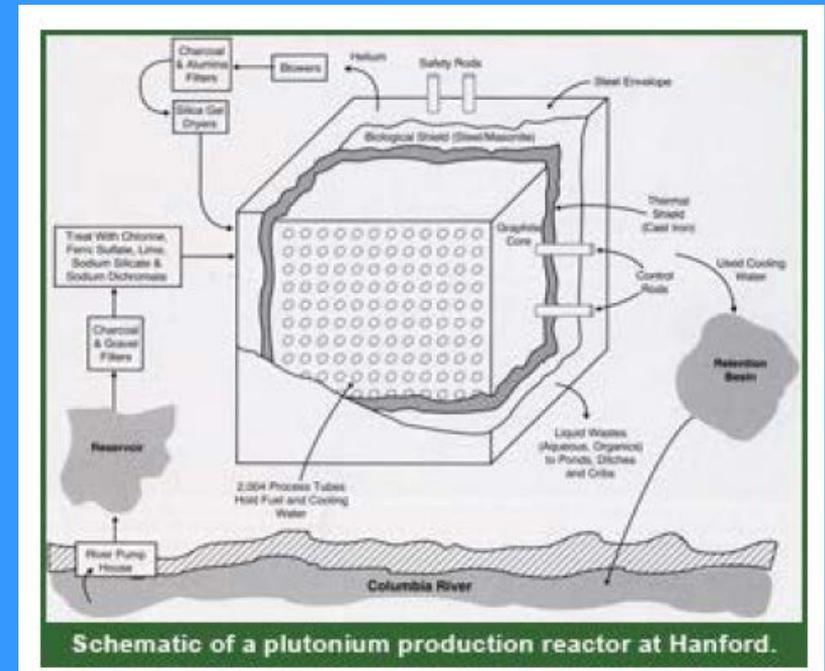
# La production de Plutonium

- Reacteur test X10 à Oak Ridge
- Conçu au MetLab par Weinberg et Wigner
  - Modérateur Graphite refroidi par air
  - 500 KW
  - U metal 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



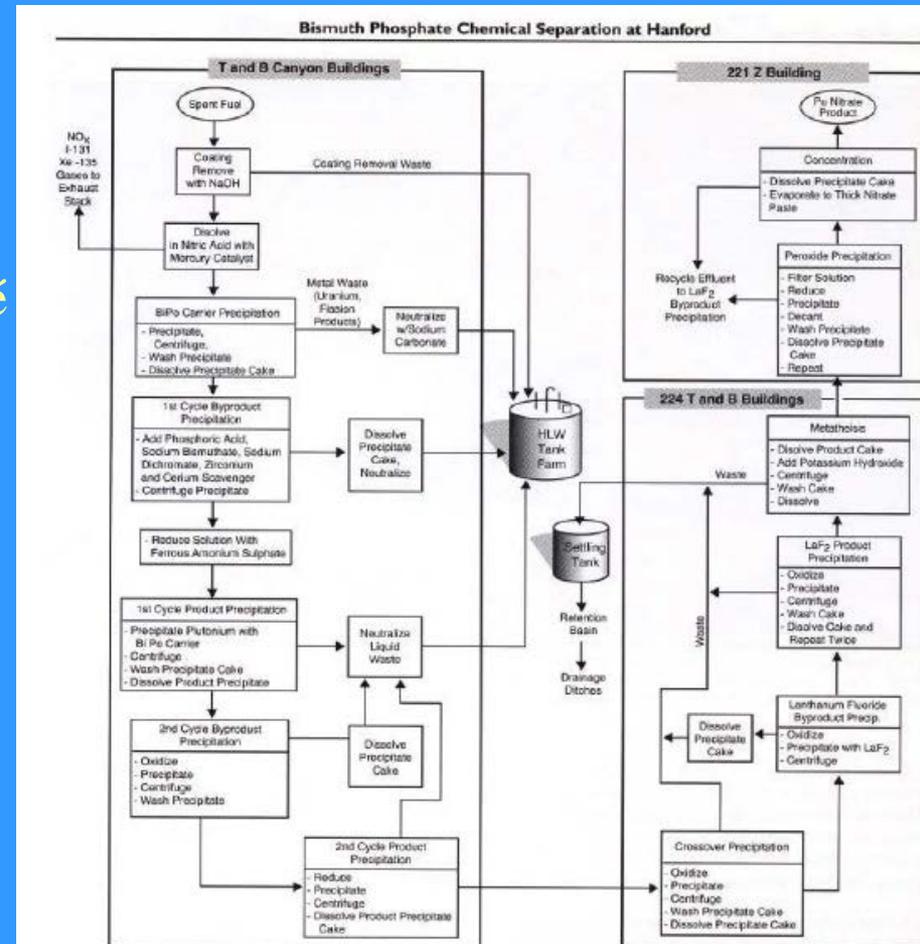


# La séparation chimique du plutonium

- 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

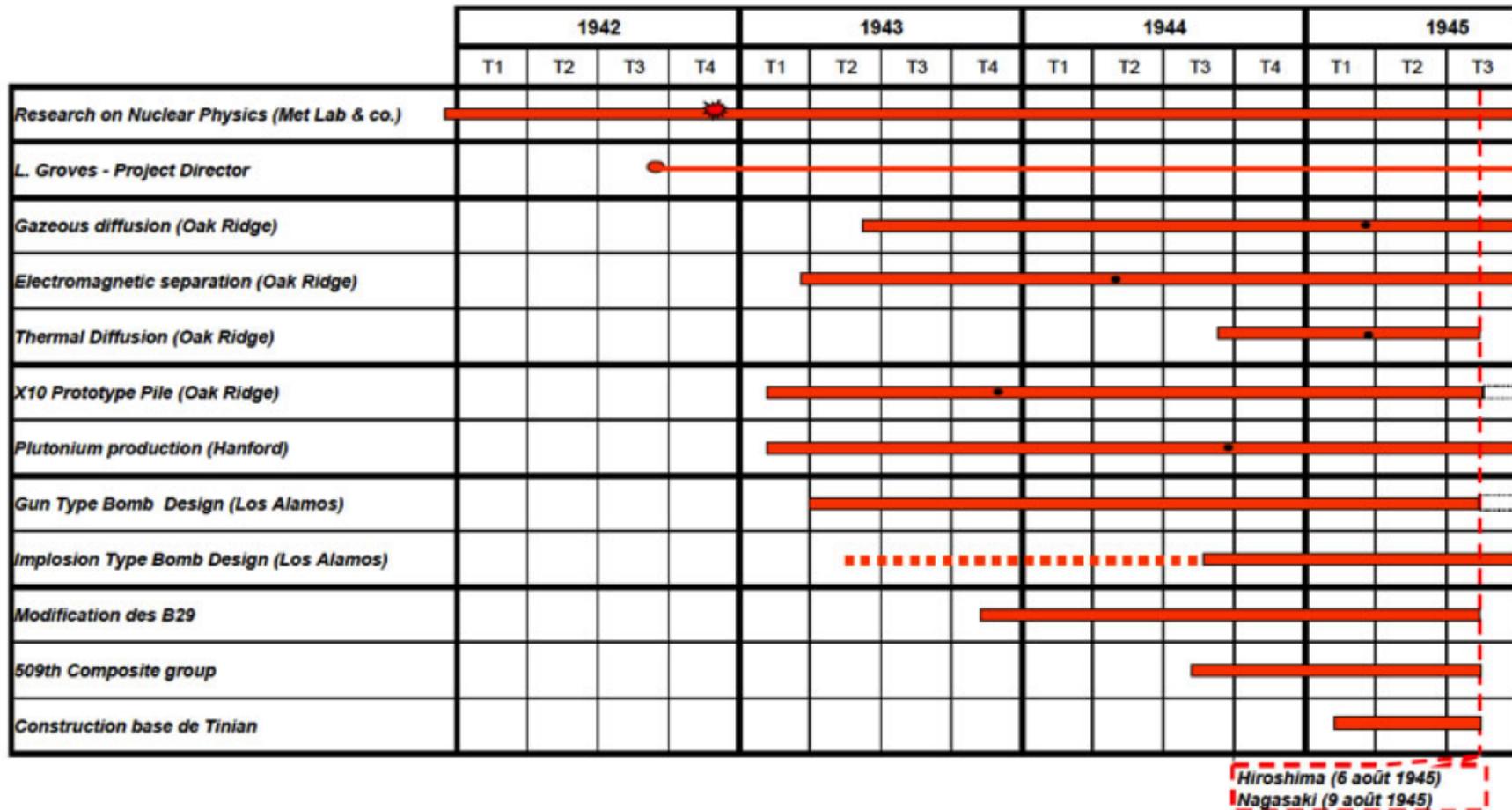


Hanford : l'intérieur (le « canyon ») du Queen Mary B ©DoE





# Le défi logistique et organisationnel





# Le défi logistique et organisationnel

- Acquisition terrains
- Recrutement de spécialistes (Oppenheimer)
- Marchés de construction et d'engineering
- Bases « vie » dans les labos isolés
- « Loisirs » dans les labos
- Relative lenteur des déplacements des spécialistes entre les labos (train)
- Passer de quelques dizaines à plus de 100 000 personnes en 2 ans
- Reporting et changements très fréquents de priorités
- Maintien du secret vis-à-vis de l'environnement et de la presse malgré l'énormité du projet



# Le défi logistique et organisationnel

- La gestion de conflits de personnes
  - Bethe-Teller
  - Neddermeyer-Kistiatowsky-Parsons
- La « formation continue »
- La documentation
- Le lien avec les politiques
- Le lien avec les opérations militaires
- La communication post- bombardement

# Sites de production et de recherche

**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

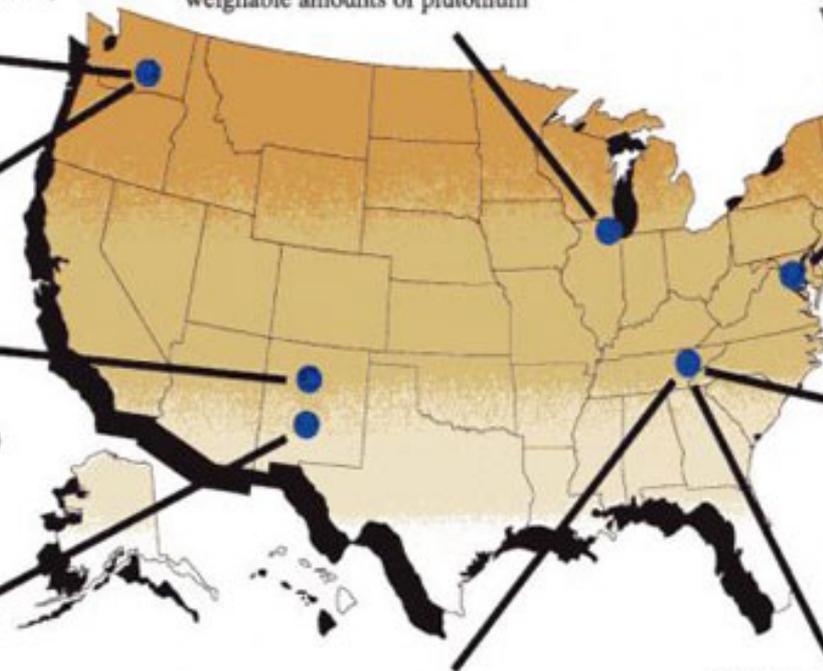
**V-Site Assembly Building/Gun Site, Los Alamos, New Mexico** Trinity device (prototype for Nagasaki plutonium weapon) and later weapons assembled at V-Site. Ordnance for uranium gun type Hiroshima weapon tested at Gun Site

**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

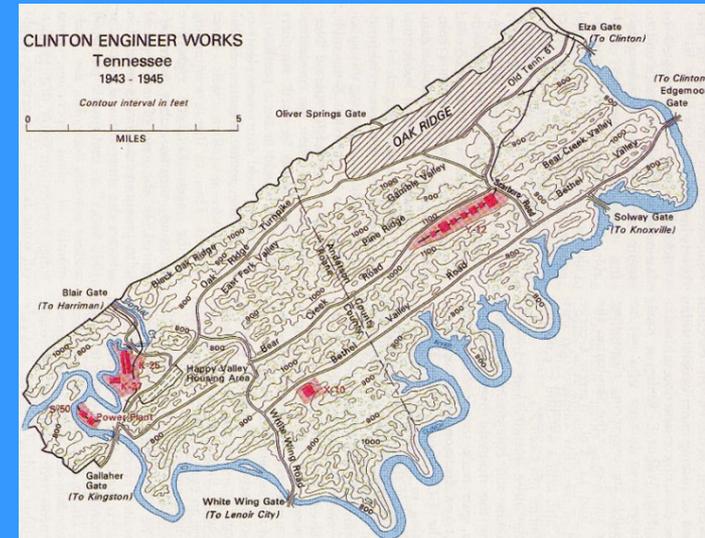
**Y-12 Beta-3 Racetrack, Oak Ridge, Tennessee** Produced enriched uranium for Hiroshima weapon (Little Boy) utilizing E. O. Lawrence's electromagnetic method





# Oak Ridge

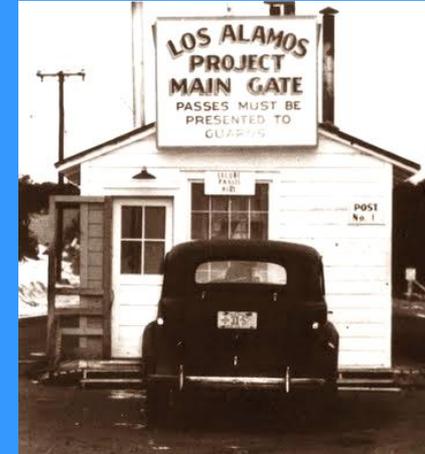
- X 10 réacteur modéré graphite
- K 25 Séparation par diffusion gazeuse
- Y 12 Calutrons « racetracks »
  - Alpha I
  - Alpha II
  - Beta
- S 50 séparation diffusion thermique
- Base vie importante
- Organisation des loisirs
- Plus de 45 000 personnes





# Los Alamos Site Y – « The Hill »

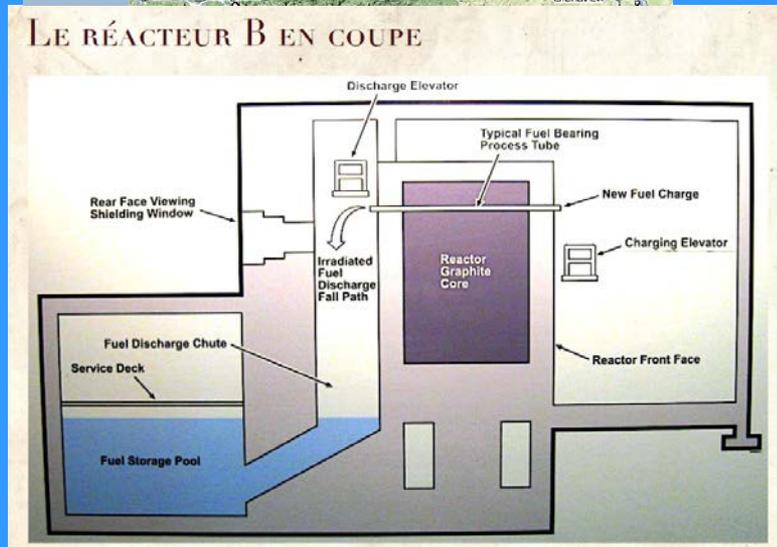
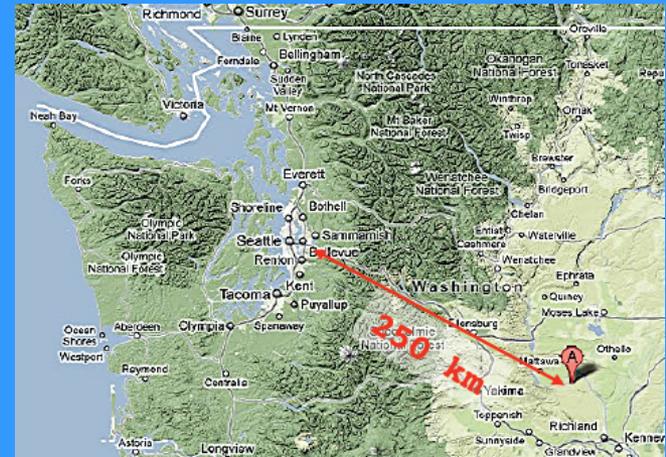
- Choisi ex-nihilo par Oppenheimer et Groves (conception bombe)
- Construction en temps record avec toutes infrastructures de vie
- Concertation des physiciens et chimistes
- PO Box 1663 Santa Fe NM
- Organisation du travail:
  - Division T Bethe
  - Division P Bacher
  - Division CM Kennedy
  - Division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



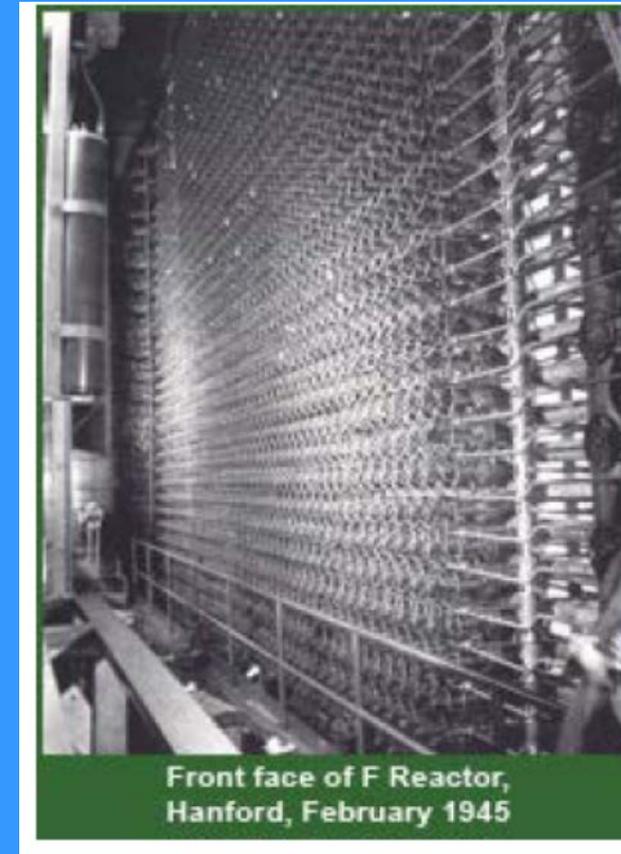
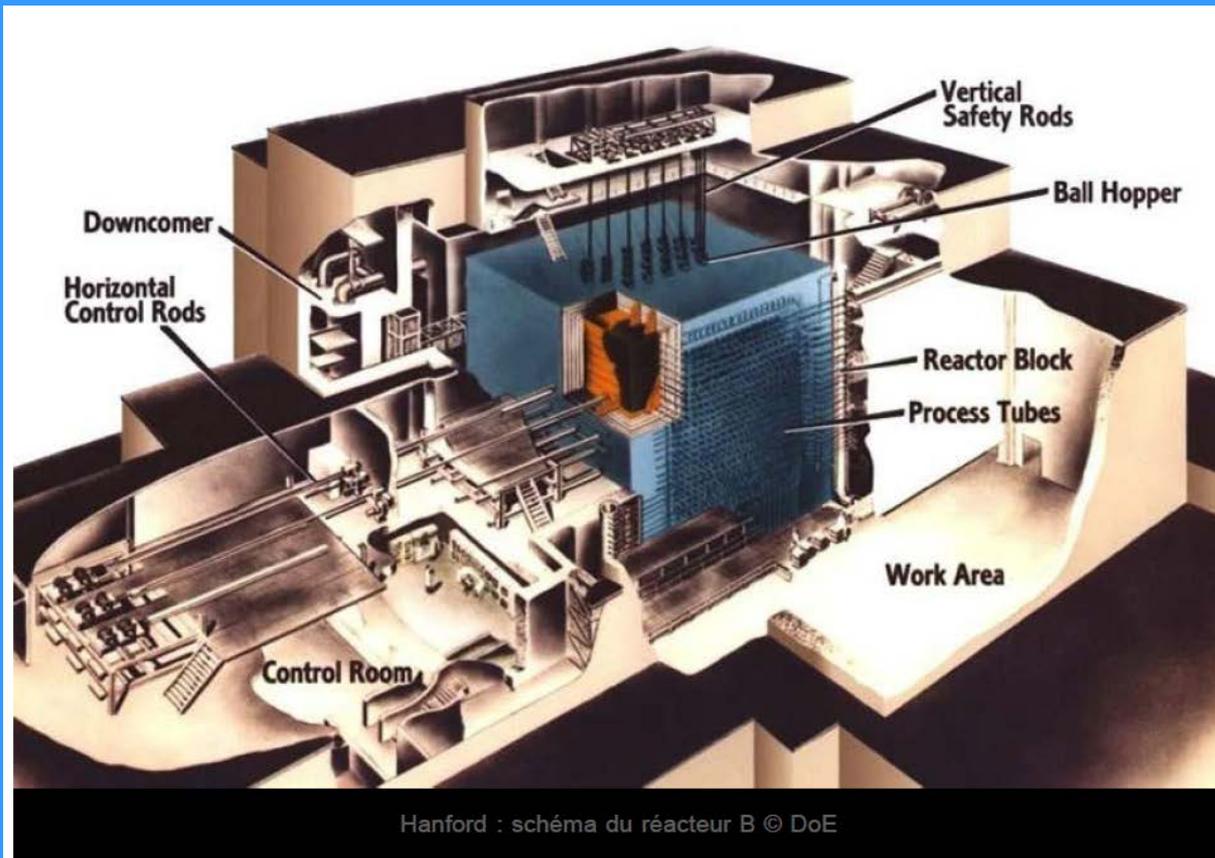


# Hanford

- 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





# L'espionnage interne

- Klaus Fuchs
- Bruno Pontecorvo
- Epoux Rosenberg
- David Greenglass
- Ted Hall



David and Ruth Greenglass



Theodore A. Hall

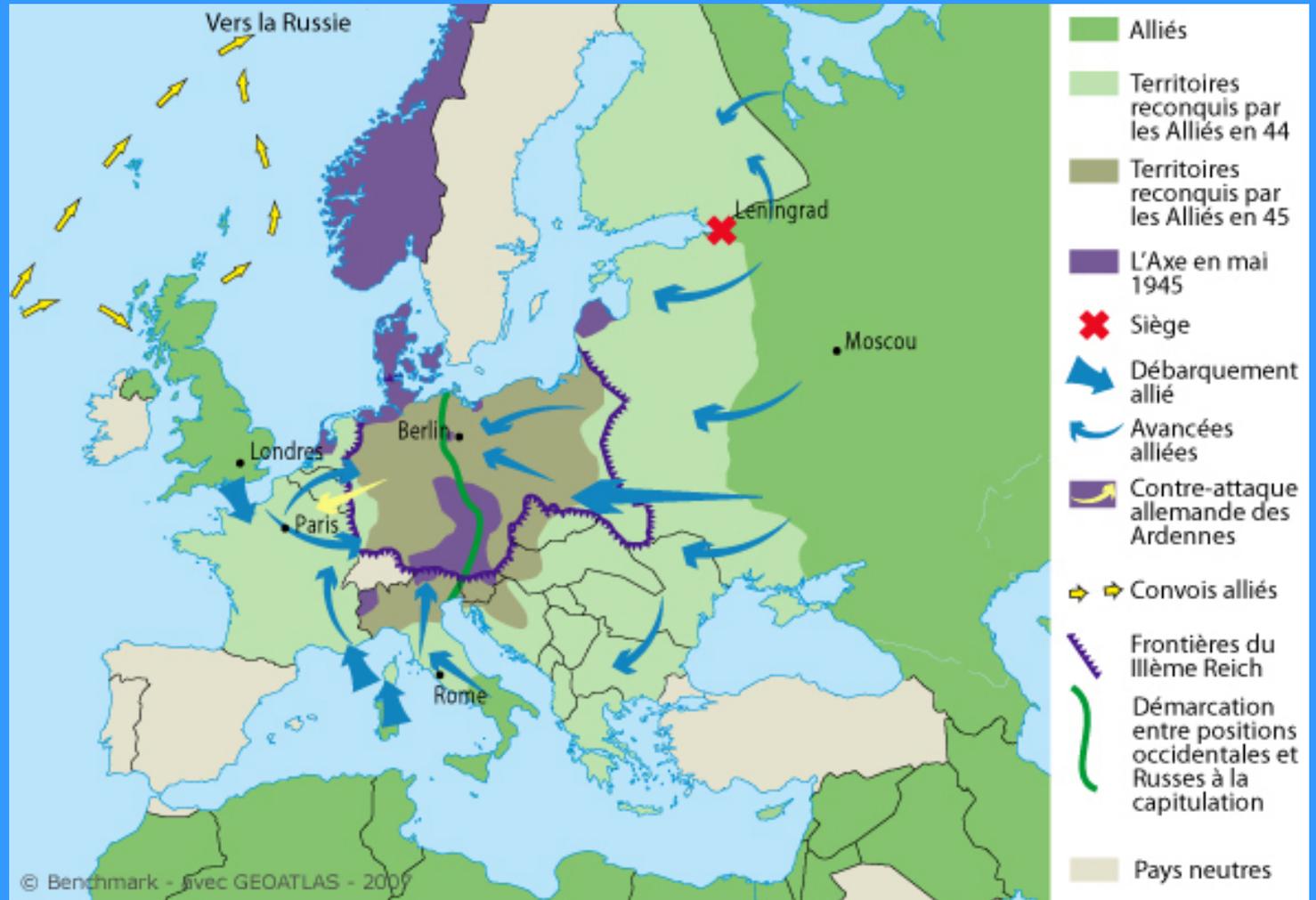




# ALSOS

- Detection aérienne de Xe 133 (Alvarez)
- **Operation Harborage**
- Avril 1945 : capture des principaux physiciens allemands par Alsos (Pach) devant les lignes françaises
- Otto Hahn, Max von Laue, Werner Heisenberg, and Carl Friedrich von Weizsäcker
- Tranférés en Angleterre du 3 juillet 1945 au 3 janvier 1946
- Prive la France de cette capture et des informations correspondantes

# Evolution de la guerre en Europe (1944-1945)



# Evolution de la guerre dans le Pacifique



# Evolution de la guerre dans le Pacifique





# Les choix politiques sur l'usage de la bombe

- Bohr/Churchill/Roosevelt
  - Rencontre Bohr Roosevelt fin mars 44 (approche discrète de Churchill) via Lord Anderson chancelier de l'Echiquier
  - Retour en Angleterre début avril
  - Churchill le fait mariner et le reçoit très mal le 16 mai (ce n'est pas aux scientifiques de s'occuper de politique)
  - Retour USA 18 mai rencontre FDR très chaleureuse
  - 19 sept Churchill maintient sa position devant FDR qui cède
- Evolution de la guerre
  - A l'automne 44 l'espoir d'une défaite allemande rapide se précise
  - La bombe ne serait pas nécessaire
  - Idée de l'utiliser contre le Japon
  - Les décideur ont redoublé d'effort pour la bombe



# Le temps des doutes (juillet 1944- février 1945)

- Passer de l'Allemagne au Japon
  - Adapter un bombardier (B29)
  - Point de départ (dépend de l'évolution de la guerre dans le pacifique)
- Pu 240 et Fat Man
  - Crise de juillet 1944 Fission spontanées trop importantes (Segrè) le modèle canon ne marchera pas (Thin man)
  - Passage au modèle à implosion
  - 6 mois d'essais et études infructueux
  - Finalement sphère pleine et lentilles explosives résolvent le problème
- Quantité de matière fissile fin 44
  - La production de U 235 est très faible (pb Calutrons et rendement récupération)
  - Il y aura du Pu mais on ne sait pas si on saura l'utiliser dans une bombe



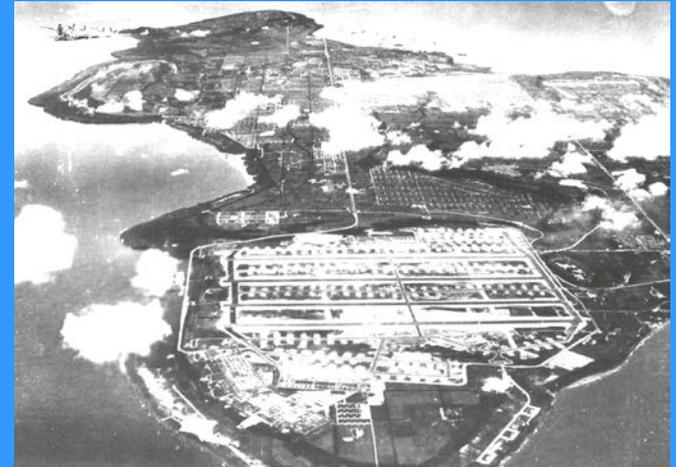
# Réflexions des scientifiques sur l'usage de la bombe

- Bohr : entretiens Roosevelt et Churchill
- Szilard printemps 1945
- Rapport Franck juin 1945
- Pétition Szilard
- Scientist Panel
- Interim Committee
- *"In my mind General Groves<sup>4</sup> stands out as a classic example of the patriot. I asked him once whether he would place the welfare of the United States above the welfare of mankind. 'If you put it that way,' the General replied 'there is only one answer. You must put the welfare of man first. But show me if you can,' he added, 'an agency through which it is possible to do more for the service of man than can be done through the United States.(A. Compton)*



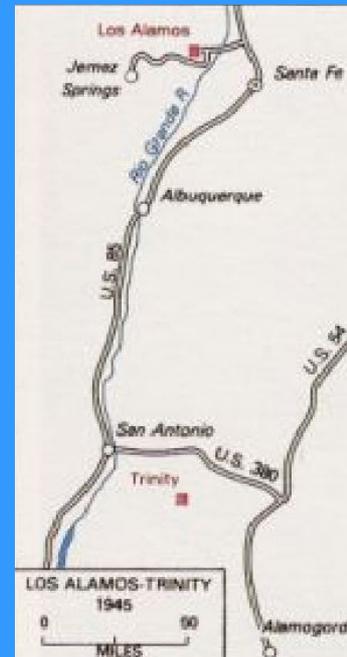
# Préparation du bombardement du Japon

- Entraînement Bombardiers B29
- Entraînement à Wendover Utah (sept 44)
- Tests de largage de bombes factices (« citrouilles »)
- Transfert à Tinian (mai 45)
- Transfert de la bombe Thin Man par mer (coulé 3 jours plus tard)
- Charge explosive par air ainsi que Fat Man en plusieurs vols (3 bombes)
- Commande Enola Gay pour Hiroshima
- Dates de bombardement conditionnées par météo



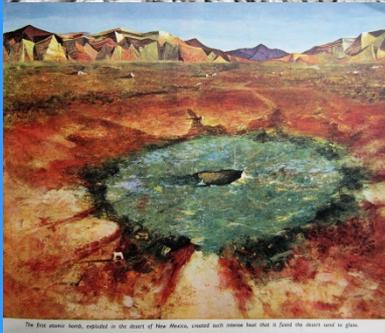
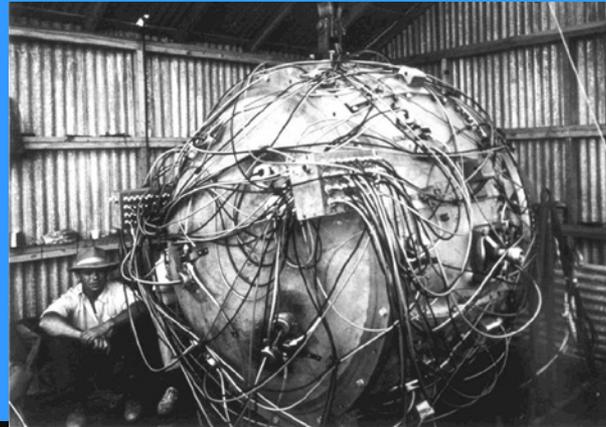
# Alamogordo et « Trinity »

- Faire un essai préliminaire de la bombe à implosion
- Il y a assez de Pu
- Site Alamogordo distant de 120 km
- Le « Gadget »
- Date essai imposée par Postdam
- 16 juillet 1945 5 h 30
- Orages et pluie battante
- Fébrilité les derniers jours
- Impression très vive sur tous les témoins





# Trinity

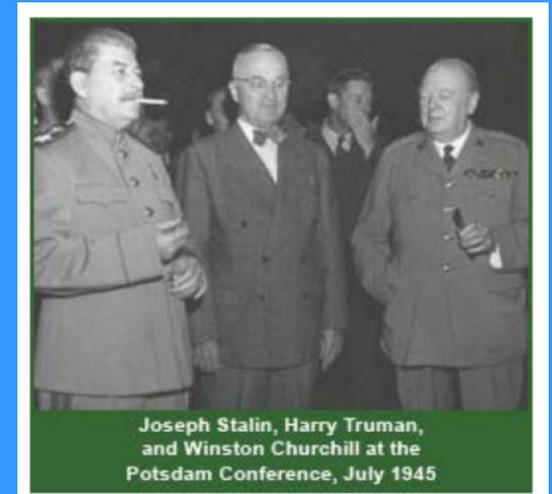


The first atomic bomb, exploded in the heart of New Mexico, created such intense heat that it fused the desert sand to glass.



# La décision

- Les Allemands n'ont pas la Bombe (ALSOS avril 45)
- Il faut l'utiliser contre le Japon
- Mort de Roosevelt le 12 avril 1945
- Stimson secrétaire d'Etat à la Guerre (éviter Kyoto)
- James F. Byrnes nouveau Secrétaire d'Etat
- Truman
  - Ne savait rien du projet (!)
  - Postdam
  - Ultimatum 26 juillet rejeté par le Japon
  - La décision (3 semaines de débats intenses)





# Le processus de décision

- Target committee 27/4/1945 Première liste 17 cibles
- Réunion des 10 et 11 mai Kyoto, Hiroshima, Yokohama, Kokura, Nigata
- Réunion du 30 mai retrait de Kyoto par Stimson
- 31 mai comité élargi à Compton Lawrence Fermi et Oppenheimer
- 11 juin Rapport Franck scientifiques opposés à l'usage de la bombe
- 16 juin Oppenheimer, Fermi, Lawrence et Compton réaffirment la nécessité de la bombe
- Oppenheimer et Marshall bombardement sans prévenir
- Pétition Szilard 3 et 17 juillet opposition à la bombe
- Trinity le 16 juillet montre une puissance destructrice plus forte qu'estimée
- Information de Staline par Truman à Postdam qui fait l'étonné sans plus (il sait déjà l'existence de la bombe et le résultat de Trinity)
- 23 juillet liste finale : Hiroshima, Kokura Nagasaki et Niigata



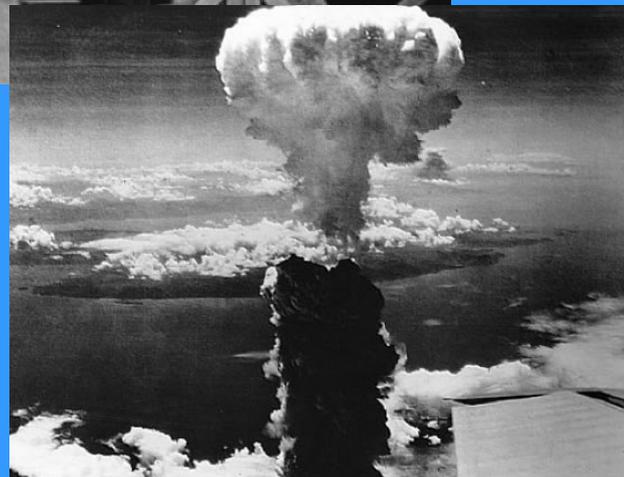
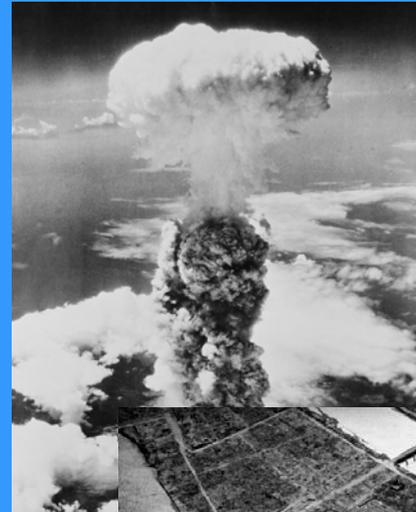
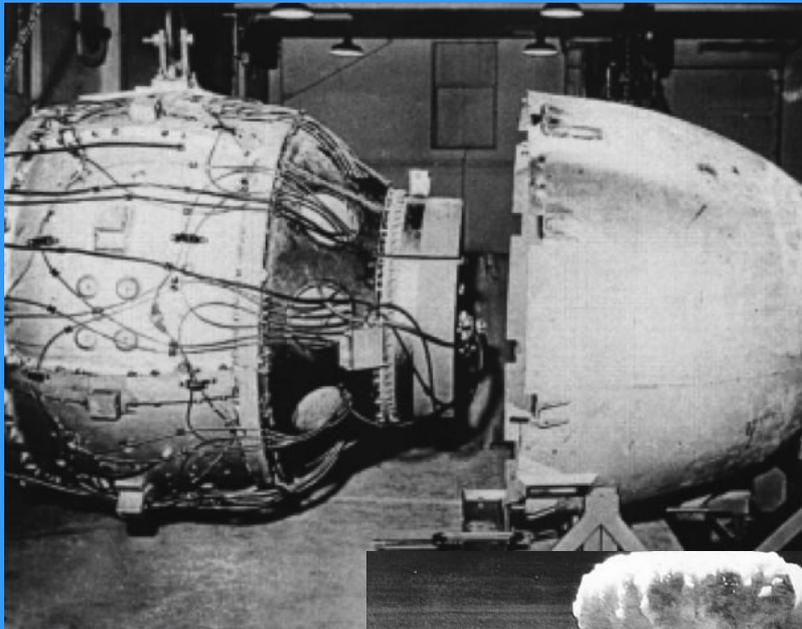
# Le bombardement

- Premier bombardement le 6 aout 1945 Hiroshima
- Thin Man (Bombe canon à U 235)
- 8 h 15 heure locale
- 5 bombardiers
  - 2 pour la météo 1 h avant
  - Largage bombe
  - Observation (photo et film)
  - Instrumentation
- U Turn à 155 ° en piqué pour échapper à l'onde de choc
- Deuxième bombardement Nagasaki le 9 aout
- Objectif secondaire (nuages) Kokura





# Le bombardement



19 mars 2018



# Le bombardement et ses conséquences

- Hiroshima
- 80 000 morts immédiats (température souffle destruction bâtiments)
- 60 000 morts (?) « différés » autres blessures et irradiation
- Destruction quasi-totale des bâtiments
- Pas d'évidence statistique sur l'accroissement spécifique des malformations à la naissance
- Stress post traumatique important même après 20 ans
- Nagasaki
- 35 000 morts
- Largage à 2 km du point prévu (météo)





# Le bombardement et ses conséquences

- Retard à la prise conscience de la nature de la bombe à Hiroshima
- Refus des militaires de capituler même après Nagasaki
- Déclaration de guerre URSS au Japon 9 août
- L'empereur force la décision le 10 à condition que son statut ne soit pas remis en cause
- Résistances (Byrnes et généraux japonais)
- Campagne de tracts le 13
- Capitulation (base Postdam) le 14
- Message radio de l'empereur aux Japonais le 15
- Signature du traité le 2 septembre



General Douglas MacArthur signs the Japanese surrender document, U.S.S. Missouri, Tokyo Bay, September 2, 1945.



## 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



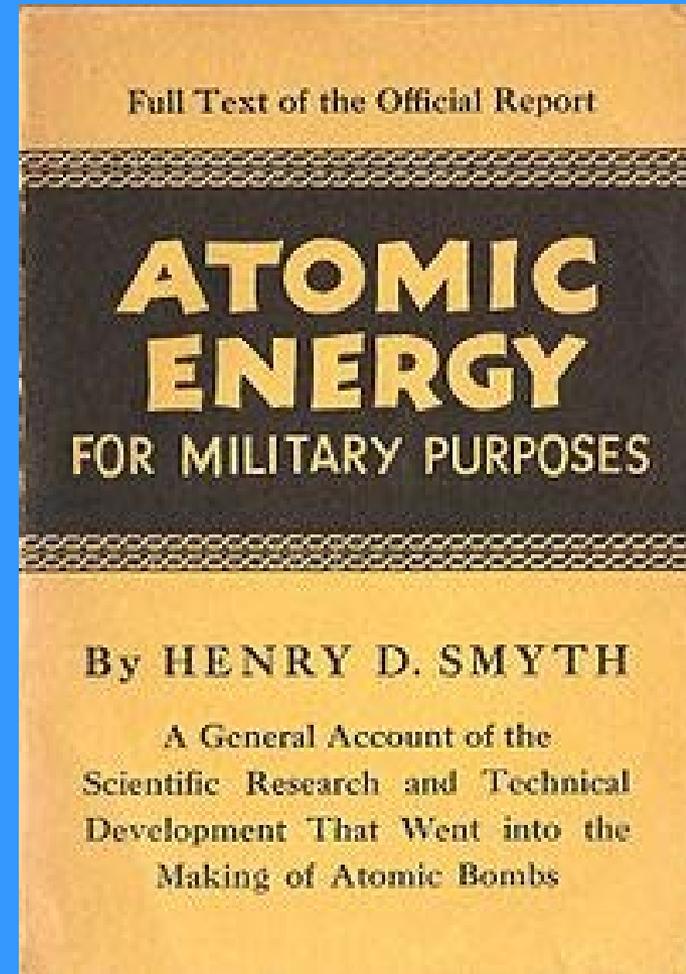
# Dépenses par sous projet

Site ou projet	Dollars 1945	Dollars 1996
OAK RIDGE (Total)	\$1,188,352,000	\$13,565,662,000
—K-25 Gaseous Diffusion Plant	\$512,166,000	\$5,846,644,000
—Y-12 Electromagnetic Plant	\$477,631,000	\$5,452,409,000
—Clinton Engineer Works, HQ and central utilities	\$155,951,000	\$1,780,263,000
—Clinton Laboratories	\$26,932,000	\$307,443,000
—S-50 Thermal Diffusion Plant	\$15,672,000	\$178,904,000
HANFORD ENGINEER WORKS	\$390,124,000	\$4,453,470,000
SPECIAL OPERATING MATERIALS	\$103,369,000	\$1,180,011,000
LOS ALAMOS PROJECT	\$74,055,000	\$845,377,000
RESEARCH AND DEVELOPMENT	\$69,681,000	\$795,445,000
GOVERNMENT OVERHEAD	\$37,255,000	\$425,285,000
HEAVY WATER PLANTS	\$26,768,000	\$305,571,000
Grand Total	\$1,889,604,000	\$21,570,821,000



# 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





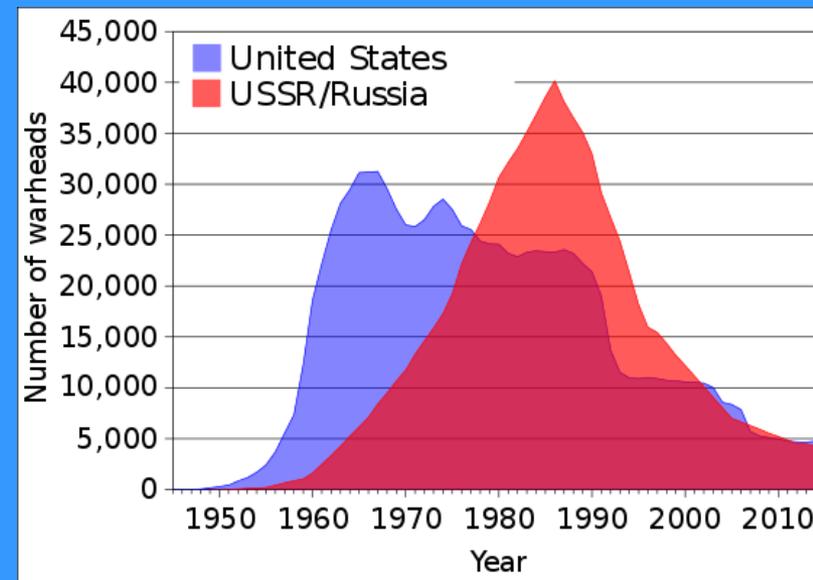
# Héritage

- 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



# Course aux armements nucléaires

- Bikini 1946
- Première bombe A URSS aout 1949
- Première bombe H US nov 1952
- Première bombe A UK nov 1952
- Première bombe thermonucleaire URSS aout 1953
- Rejet de toute régulation internationale
- Première bombe H URSS nov 1955
- Missiles intercontinentaux (ICBM)
- Première bombe A France fev 1960
- Crise de Cuba 1952
- Première bombe H France 1968





# Course aux armements nucléaires

- Limited Test Ban Treaty (LTBT ) oct 1963
- Strategic Arms Limitation Talks (SALT)
- SALT1 mai 1972
- Multiple-independently targetable re-entry vehicle (MIRV) rend caduc ce traité
- Intermediate Nuclear Forces (INF) dec 1987
- New START Treaty dec 2010
- Remis en cause par Trump en 2017
- Inde et Pakistan
- Chine
- Corée du Nord
- Israël





# 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
- A engendré la théorie de la dissuasion
- Timides progrès du contrôle international des armes de destructions massives