PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

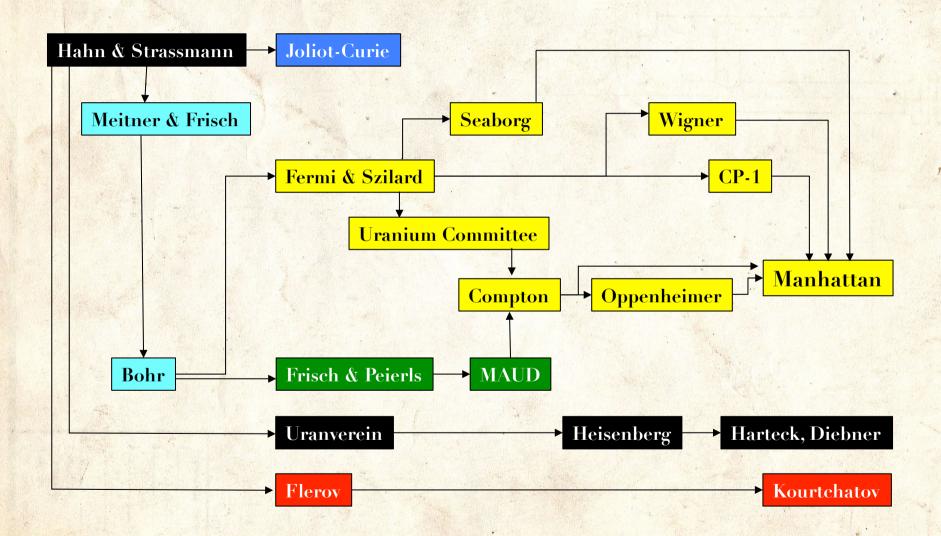
15 – PARALLÈLES

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

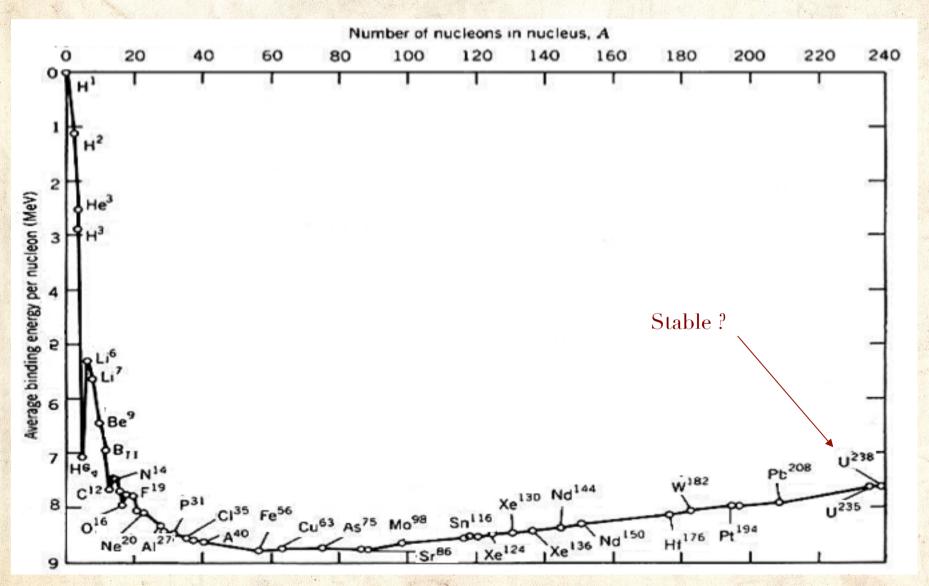
CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

Parallèles





Énergie de liaison et stabilité

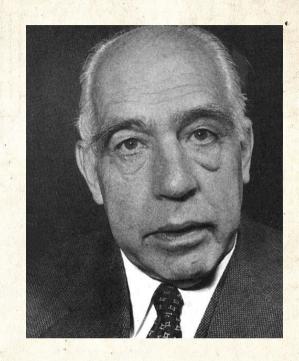


Premiers calculs

Formule de Bethe-Weizsäcker

O E =
$$aA + bA^{2/3} + c(N-Z)^2/A + 3/5 e^2Z(Z-1)/(r_0A^{1/3})$$

$$\begin{array}{c|c} A & \longrightarrow & A_1 & A_2 \end{array}$$



Limite de stabilité

Avant:
$$E = aZ(Z-1)/A^{1/3} + bA2^{/3} + c(N-Z)^2/A \rightarrow relation E(Z,A) non-linéaire$$

$$Z \rightarrow Z = Z_1 + Z_2$$

$$E \rightarrow E_1(Z_1,A_1) + E_2(Z_2,A_2)$$

O Instabilité si E > E₁ + E₂

$$\bigcirc$$
 \Rightarrow $Z^2/A > 40 et A ~ 2.5 Z \Rightarrow Z > 100 , A > 250 \rightarrow encourageant mais à améliorer$

Une question simple de Placzek à Bohr

- O George Placzek (1905-1955)
 - O Travaux sur l'interaction de la lumière avec les gaz et liquides
 - O Physique des neutrons avec Bethe puis Bohr et Frisch (1935-1939)
 - O Directeur du groupe de théorie du laboratoire de Montréal, puis adjoint de Bethe à Los Alamos
 - Membre de l'IAS de Princeton après la guerre



- O © Certes, plus de soucis avec les «transuraniens» et les «mésoméries ternaires»
- O Mais comment le modèle de noyau composé expliquait-il que
 - Thorium (90-232) et uranium (92-238) sont très semblables
 - O Les neutrons sont absorbés par des résonances aussi bien dans le thorium que dans l'uranium
 - O Le thorium n'est brisé que par les noyaux rapides
 - Alors que l'uranium est brisé par les neutrons rapides ET lents
 - Et la section efficace de fission ne suit pas la loi en 1/V

?

Uranium 235

- O Bohr suggéra que
 - O Thorium 232 et uranium 238 se comportaient en réalité de la même façon: fission exclusivement par neutrons rapides
 - Et que le comportement différent de l'uranium vis à vis des neutrons lents était dû à un *contaminant*
- O Il pensa à l'uranium 235
- O Le thorium naturel est à 100% du thorium 232
- O Mais en 1935, Dempsey avait découvert un isotope inconnu de l'uranium, ²³⁵U
- O En 1938, Nier avait montré que cet isotope ne représentait qu'un noyau sur 140 dans l'uranium naturel (0,7%)
- O Et en 1940, Nier montra que c'était bien ²³⁵U qui était fissile



Bohr & Wheeler

SEPTEMBER 1, 1939

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 56

The Mechanism of Nuclear Fission

NIELS BOHR
University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, and The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey

AND

JOHN ARCHIBALD WHEELER
Princeton University, Princeton, New Jersey
(Received June 28, 1939)

On the basis of the liquid drop model of atomic nuclei, an account is given of the mechanism of nuclear fission. In particular, conclusions are drawn regarding the variation from nucleus to nucleus of the critical energy required for fission, and regarding the dependence of fission cross section for a given nucleus on energy of the exciting agency. A detailed discussion of the observations is presented on the basis of the theoretical considerations. Theory and experiment fit together in a reasonable way to give a satisfactory picture of nuclear fission.

WHEELER

- O John A. Wheeler (1911-2008)
 - O Théorie de la matrice S (1937)
 - O Théorie de la fission avec Bohr (1939)
 - Programme Manhattan (résolut à Hanford le problème de l'empoisonnement dû au xénon 135)
 - O Programme Matterhorn (bombe à hydrogène) dans les années 1950
 - Géométrodynamique (identification de l'espace et de la matière), trous noirs et trous de ver...
 - O Gravitation quantique (équation de Wheeler-DeWitt)
 - O Théorie de l'information

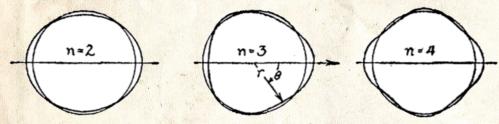
Tout est particule \rightarrow tout est champ \rightarrow tout est information

Calcul des modes de déformation d'une goutte

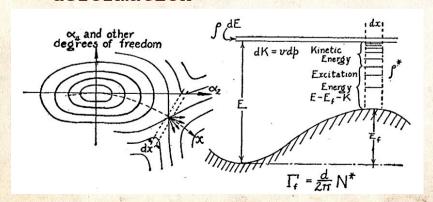


VIBRATIONS ET RUPTURE

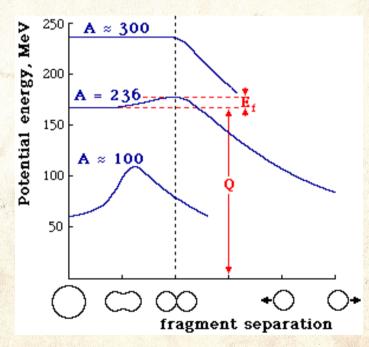
Décomposition de la forme d'une goutte comme superposition de modes de déformation (~décomposition de Fourier)



 → calcul du potentiel nucléaire et électrostatique en fonction des paramètres de déformation



- existence d'une barrière de potentiel
 - O disparaissant pour A > 250
 - franchissable pour A > 230
 soit par effet tunnel soit
 par apport d'énergie
 (neutron)



NOYAUX FISSI(B)LES

Noyau	Barrière de potentiel	Énergie de liaison libérée par un neutron additionnel	Différence à fournir (sous forme d'énergie cinétique du neutron)
Thorium 232	7.5 MeV	5.4 MeV	2.1 MeV
Uranium 238	7.0 MeV	5.5 MeV	1.5 MeV
Uranium 235	6.5 MeV	6.8 MeV	- 0.3 MeV
Plutonium 239	5.0 MeV	6.6 MeV	- 1.6 MeV

O Vocabulaire

- of fissible (ou fissionnable): noyau brisé par des neutrons rapides mais pas de réaction en chaîne possible (238U)
- explosif: noyau brisé par des neutrons rapides et réaction en chaîne possible (238Pu, 240Pu, 242Pu)
- fissile (sans «b»): noyau brisé par n'importe quel neutron (lent ou rapide) ⇒ réaction en chaîne possible (233U, 235U et 239Pu)



COMMENT FAIRE UNE BOMBE ?

- O Sphère d'uranium de masse $M = n_0 R_0^3 = k M_{critique}$
- $\bigcirc \Leftrightarrow \text{ rayon } R_0 = k^{1/3} R_{c0} \sim k^{1/3} \lambda_0 = k^{1/3} / n_0 \sigma$
- Libération d'énergie → élévation de température → dilatation
- $0 \Rightarrow \text{densité } n_0 > n \Rightarrow \lambda = 1/n \sigma / \Rightarrow R_c \sim \lambda \sim R^3 / \sigma / \gamma$
- O Le rayon critique augmente plus vite que le rayon de la sphère en expansion
- O La réaction s'arrête quand ils sont égaux \Rightarrow R = $k^{1/6}$ R₀
- O Les noyaux se déplacent à 10^6 m/s \Rightarrow arrêt en 10^{-8} s

Fissions et réactions en chaîne

- O Pas de fission rapide possible avec 238U
 - O chaque fission libère bien entre 2 et 3 neutrons
 - o mais seuls 20% ont une énergie > seuil (1,5 MeV) qui permet une nouvelle fission
 - $0 \Rightarrow \nu_{\text{effectif}} < 1 \Rightarrow \text{pas de réaction en chaîne avec}^{238} \text{U pur}$
- O Avec un peu de 235U (0,7% à 3%) la situation s'améliore
 - pas de seuil de fission pour ²³⁵U ⇒ réaction en chaîne possible
 - noyaux ²³⁵U rares ⇒ éviter capture par ²³⁸U ⇒ ralentir les neutrons en dessous de la zone de résonances (eV→keV) ⇒ modérateur

 - (si pertes de neutrons acceptables dans le modérateur et dans ²³⁸U ⇒ choix judicieux du modérateur et de la géométrie)
- O Fission rapide de $^{235}U \Rightarrow uranium 235 pur ?$
 - pas de seuil, peu d'absorption

 - mais nécessité apparente d'isoler des tonnes d'un isotope rare

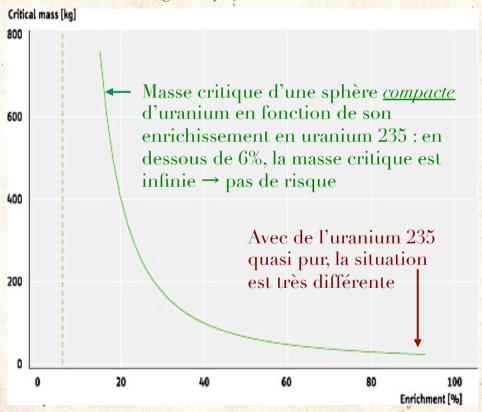
Soulagement... provisoire

- O Version erronée de la suggestion de Bohr
- fission rapide due au seul ²³⁸U
 (inexact) et captures → réaction
 convergente
- fission lente due au seul ²³⁵U
 (exact) → réaction divergente
 mais sans explosion
- O ⇒ Bohr, Heisenberg, Fermi (<1942) n'imaginèrent pas une bombe autrement que comme un réacteur qui s'emballerait

Élément 94-239

De l'article de Bohr & Wheeler, on pouvait *déduire* que 94-239 serait probablement ~ stable mais fissile comme 92-235

- O Uranium 235 ?
 - O Utilisable (peut-être) pour un réacteur, pas pour une bombe
 - « Il faudrait y consacrer toutes les ressources d'un grand pays » N. Bohr 1939



16 février 2012

Une confusion fréquente

- On lisait par exemple, sur 5 colonnes à la une, dans le New York Times du 5 mai 1940 :
 - « un kilo d'uranium 235 aurait la force explosive de 15 000 tonnes de TNT »
 - « 5 kilos de cette substance permettraient à un cuirassé ou un sous-marin de faire le tour du monde sans ravitaillement »
- Une chose est de calculer que la fission d'un kilo d'uranium libérerait l'énergie de 15 000 tonnes de TNT
- Une autre est de parvenir à fissionner ce kilo, et une autre encore de le faire en moins d'une microseconde
- accent sur le réacteur plutôt que sur la bombe

VASTPOWERSOURCE IN ATOMIC ENERGY GERMANY IS SEEKING IT OPENED BY SCIENCE scientists Ordered to Devote

Relative of Uranium Found to Yield Force 5 Million Times as Potent as Coal

U 235

All Time to Research-Tests Made at Columbia

By WILLIAM L. LAURENCE

A natural substance found abundantly in many parts of the earth. now separated for the first time in



La physique nucléaire en Union Soviétique

O Léningrad

- → 12 mars 1939 : théorie de la fission par Yakov Frenkel (1894-1952) au Fiztekh d'Abraham Ioffe, partant du modèle de la goutte liquide
- → 10 avril 1939 : estimation
 à 3±1 du nombre de neutrons
 secondaires par Georgy Flerov
 (1913-1990) et Lev Rusinov à
 l'Institut du Radium de
 Klopin et Vernadsky
- → été 1939 : Igor

 Kourtchatov lança au Fiztekh

 une série d'expériences sur

 la fission
- → début 1940 : découverte de la fission spontanée de l'uranium par Flerov

Moscou

→ études sur la possibilité
 de réactions en chaîne par
 Yakov Zeldovitch (1914-1987)
 et Iouli Khariton (1904-1996)
 à l'Institut de chimie physique



⇒ suggèrent en octobre 1939 l'utilisation d'eau lourde ou l'enrichissement en 235U

Igor Vassilievitch Kourtchatov (1903-1960)

- 1925 : travaux sur la radioactivité au *Fiztekh* sous la direction de Ioffe
- 1932 : cyclotron (achevé en 1939)
- 1939 : fission et réaction en chaîne
- O Août 1940: projet
 - Réacteur avec 2,5 t d'oxyde d'uranium et 15 t d'eau lourde (Kourtchatov, Khariton, Flerov et Rusinov)
- O Novembre 1940 : possibilité d'une arme nucléaire présentée par Kourtchatov à Moscou lors d'une conférence

- Des calculs théoriques montrent que [...]
 une bombe atomique, même de petite taille,
 pourrait détruire une grande capitale de
 plusieurs millions de personnes. (Kapitsa
 Pravda du 13 octobre 1941)
- O Avril 1942: Flerov nota l'absence soudaine d'articles sur la physique nucléaire dans les revues américaines et il alerta Staline
- O Mai 1942 : le NKVD rassembla des informations sur les travaux britanniques et américains
- 11 février 1943 : Kourtchatov reçut la mission de réaliser une arme nucléaire

Kourtchatov et le programme soviétique



Kourtchatov prit la direction du Laboratoire n°2 à Moscou (Institut Kourtchatov aujourd'hui)

« La barbe »

- O Il monta un programme tous azimuts
 - o réacteur uranium-graphite
 - o réacteur à eau lourde
 - O séparation isotopique 235U
 - o bombe à 235U (Khariton)
 - O bombe à ²³⁹Pu
- O Informations régulières sur l'avancement du programme Manhattan, ce qui permit de gagner du temps

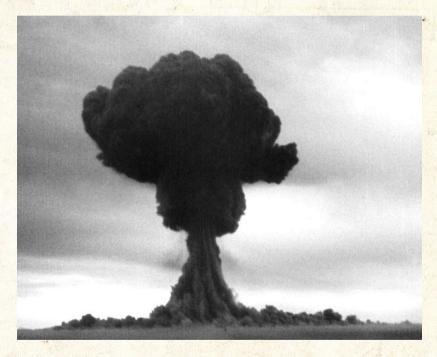
- Manque de moyens (et manque d'uranium) → progrès lents jusqu'en 1945, puis accélération brutale
- O Construction en 1946 d'une ville secrète près de Sarov, Arzamas-16, pour Khariton
- O Et de 2 autres près de Sverdlovsk pour l'uranium 235
- 1° réacteur à Moscou le 25 décembre 1945 (graphite-U naturel)
- O 1° réacteur de production à Mayak (copie du réacteur B de Hanford) en juillet 1948

ПЕРВАЯ МОЛНИЯ Premier éclair

- O Extraction du plutonium
- (→ irradiation de nombreux ouvriers et grave pollution, sur des dizaines de kilomètres, de la rivière qui refroidissait le réacteur)
- \cap \rightarrow RDS-1 (copie de Fat Man)



29 août 1949 : première explosion nucléaire à Semipalatinsk (Kazakstan)



→ armement thermonucléaire (Zeldovitch, Tamm, Sakharov et Ginzburg)

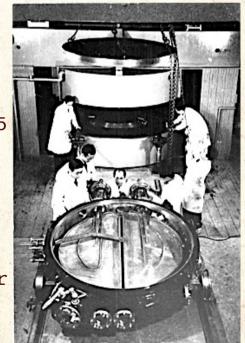




Yoshio Nishina (1890-1951)

- Travailla de 1921 à 1929 à
 Cambridge au Cavendish, à
 Göttingen (→ formule de
 Klein-Nishina pour l'effet
 Compton) et à Copenhague
 (avec Bohr)
- De retour à Tokyo, il dirigea son propre laboratoire au Riken (理化学研究所 Rikagaku Kenkyusho, Institut de recherche en physique et en chimie)
- O Construction d'un cyclotron de 70 cm de diamètre en 1936 (sur le modèle du 27 pouces de Lawrence)
- o 1937: début de la construction d'un cyclotron de 150 cm avec un aimant de 220 t

- O Il eut Yukawa et Tomonaga parmi ses étudiants
- Après la découverte de la fission, il prit contact avec l'armée, qui lança un programme de recherches en avril 1941
- 1943 : bombe
 réalisable
 avec ~ 10 kg
 d'uranium 235
 - Nishina
 modifia le
 cyclotron en
 spectromètre
 de masse pour
 séparer 235U



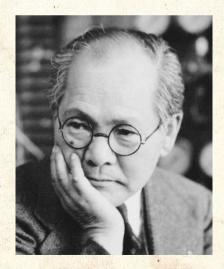
Programmes rivaux

- La Marine lança un autre programme en juillet 1942 à Kyoto sous la direction de Bunsaku Arakatsu
 - objectif : un moteur naval
 - essais de séparation isotopique par centrifugation
- Mars 1943 : bilan très mitigé ⇒ décision de porter les efforts plutôt sur le radar

- O Février 1944 : Nishina indiqua les difficultés du programme de séparation
 - o inefficacité de la séparation électromagnétique
 - o corrosion avec la séparation thermique
- O 13 avril 1945 : destruction du Riken par un bombardement américain



Août 1945 : allant à
Hiroshima, Nishina et
Arakatsu confirmèrent au
gouvernement japonais qu'il
s'agissait bien d'une arme
nucléaire





Préliminaires

- O Les Britanniques avaient suivi de très près les travaux du groupe de Joliot → plusieurs équipes s'étaient lancées
 - O Mark Oliphant (Birmingham)
 - O George Paget Thomson (Londres)
 - O Joseph Rotblat (Liverpool)
 - O James Chadwick (Manchester)



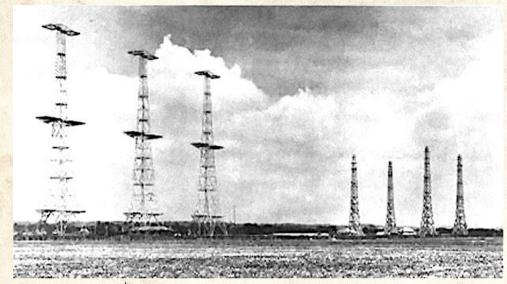
O Pacte germano-soviétique et déclaration de guerre → réorientation de l'effort scientifique vers les nécessités immédiates de défense



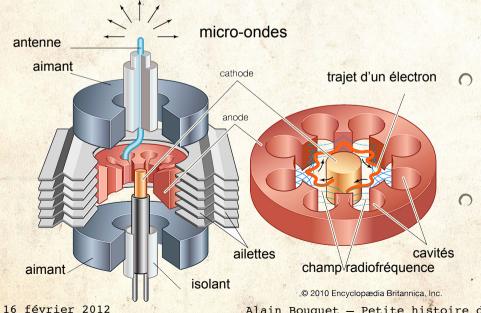


La lie de la Terre, je suppose ? Le bourreau sanglant des travailleurs, je présume ?

Le radar et le magnétron







Magnétron: électrons spiralant dans un champ magnétique axial de la cathode vers l'anode, creusée de cavités résonantes

→ émission d'ondes centimétriques (GHz)avec des puissances de plusieurs kW

Sir Rudolf Peierls (1907-1995)

- Pionnier de l'étude des semiconducteurs et des électrons dans les métaux
- O S'installa en Grande-Bretagne en 1933, à Manchester (Chadwick), Cambridge, puis Birmingham (1937)
- O Travaux sur la supraconductivité puis la physique nucléaire avec Chadwick puis Frisch
- 1939 : ressortissant étranger, n'eut pas le droit de travailler sur le radar → étude de la fission
- Mémorandum de Frisch & Peierls



- O Rejoignit le projet Manhattan en 1944 (Mission britannique)
- Après la guerre, recherches en physique nucléaire (diffusion, effets collectifs), consultant du programme nucléaire civil britannique
- Membre important du mouvement Pugwash

Mémorandum de Frisch & Peierls (février 1940)

Trois points essentiels

- fission rapide de l'uranium 235 pur → masse critique 600 grammes
- méthode de diffusion thermique pour séparer ²³⁵U de ²³⁸U
- → possibilité pratique d'une arme nucléaire et conséquences politiques

Comment arrivèrent-ils à 600 q ?

Incertitude sur la section efficace de fission

```
0 \rightarrow \sigma \sim 10 \text{ barns [en fait 1,24]}
```

 $0 \rightarrow \lambda \sim 2.6 \text{ cm}$ [en fait 16.5 cm]

 $\rho \rightarrow \nu = 2.3 \text{ neutrons/fission}$

 $O \Rightarrow R_0 = 0.8 \lambda$ [en fait 1,5 \lambda]

 $0 \rightarrow \text{la taille d'une balle de golf }!$

O \rightarrow $M_{critique} = 600 g [en fait 50 kg]$

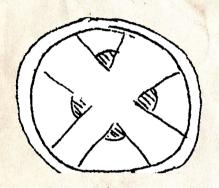
The atteched detailed report concerns the possibility of constructing a "esper-band" which utilizes the energy stored in stonds medal as a source of energy. The energy liberated in the explosion of such a super-bomb is about the same so that produced by the explosion of 1000 tons of dynamits. This energy is liberated in a small volume, in which it will, for an instant, produce a imperature comperable to that in the interior of the sun. The blest from such an explosion would destroy life in a wide area. The else of this eros is difficult to estimate, but it will probably e over the centre of a big oity.

In addition, some part of the energy set free by the bord-goes to produce redicactive achetances, and those will enit very powerful and dangerous redictions. The affect of these redictions le greatest immediately after the explosion, but it desays only gradually and even for days after the explosion my person entering the affected area will be killed.

come of this relicestivity will be carried along with the wind and will appeal the dottemination; several miles domewind this may hill people.

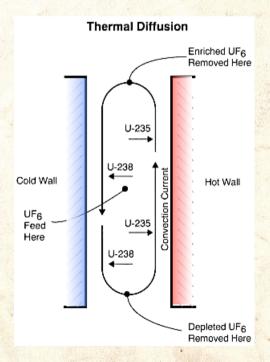
Aspects pratiques

Assemblage [par des ressorts] de 2 à 8 masses critiques (5 kg) d'uranium 235



- ⇒ dilatation de 10% à 40%
- $0 \Rightarrow 8*600*0,1 = 480 \text{ g de}^{235}\text{U}$ fissionnent
- o équivalent à 10 000 t TNT
- O Séparation isotopique par diffusion thermique
 - Clusius et Dickel venaient de séparer ainsi 35Cl et 37Cl
 - estimation: 100 tubes de 150 cm de long et 3 cm de diamètre en cascade \rightarrow 100 mg de 235 U par jour
 - objectif 1 bombe par mois → 100 g/jour → 1000x100 tubes → une très grande usine

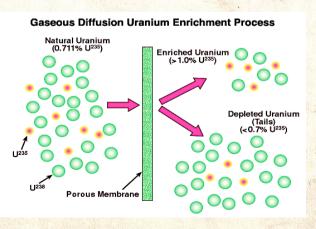




Le comité MAUD

- O Mémorandum remis à Mark Oliphant en mars 1940 → sir Henry Tizard → comité MAUD
 - O Thomson, Chadwick, Blackett, Cockroft, Oliphant, Frisch & Peierls
 - → suivi des efforts allemands vis à vis de l'eau lourde
 - → suivi des déplacements des physiciens allemands (Clusius et Heisenberg en particulier)
- O Réunion le 10 avril 1940
 - o programme de recherche sur la fission rapide (Chadwick, Bretscher)
 - o programme de recherche sur la diffusion gazeuse (Franz Simon)

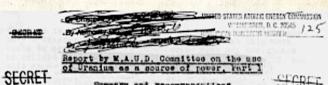
- O Décembre 1940 : rapport d'étape favorable
- Mars 1941: nouvelle estimation de $\sigma_{\rm fission} \to {\rm masse}$ critique ~ 9 kg (Peierls)
- O Juillet 1941: rapports finals sur
 - Bombe-canon à uranium 235 → délai de 3 à 4 ans
 - Réacteur à uranium naturel et eau lourde → délai de 4 à 5 ans



TUBE ALLOYS

- Transmis aux USA, le rapport MAUD fut enterré au fond d'un coffre…
- Churchill lança le programme *Tube*Alloys le 3 septembre 1941 pour

 réaliser une bombe
 - nombreuses difficultés techniques
 - manque de moyens
 - ⇒ progression très lente
- Échanges Peierls-Oppenheimer en septembre 1942, puis black-out américain
- Août 1943 (conférence de Québec)→ mission britannique à Los Alamos [Chadwick, Frisch, Peierls, Penney, Fuchs, Taylor...]
- 1946 : refus américain de partager leurs connaissances (loi McMahon) → programme britannique indépendant



It has been known for the past

It has been known for the past few years that very large stores of atomic energy are present in Uranium. Besides the extremely slow release which occurs raturally and is an example of radio-activity, there is cutther process which gives some hope that it may be possible to release the energy fast enough to have practical applications. The possibility of using this energy release to make an explosive of great violence has been discussed by as in sucther report, and has been shown to involve the extraction of the most notive constituent of the Uranium celled Uggs. If, however, we wish to see the atomic energy as a prime mover, that is so a substitute for coal or cil in the production of power, this extremely difficult and expensive operation may not be necessary. The presence of the less active part of the Uranium, though it makes it harder to release the energy, does not decrease, and may indeed increase, the amount evaluable. The problem is to find an arrengement which will give a release of atomic energy with ordinary Uranium, other as nettal or preferably in a compound, since the extraction of the metal is still not an easy operation. Experiments to determine whether such an arrangement is possible have been carried out by various workers in this and other countries, and nost recently by Dr. Salben and Dr. Romarski, who have proved that it can be done by mixing Uranium order in suitable proportions with a measurement about a beautiful and other countries.

Though this substance is at present only available as a fairly mare chemical, and although quantities of the order of atveral tens would be required to make the apparatus work, we chesisor that the method has considerable possibilities. The energy that can theoretically be derived from uranium opnamed in this way amounts to it million H.P. hours par it. and in addition large amounts of artificial radio-softys substances sould be formed which might have important applications. Essites the production of the heavy mater there are a fumber of problems still to be solved in making and using such a device. It will be necessary to provide means of controlling the process and preventing an explosion, which though not violent enough to have much military value would kneed the apparatus and building. The rate at which power can be generated in in fact limited by the rate at which it can be taken eway in the form of heat, either in steam or some other cooling material. Such a plant would produce radio-active effects of enormous intensity and the greatest care would have to be taken to shield the workers. It is clear that the scheme requires a long term development and we do, not consider that it is worth aerious consideration from the point of view of the present war.

We are informed, however, that steps are being taken in U.S. to produce heavy water on a large scale, and since Dre. Helban and Kowarski have done all that they can with the supplies which they brought to this country, we think that they should be allowed to continue their work in U.S. Arrangements should be made through the existing channels to keep us informed of their results, since if, as we hope, the work on



À suivre!



Mais c'est tout pour aujourd'hui!