



# CHAMPS & PARTICULES

## LE PROGRAMME MANHATTAN

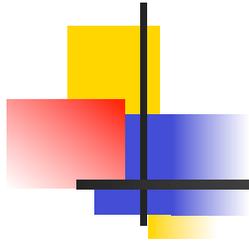


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





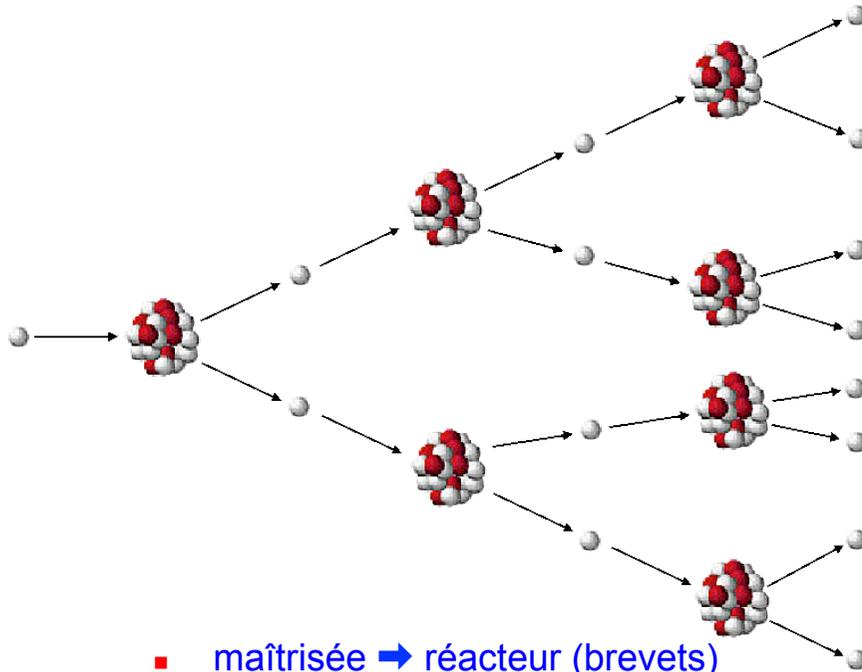
# RÉACTIONS EN CHAÎNE

# De la fission à la réaction en chaîne



## ■ Joliot

- chaque fission libère entre 3 et 4 neutrons (en fait entre 2 et 3)
- → réaction en chaîne possible



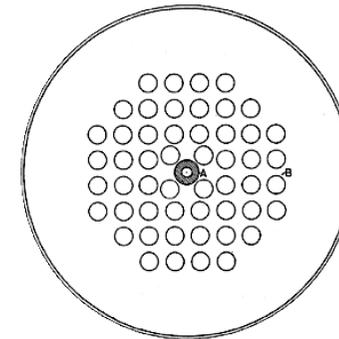
- maîtrisée → réacteur (brevets)
- explosive → bombe (brevets)

## ■ En pratique cela ne marche pas

- → ralentir les neutrons ( $\sigma \nearrow \nearrow$ )
- → placer l'uranium dans l'eau
- → insuffisant : trop de neutrons perdus par absorption dans l'eau
- → eau lourde

## ■ Szilard et Fermi

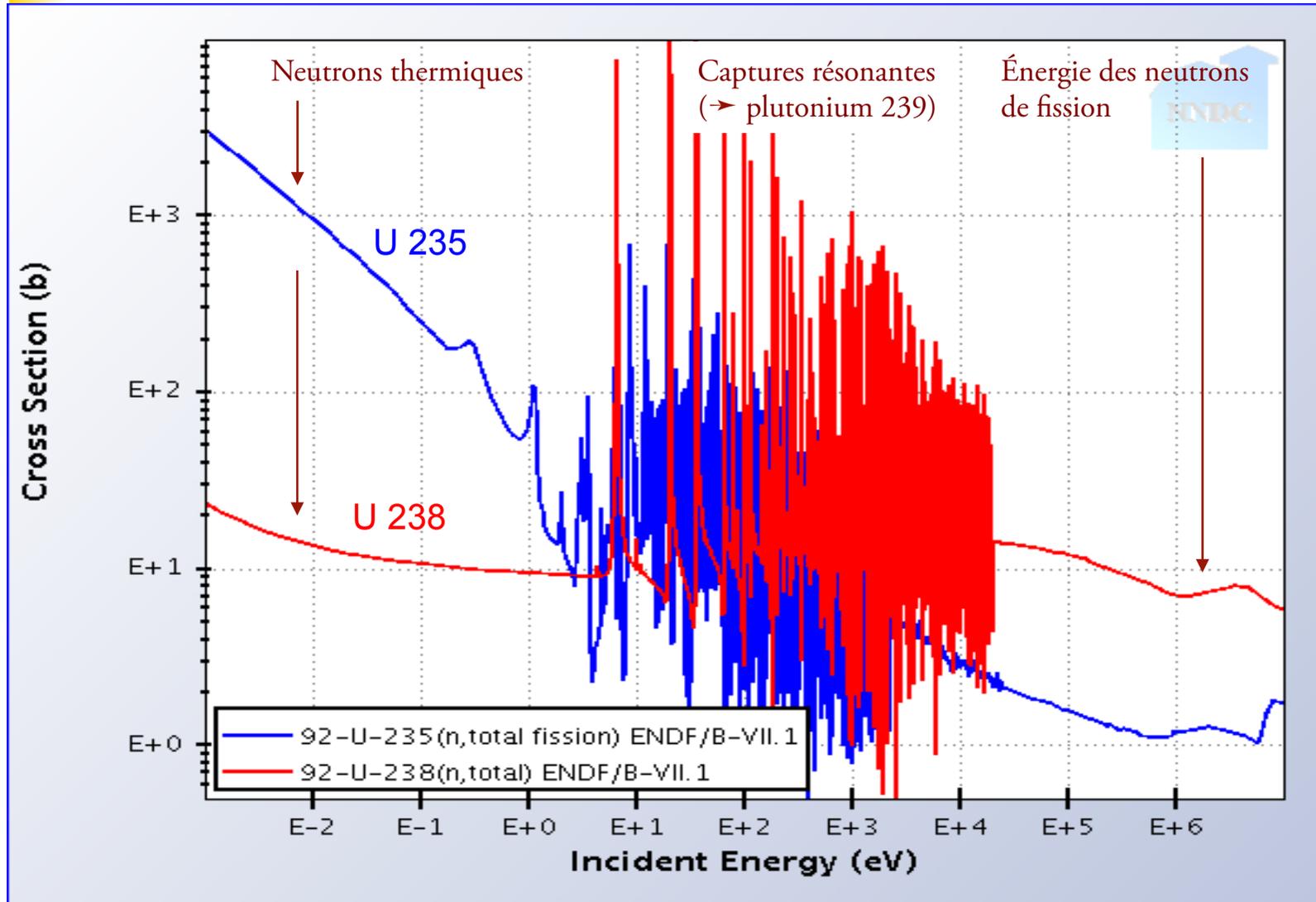
- → éviter la zone des captures résonantes dans l'uranium
- → arrangement hétérogène

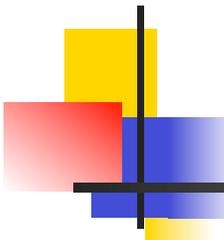


- → eau lourde ou graphite

- Énergie : 1 kg d'uranium = 25 000 tonnes de charbon... ou de dynamite

# Sections efficaces

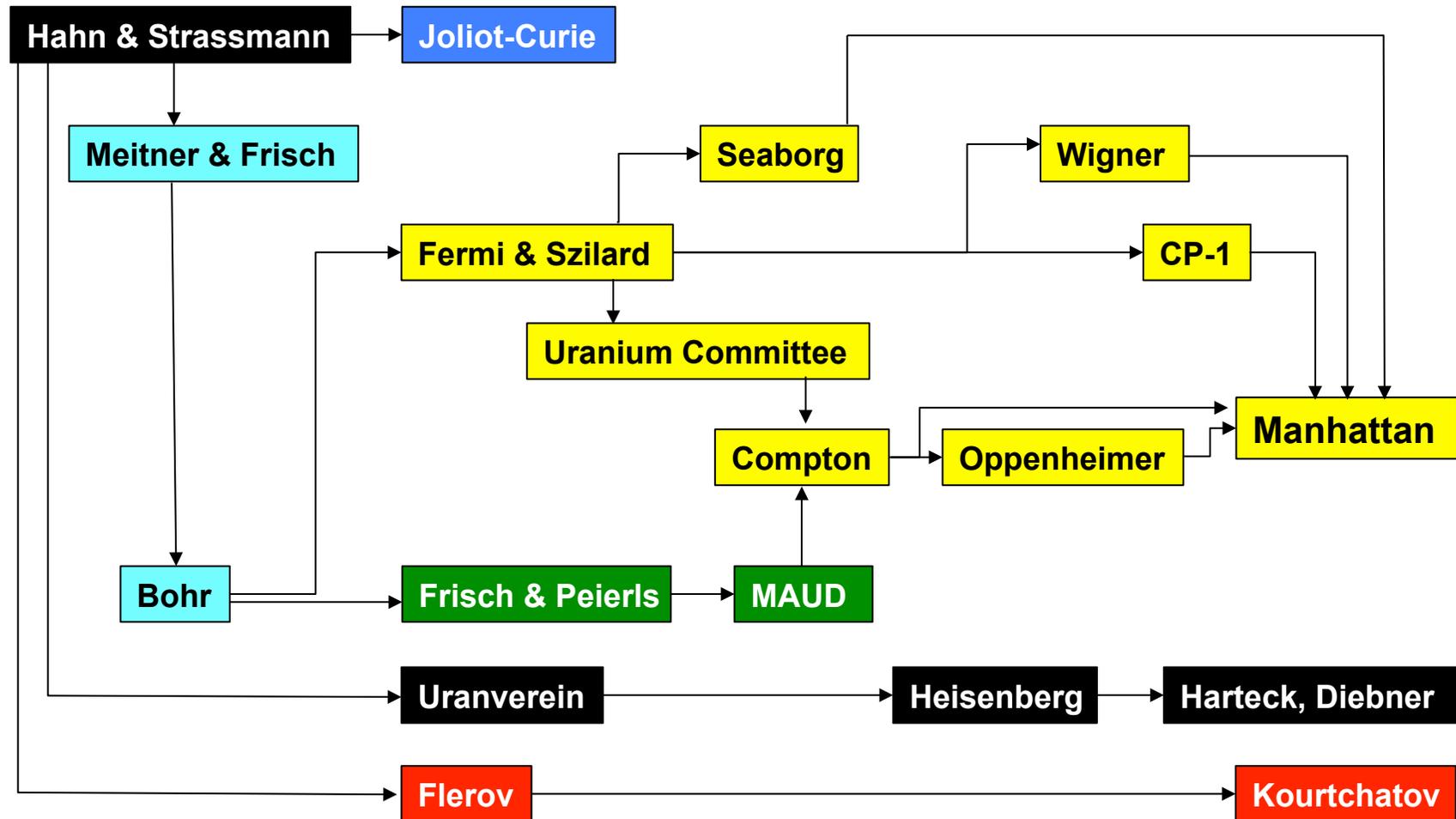


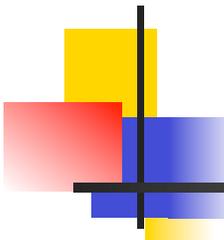


# Masse critique

- Masse critique (Szilard 1934, Perrin 1939)
  - un neutron parcourt en moyenne une distance  $\lambda$  (libre parcours moyen) avant de provoquer une fission
    1. sphère de diamètre  $\ll \lambda \Rightarrow$  la plupart des neutrons sortent sans interagir  $\Rightarrow$  la réaction en chaîne s'arrête
    2. sphère de diamètre  $\gg \lambda \Rightarrow$  la plupart des neutrons provoquent une nouvelle réaction  $\Rightarrow$  la réaction en chaîne diverge exponentiellement
  - $\Rightarrow$  taille critique  $\sim \lambda$  (et donc masse critique  $\sim \rho \lambda^3$ )
- Ordre de grandeur
  - densité  $n \sim 5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ , section efficace de fission  $\sigma \sim 10^{-28} \text{ m}^2$  (1 barn)
  - $\Rightarrow \lambda = 1/n\sigma = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$
  - sphère d'uranium (densité 19) de 20 cm de diamètre  $\rightarrow$  masse 80 kg
- Perrin (1939)
  - oxyde d'uranium (densité 8 à 10), rayon =  $5 \lambda \rightarrow$  40 tonnes nécessaires pour maintenir une réaction en chaîne
- Frisch & Peierls (1940)
  - uranium 235 pur
  - fission rapide (sinon pas d'explosion)
  - $\sigma \sim 10$  barns (*surestimation facteur 5*)
  - $\rightarrow$  masse critique 600 g seulement
  - $\rightarrow$  réalisation possible dans un délai de 3 à 4 ans, via séparation thermique
  - $\rightarrow$  commission MAUD (1940-1941)
  - $\rightarrow$  transmission des résultats au gouvernement américain en 1941
  - $\rightarrow$  confirmation par Compton des estimations (masse revue à la hausse)
  - $\rightarrow$  programme Manhattan

# Parallèles





# Aux États-Unis

## ■ Transuraniens

- McMillan et Abelson (mai 1940)



- ${}^{239}_{94}\text{Pu} \sim$  **stable**
- $\Rightarrow$  utilisable comme élément fissile à la place de  ${}^{235}_{92}\text{U}$

## ■ Nombreuses recherches universitaires

- sur la fission de l'uranium naturel
- sur l'enrichissement en U235

## ■ Soutien du gouvernement américain

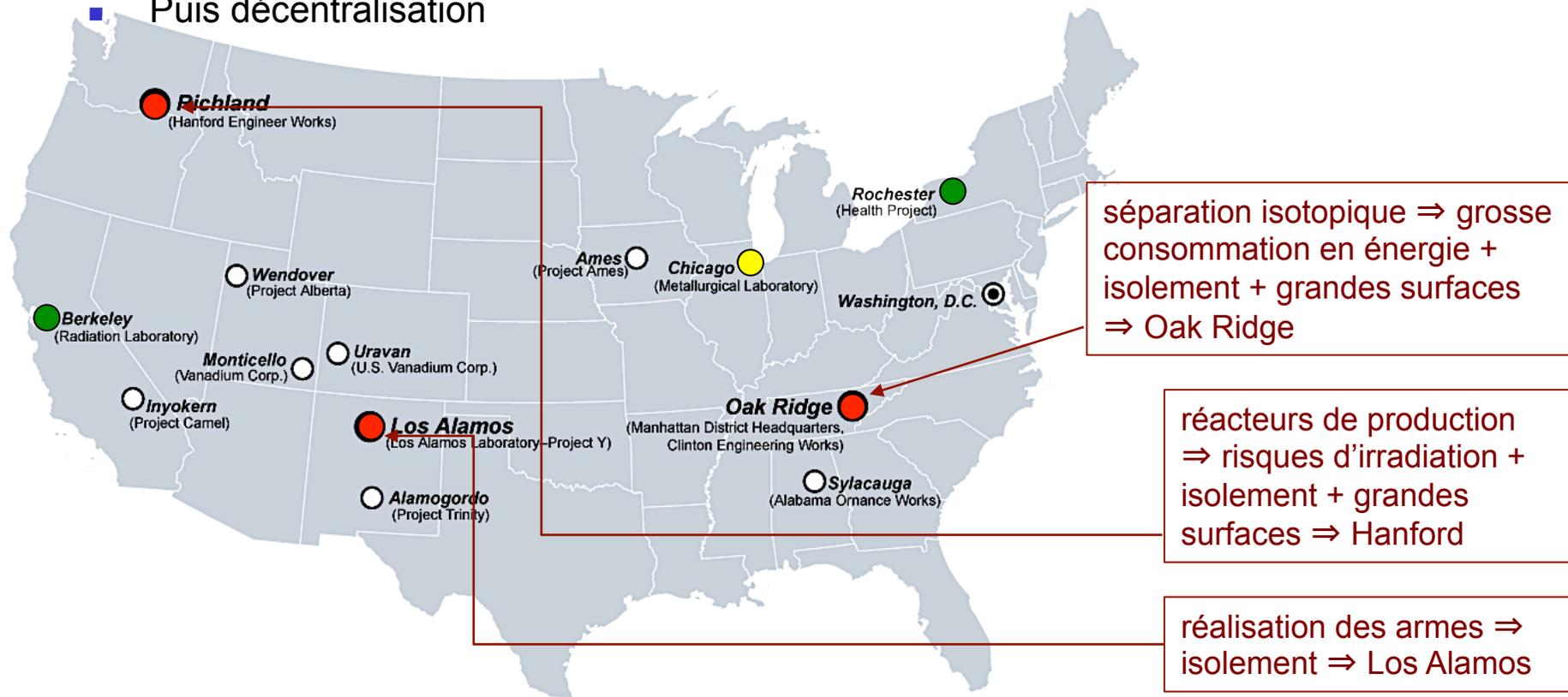
- « lettre d'Einstein »
- $\rightarrow$  financement des travaux sur la fission
- 6 k\$ (1939)  $\rightarrow$  3 M\$ (1942)  $\rightarrow$  2 G\$ (1945)
- décisions de V. Bush : NDRC  $\rightarrow$  OSRD  $\rightarrow$  Comité S-1

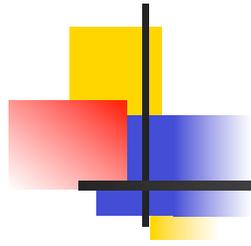
## ■ 6 décembre 1941 : décision finale

- risque d'une arme allemande
- $\rightarrow$   ${}^{235}\text{U}$  : 5 à 100 kg requis par bombe
- $\rightarrow$  séparation isotopique nécessaire
  - électromagnétique (Lawrence)
  - diffusion gazeuse (Dunning)
  - centrifugation (Urey)
  - *objectif : uranium disponible fin 1944*
- $\rightarrow$   ${}^{239}\text{Pu}$  : alternative intéressante
- $\rightarrow$  programme de réacteur
  - Fermi : réaction en chaîne maîtrisée
  - *objectif : fin 1942*
  - Wigner : réacteurs de production
  - *objectif : montée en puissance 1944  $\rightarrow$  plutonium disponible début 1945*

# Le Manhattan Engineers District

- Corps des Ingénieurs de l'Armée → découpage territorial (districts)
- Le Manhattan District couvrit tous les Etats-Unis
- Initialement, tout devait se faire à Chicago (MetLab)
- Puis décentralisation

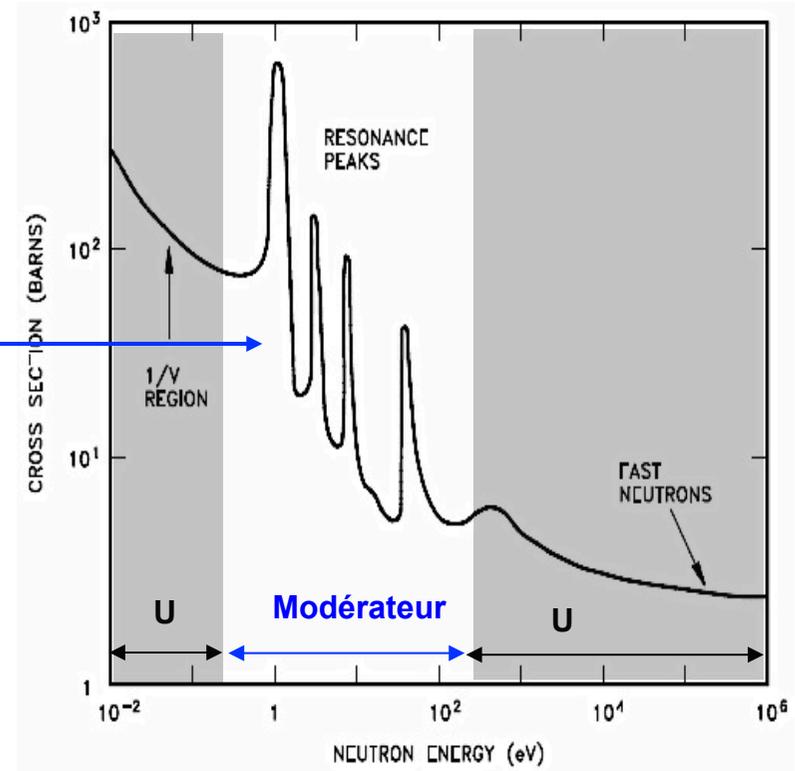




# RÉACTEURS

# Éléments de neutronique

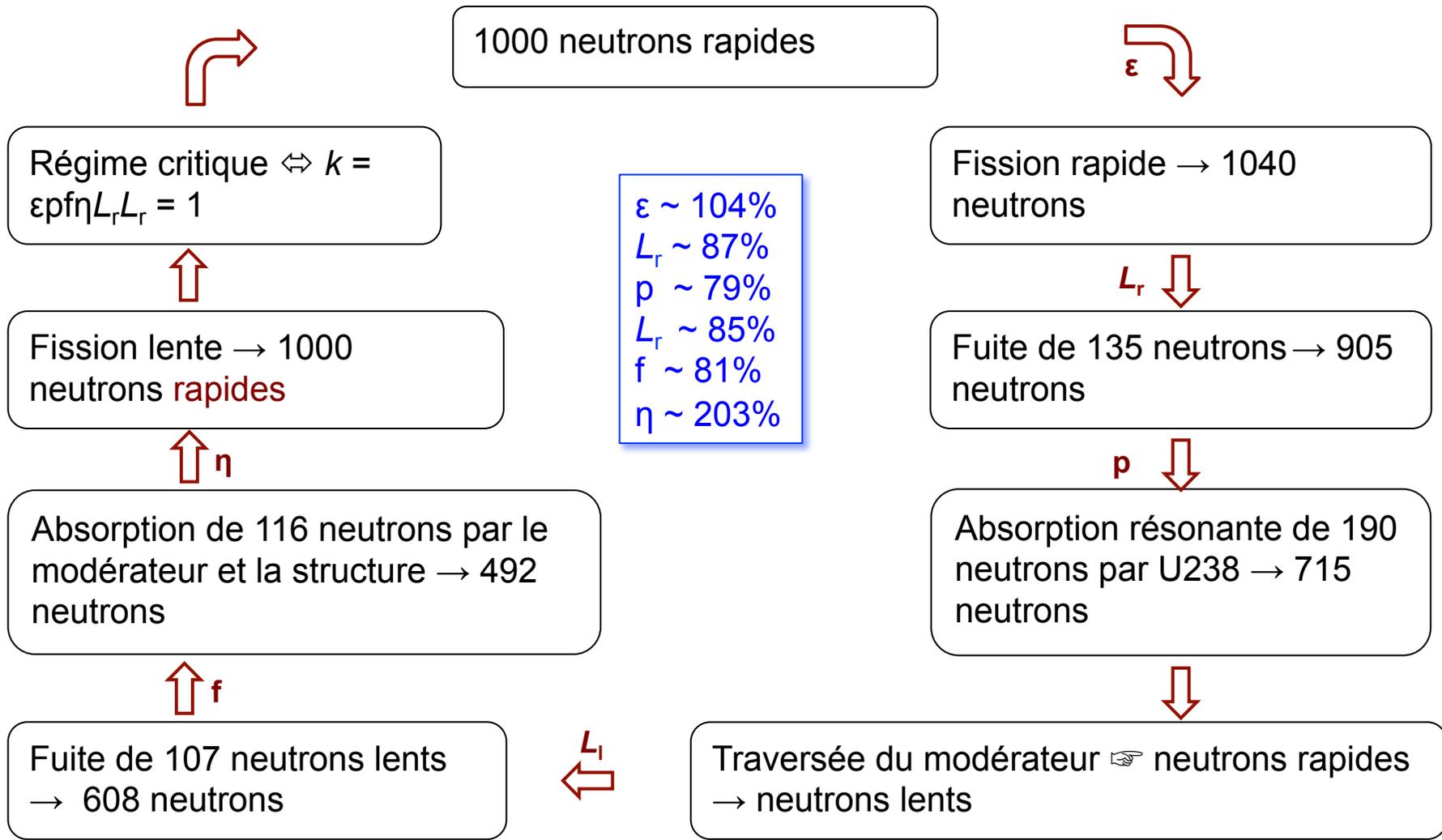
- Formule des quatre facteurs :  $k_{\infty} = \epsilon p f \eta$ 
  - $\epsilon$  : coefficient de fission rapide [augmentation nette du nombre de neutrons due aux neutrons rapides provoquant des fissions]
  - $p$  : probabilité d'échapper à la capture par résonance
  - $f$  : coefficient d'utilisation thermique [proportion des neutrons thermiques/lents provoquant des fissions  $\Leftrightarrow$  ceux qui ne sont pas absorbés par le modérateur, la structure, etc.]
  - $\eta$  : coefficient de reproduction [nombre de neutrons produits par les fissions lentes/ nombre de neutrons capturés par l'uranium]



- Dimension finie du réacteur  $\rightarrow$  2 facteurs additionnels
  - fuite des neutrons rapides  $\rightarrow$  proportion  $L_r$  qui ne fuit pas
  - fuite des neutrons lents  $\rightarrow$  proportion  $L_l$  qui ne fuit pas

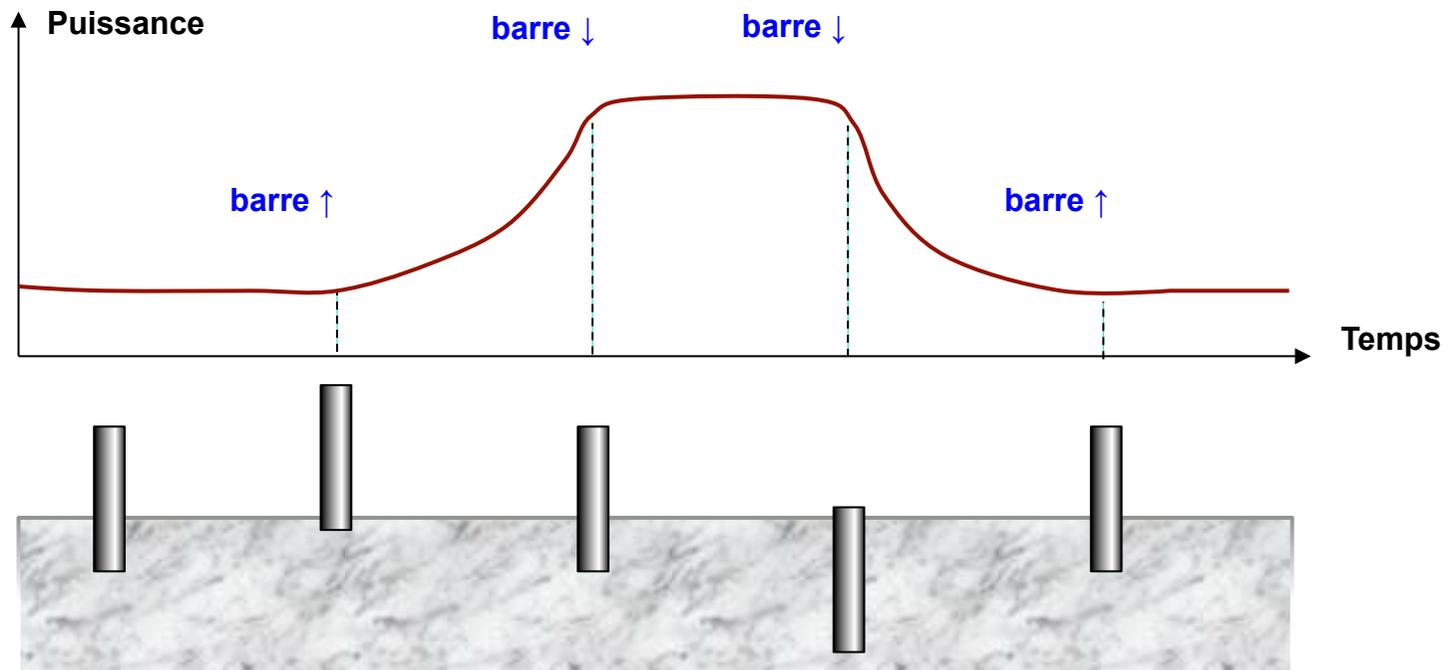
$$\Rightarrow k = \epsilon p f \eta L_r L_l$$

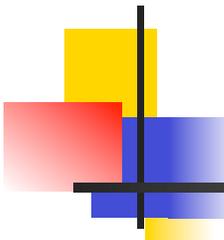
# Équilibre possible d'un réacteur



# Pilotage d'un réacteur

- $k = 1 \Leftrightarrow$  nombre de fissions par unité de temps constant  $\Leftrightarrow$  puissance stable
- Augmenter la puissance  $\Leftrightarrow k > 1$  (ex: retrait barre Cd absorbant)
  - $\Rightarrow$  le nombre de fissions augmente exponentiellement (divergence)
  - $\Rightarrow$  il faut ensuite **revenir à  $k = 1$  pour stabiliser** la puissance





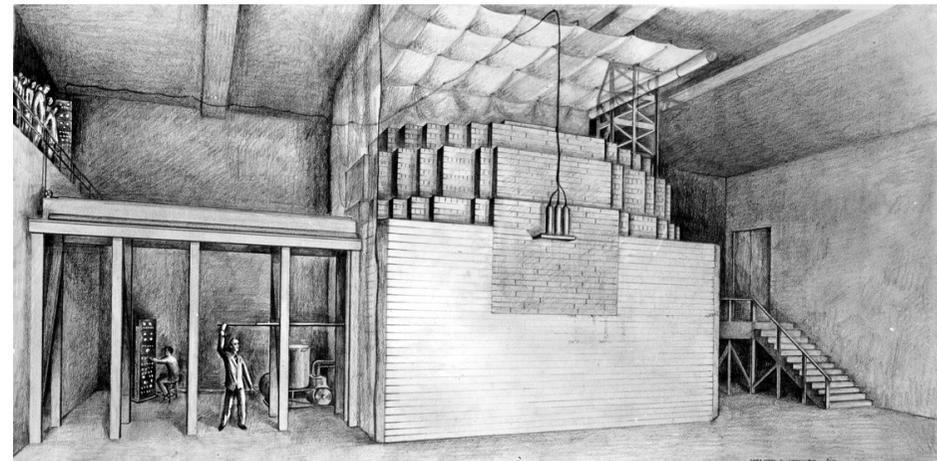
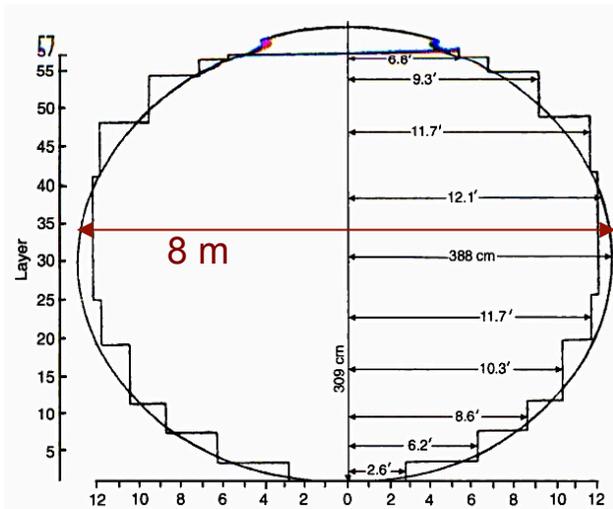
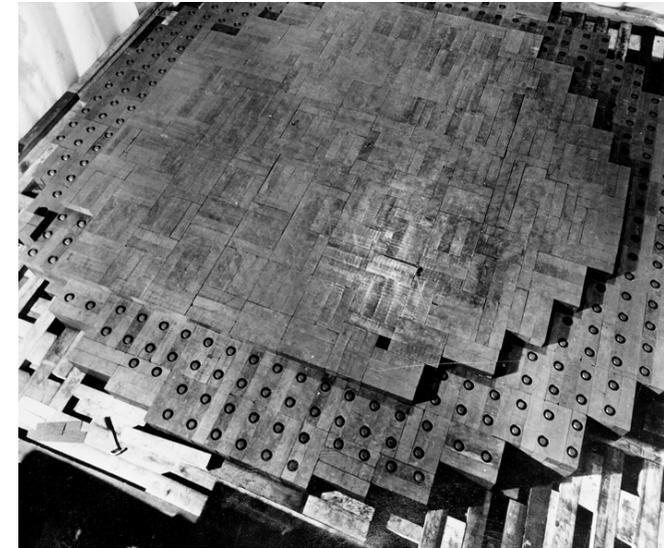
# Choix d'un modérateur

- Un bon modérateur
  - thermalise un neutron en un petit nombre de collisions (← forte perte d'énergie par collision ← masse proche de celle d'un neutron)
  - diffuse le neutron plutôt que de l'absorber (← section efficace de diffusion >> section efficace de capture)
  - ⇒ efficacité mesurée par un *rapport de modération*

Modérateur	Perte d'énergie/ collision	⇒ nombre de collisions pour thermaliser	Diffusion/ absorption	Rapport de modération
Eau légère	60%	19	67	62
Eau lourde	40%	35	9500	<b>4830</b>
Hélium	35%	42	120	51
Béryllium	19%	86	600	126
Bore	16%	105	0,005	<b>0,00086</b>
Graphite	15%	115	1400	<b>216</b>

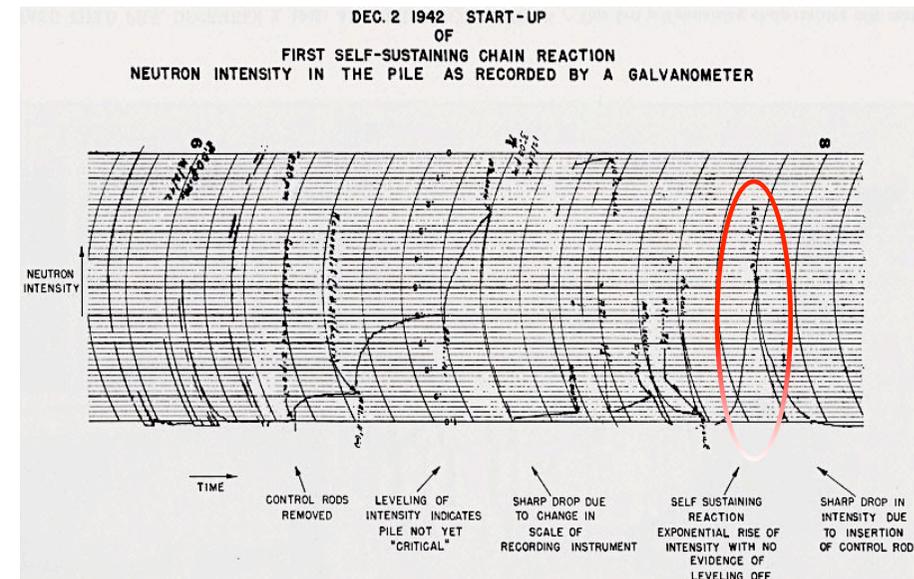
# Le réacteur de Fermi : Chicago Pile - 1

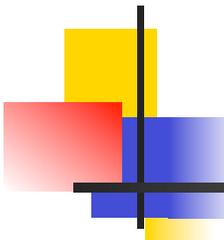
- Montage prévu dans la forêt d'Argonne
- Retards du bâtiment → montage sous le stade (désaffecté) de l'université de Chicago
- Construction du 16 novembre au 1<sup>o</sup> décembre (2 équipes se relayant 24h/24)
- Cylindres d'uranium (et d'oxyde) de 6 cm sur 6 espacés de 20 cm → 6 t d'uranium et 36 t d'oxyde d'uranium dans 385 t de graphite



2 décembre 1942

- Fermi avait surestimé la taille critique (→ forme un peu aplatie)
  - → barre de contrôle (cadmium) lentement retirée
  - → augmentation – puis stabilisation – du flux de neutrons
  - → mesure du facteur de multiplication sous-critique  $M \rightarrow k$
  - Fermi imposa une pause déjeuner juste avant d'arriver au seuil critique
  - **15h20 : réaction en chaîne entretenue et contrôlée**
- →  $k = 1,0006$
  - (Puissance < 200 W)
  - «Le navigateur italien a abordé le rivage du nouveau monde, et il a trouvé les indigènes amicaux. Le monde est plus petit qu'il le pensait.» Compte-rendu de Compton à Conant





# Objectif plutonium

---

- Évaluation rapide de la puissance requise
  - 1 fission  $\Leftrightarrow$  2,5 neutrons  $\Leftrightarrow$   $\sim$  1 noyau de plutonium 239 formé
  - 1 fission  $\Leftrightarrow$  200 MeV =  $200 \cdot 1,6 \times 10^{-13}$  J =  $3,2 \cdot 10^{-11}$  J
  - 1 g Pu  $\Leftrightarrow$   $6 \cdot 10^{23} / 239 = 2,5 \cdot 10^{21}$  noyaux  $\Leftrightarrow$   $2,5 \cdot 10^{21}$  fissions
  - 1 g Pu  $\Leftrightarrow$   $2,5 \cdot 10^{21} \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} = 8 \cdot 10^{10}$  J
  - 1 g Pu/jour  $\Leftrightarrow$   $8 \cdot 10^{10}$  J /  $10^5$  s  $\sim$  1 MW (sous forme de chaleur)

**1 g Pu/jour  $\Leftrightarrow$  1 MWt**

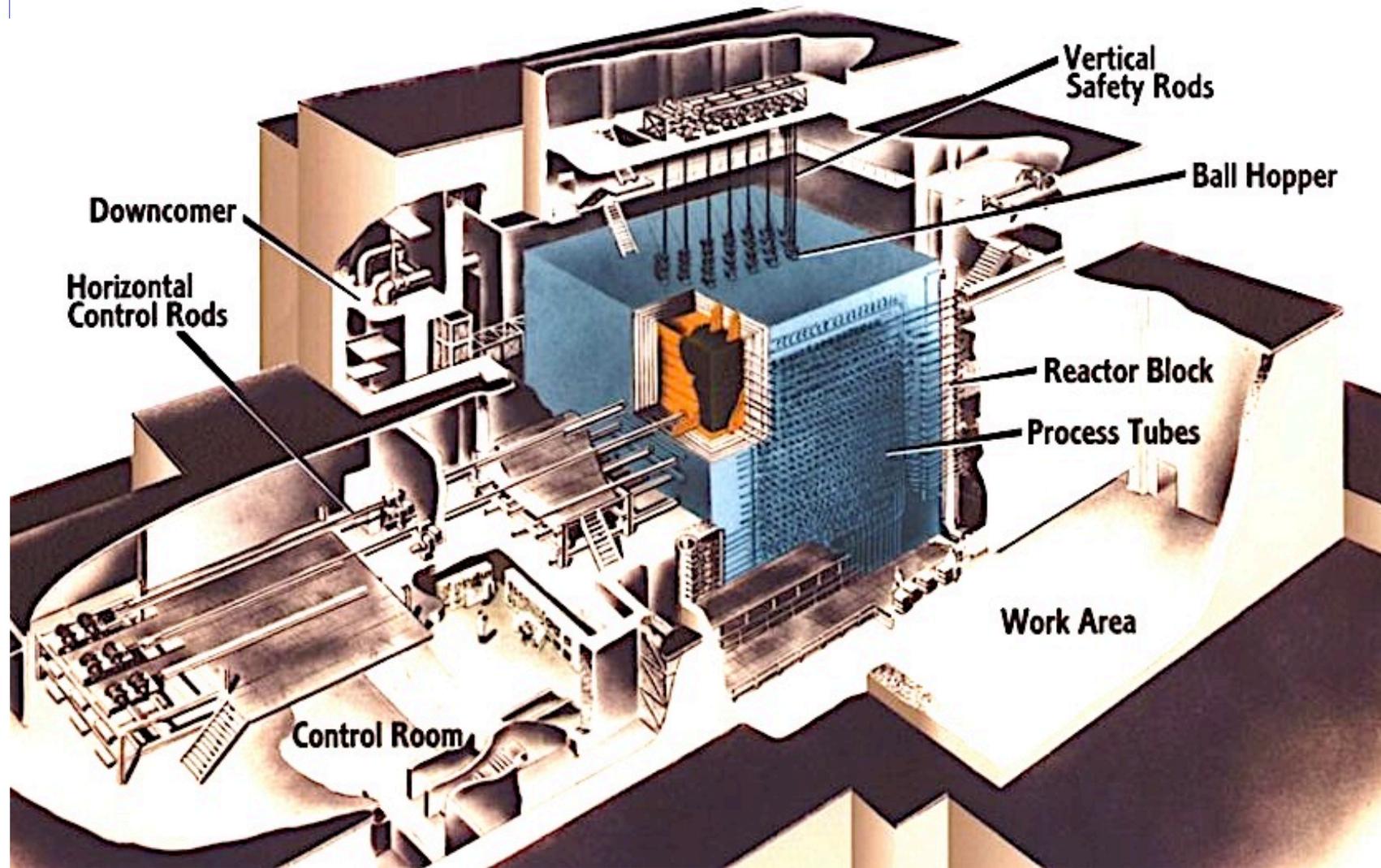
- Besoins
  - 10 kg (estimation 1942) de plutonium pour une bombe
  - 3 bombes (minimum) par mois  $\Rightarrow$  30 kg en 30 j  $\Rightarrow$   $\sim$  1000 g/jour
  - $\Rightarrow$  1000 MWt nécessaires
- Plans (par Wigner et son groupe du *MetLab*)
  - divers modèles de réacteur de 100 MWt envisagés (avril 1942)
  - plans revus à la hausse en juillet, puis en décembre 1942, à la demande de Compton  $\rightarrow$  3 réacteurs de 500 MWt chacun
  - **il n'était pas prévu de récupérer la chaleur produite**

# Modéré par le graphite, refroidi par l'eau

- Nombreuses études pour le modérateur
  - eau légère, mais  $k < 0,9$  à moins d'enrichir l'uranium  $> 1\%$
  - eau lourde ☞ usine au Canada (premières livraisons début 1943,  $6\text{m}^3/\text{an}$ )
  - béryllium (toxique et coûteux)
  - graphite, le plus simple, mais très volumineux + fluide de refroidissement
- pour le fluide de refroidissement
  - hélium (Mae West), air (X-10), gaz carbonique
  - eau (malgré les problèmes de corrosion)
  - plomb-bismuth fondu (Szilard)
- et pour la géométrie
  - barres continues d'uranium  $\varnothing 1,7$  cm
  - espacées de  $\sim 21$  cm dans le graphite
- Le groupe de Wigner opta pour un réacteur de production
  - modéré par le graphite (malgré le risque de l'effet Wigner)
  - refroidi par l'eau (malgré le risque en cas de perte du refroidissement)



# Le réacteur B



## Les « Queen Mary »

- Trois bâtiments de séparation chimique, à 15 km des réacteurs : 260 m de long, 30 m de large, 30 m de haut (+ nombreux bâtiments annexes)
- Deux terminés en octobre 1944, le 3° en février 1945



## L'intérieur des « Queen Mary »

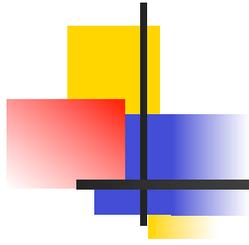
- 40 bassins de traitement chimique (commandé à distance en raison de la radioactivité due aux produits de fission et aux actinides)



# Production de plutonium

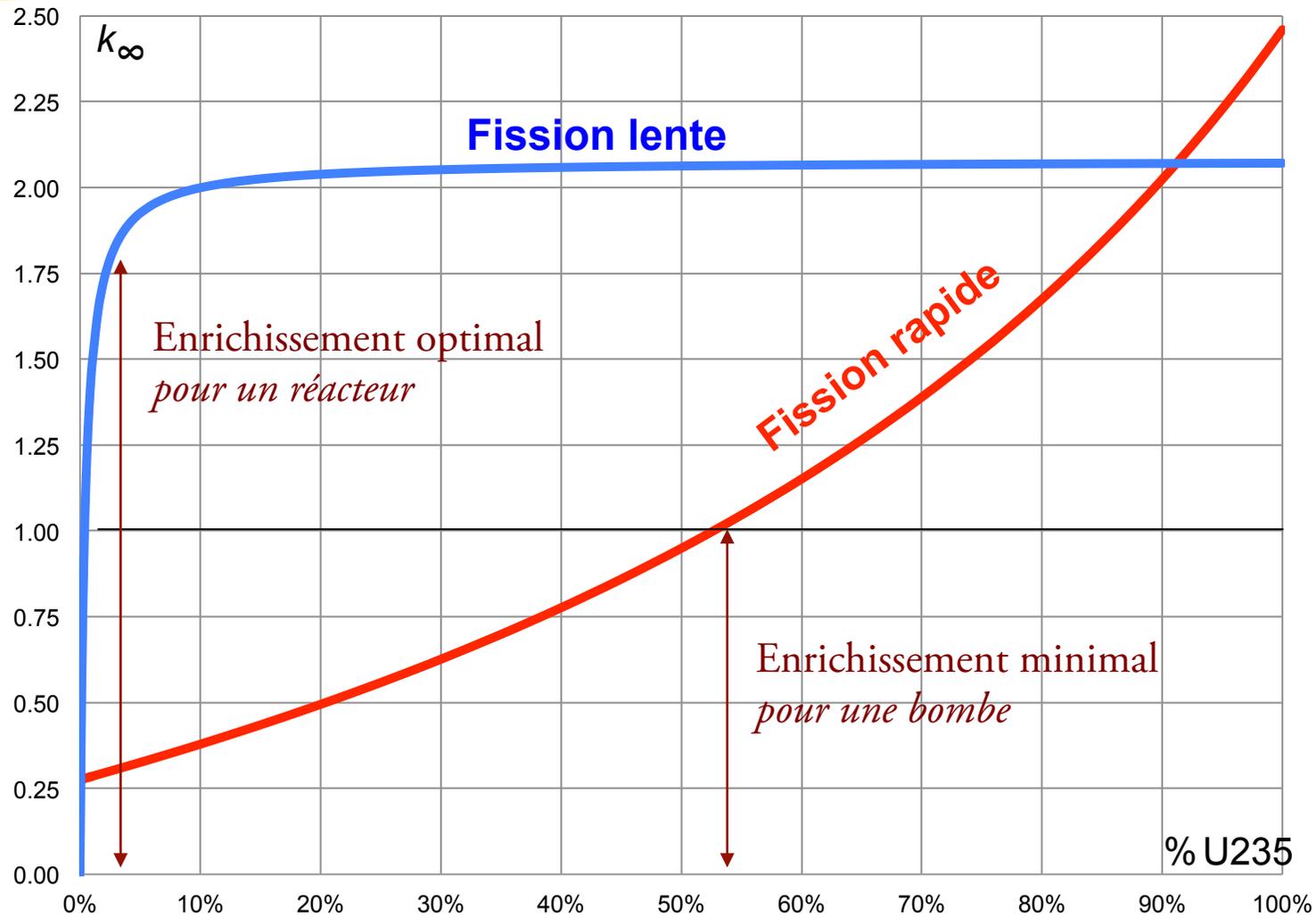
- Réacteur B : divergence le 26 septembre 1944
  - extraction des premiers barreaux le 24 novembre, puis repos dans l'eau
  - séparation chimique en janvier 1945
  - envoi du plutonium à Los Alamos (700 g) le 2 février 1945
- Réacteur D : divergence le 17 décembre 1944
- Réacteur F : divergence le 24 février 1945
- Production
  - 7 kg en tout jusqu'en mai 1945
  - 6 kg/mois de juin à août 1945
  - 14 kg/mois en septembre 1945
  - 18 kg/mois à partir d'octobre
- Une bombe de type Mark 3 «Fat Man» (celle lancée sur Nagasaki) utilisait 6 kg de plutonium
  - → Gadget (essai Trinity à Alamogordo en juillet)
  - → Nagasaki (+ une en réserve) en août
- De 1945 à 1987, Hanford a produit **60 tonnes** de plutonium



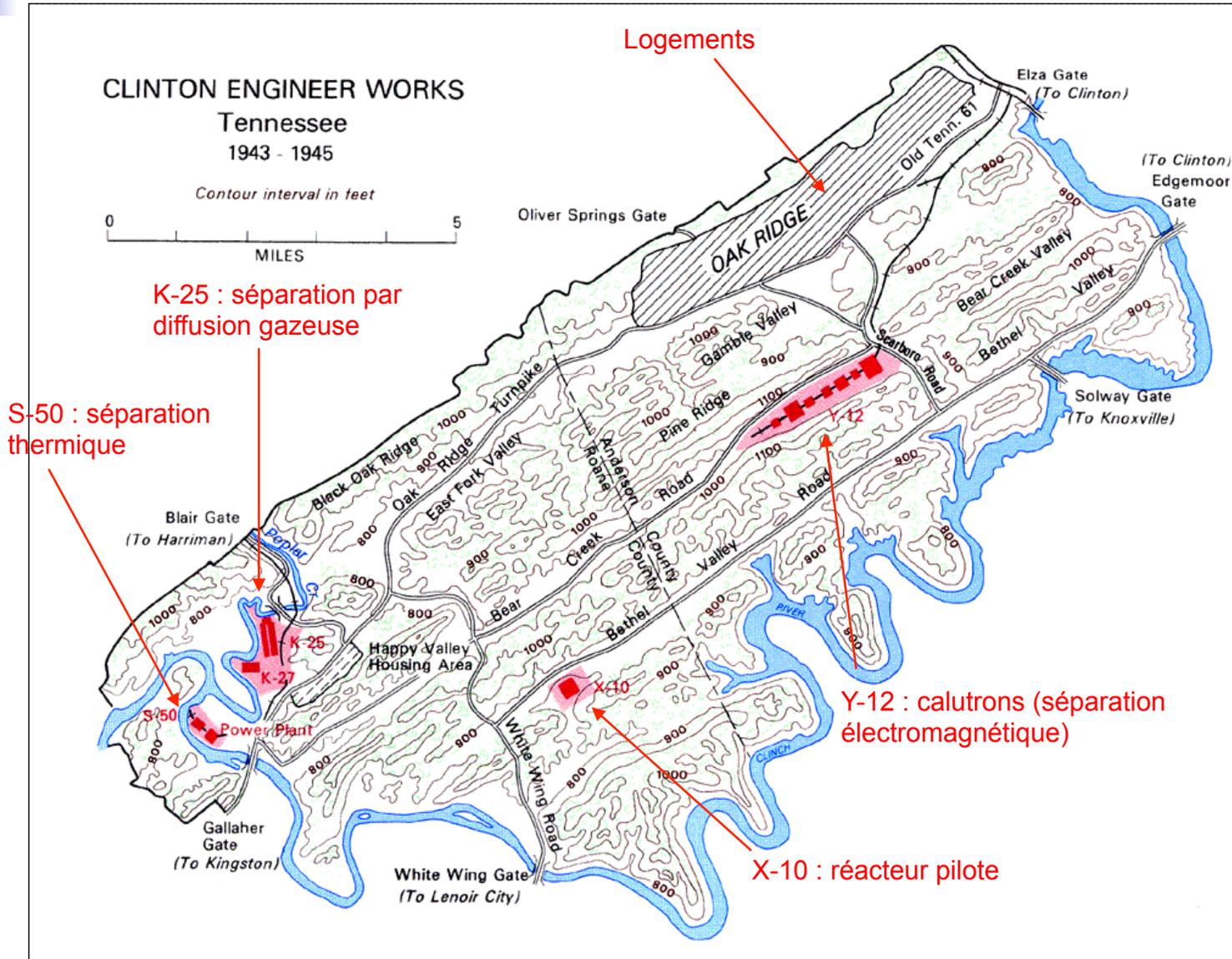


# SÉPARATION ISOTOPIQUE

# Facteur de reproduction $k_{\infty}$

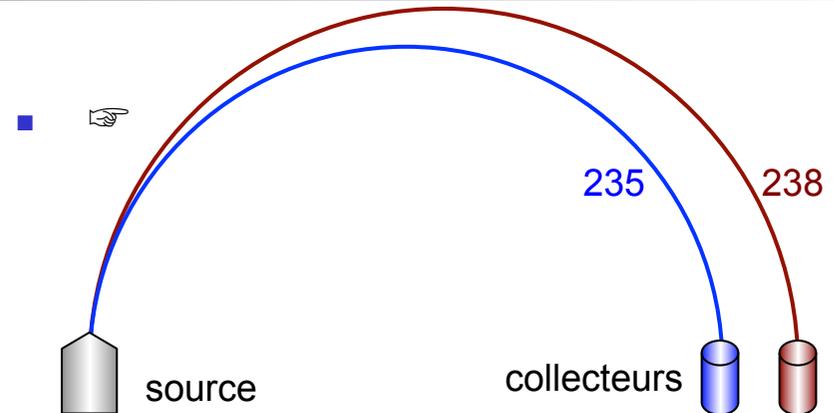


# Oak Ridge [Clinton Engineers Works]



# Séparation électromagnétique

- Principe du spectromètre de masse
  - Ion de masse  $m$  et de charge  $q$
  - Accéléré par potentiel  $V \rightarrow$  vitesse  $v = [2qV/m]^{1/2}$
  - Champ magnétique uniforme  $B \rightarrow$  trajectoire circulaire de rayon  $R$
  - $R = mv/qB = \sqrt{m [2V/q]^{1/2} / B}$
  - Ions de même charge et de masse différente  $\rightarrow$  rayons différents
- Uranium : vapeur à  $2500^\circ\text{C} \rightarrow$  tétrachlorure  $\text{UCl}_4$  gazeux à  $600^\circ\text{C}$
- Fonctionnement en continu



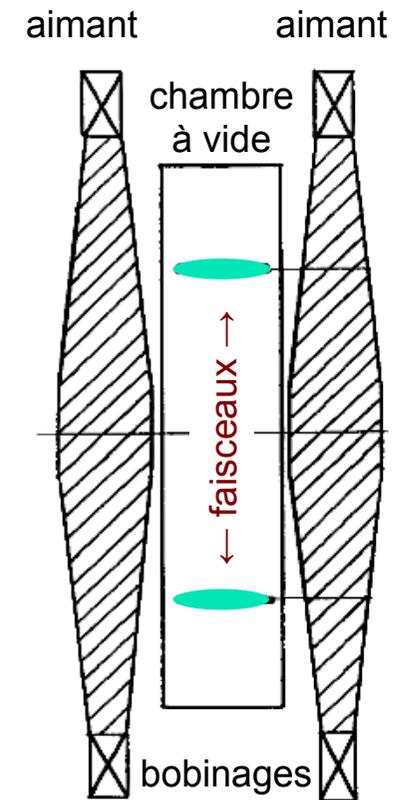
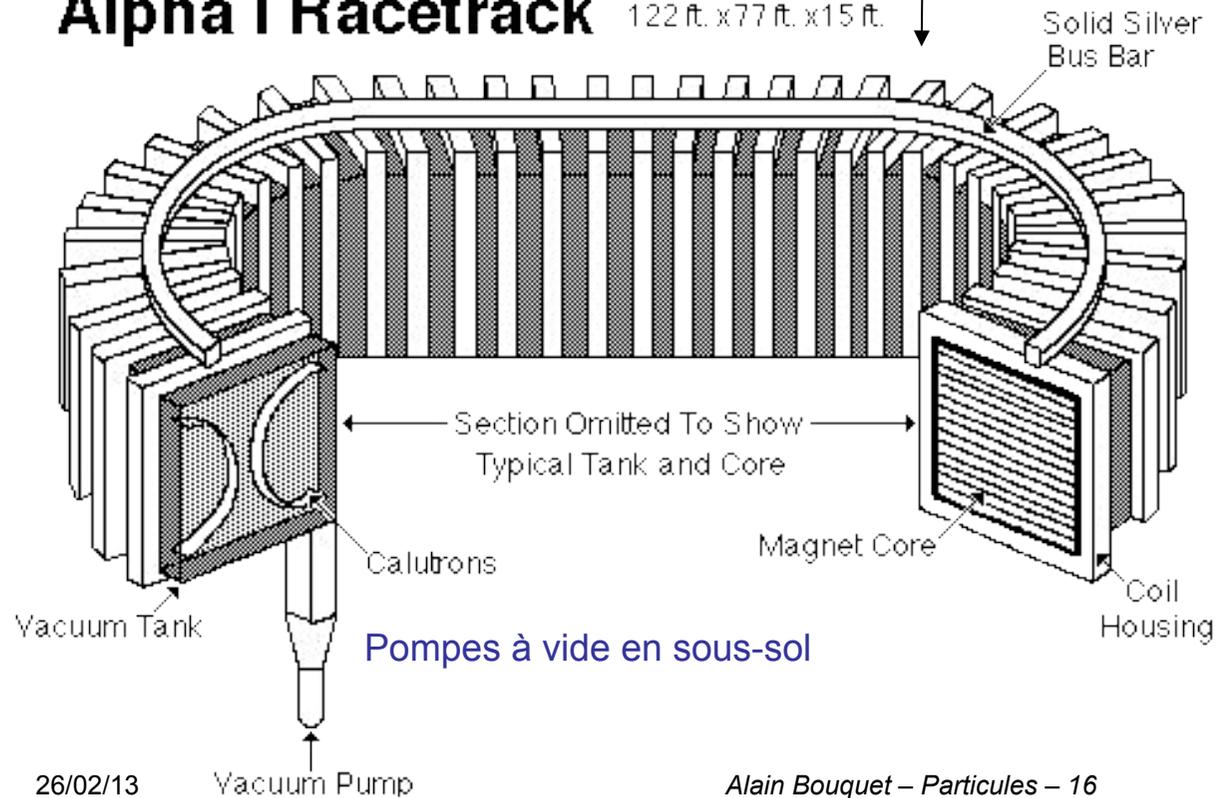
- Lawrence espérait obtenir 200 mg d'uranium  $^{235}$  ~pur par jour par chambre
- Pour obtenir les 50 kg nécessaires pour *chaque* bombe, il envisagea
- 1000 chambres à 4 sources chacune
- $\rightarrow$  une bombe tous les deux mois
- *et une consommation électrique effarante (200 MW)*

# CALifornia University cycloTRON

- calutrons
- 96 chambres à vide (avec 2 puis 4 sources) en sandwich entre les pôles des aimants

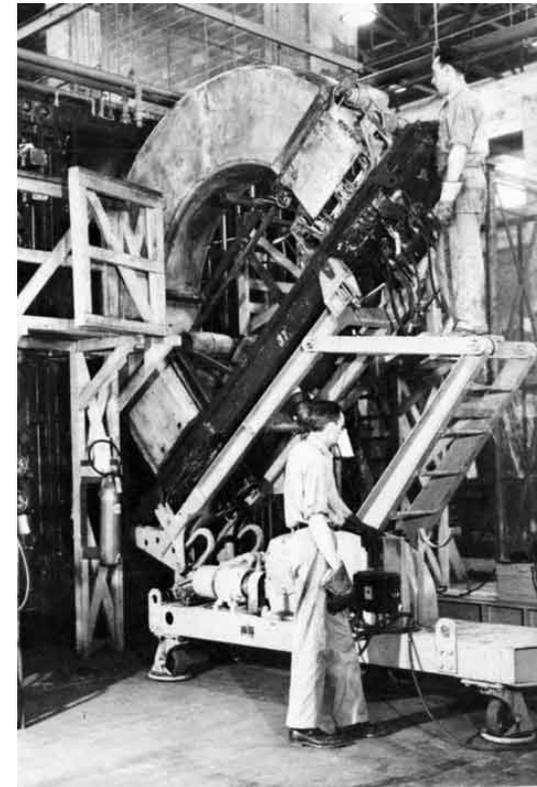
- Bobinages des aimants → 13 300 tonnes d'argent prêté par le Trésor (300 M\$)

## Alpha I Racetrack 122 ft. x 77 ft. x 15 ft.



## Y-12 : les « pistes » de calutrons alpha

- Calutron  $\alpha$  : 96 chambres en forme de C disposées en anneau (piste)
- Premier mis en service en octobre 1943, 4 en avril 1944, 9 en fin d'année



Une des 96 chambres d'un calutron  $\alpha$

## Y-12 : calutrons bêta

- 9 pistes = 864 calutrons  $\alpha$
- → 260 g/jour d'uranium à 10% (puis 20%)
- Complétés par 8 pistes  $\beta$  de 36 chambres chacun
- → 40 g puis 200 g/jour d'uranium à 80% en janvier 1945



- La consommation électrique de Y-12 était phénoménale (200 MW)
- → arrêt des calutrons  $\alpha$  dès la fin de la guerre, et des  $\beta$  peu après
- Calutrons  $\beta$  → isotopes purs de la plupart des éléments du tableau périodique

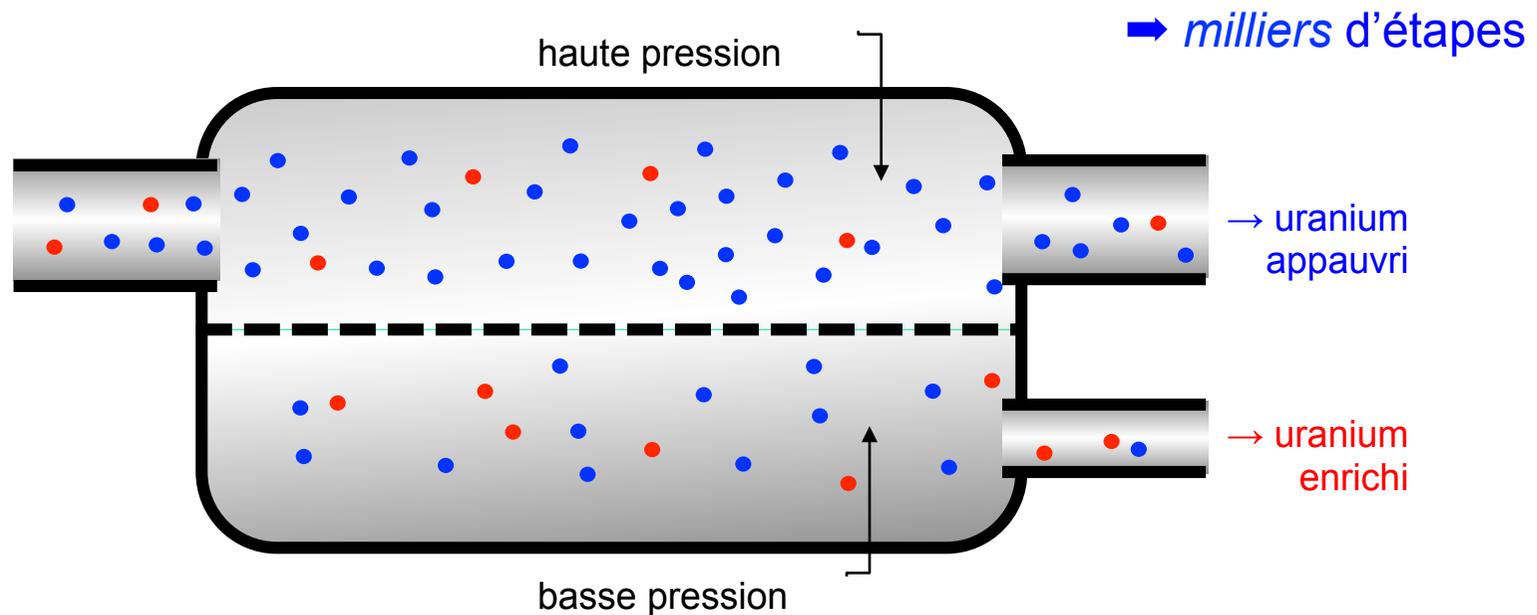
# Séparation par diffusion gazeuse

## ■ Principe

- uranium sous forme gazeuse à température ambiante (hexafluorure  $\text{UF}_6$ )
- à température  $T$  donnée, l'isotope le plus léger est plus rapide

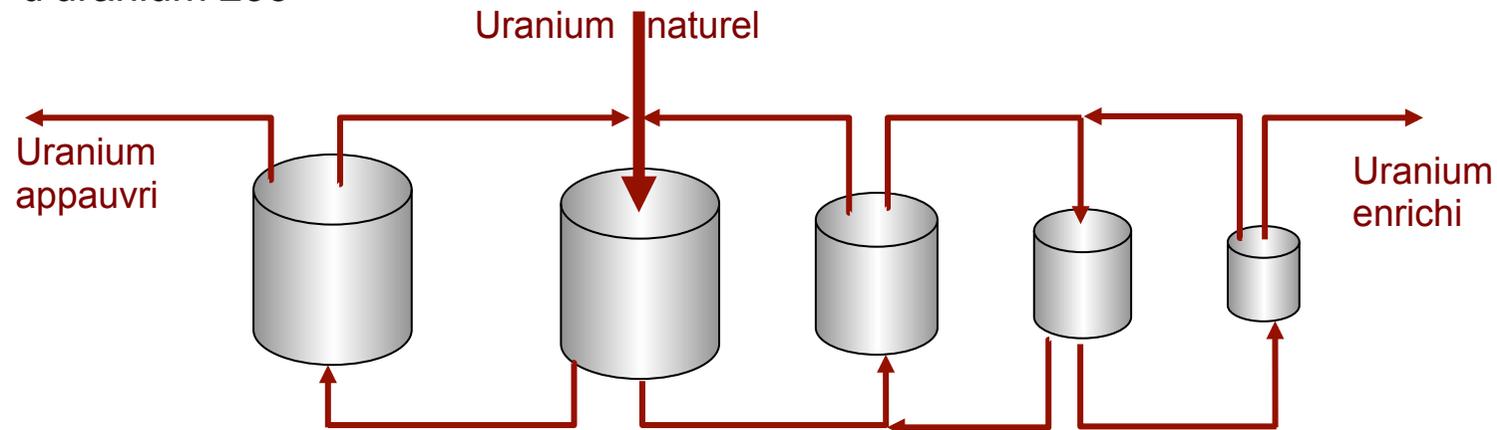
$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} kT \Rightarrow v = [3kT/m]^{1/2}$$

- il passera (un peu) plus souvent à travers les pores d'une paroi que l'isotope plus lourd
- $\Rightarrow$  enrichissement relatif à chaque étape =  $[m_{238}/m_{235}]^{1/2} = 1,0043$



# Travail à la chaîne

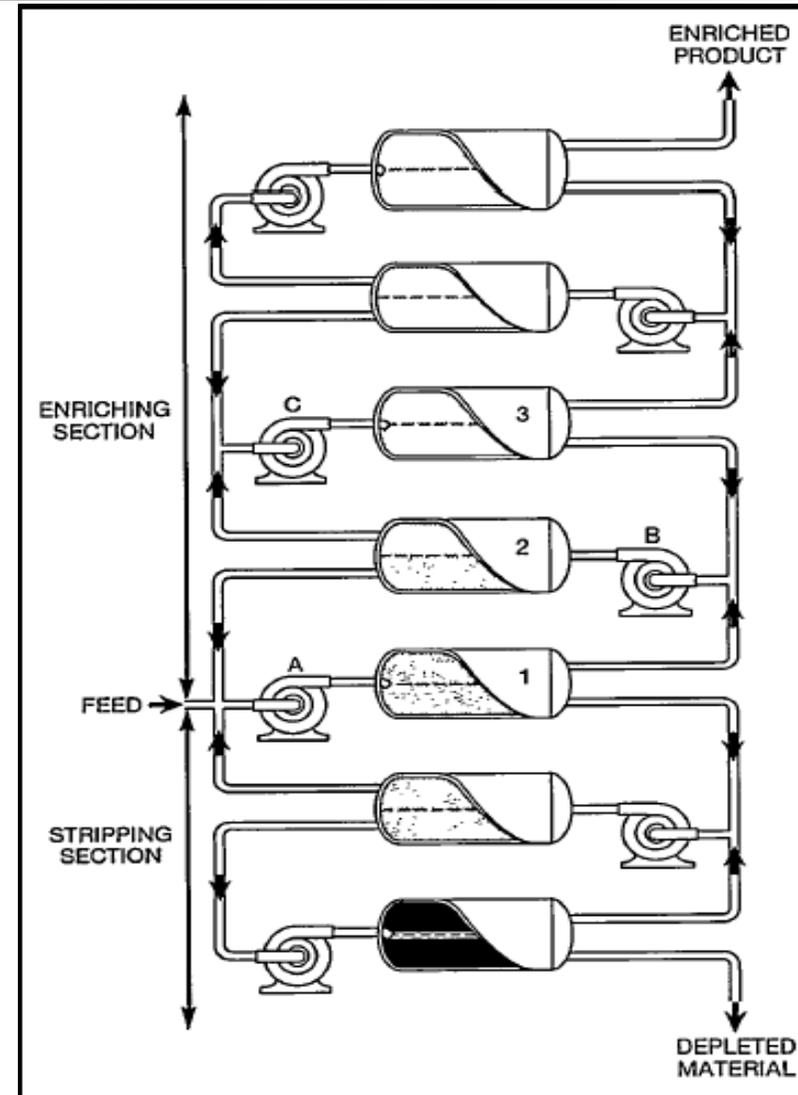
- Pour obtenir 1 kg d'uranium 235, il faut partir de 140 kg d'uranium naturel à 0,72% d'uranium 235



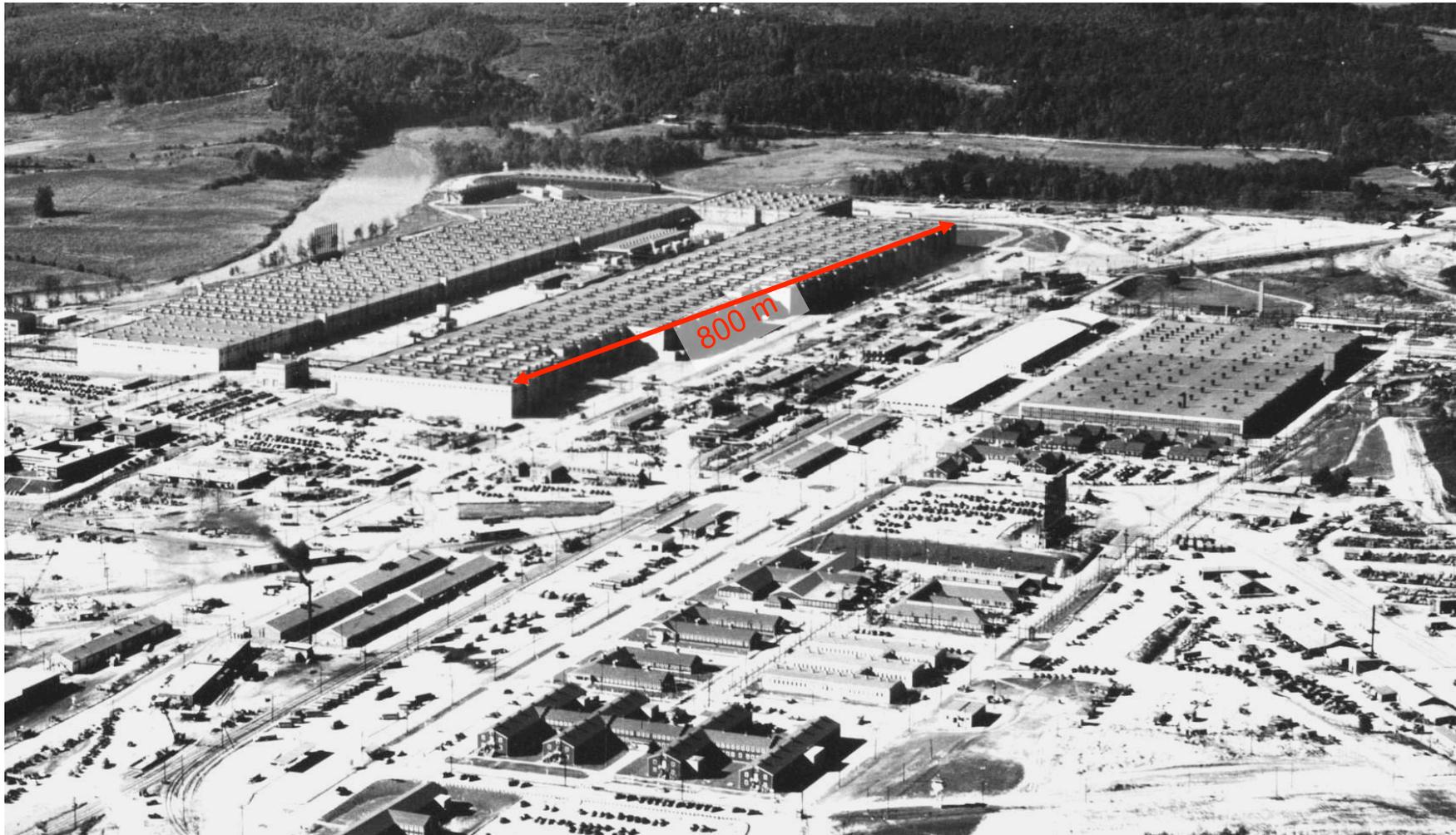
- À chaque étape du processus d'enrichissement
  - on extrait l'uranium (faiblement) enrichi, injecté à l'étape **suivante**
  - on récupère l'uranium (faiblement) appauvri, réinjecté à l'étape précédente
- ⇒ les volumes traités décroissent en progressant le long de la chaîne ⇒ plus simple d'avoir des unités identiques en nombre décroissant

# Séparation par diffusion gazeuse

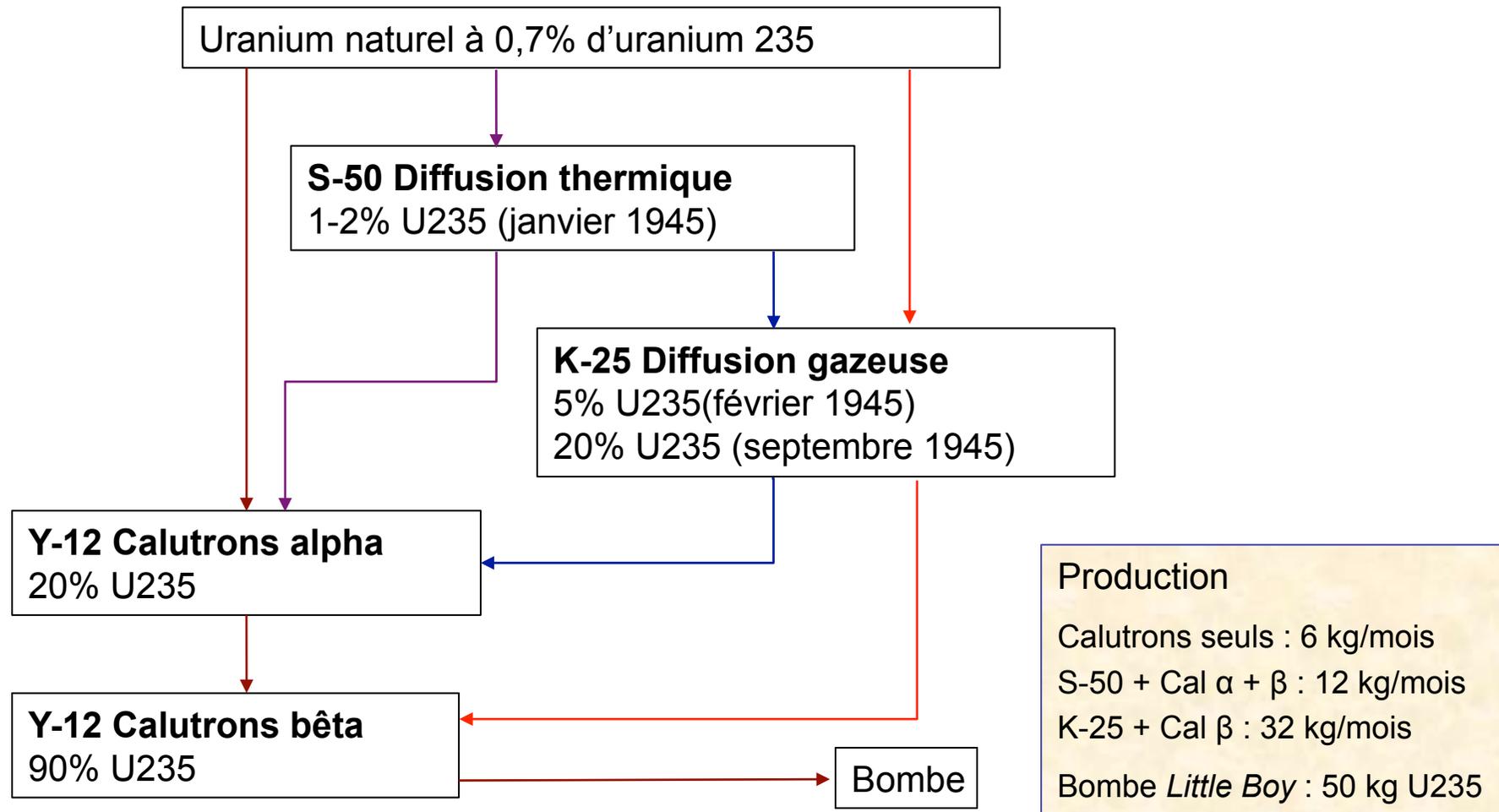
- Le complexe K-25 d'Oak Ridge ⇒
  - 3 000 unités
  - 10 000 m<sup>2</sup> de surface poreuse (pores de 0,1 μm)
  - corrosion due à l'hexafluorure d'uranium → chambres en acier inoxydable recouvert de nickel
  - tubulures, valves et raccords recouverts de Téflon (polytétrafluoroéthylène)

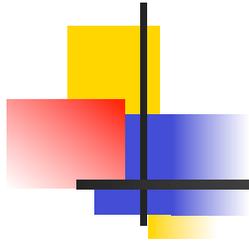


## K-25 et les bâtiments annexes



# Enrichissement à Oak Ridge





# BOMBES

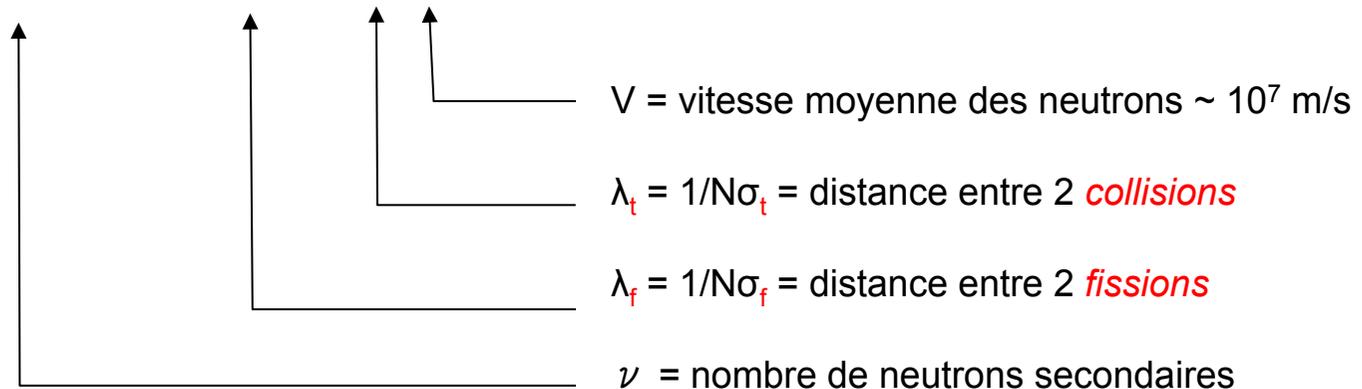
L'objectif du projet est de réaliser une arme utilisable sous la forme d'une bombe où l'énergie est libérée par une réaction en chaîne de neutrons rapides dans l'un des matériaux capables de fission nucléaire.

*Los Alamos Primer, mars 1943*

*Délai imposé : 1<sup>o</sup> août 1945*

# Premier objectif : calculer précisément la masse critique

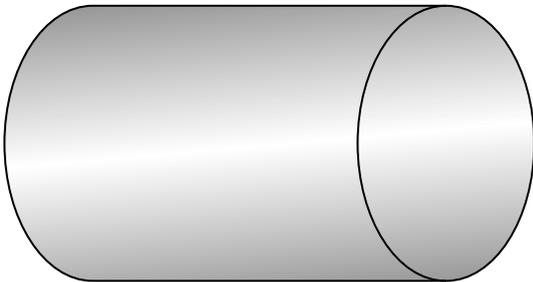
- Calculer le rayon (et donc la masse) d'une sphère d'uranium 235 ou de plutonium 239 juste assez grande pour que les pertes de neutrons soient inférieures à leur production par fission
- Densité de neutrons  $N(x,V,t) \rightarrow$  variation au cours du temps  $dN/dt$
- $dN/dt = [\text{fission}] + [\text{neutrons venant ou partant ailleurs}]$
- $\Rightarrow dN/dt = (\nu - 1)N V/\lambda_f + \lambda_t V/3 \Delta N$



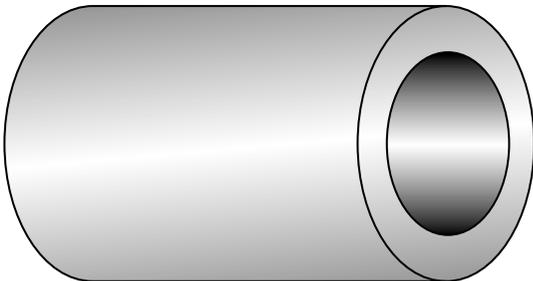
- Simplifications : 1) sphère homogène, et 2) libre parcours moyen des neutrons petit devant la taille de la sphère **aucune des deux n'est réaliste**

## Et si le cœur n'est pas une sphère pleine?

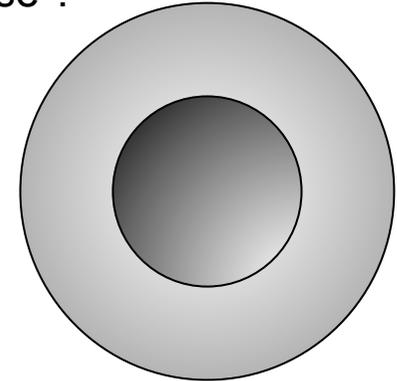
- Un cylindre plein ?



- Un cylindre creux ?

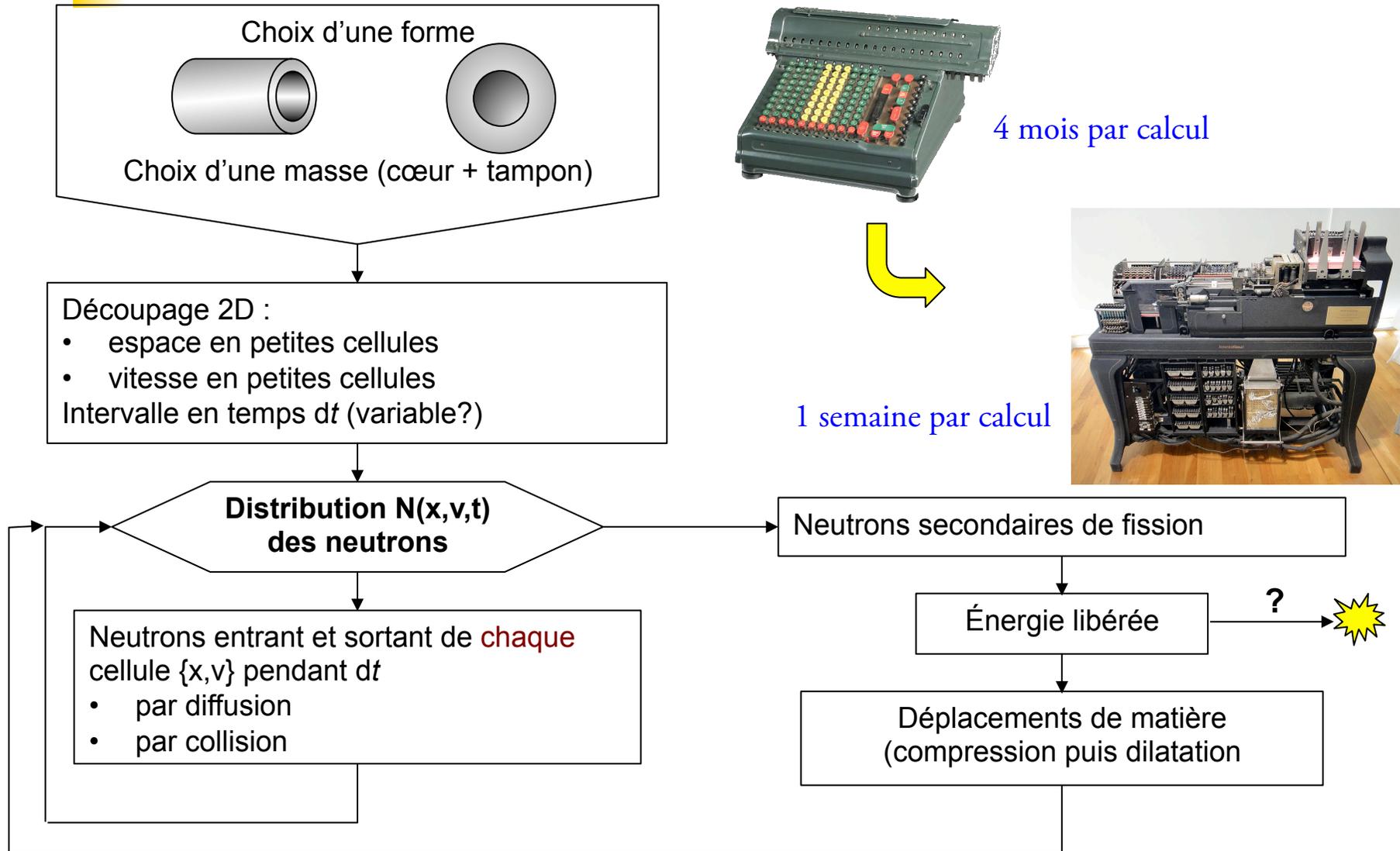


- Une sphère creuse ?



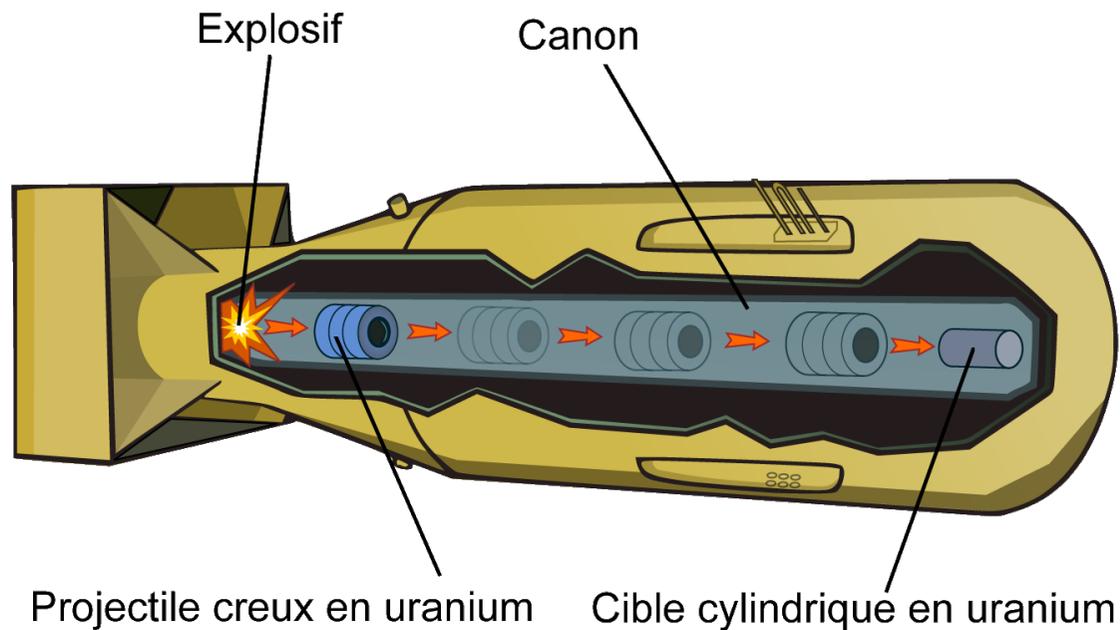
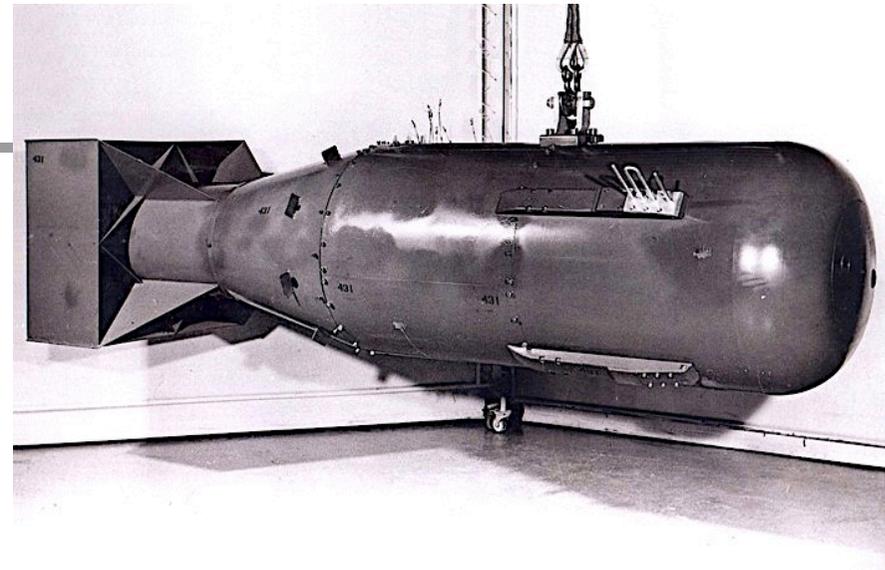
- Le libre parcours moyen des neutrons est de la taille (du cœur) de la bombe
- $\Rightarrow$  une « simple » théorie de diffusion ne suffit pas
- $\Rightarrow$  équation de Boltzmann, à résoudre numériquement

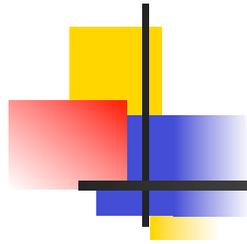
# Un calcul de masse critique à Los Alamos en 1944



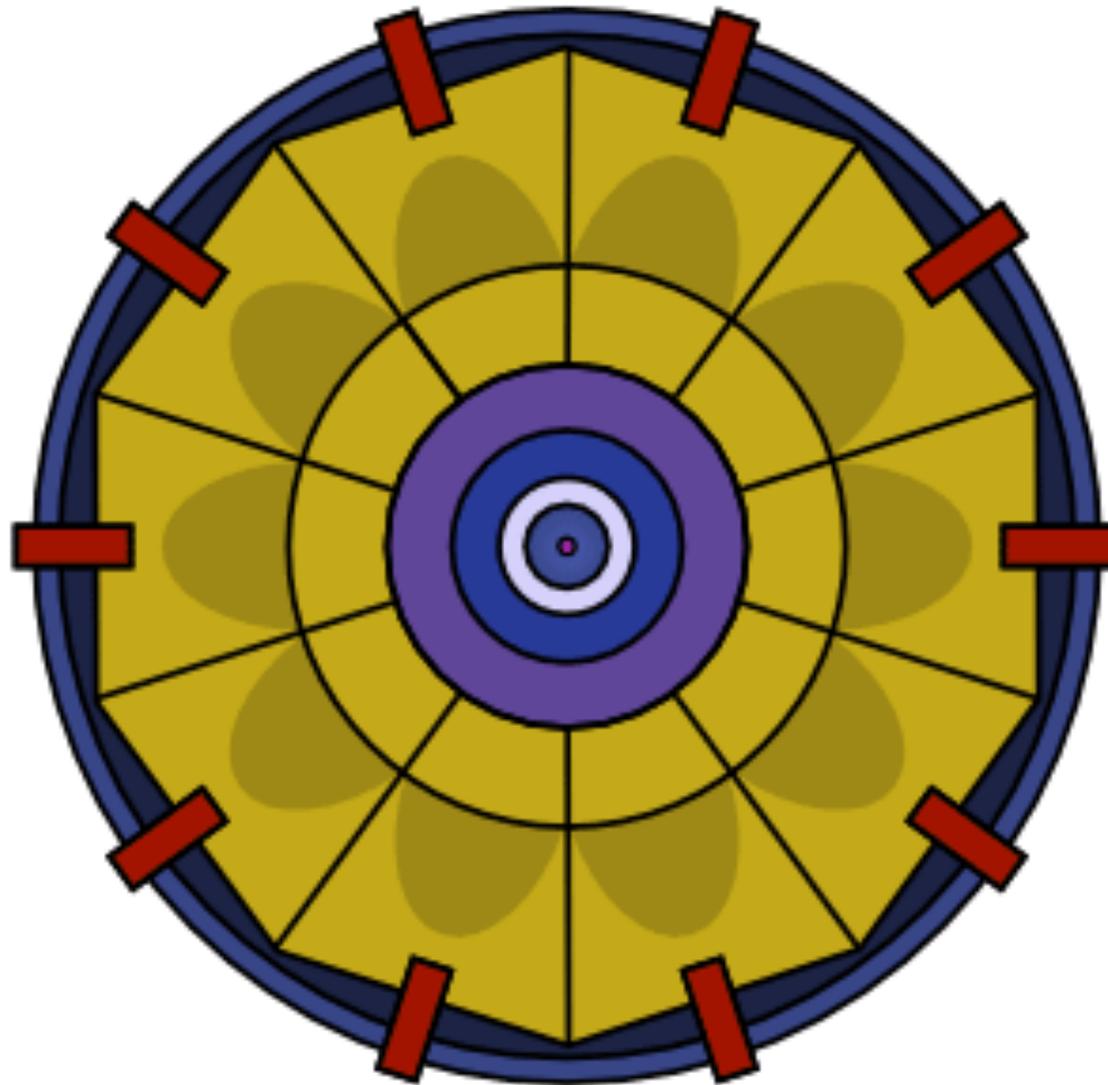
# Little Boy

- Longueur: 3,07 m
- Diamètre: 0,71 m
- Masse ↗ 4 400 kg
- dont 64 kg U235 (3,4 masses critiques)
- et 300 kg carbure de tungstène

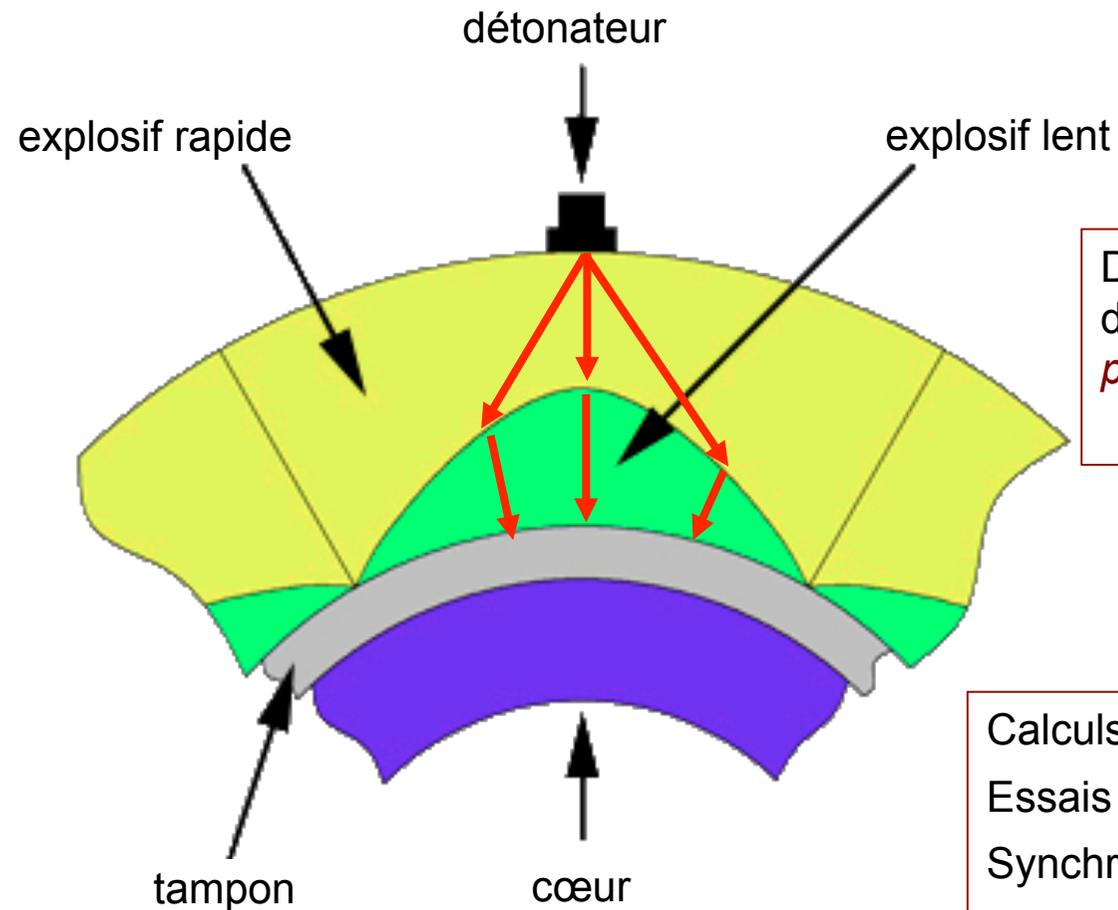




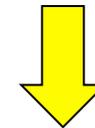
# Fat Man



# Le problème le plus difficile : les lentilles explosives



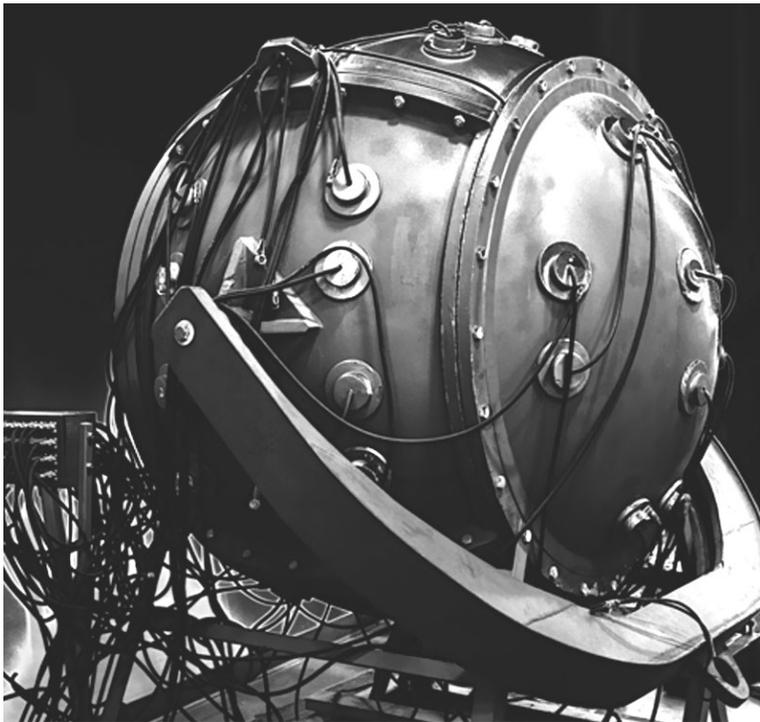
Durée identique des trajets du détonateur au tampon  $\Rightarrow$  forme *très précise* des blocs d'explosifs



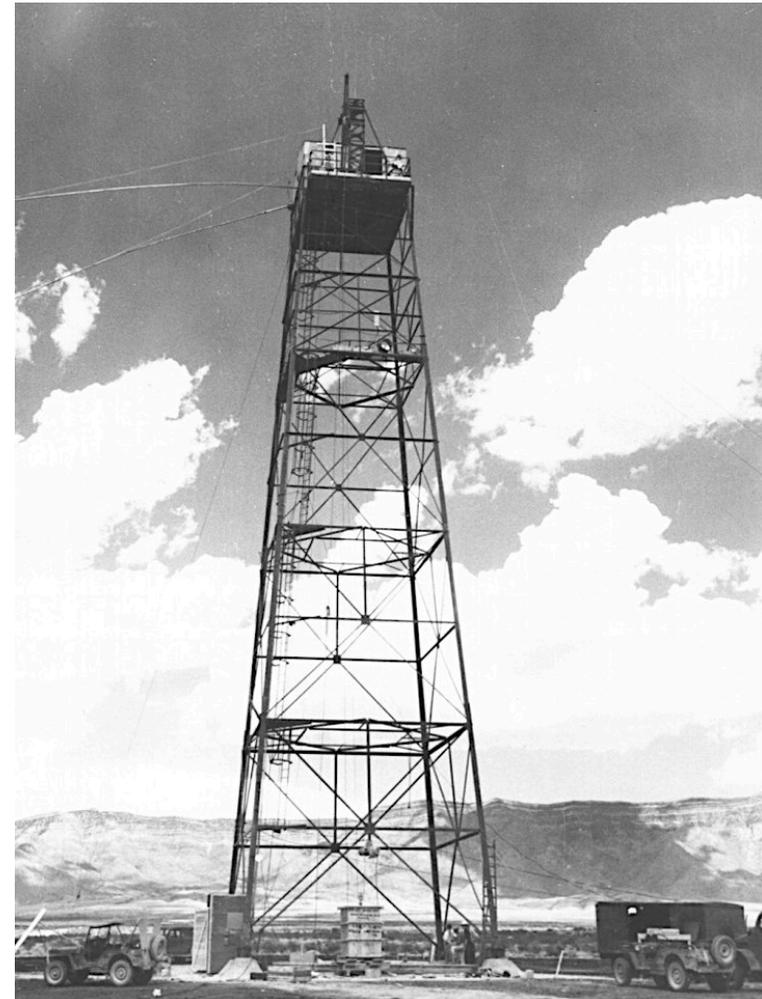
Calculs complexes (von Neumann)  
Essais RaLa (Serber, Rossi)  
Synchronisation des détonateurs (Alvarez)

# Trinity, 16 juillet 1945 : tout fonctionne comme prévu !

- Gadget



- Alamogordo

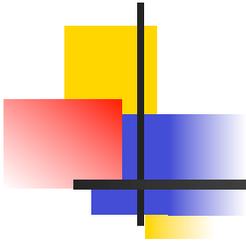


# Hiroshima



# Nagasaki





Merci de votre attention !

