

# PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

## 19 – MANHATTAN OAK RIDGE ET LA SÉPARATION ISOTOPIQUE

Alain Bouquet

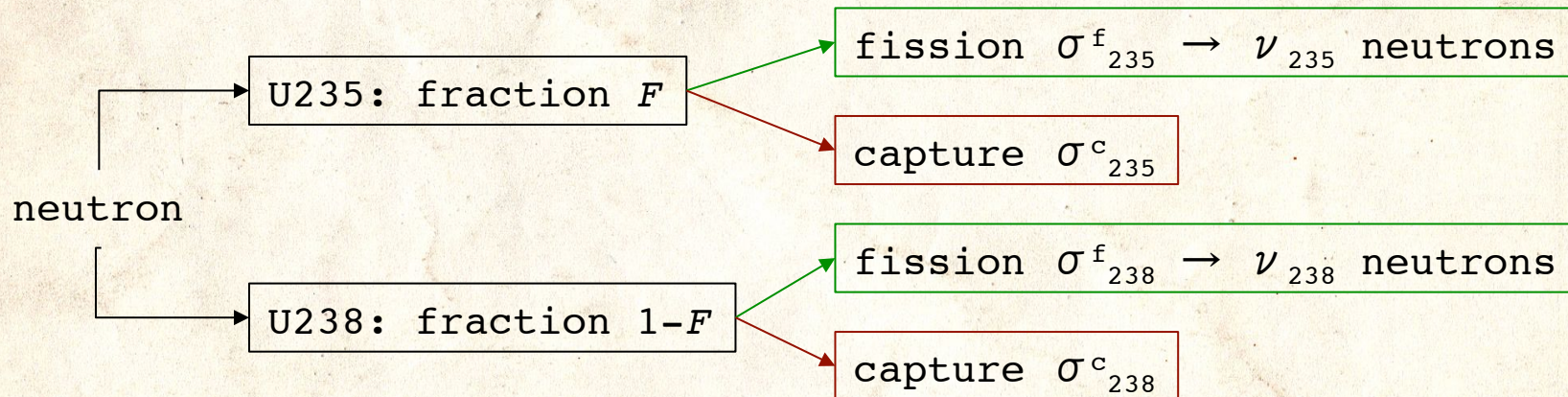
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

# POURQUOI ENRICHIR

# POURQUOI ENRICHIR L'URANIUM EN 235 ?

- Réaction en chaîne  $\Leftrightarrow$  facteur de reproduction  $k > 1$
- **Bloc** d'uranium contenant une fraction  $F$  d'uranium 235 (et donc  $1-F$  d'uranium 238)
- Fission  $\rightarrow \nu$  neutrons/fission
- $\Rightarrow \nu [\sigma^f / \sigma^{\text{total}}]$  neutrons secondaires/neutron initial



- $\Rightarrow \sigma^{\text{total}} = F [\sigma^f_{235} + \sigma^c_{235}] + (1-F) [\sigma^f_{238} + \sigma^c_{238}]$

- $\Rightarrow k_{\infty} = \frac{F \nu_{235} \sigma^f_{235} + (1-F) \nu_{238} \sigma^f_{238}}{F [\sigma^f_{235} + \sigma^c_{235}] + (1-F) [\sigma^f_{238} + \sigma^c_{238}]}$

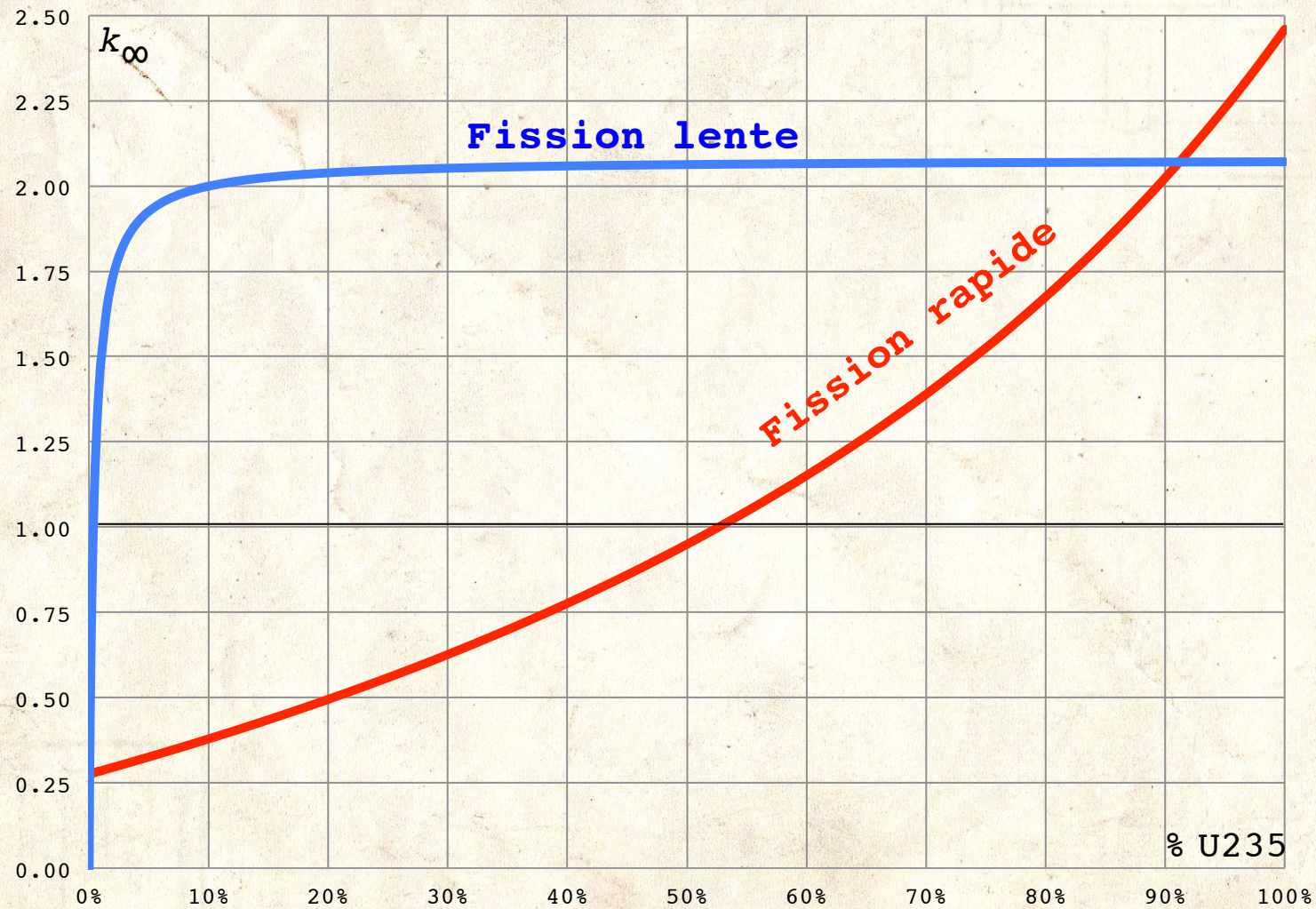
# POURQUOI ENRICHIR L'URANIUM EN 235 ?

- Les sections efficaces de fission et de capture varient fortement avec l'énergie des neutrons
- Pour un réacteur : neutrons lents (thermiques)
- Pour une bombe : neutrons rapides

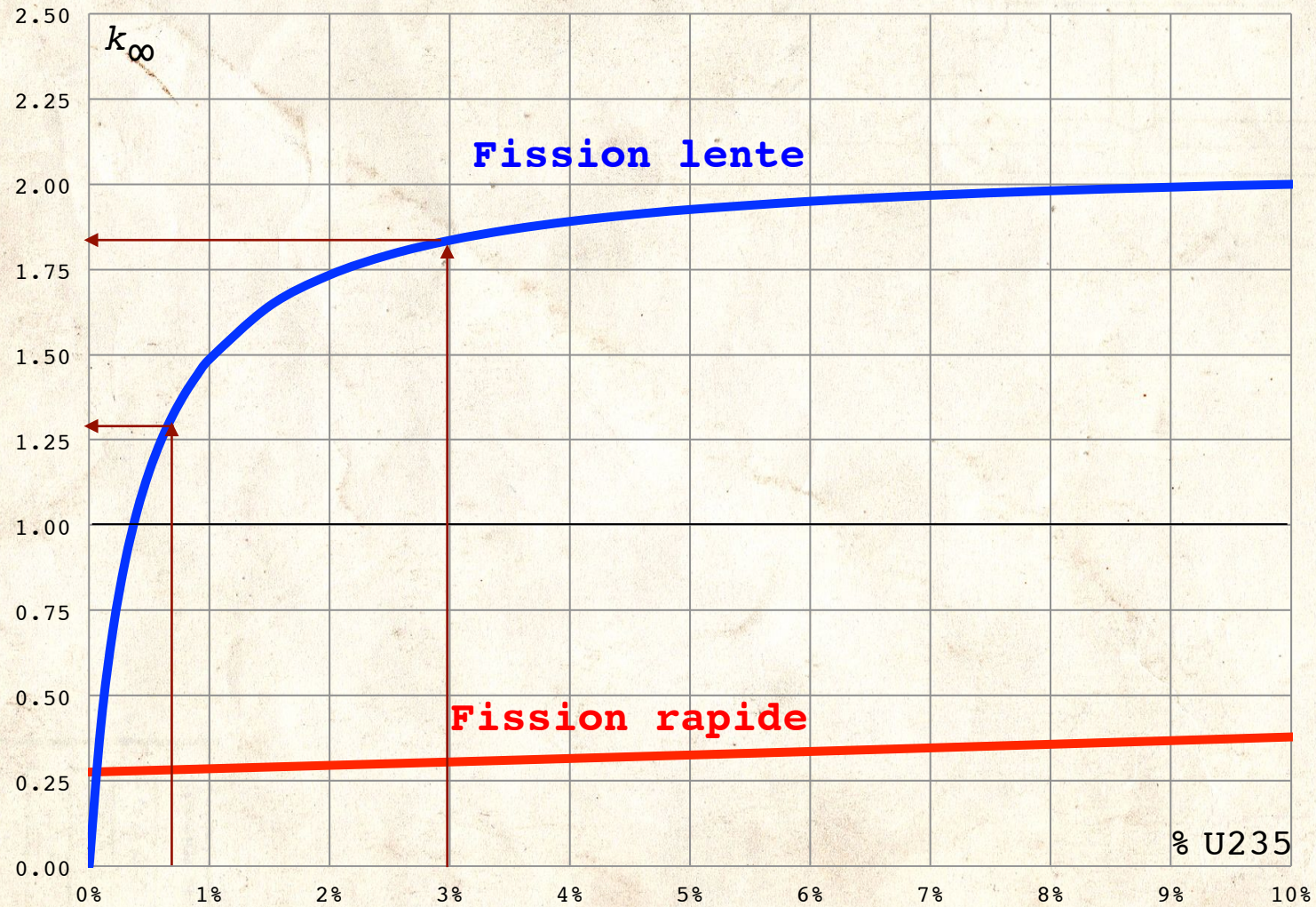
	Nb $\nu$ neutrons secondaires	Section efficace $\sigma_f$ fission	Section efficace $\sigma_c$ capture
U235 rapide	2,64	1,235 barns	0,089 barns
U235 lent	2,42	584,4 barns	98,81 barns
U238 rapide	2,65	0,308 barns	2,661 barns
U238 lent	2,45	0	2,717 barns

$$k_{\infty} = \frac{F \nu_{235} \sigma_{235}^f + (1-F) \nu_{238} \sigma_{238}^f}{F [\sigma_{235}^f + \sigma_{235}^c] + (1-F) [\sigma_{238}^f + \sigma_{238}^c]}$$


# FACTEUR DE REPRODUCTION $k_{\infty}$



# FACTEUR DE REPRODUCTION $k_{\infty}$



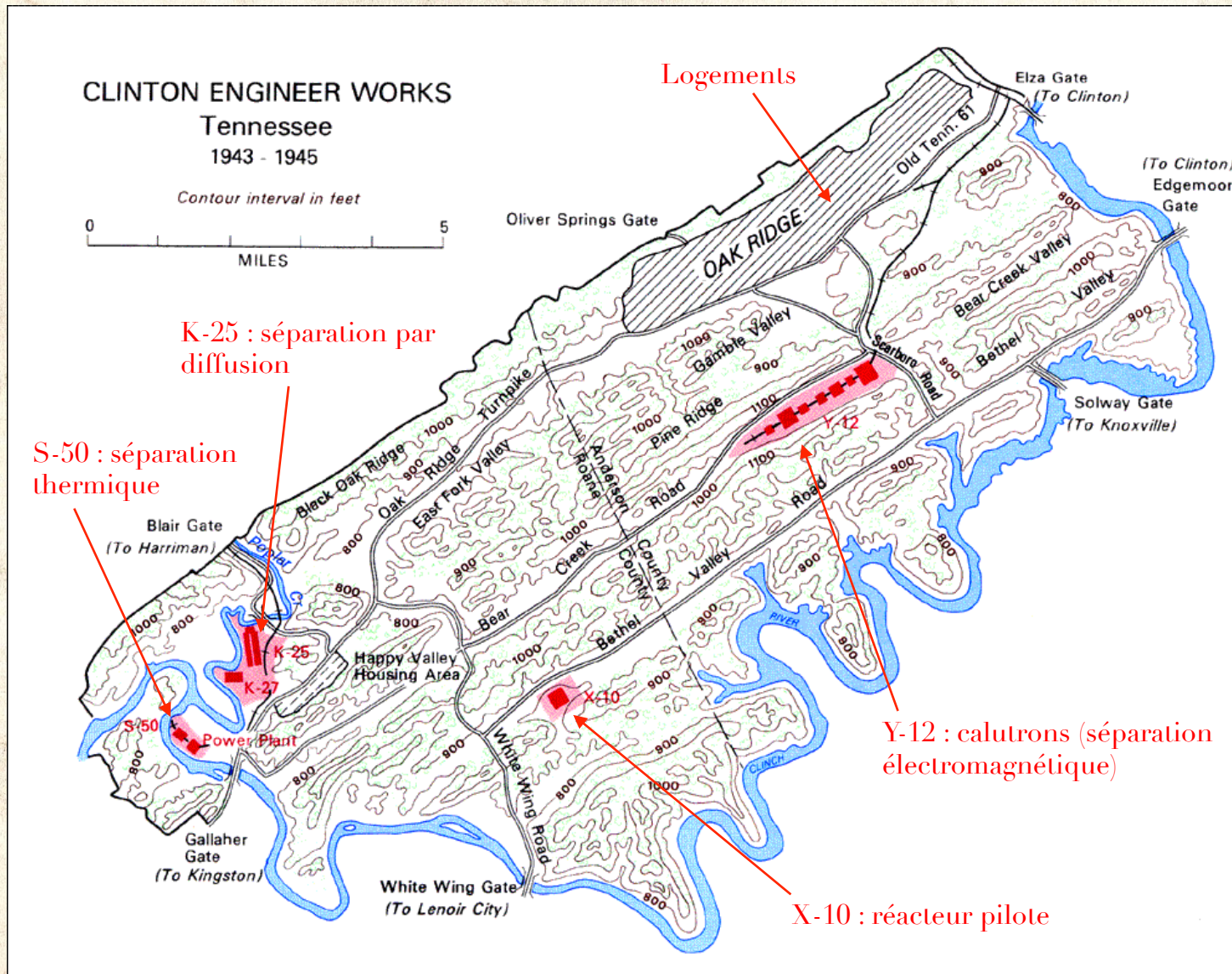
# ENRICHISSEMENT REQUIS

- **Fission lente**
  - *A priori* pas nécessaire puisque  $k_{\infty} = 1,34$  pour l'uranium naturel (0,72% d'U235)
  - Mais pertes
    - taille finie du réacteur
    - absorption dans le modérateur et la structure
    - $\Rightarrow$  enrichir donne une marge de souplesse
  - Très peu d'intérêt à enrichir au delà de 3 à 4% d'U235
  - $\Rightarrow$  les réacteurs nucléaires commerciaux utilisent de l'uranium faiblement enrichi
- **Fission rapide**
  - Requiert un enrichissement  $> 55\%$
  - En pratique, plutôt 80 à 90%
- 
- Complexe d'Oak Ridge
  - (puis Pierrelatte, Tricastin...)
  - $\Rightarrow$  les réacteurs militaires (sous-marins) utilisent de l'uranium enrichi à 50%)  $\rightarrow$  meilleure compacité

**OAK RIDGE  
« SITE X »**



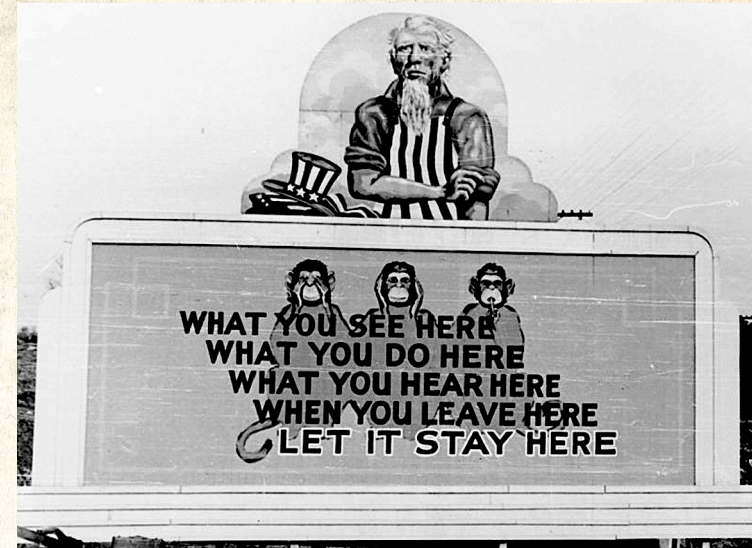
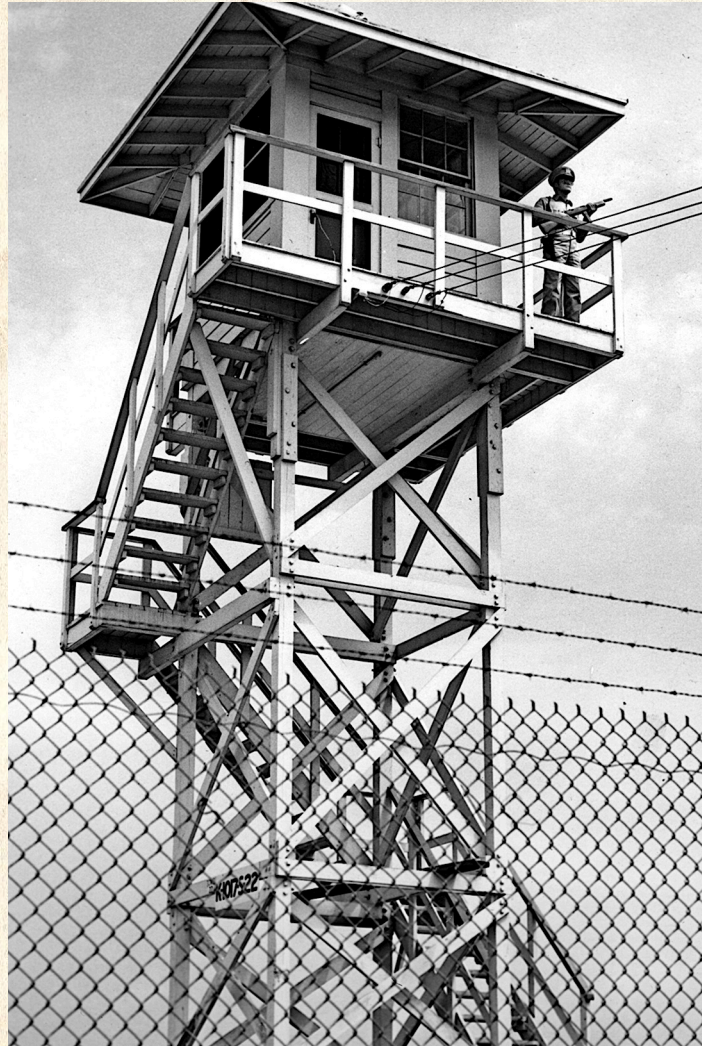
# OAK RIDGE [CLINTON ENGINEERS WORKS]



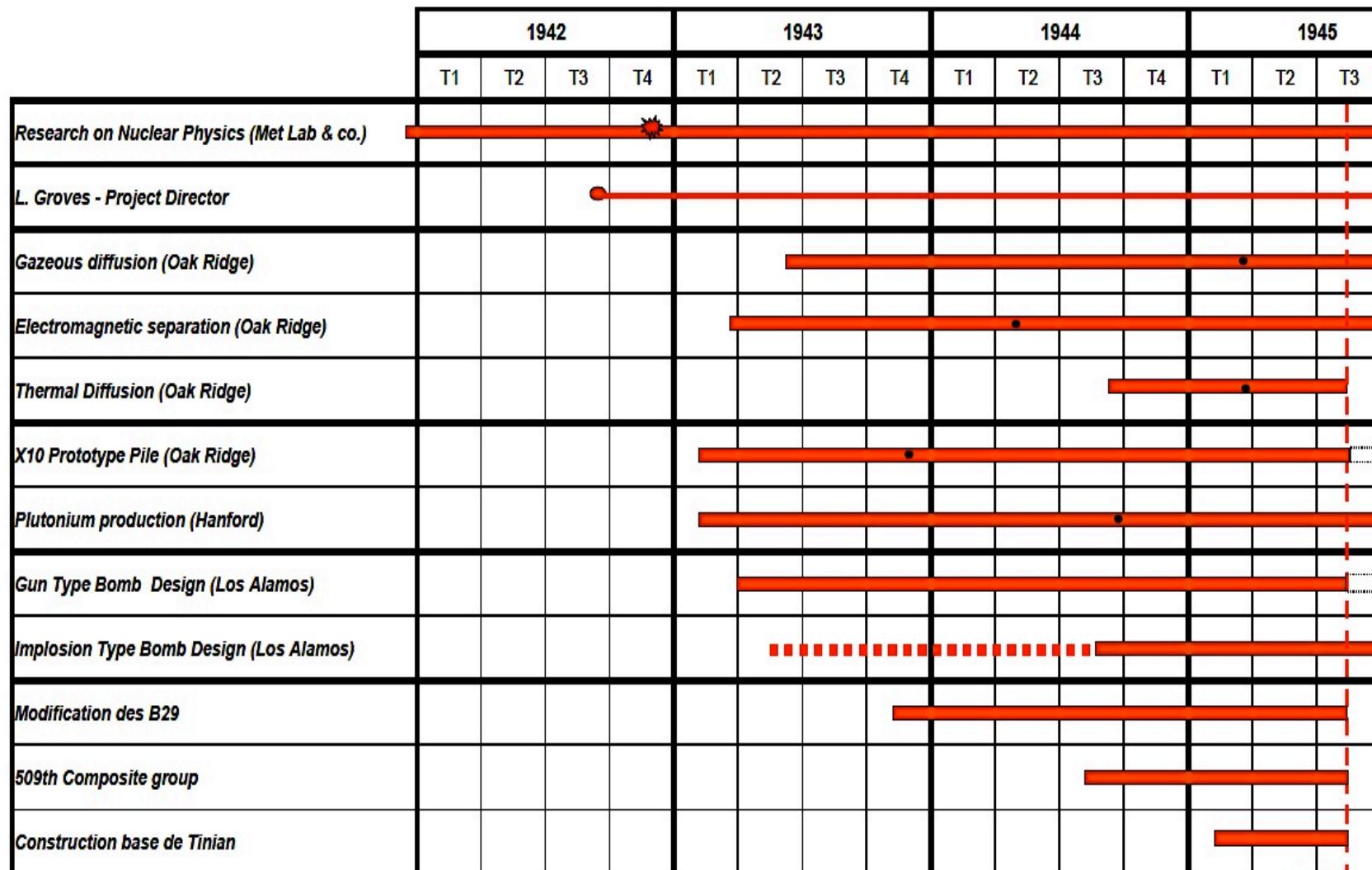
# UNE VILLE SECRÈTE



# SOUS CONTRÔLE MILITAIRE



# LE PROGRAMME MANHATTAN



© Sylvain Lenfle

Hiroshima (6 août 1945)  
Nagasaki (9 août 1945)

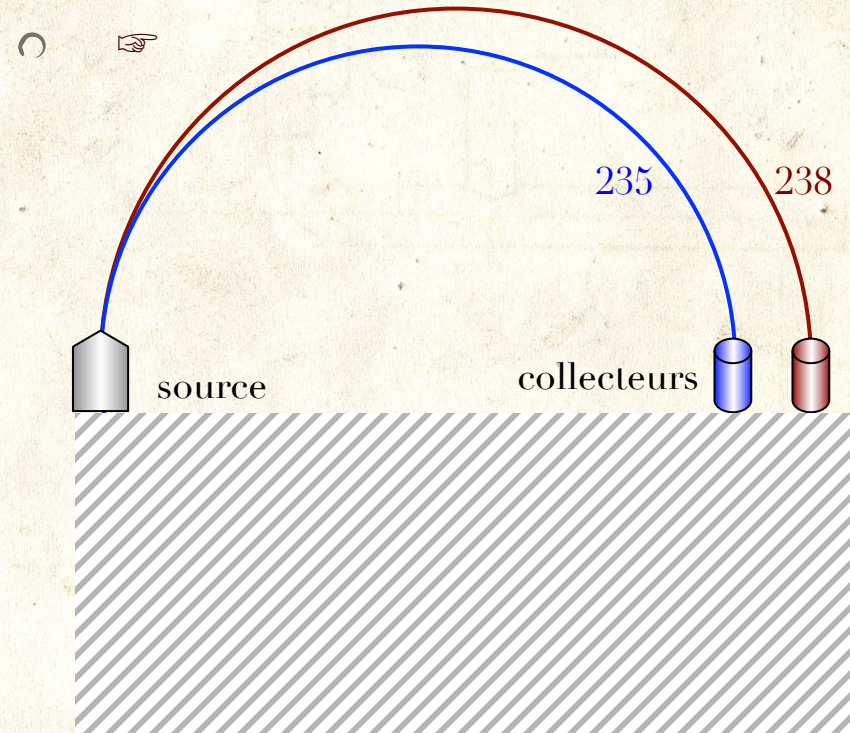
# SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE Y-12

# SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- Principe du spectromètre de masse
- Ion de masse  $m$  et de charge  $q$
- Accéléré par potentiel  $V \rightarrow$  vitesse  $v = [2qV/m]^{\frac{1}{2}}$
- Champ magnétique uniforme  $B \rightarrow$  trajectoire circulaire de rayon  $R$

$$R = mv/qB = \sqrt{m} [2V/q]^{\frac{1}{2}} / B$$

- 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  $600^{\circ}\text{C}$



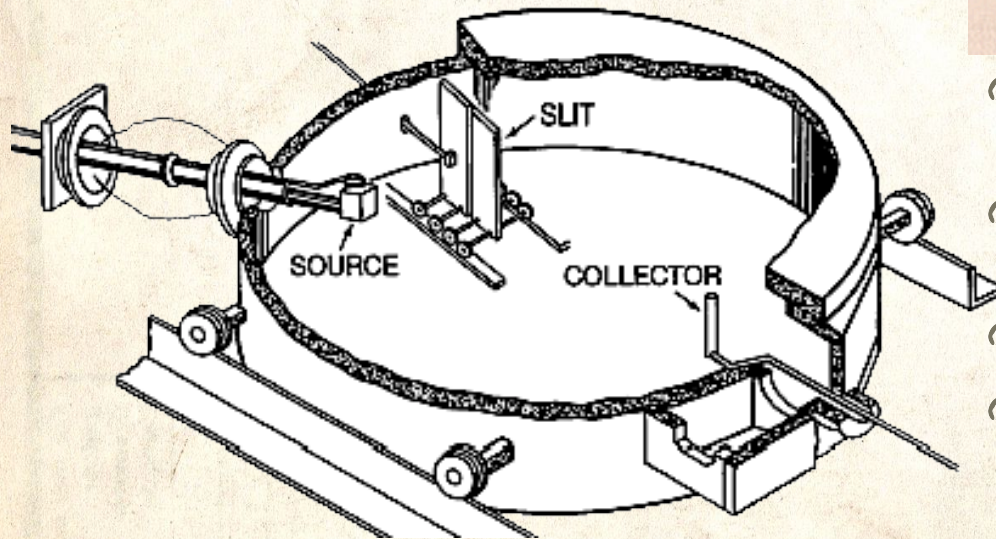
- Fonctionnement en continu
  - ionisation
  - accélération
  - sélecteur de vitesse
  - champ magnétique
  - collecteur

# SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

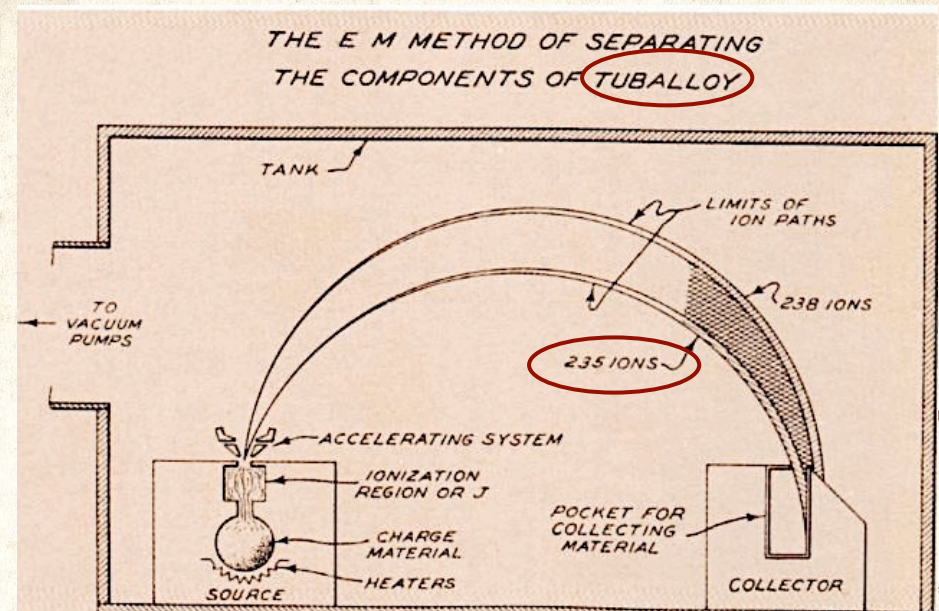
- Quantitativement [ $UCl_4$ ]
- $R = [2mV/q]^{1/2} / B$ 
  - Masse  $m = (377 \text{ ou } 380) / 6 \cdot 10^{23} \text{ g}$
  - Voltage  $V = 30 \text{ kV}$  ( $\rightarrow$  vitesse  $100 \text{ km/s}$ )
  - Charge  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
  - Champ  $B = 0,34 \text{ T}$
- $\Rightarrow R = 1,424 \text{ et } 1,430 \Rightarrow$  écart de  $12 \text{ mm}$  entre les faisceaux
- Difficile de l'augmenter : déjà chambre à vide de  $\varnothing 3 \text{ m}$
- Champ magnétique  $B$  intense sur une grande surface  $\Rightarrow$  très gros aimants  $\Rightarrow$  forte puissance électrique
- Objectif : séparer une grande quantité d'uranium en peu de temps
  - $\Rightarrow$  grand nombre d'ions/seconde [ $I = 1 \text{ mA}$  (1942)  $\nearrow$   $100 \text{ mA}$  (1945) ]
  - $\Rightarrow$  soit
    1. forte densité d'ions
    2. grande vitesse des ions
  - Forte densité  $\Rightarrow$  problème de *charge d'espace*
  - $\Rightarrow$  élargissement des faisceaux  $\Rightarrow$  **chevauchement des faisceaux**
  - Grande vitesse  $\Rightarrow$  fort voltage  $V \Rightarrow$  forte puissance électrique  $P = VI$  pour chaque source

# SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE - 1942

- Prototype d'*isotron* de Smyth et Wilson (champ électrique pulsé  $\Rightarrow$  accélération dépendant de la masse)
- Prototype de *calutron* de Lawrence (champ magnétique  $\Rightarrow$  trajectoire circulaire de rayon dépendant de la masse)




Cyclotron de 37 pouces transformé en spectromètre



- Courant d'ions limité à 1 mA  $\Leftrightarrow$   $6,24 \cdot 10^{15}$  ions/seconde
- Un ion  $\Leftrightarrow$  un atome U235  $\Leftrightarrow$   $235/6,02 \cdot 10^{23}$  g
- 1 mA  $\Leftrightarrow$   $2,43 \mu\text{g/s} = 210 \text{ mg/jour}$
- Pour 50 kg, 240 000 jours – ou 60 jours avec 1000 chambres à 4 sources chacune

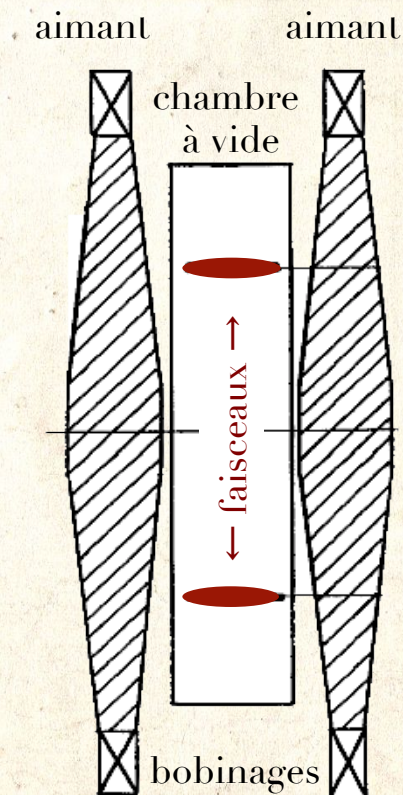
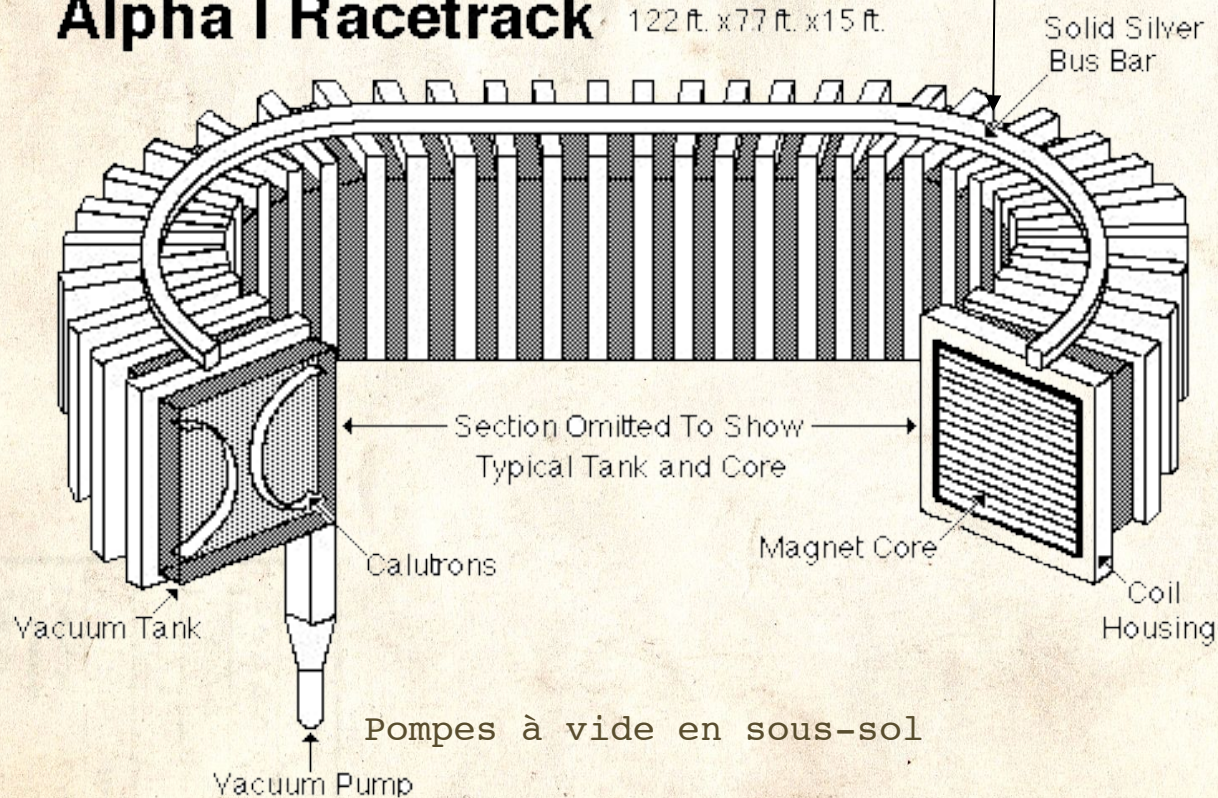


# CALIFORNIA UNIVERSITY CYCLOTRON

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

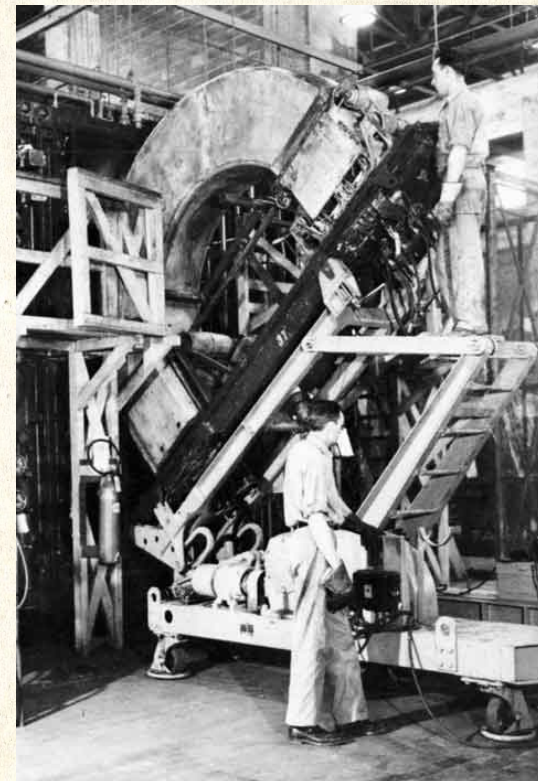
- Bobinages des aimants → 13 300 tonnes d'argent prêté par le Trésor (300M\$)

## 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 : CALUTRON ALPHA EN CONSTRUCTION



# 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 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

# Y-12 : VUE AÉRIENNE



22 mars 2012

Alain Bouquet – Petite histoire de la physique nucléaire – 19

21

**SÉPARATION PAR  
DIFFUSION GAZEUSE  
K-25**

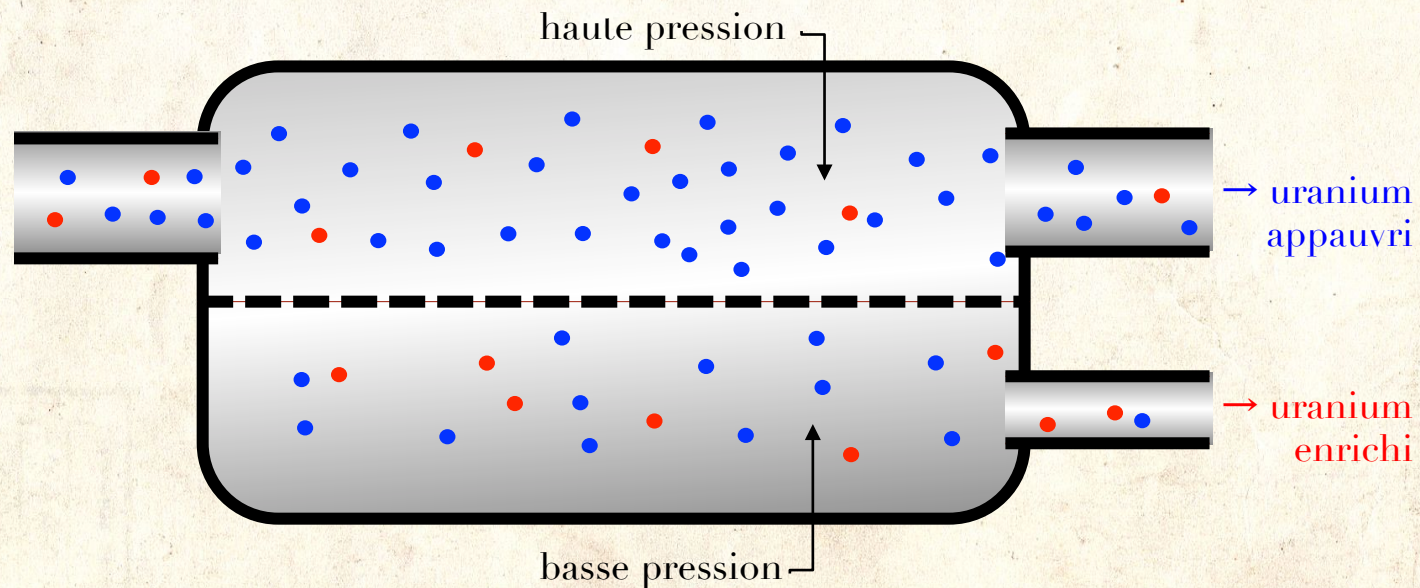
# SÉPARATION PAR DIFFUSION GAZEUSE

## ○ Principe

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

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

- il passera plus souvent à travers les pores d'une paroi que l'isotope plus lourd
- $\Rightarrow$  enrichissement



# SÉPARATION PAR DIFFUSION GAZEUSE

- Nombre de molécules traversant les pores par unité de temps

$$N \propto n S v = C n / \sqrt{m}$$

- densité  $n$  [densité initiale  $n_0$ , puis  $n_1$  après la 1<sup>o</sup> barrière poreuse...]
- vitesse  $v$
- surface totale des pores  $S$

- $\Rightarrow N_1 = C n_0 / \sqrt{m} \quad \Rightarrow n_1 = N_1 / V$

- $\Rightarrow N_2 = C n_1 / \sqrt{m} = C^2 n_0 / V (\sqrt{m})^2$

- $\Rightarrow N_k = C n_{k-1} / \sqrt{m} = C^k n_0 / V^{k-1} (\sqrt{m})^k$

- $\Rightarrow x_k \equiv N_k(235) / N_k(238) = n_0(235) / n_0(238) * [m_{238} / m_{235}]^{k/2}$

- $n_0(235) / n_0(238) = 0,0072 / 0,9928 \sim 0,0072$

- hexafluorure  $\Rightarrow m_{238} / m_{235} = 352 / 349 = 1,0086$

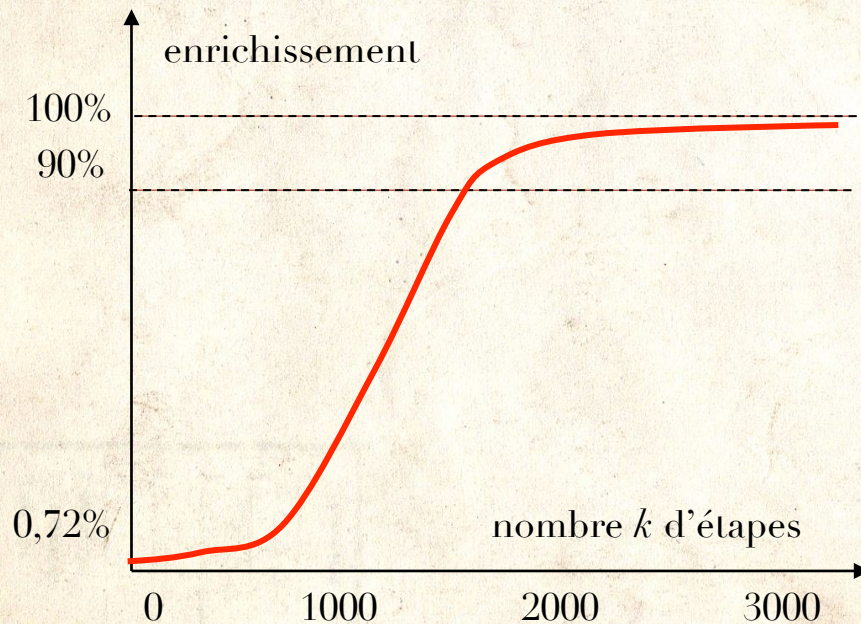
- pourcentage de 235 :  $P = x_k / [1 + x_k]$

- Enrichissement relatif à chaque étape :  $[m_{238} / m_{235}]^{1/2} = 1,0043$



# SÉPARATION PAR DIFFUSION GAZEUSE

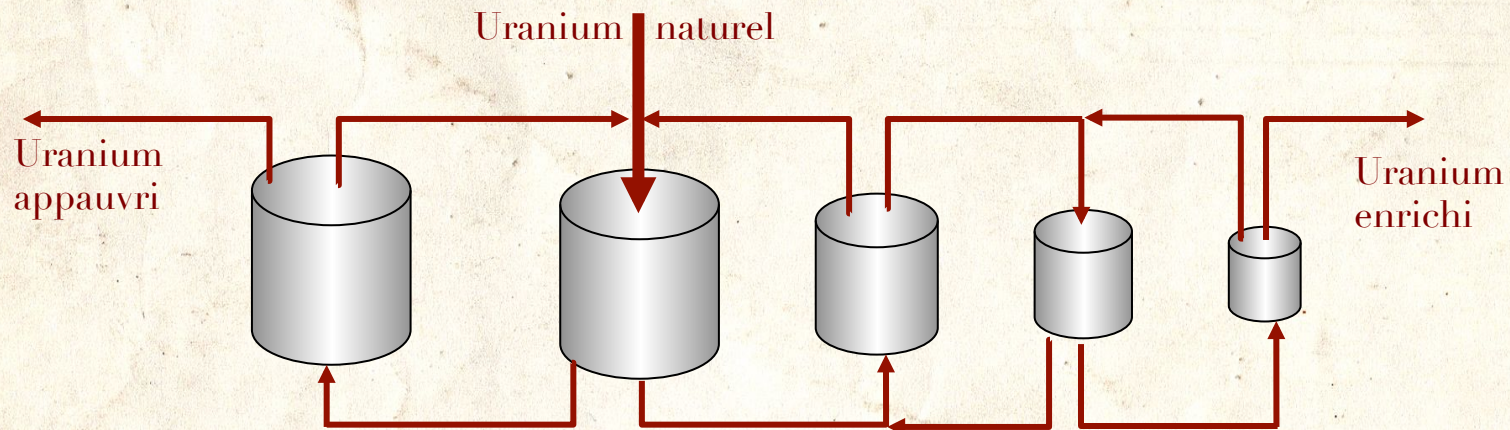
- $x_k \equiv N_k(235)/N_k(238) = n_0(235)/n_0(238) * [m_{238}/m_{235}]^{k/2}$
- $n_0(235)/n_0(238) = 0,0072/0,9928 \sim 0,0072$
- hexafluorure  $\Rightarrow m_{238}/m_{235} = 352/349 = 1,0086$
- pourcentage de 235 :  $P = x_k/[1+x_k]$
- $\Rightarrow k = 2 \text{ Log}[P/0,0072(1-P)]/\text{Log}[1,0086] \Rightarrow P = 0,04 \rightarrow k = 408$   
 $\Rightarrow P = 0,90 \rightarrow k = 1664$



- En pratique, il y a des pertes  $\Rightarrow$  bien plus d'étages
- 1200 étages de 0,72% à 4%
- 1800 étages de 4% à 90%

# TRAVAIL À LA CHAÎNE

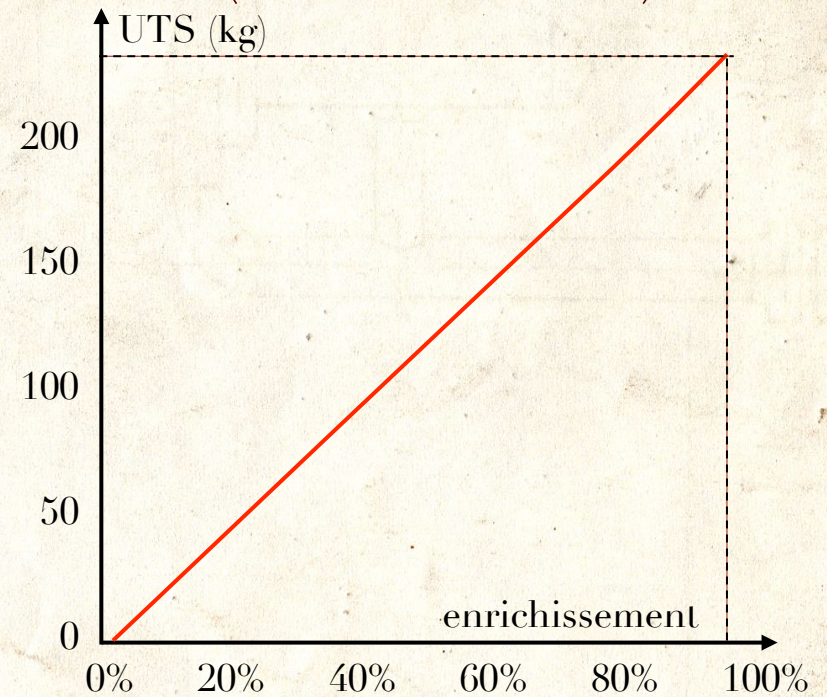
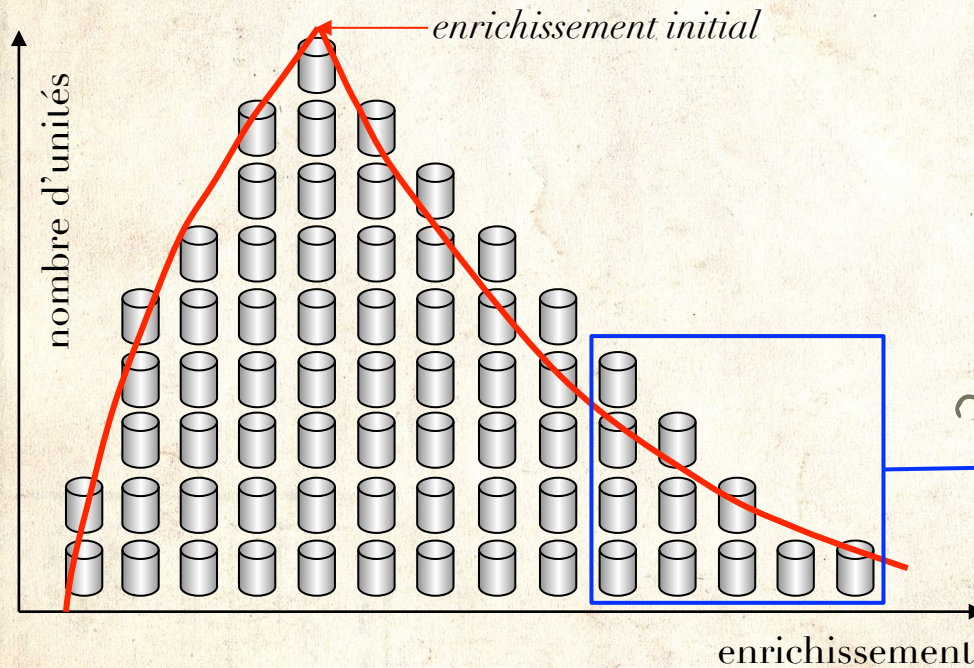
- Pour obtenir 1 kg d'uranium 235, il faut partir de 140 kg d'uranium naturel à 0,72% d'uranium 235



- 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

# UNITÉ DE TRAVAIL DE SÉPARATION (UTS ou SWU)

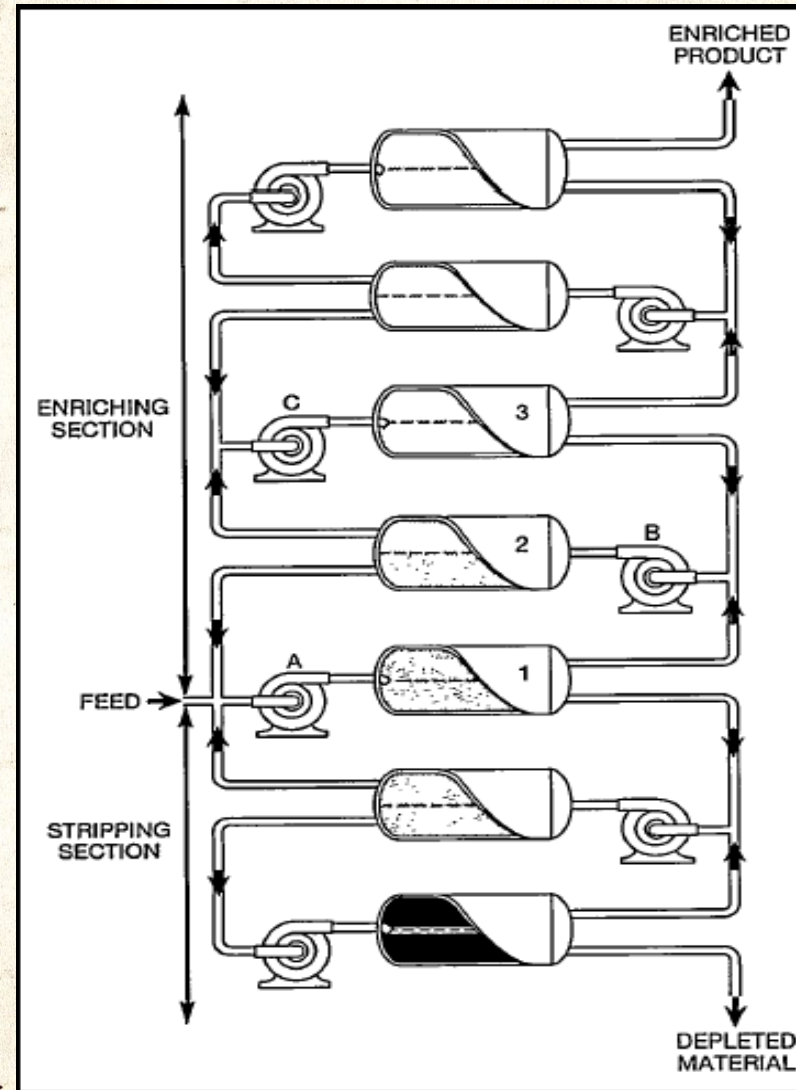
- UTS : séparation d'un kg d'uranium en 2 lots de teneur différente en U235 → dépend des teneurs finales (par ex 80% et 0,25%) ~ 200 UTS/kg
- Efficacité du procédé  $\Leftrightarrow$  nombre de joules/UTS ou de kWh/UTS



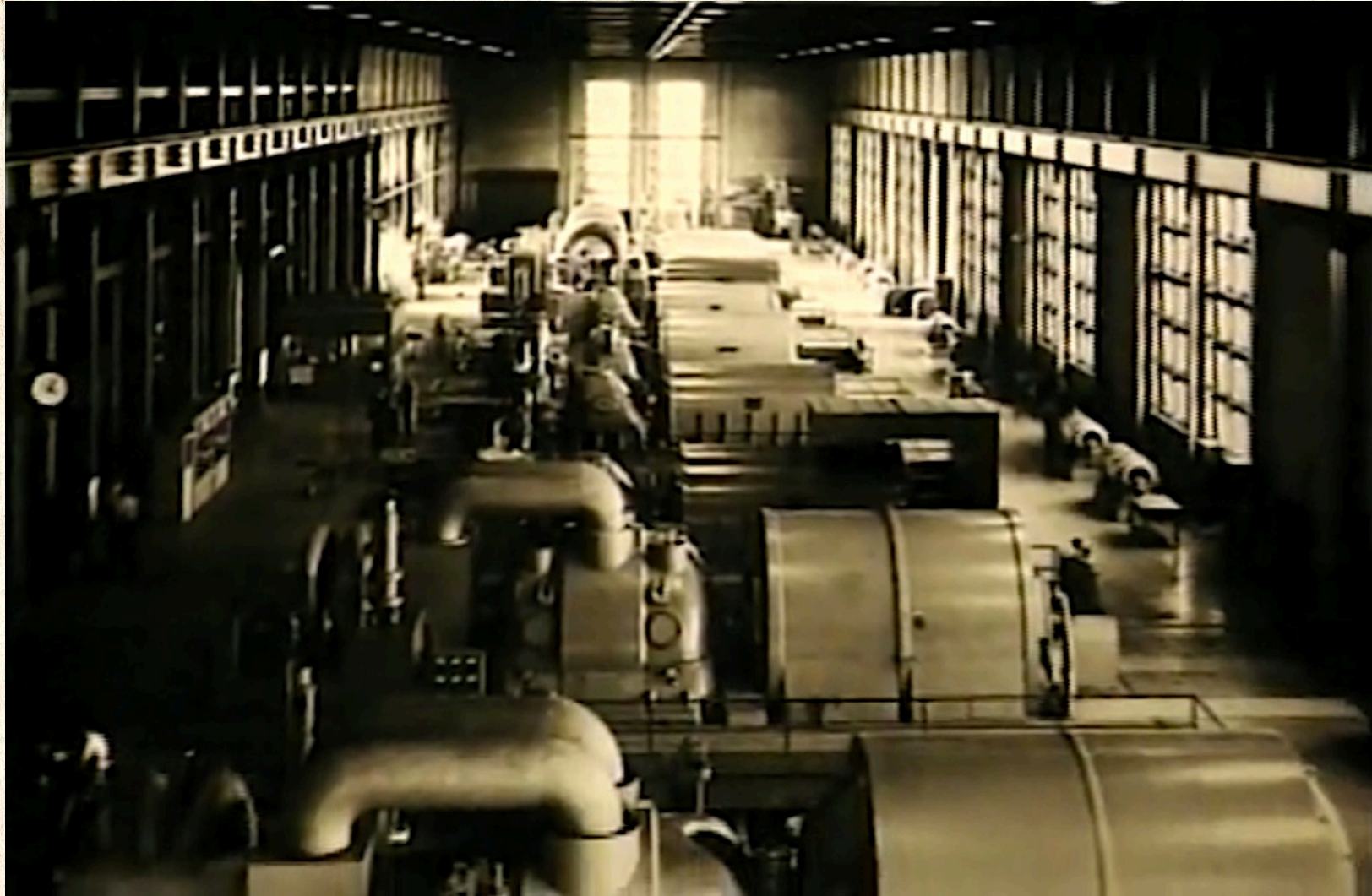
- Si on dispose déjà d'uranium faiblement enrichi, il est bien plus facile d'obtenir de l'uranium fortement enrichi

# SÉPARATION PAR DIFFUSION GAZEUSE

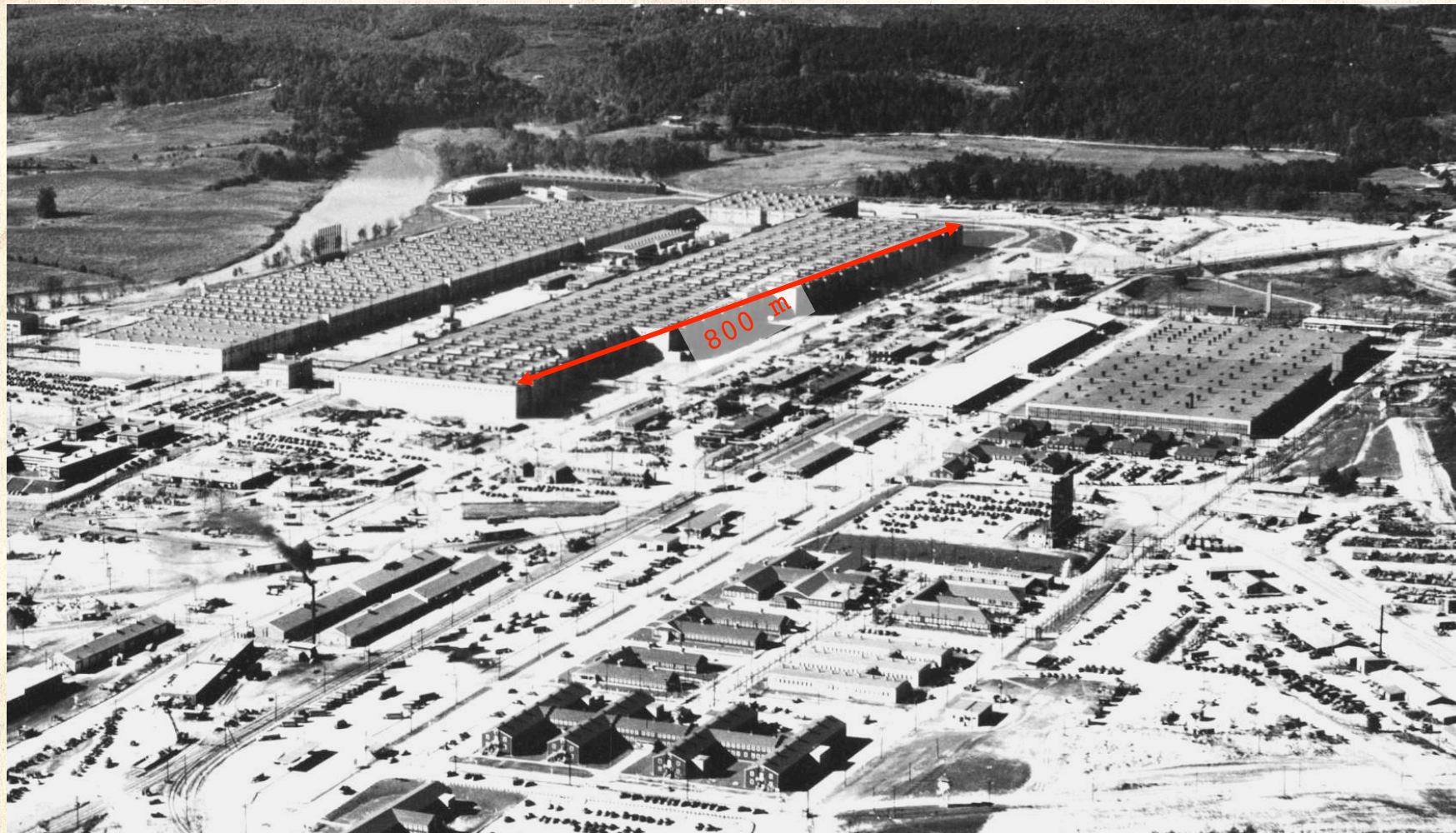
- Pertes à chaque étape ⇒
  - 3 000 unités
  - 10.000 m<sup>2</sup> de surface poreuse (pores de 0,1 μm)
  - corrosion due à l'hexafluorure d'uranium → chambres en acier inoxydable recouvert de nickel
  - tubulures, valves et raccords recouverts de *Téflon* (polytétrafluoroéthylène)



# À L'INTÉRIEUR DE K-25



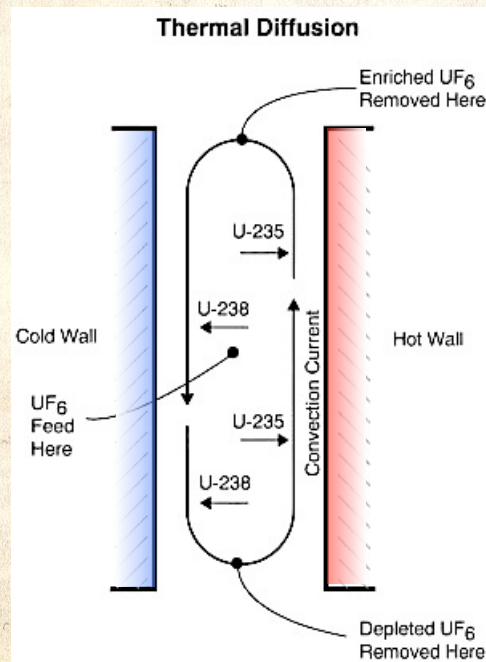
# K-25 ET LES BÂTIMENTS ANNEXES



# SÉPARATION PAR DIFFUSION THERMIQUE S-50

# S-50 : SÉPARATION THERMIQUE

- La séparation thermique avait été rejetée en 1942 par le programme Manhattan comme peu compétitive
- Philip Abelson avait indépendamment poursuivi son étude au *Naval Research Laboratory* (US Navy) où il obtint de bons résultats
- Juin 1944 : Y-12 et K-25 enlisés  $\Rightarrow$  construction en urgence d'une usine de séparation thermique sur le modèle d'Abelson  $\Rightarrow$  S-50



- 2142 colonnes
- enrichissement à 2% d'U235
- mise en route de janvier à mars 1945
- arrêt en septembre 1945





# S-50

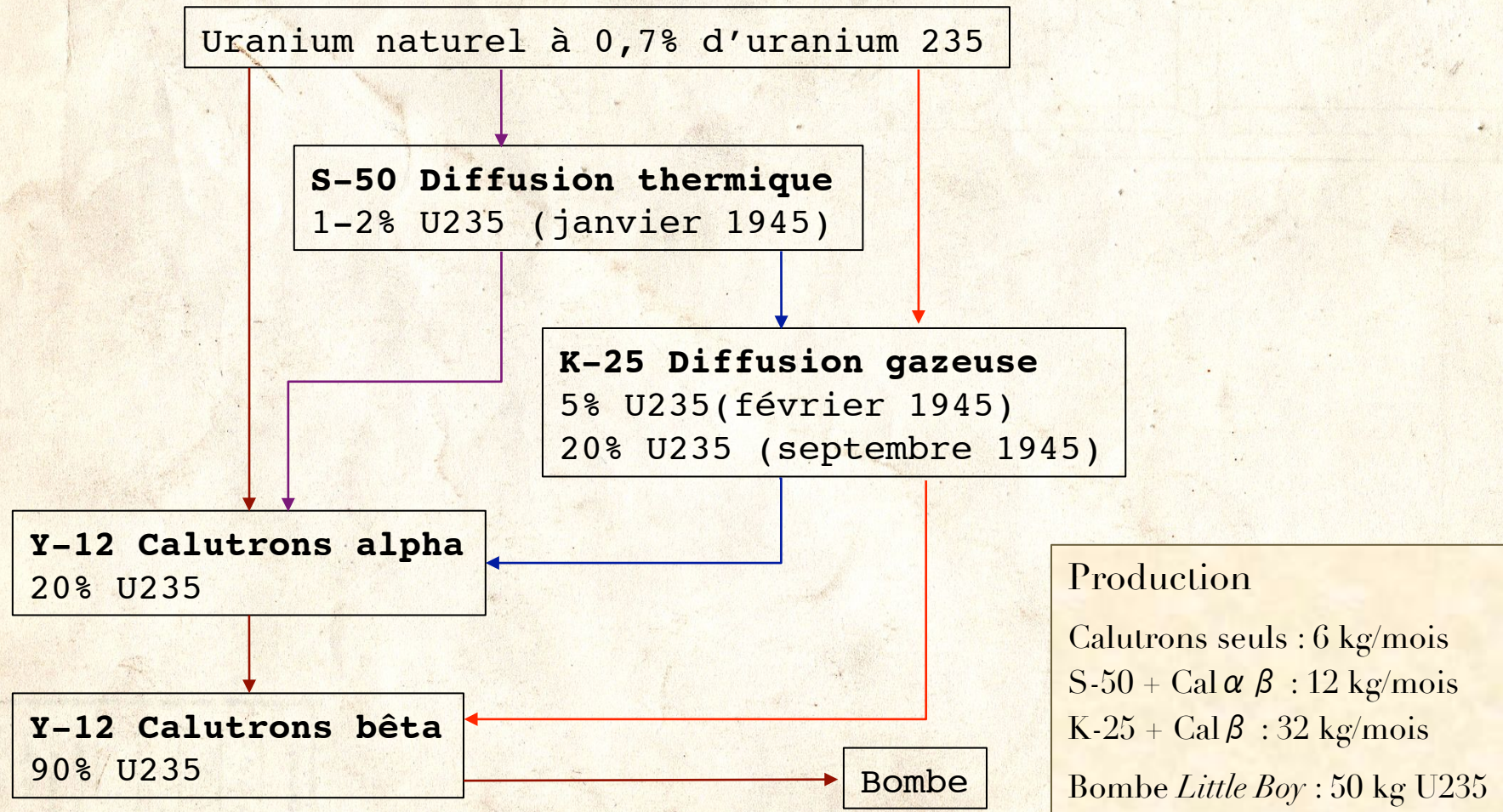


22 mars 2012

Alain Bouquet – Petite histoire de la physique nucléaire – 19

33

# ENRICHISSEMENT À OAK RIDGE



# EFFICACITÉ COMPARÉE DES MÉTHODES

- Bombe *Little Boy* : 50 kg d'uranium enrichi à 80% en uranium 235
- Séparation électromagnétique [**120 000 kWh/UTS** ↘ 30 000]
  - haute tension des sources 30 kV
  - courant d'ions ~ 100 mA ⇒ 3 kW/source [pertes → 30 puis 10]
  - 1152 calutrons ~ 4000 sources ⇒ 120 MW puis 40 MW
  - aimants (1000 A, 500 V) ⇒ 4 MW/piste ⇒ 70 MW
  - ⇒ **puissance requise par Y-12 ~ 200 MW** pour 1 200 UTS/mois [6 kg]
- Séparation par diffusion gazeuse [**8 000 kWh/UTS** ↘ 1 700 à Tricastin]
  - compresseurs + refroidissement (la compression chauffe le gaz)
  - ⇒ **puissance requise par K-50 ~ 80 MW** pour 7 000 UTS/mois [35 kg] en 1946
  - en comparaison Tricastin (Eurodif) ~ 2300 MW pour 1 million UTS/mois
- Séparation thermique 6 MW
- Centrifugeuses [50 à 100 kWh/UTS]
- Rappel : Hanford → 18 kg/mois Pu 239 = 3 bombes/mois

Puissance totale amenée  
à Oak Ridge : 300 MW

# CENTRIFUGEUSES

# CENTRIFUGEUSES

- Hexafluorure d'uranium
- Cylindres de 10 cm sur 150 cm
- Rotation  $\sim 50\,000$  t/mn  $\rightarrow$   
 $V = 500$  m/s en périphérie
  - $\Rightarrow$  parois en acier NiCoMo (ou fibre de carbone)
  - $\Rightarrow$  résonances à certaines vitesses critiques (balourds)
  - support magnétique ou à aiguille
- Efficacité  $\propto$  longueur du rotor et à la vitesse périphérique  $v^4$
- Enrichissement  $\sim 1,055$  par étape  $\Rightarrow$  4% en 30 étapes, 90% en 90
- Peu d'uranium par rotor  $\Rightarrow$  milliers de rotors en parallèle

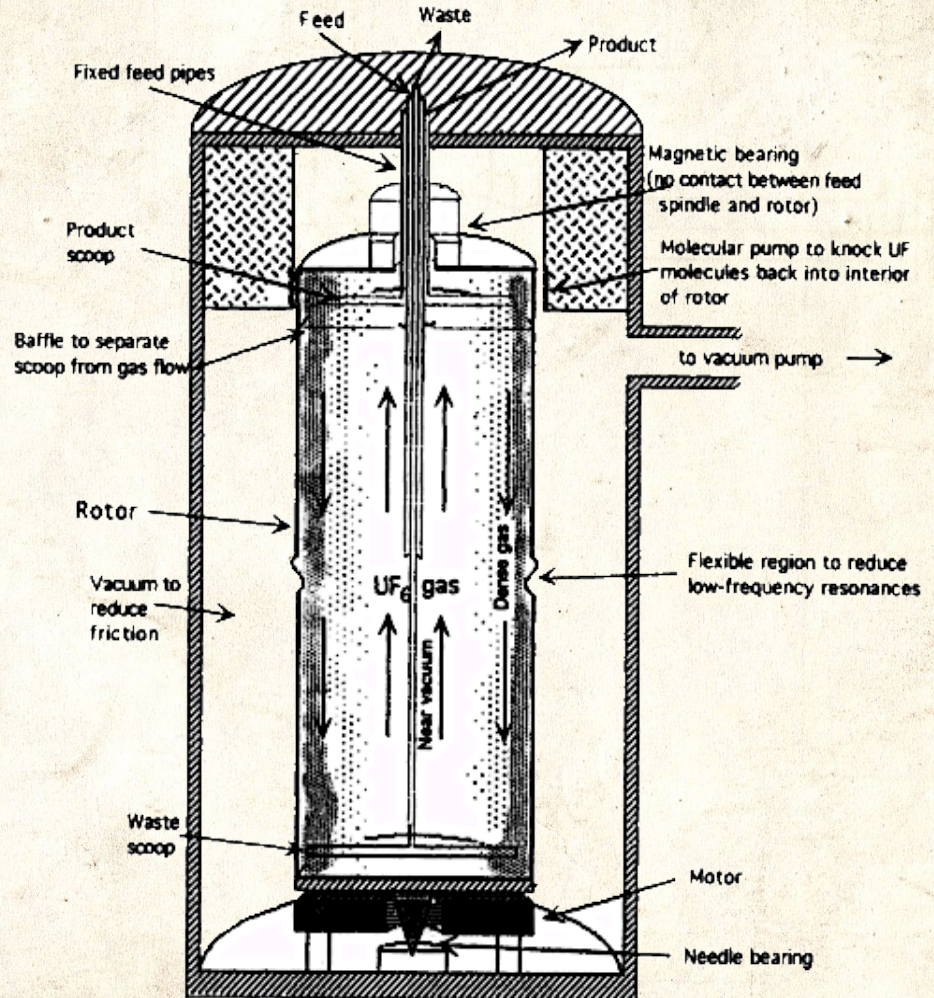
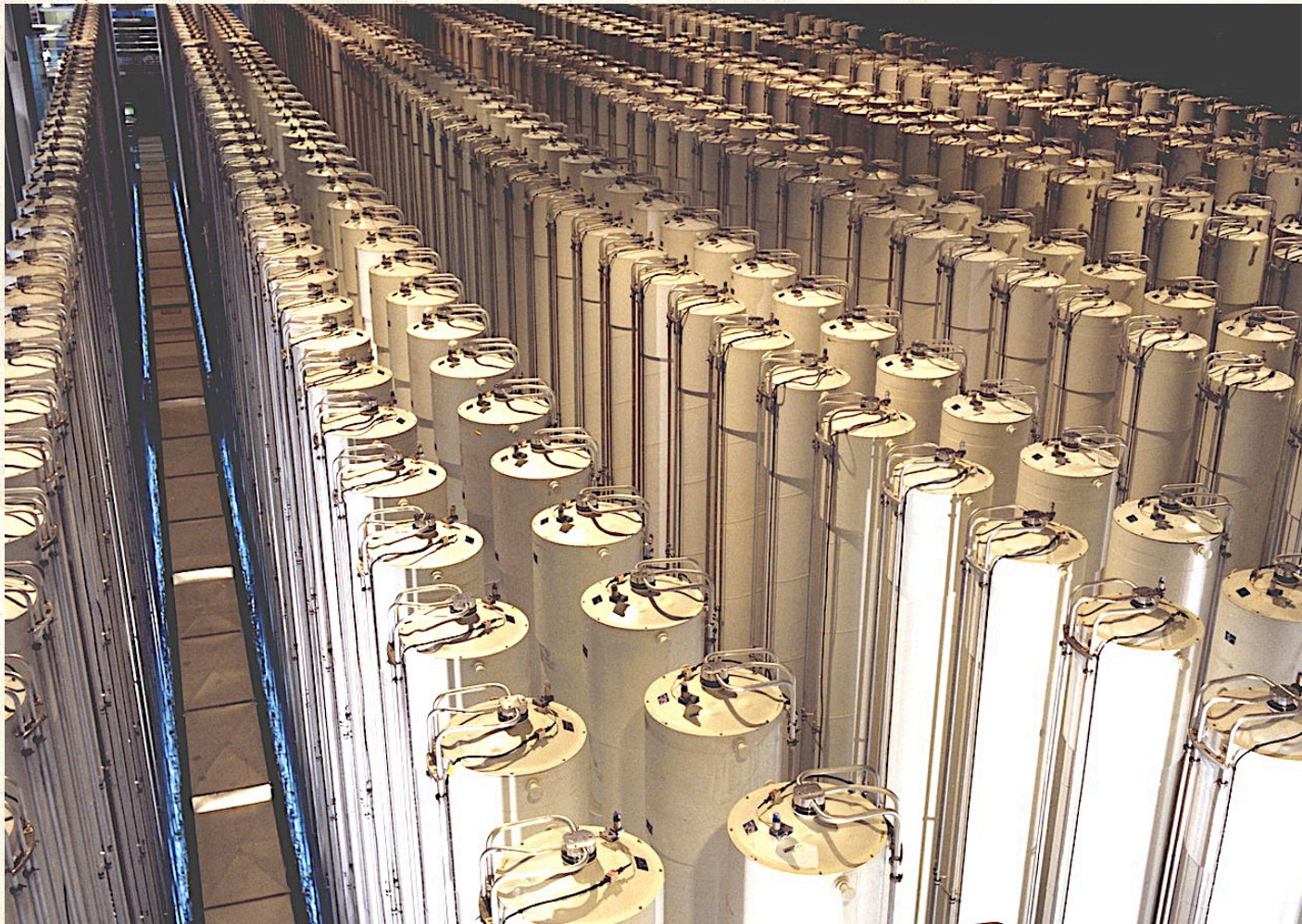


FIG. 30. Centrifuge

# CENTRIFUGEUSES

- Banc de centrifugeuses (Piketon, Ohio, 1984)



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!