

PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

19 – MANHATTAN OAK RIDGE ET LA SÉPARATION ISOTOPIQUE

Alain Bouquet

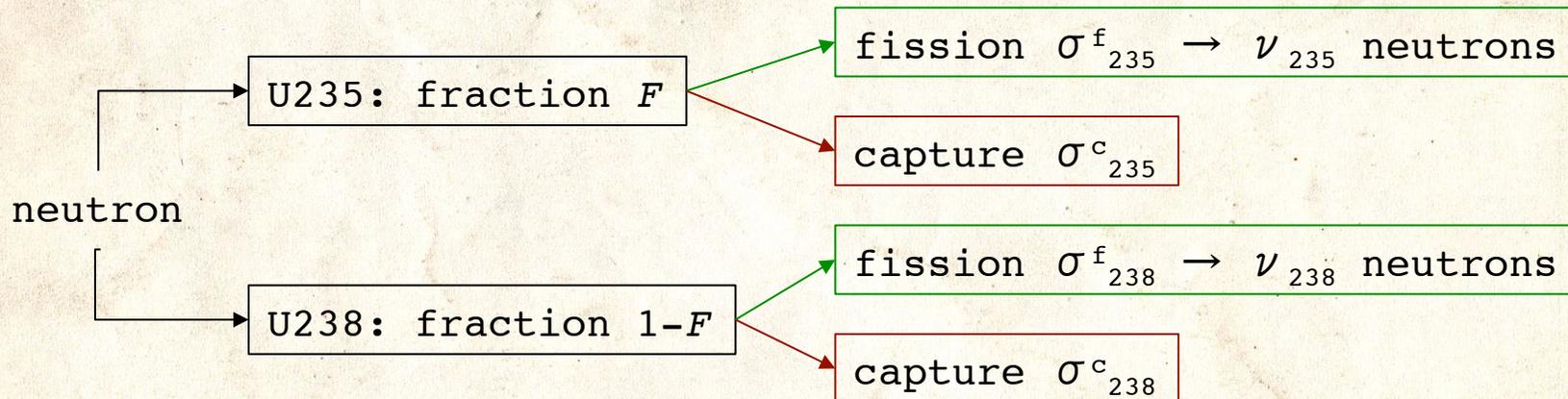
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

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



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

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

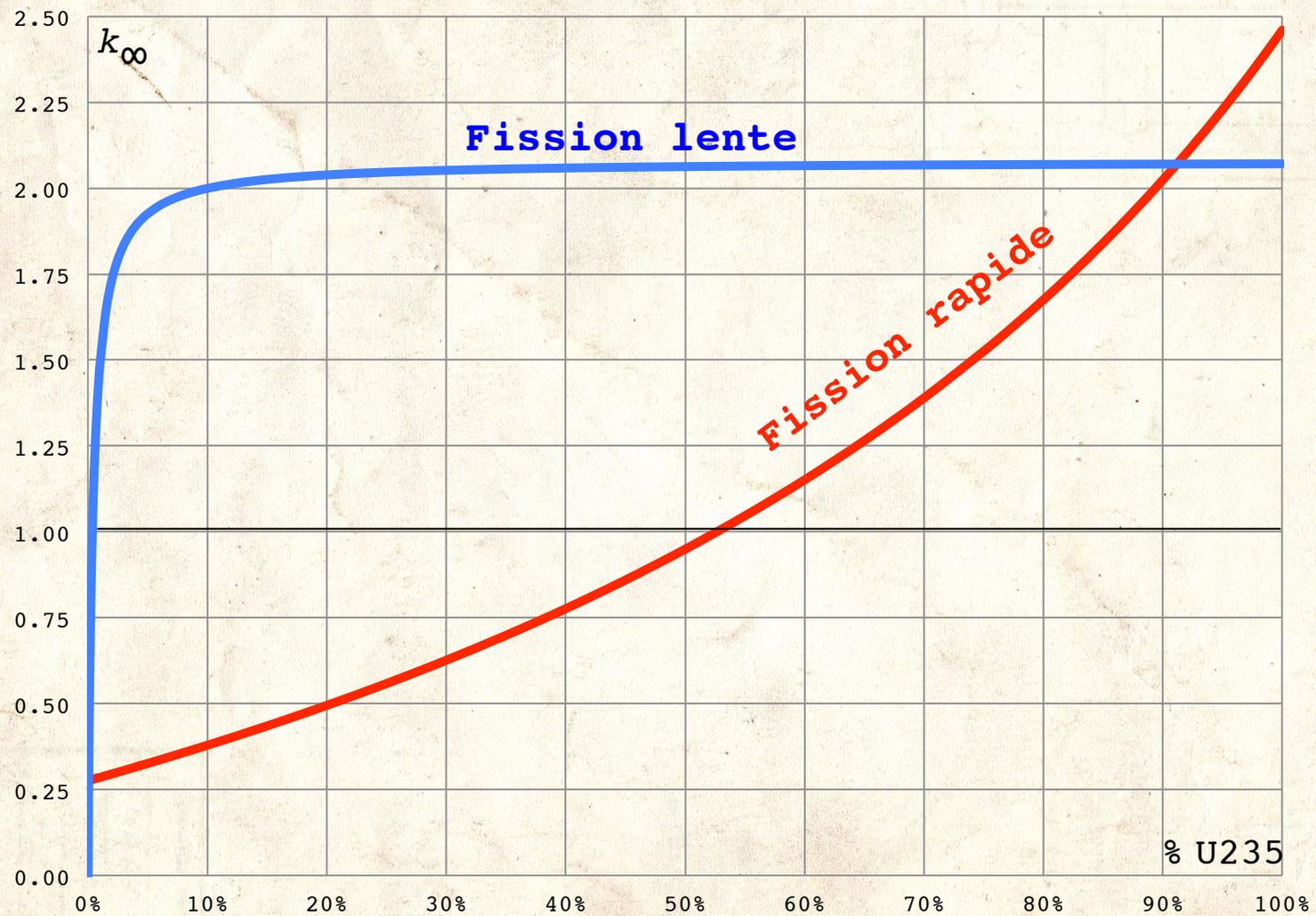
POURQUOI ENRICHIR L'URANIUM EN 235 ?

- 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

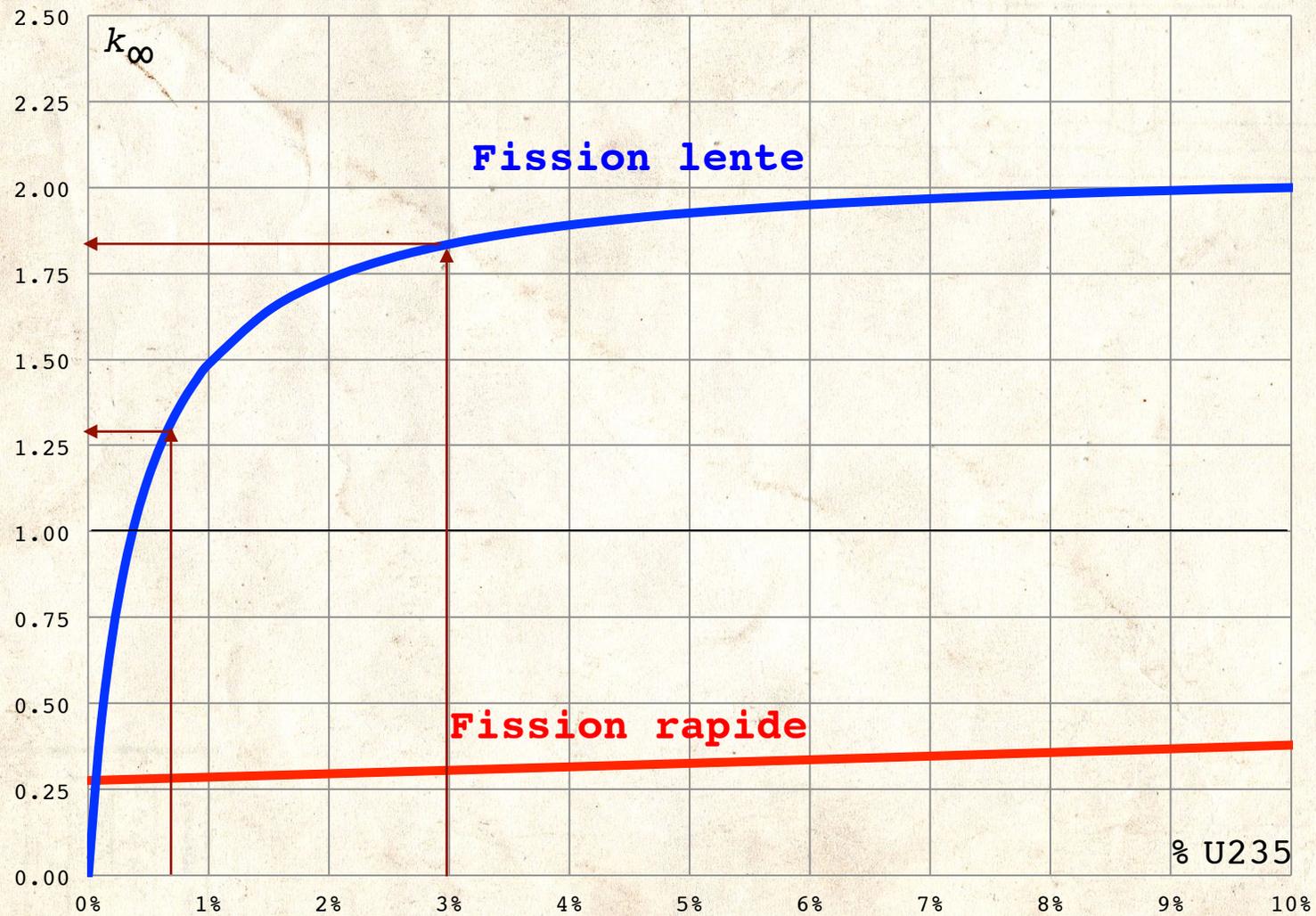
	Nb ν neutrons secondaires	Section efficace σ_f fission	Section efficace σ_c capture
U235 rapide	2,64	1,235 barns	0,089 barns
U235 lent	2,42	584,4 barns	98,81 barns
U238 rapide	2,65	0,308 barns	2,661 barns
U238 lent	2,45	0	2,717 barns

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

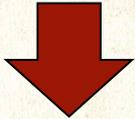
FACTEUR DE REPRODUCTION k_{∞}



FACTEUR DE REPRODUCTION k_{∞}

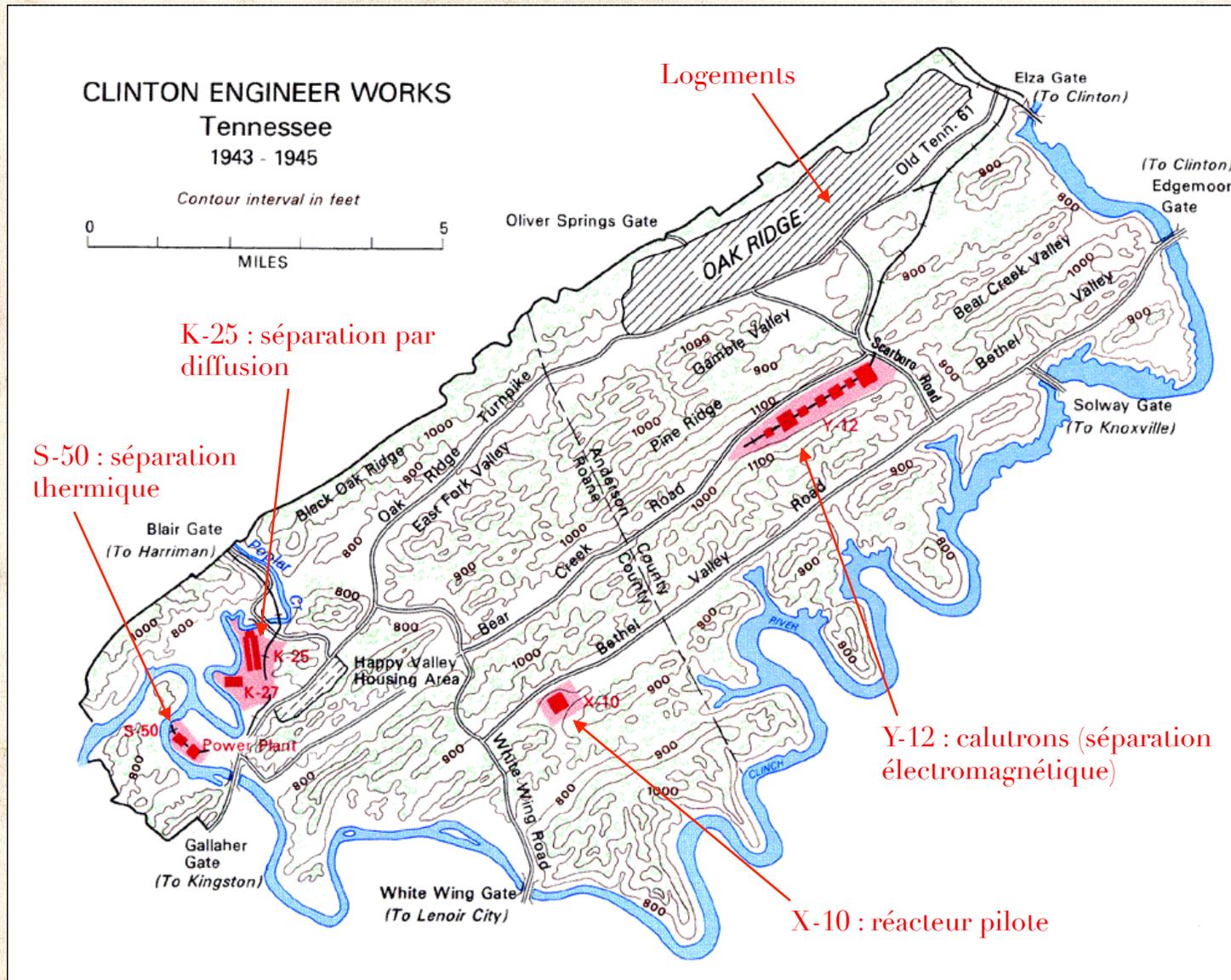


ENRICHISSEMENT REQUIS

- **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 A »**

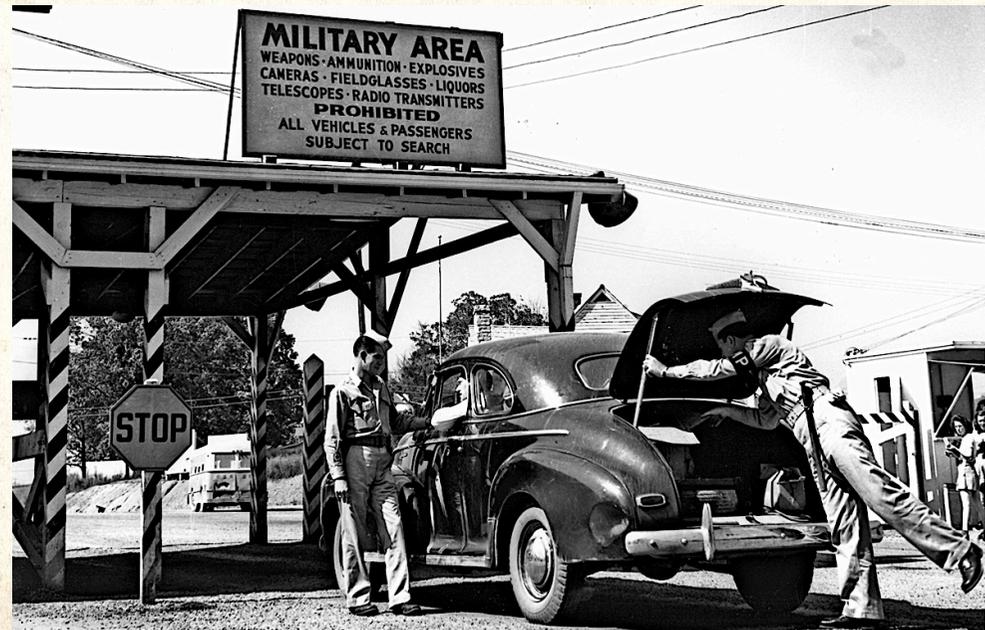
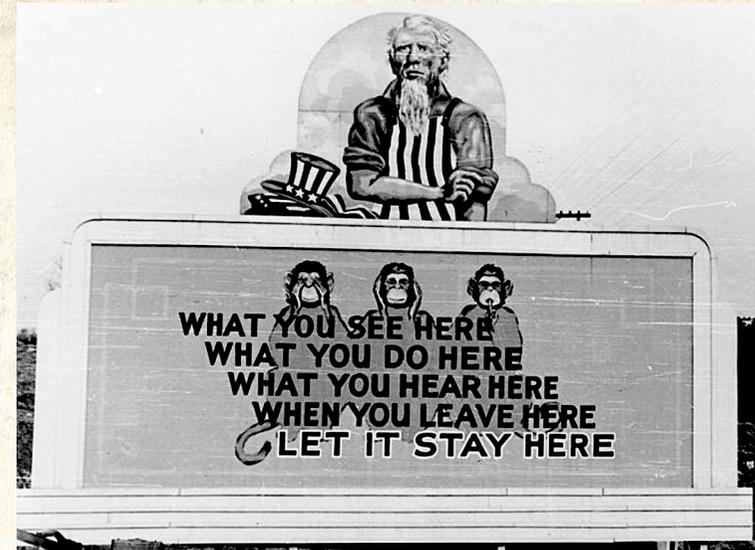
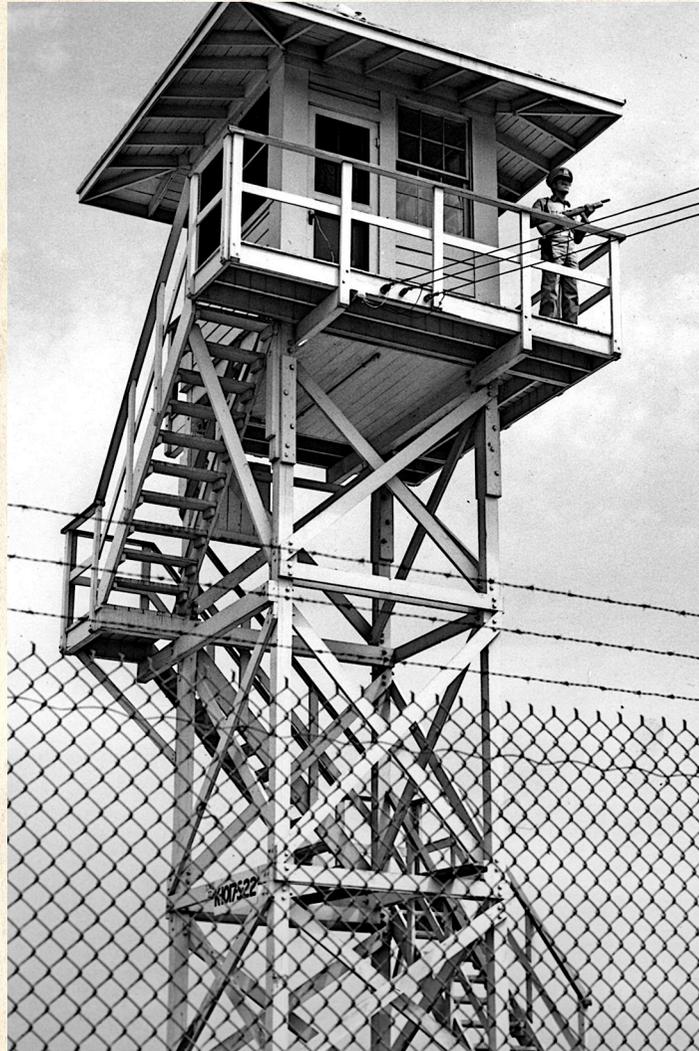
OAK RIDGE [CLINTON ENGINEERS WORKS]



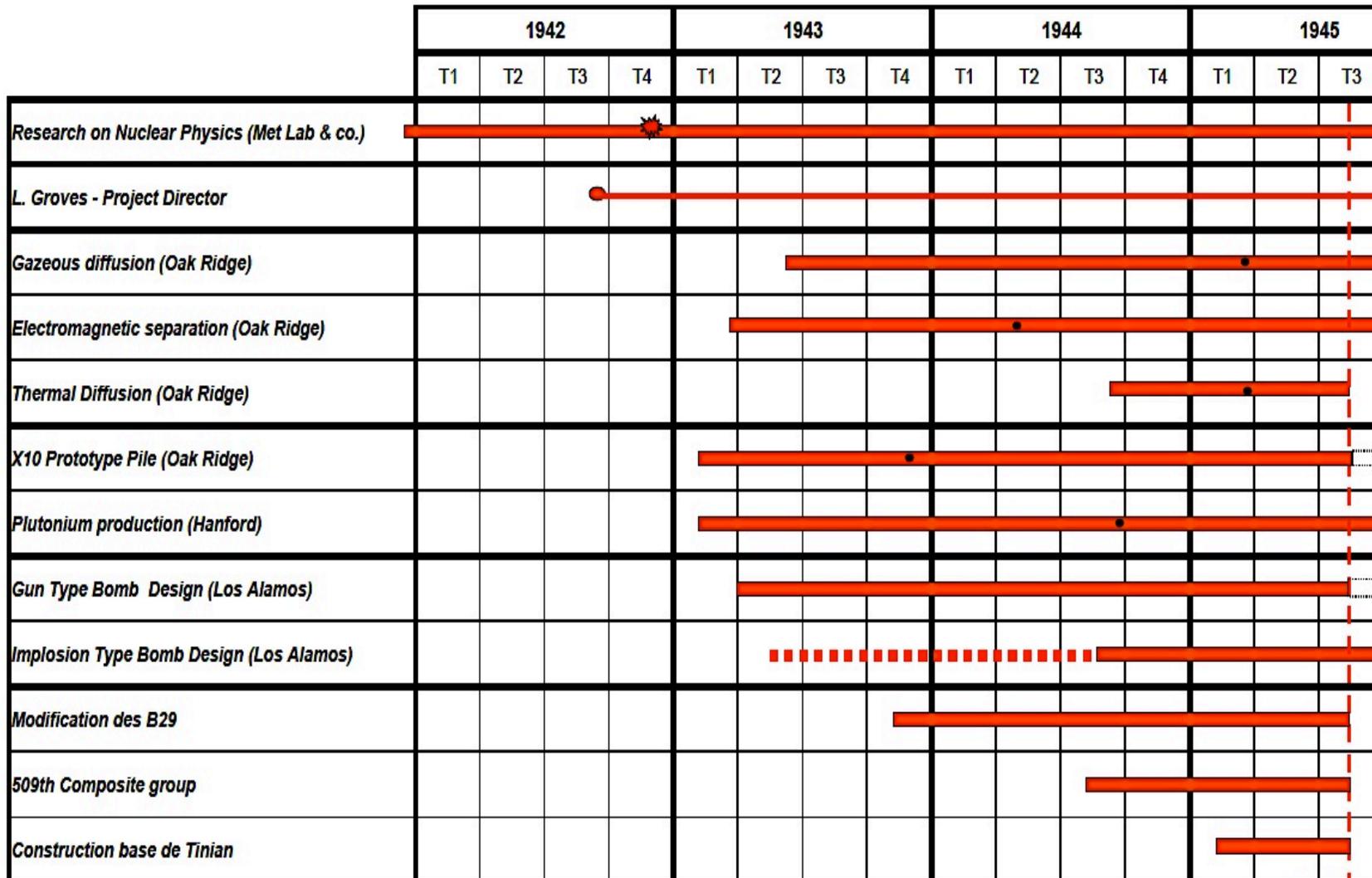
UNE VILLE SECRÈTE



SOUS CONTRÔLE MILITAIRE



LE PROGRAMME MANHATTAN



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

© Sylvain Lenfle

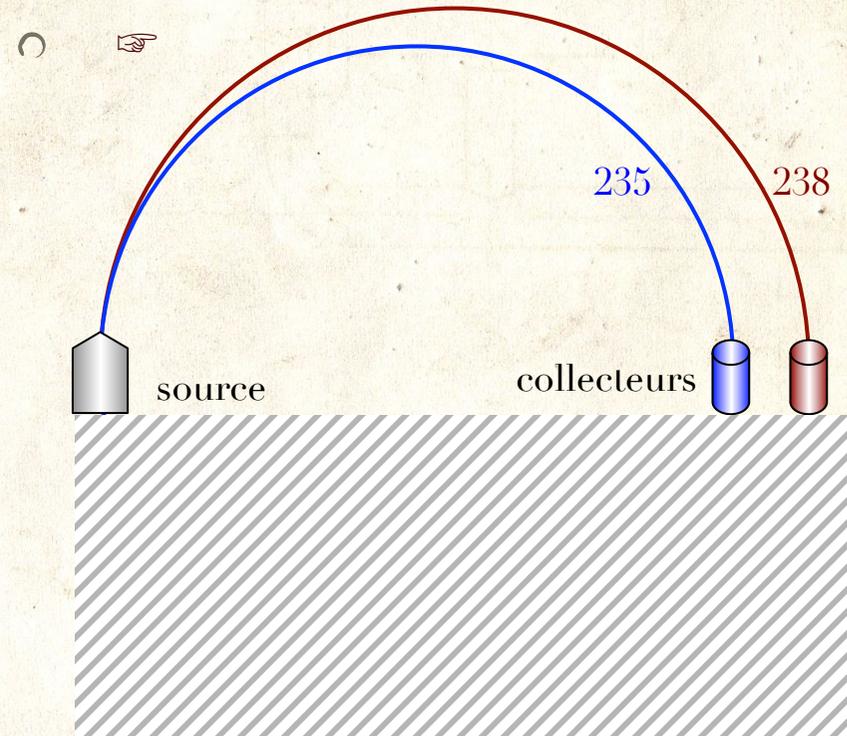
SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE Y-12

SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- Principe du spectromètre de masse
- Ion de masse m et de charge q
- Accéléré par potentiel $V \rightarrow$ vitesse $v = [2qV/m]^{1/2}$
- 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 UCl_4 gazeux à 600°C



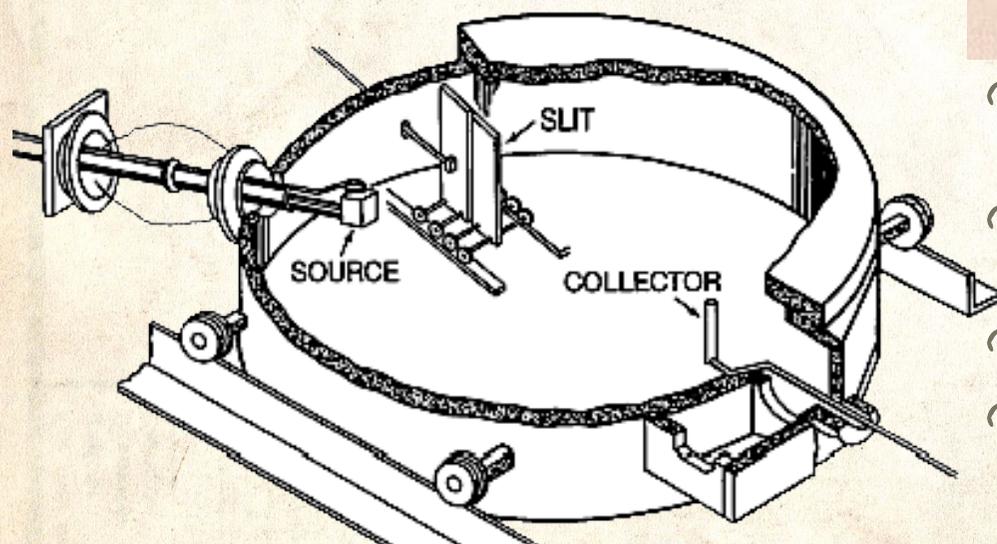
- Fonctionnement en continu
 - ionisation
 - accélération
 - sélecteur de vitesse
 - champ magnétique
 - collecteur

SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

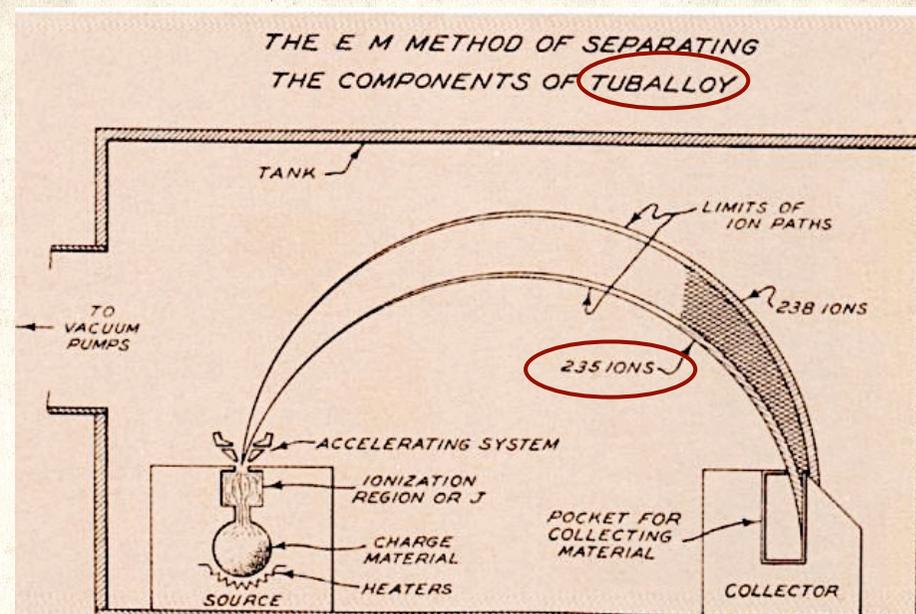
- Quantitativement [UCl_4]
- $R = [2mV/q]^{1/2} / B$
 - Masse $m = (377 \text{ ou } 380) / 6 \cdot 10^{23} \text{ g}$
 - Voltage $V = 30 \text{ kV}$ (\rightarrow vitesse 100 km/s)
 - Charge $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 - Champ $B = 0,34 \text{ T}$
- $\Rightarrow R = 1,424 \text{ et } 1,430 \Rightarrow$ écart de 12 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 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



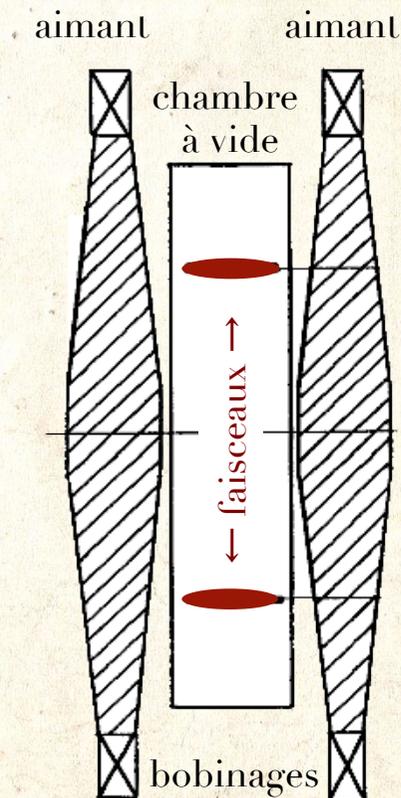
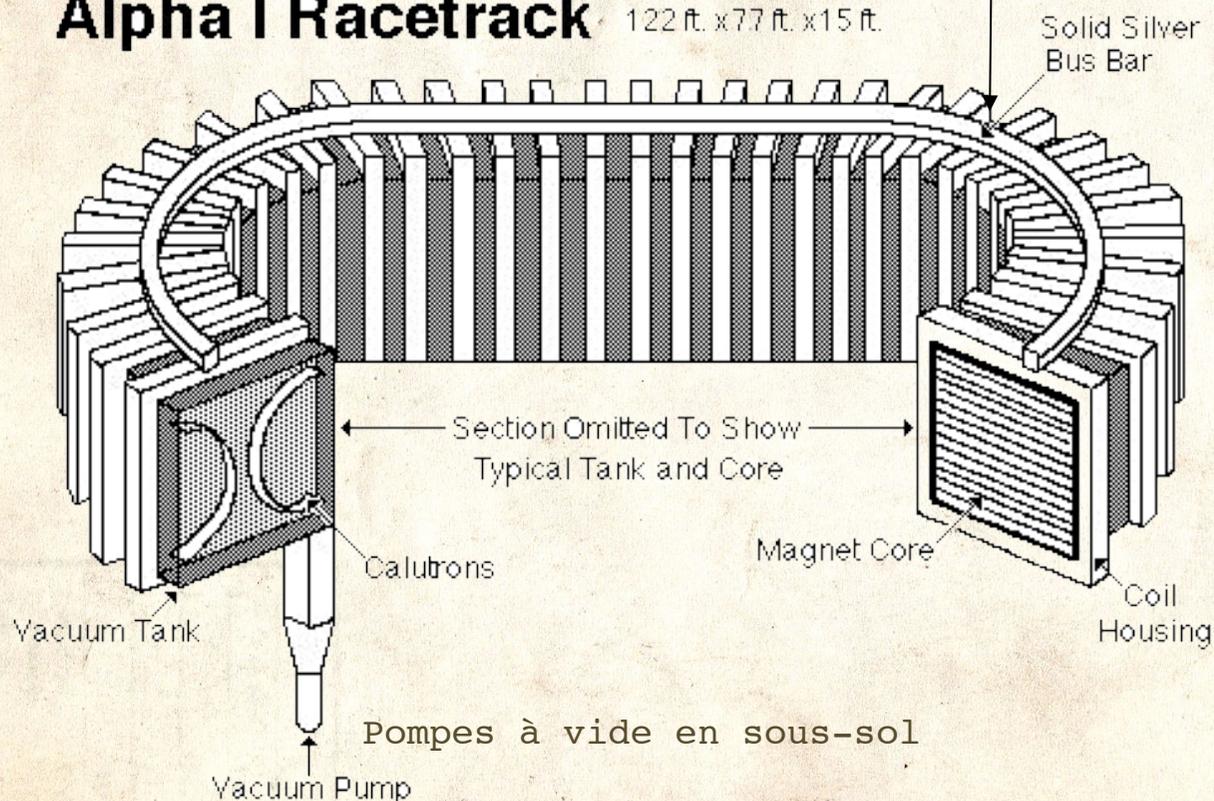
- Courant d'ions limité à 1 mA \Leftrightarrow $6,24 \cdot 10^{15}$ ions/seconde
- Un ion \Leftrightarrow un atome U235 \Leftrightarrow $235/6,02 \cdot 10^{23}$ g
- 1 mA \Leftrightarrow $2,43 \mu\text{g/s} = 210 \text{ mg/jour}$
- Pour 50 kg, 240 000 jours – ou 60 jours avec 1000 chambres à 4 sources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

CALIFORNIA UNIVERSITY CYCLOTRON

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

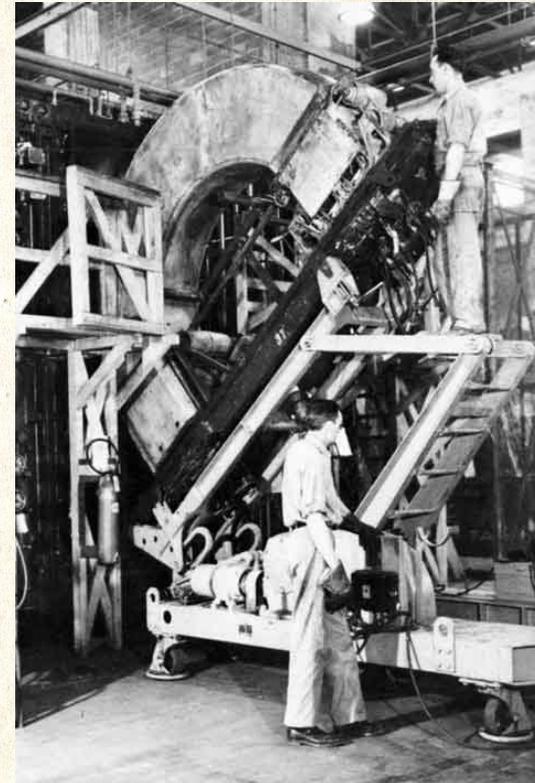
- Bobinages des aimants → 13 300 tonnes d'argent prêté par le Trésor (300M\$)

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



Y-12 : LES « PISTES » DE CALUTRONS ALPHA

- Calutron α : 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 α

Y-12 : CALUTRON ALPHA EN CONSTRUCTION



Y-12 : CALUTRONS BÊTA

- 9 pistes = 864 calutrons α → 260 g/jour d'uranium à 10% (puis 20%)
- Complétés par 8 pistes β 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 α dès la fin de la guerre, et des β peu après
- Calutrons β → isotopes purs de la plupart des éléments du tableau périodique

Y-12 : VUE AÉRIENNE



SÉPARATION PAR DIFFUSION GAZEUSE K-25

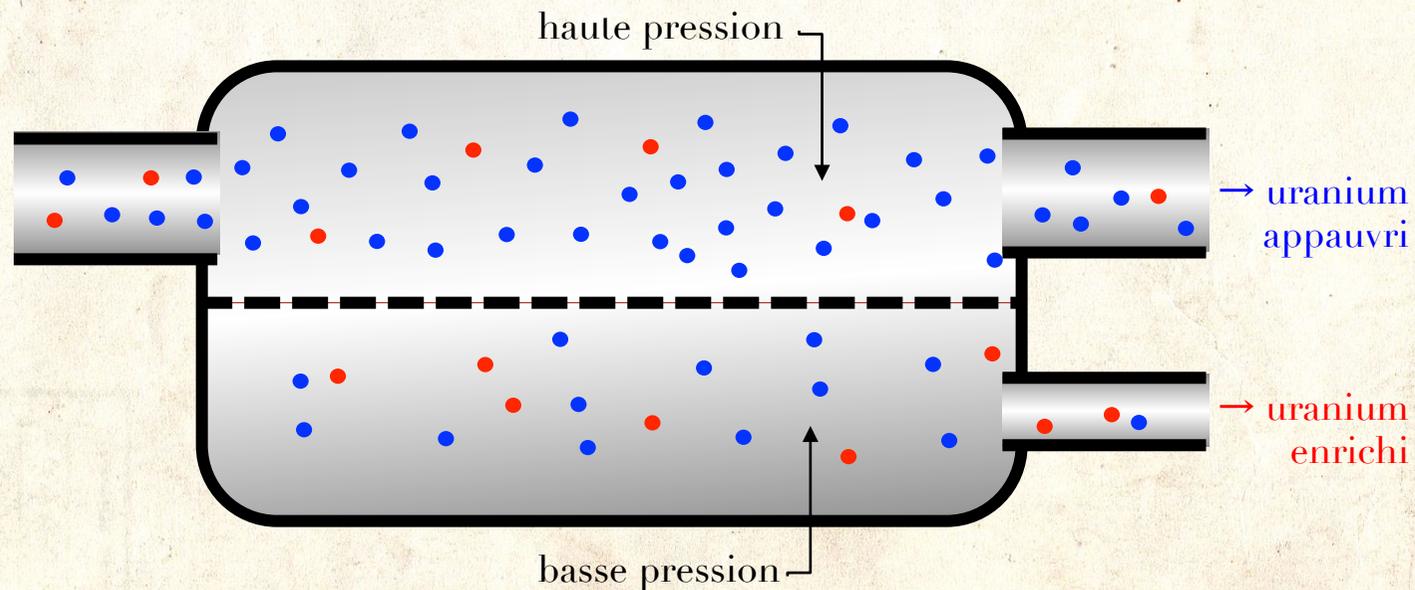
SÉPARATION PAR DIFFUSION GAZEUSE

○ Principe

- uranium sous forme gazeuse à température ambiante (hexafluorure 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^o barrière poreuse...]
- vitesse v
- surface totale des pores S

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

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

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

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

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

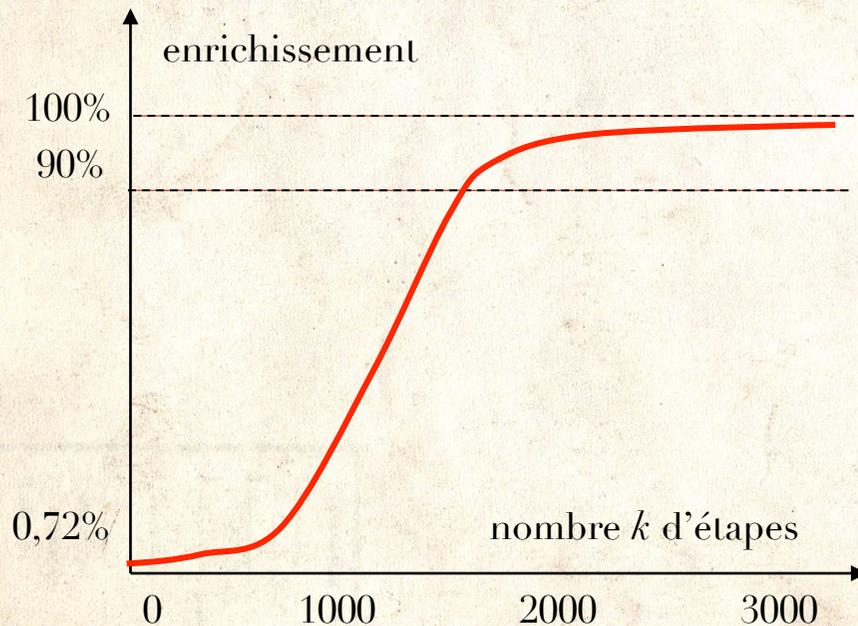
- hexafluorure $\Rightarrow m_{238} / m_{235} = 352 / 349 = 1,0086$

- 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

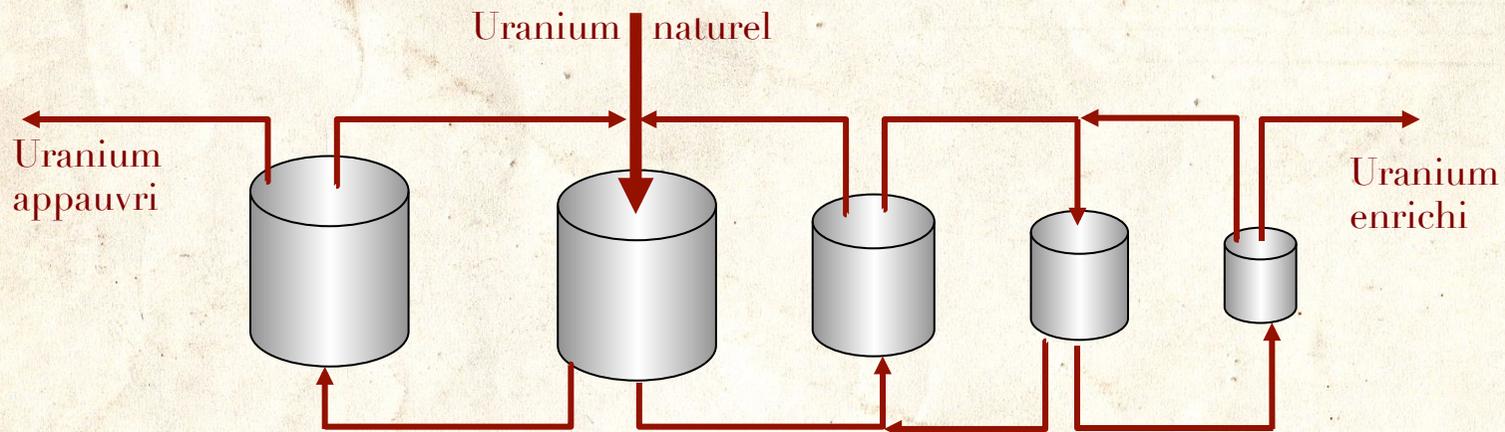
- $x_k \equiv N_k(235)/N_k(238) = n_0(235)/n_0(238) * [m_{238}/m_{235}]^{k/2}$
- $n_0(235)/n_0(238) = 0,0072/0,9928 \sim 0,0072$
- hexafluorure $\Rightarrow m_{238}/m_{235} = 352/349 = 1,0086$
- pourcentage de 235 : $P = x_k/[1+x_k]$
- $\Rightarrow k = 2 \text{ Log}[P/0,0072(1-P)]/\text{Log}[1,0086]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



- 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

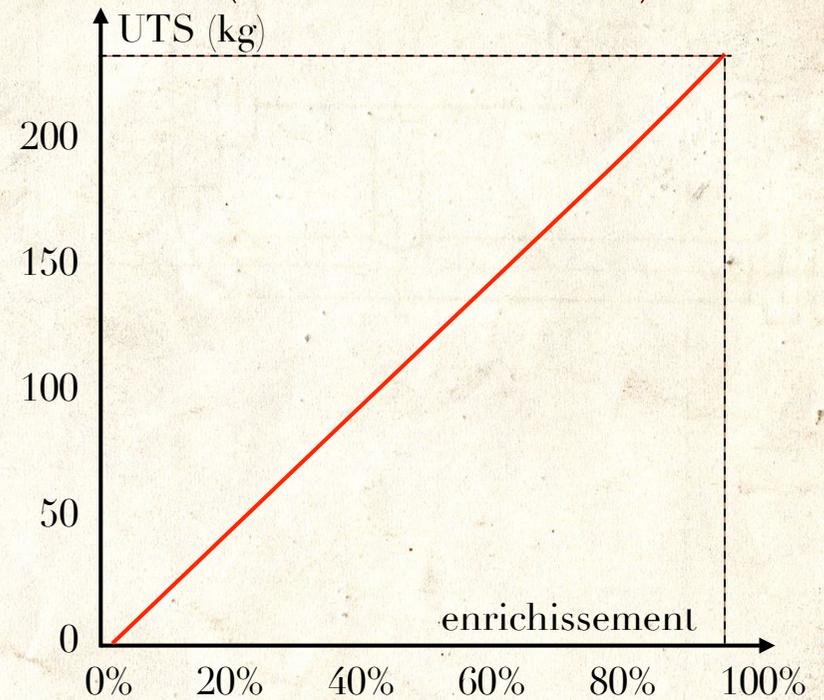
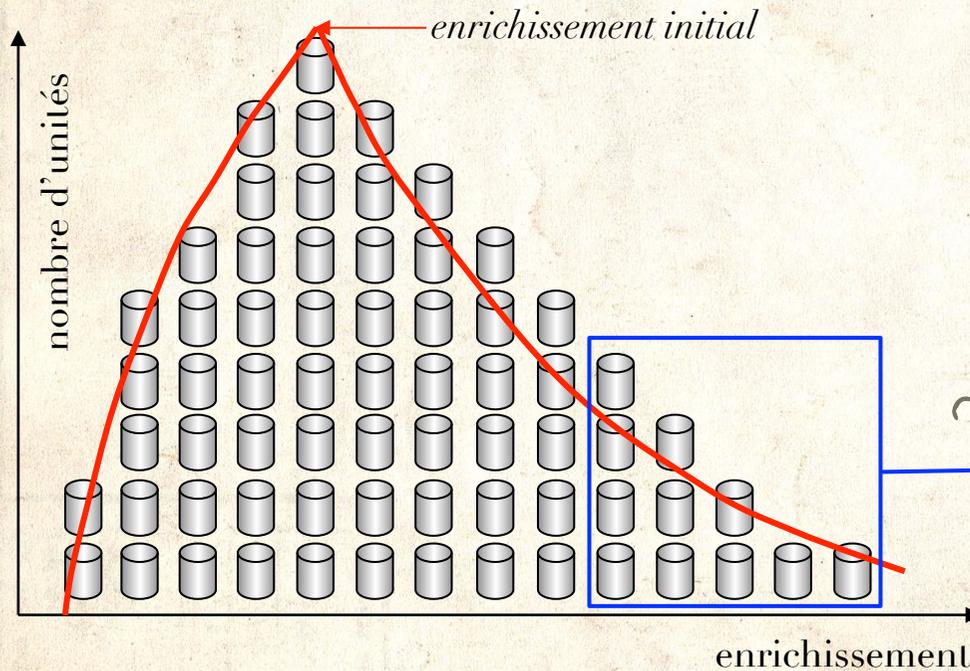
- Pour obtenir 1 kg d'uranium 235, il faut partir de 140 kg d'uranium naturel à 0,72% d'uranium 235



- 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)

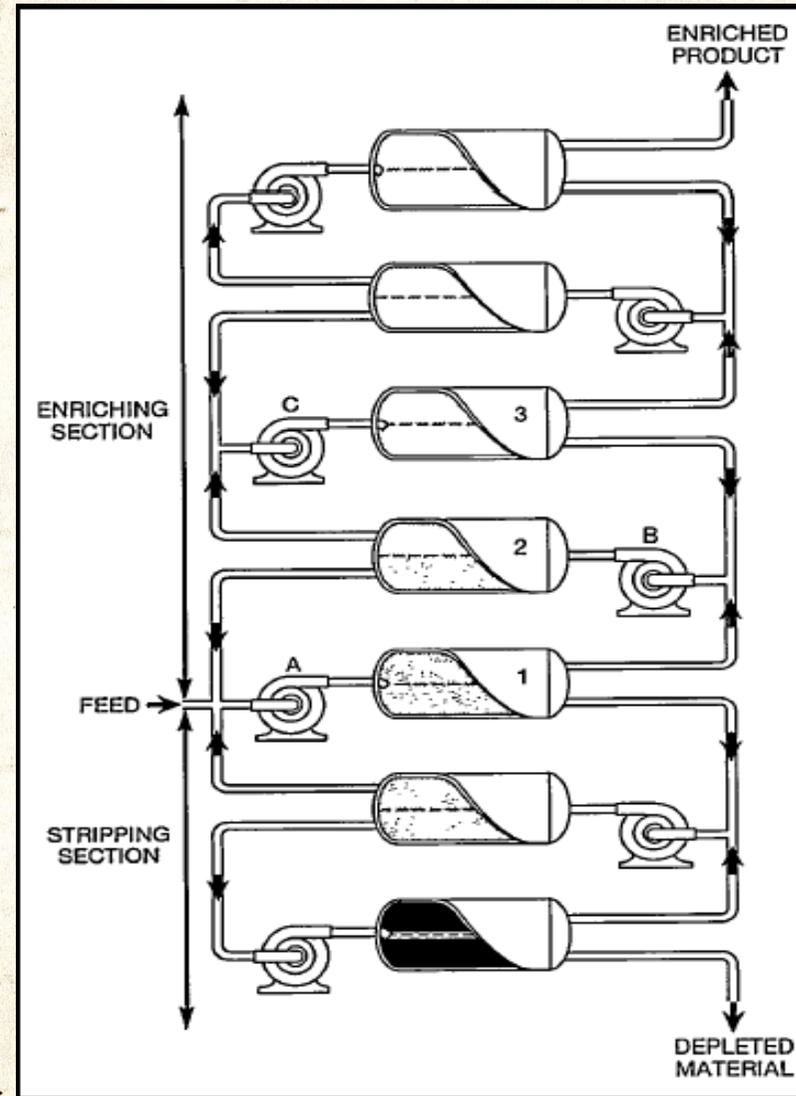
- UTS : séparation d'un kg d'uranium en 2 lots de teneur différente en U235 → dépend des teneurs finales (par ex 80% et 0,25%) ~ 200 UTS/kg
- Efficacité du procédé \Leftrightarrow nombre de joules/UTS ou de kWh/UTS



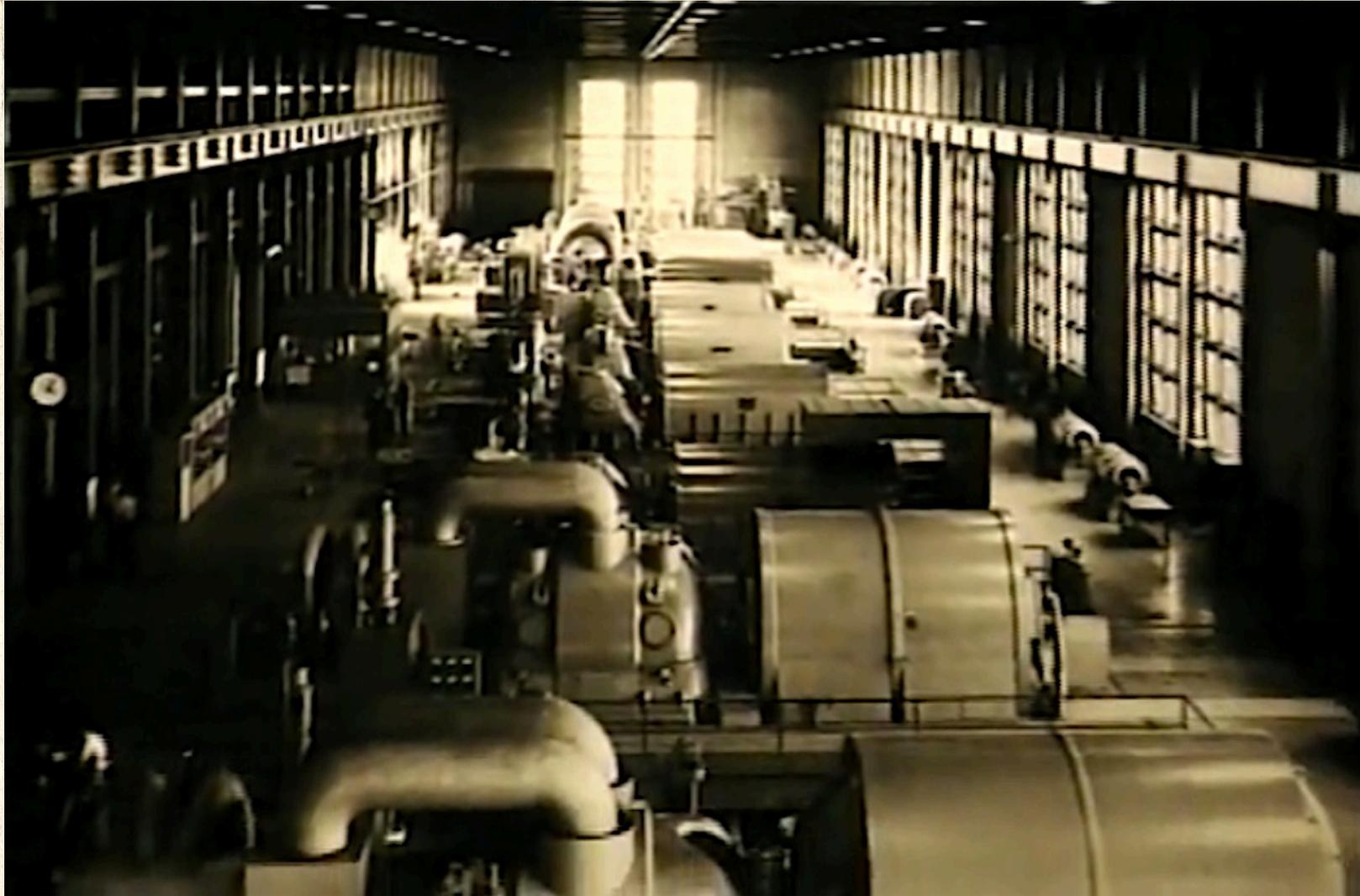
- Si on dispose déjà d'uranium faiblement enrichi, il est bien plus facile d'obtenir de l'uranium fortement enrichi

SÉPARATION PAR DIFFUSION GAZEUSE

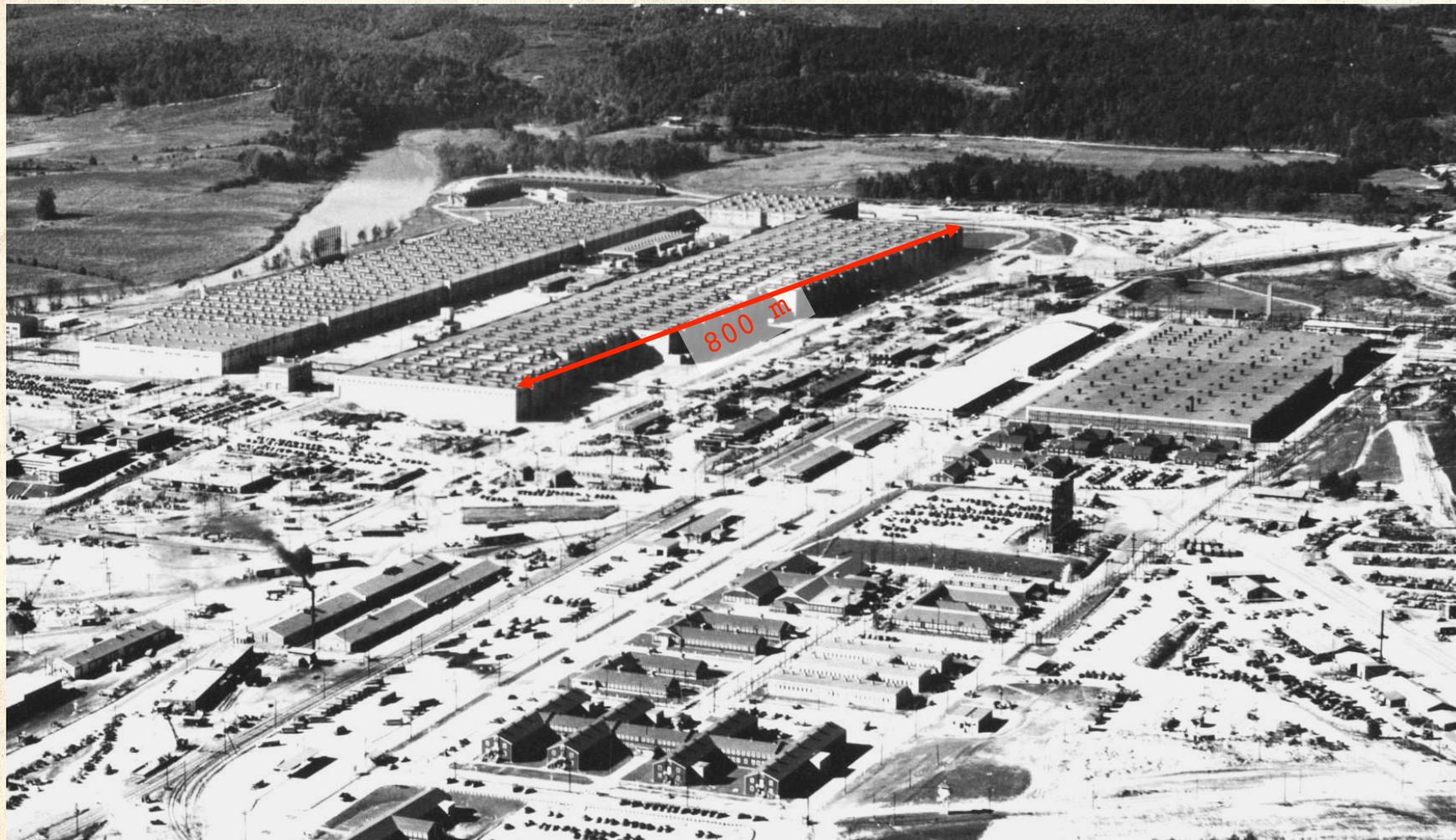
- Pertes à chaque étape ⇒
 - 3 000 unités
 - 10.000 m² de surface poreuse (pores de 0,1 μm)
 - corrosion due à l'hexafluorure d'uranium → chambres en acier inoxydable recouvert de nickel
 - tubulures, valves et raccords recouverts de *Téflon* (polytétrafluoroéthylène)



À L'INTÉRIEUR DE K-25



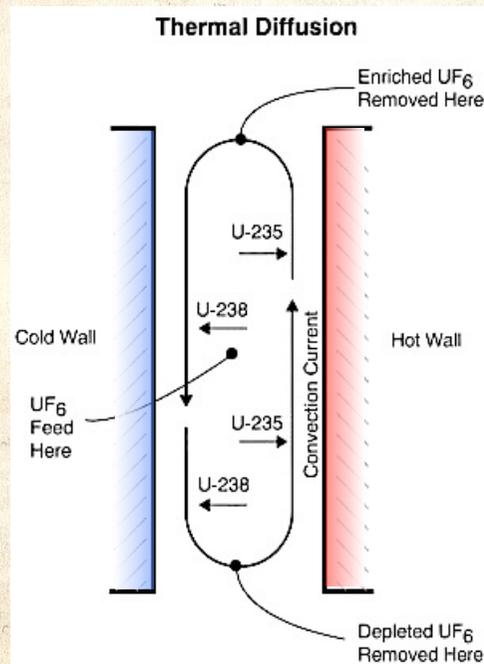
K-25 ET LES BÂTIMENTS ANNEXES



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

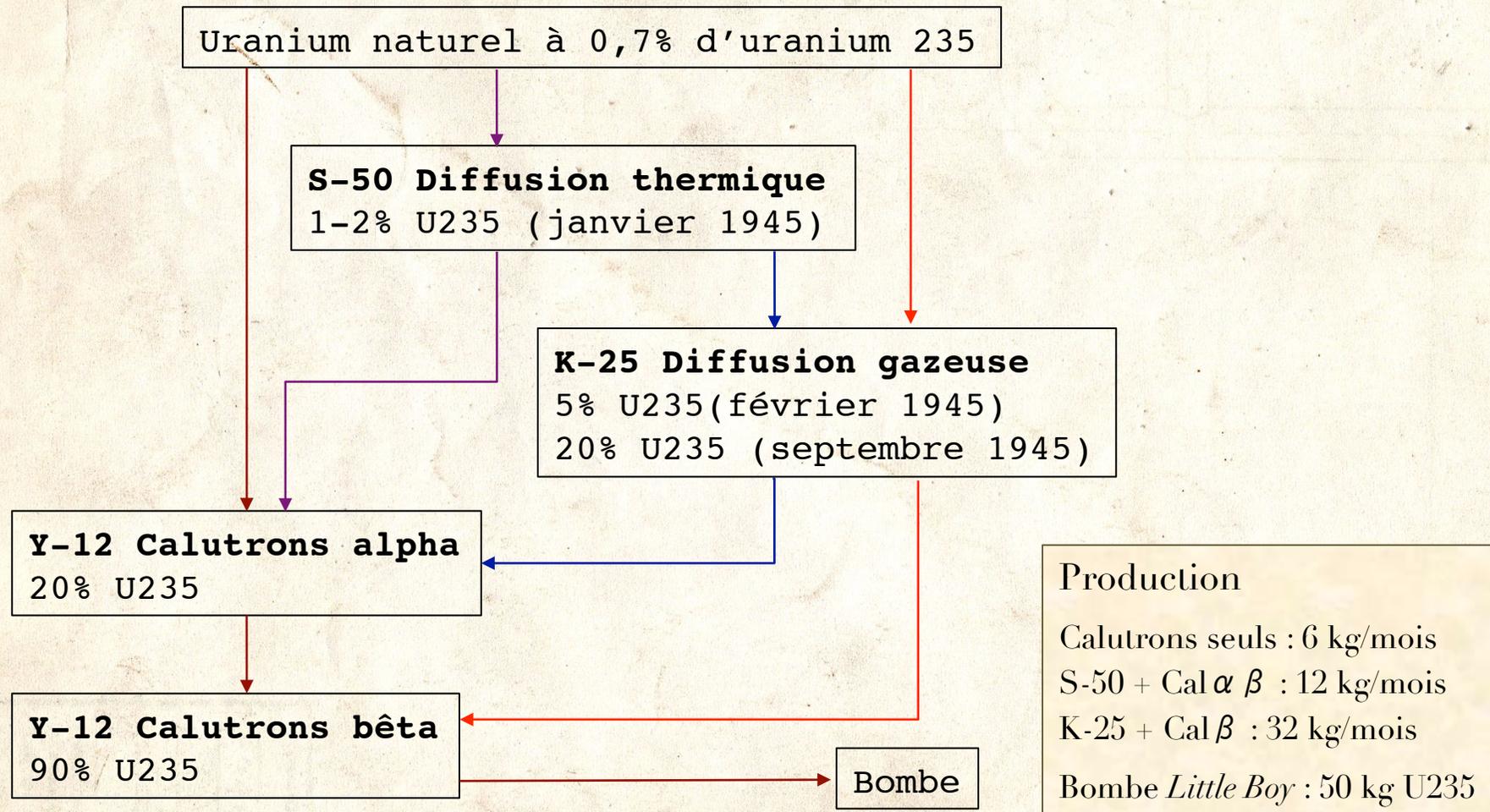


22 mars 2012

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

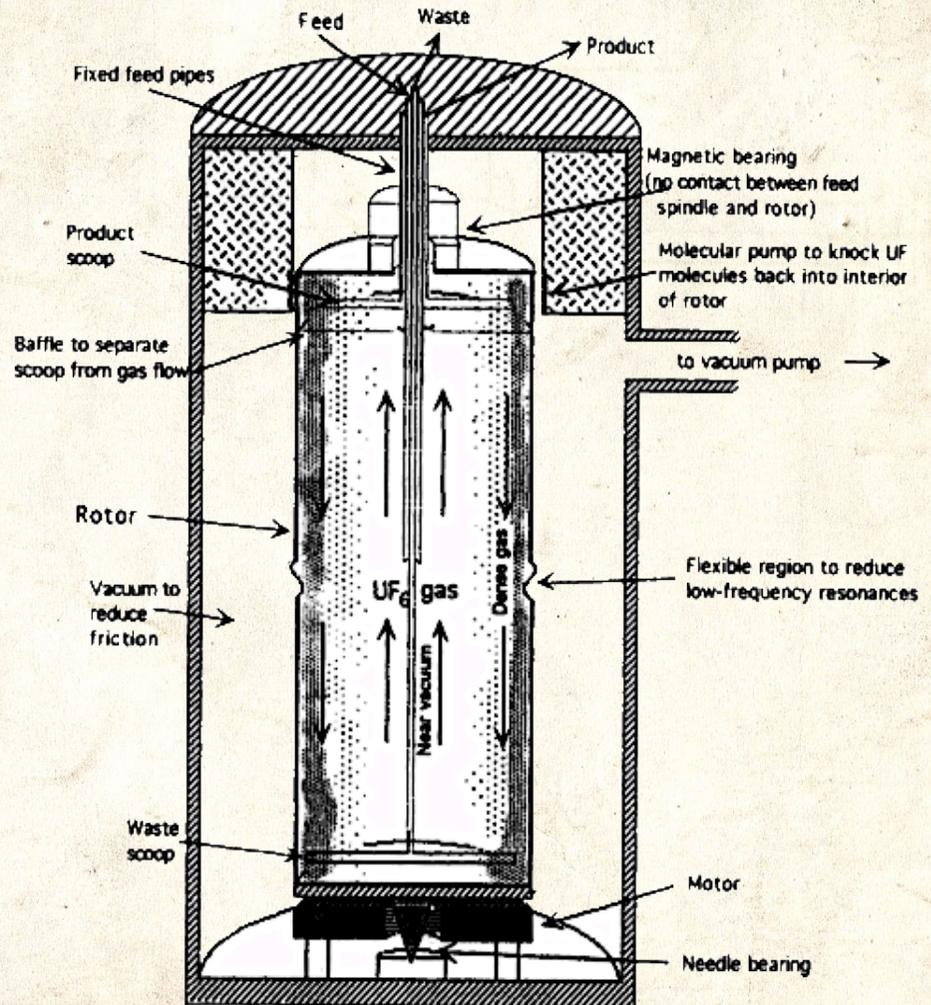
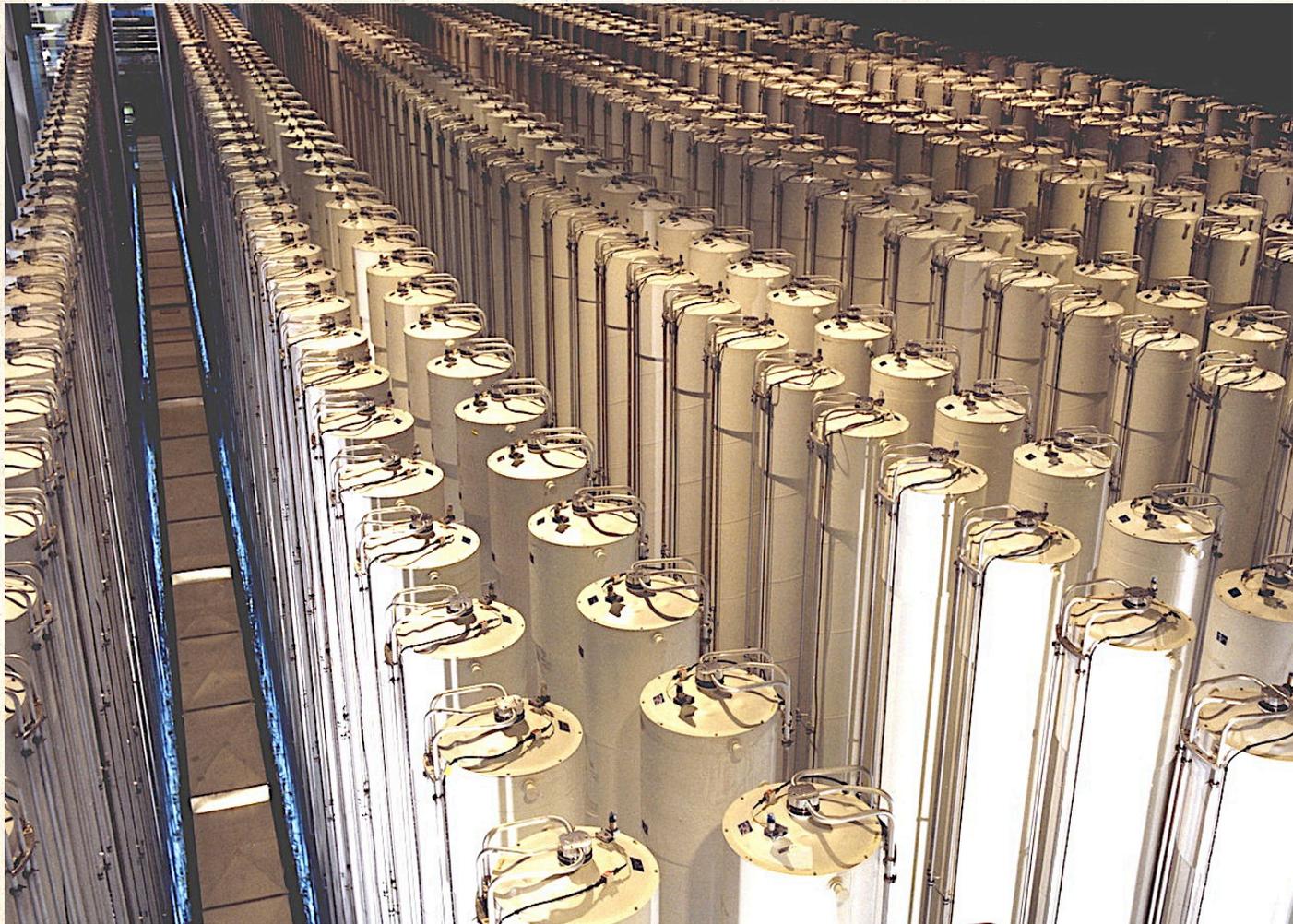


FIG. 30. Centrifuge

CENTRIFUGEUSES

- Banc de centrifugeuses (Piketon, Ohio, 1984)



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!