

PETITE HISTOIRE  
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

18 – MANHATTAN  
LES RÉACTEURS DE HANFORD

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris



# LE PROGRAMME MANHATTAN

# PASSAGE SOUS CONTRÔLE MILITAIRE

- Entrée en guerre des Etats-Unis (7 et 11 décembre 1941)
  - ⇒ le programme nucléaire acquit une importance majeure
  - ⇒ le coût n'avait plus d'importance
- Ampleur du programme
  - ⇒ demande de passage sous contrôle militaire (Bush, 9 mars 1942)
  - ⇒ poursuite simultanée des 2 filières (Conant, 23 mars 1942)
    1. Uranium 235
    2. Plutonium 239
  - feu vert de Roosevelt le 17 juin → *Manhattan District*
  - ⇒ budget 85 M\$ en juin 1942

- Deux programmes parallèles

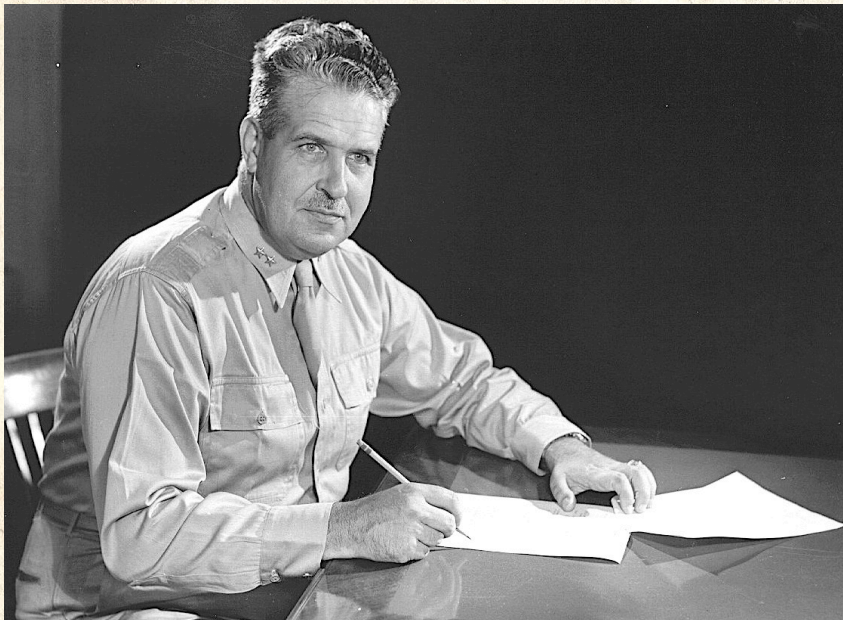
- fourniture de 2000 tonnes de minerai d'uranium
- diffusion gazeuse
- ~~diffusion thermique~~
- centrifugeuses
- séparation électromagnétique
- métallurgie de l'uranium
- → bombe à l'uranium

- réacteurs uranium-graphite
- ~~réacteurs uranium-eau lourde~~
- séparation du plutonium
- → bombe au plutonium

- Entretemps, la Marine (tenue à l'écart) lança un programme d'enrichissement (diffusion thermique) pour un moteur naval

# GÉNÉRAL LESLIE R. GROVES (1896-1970)

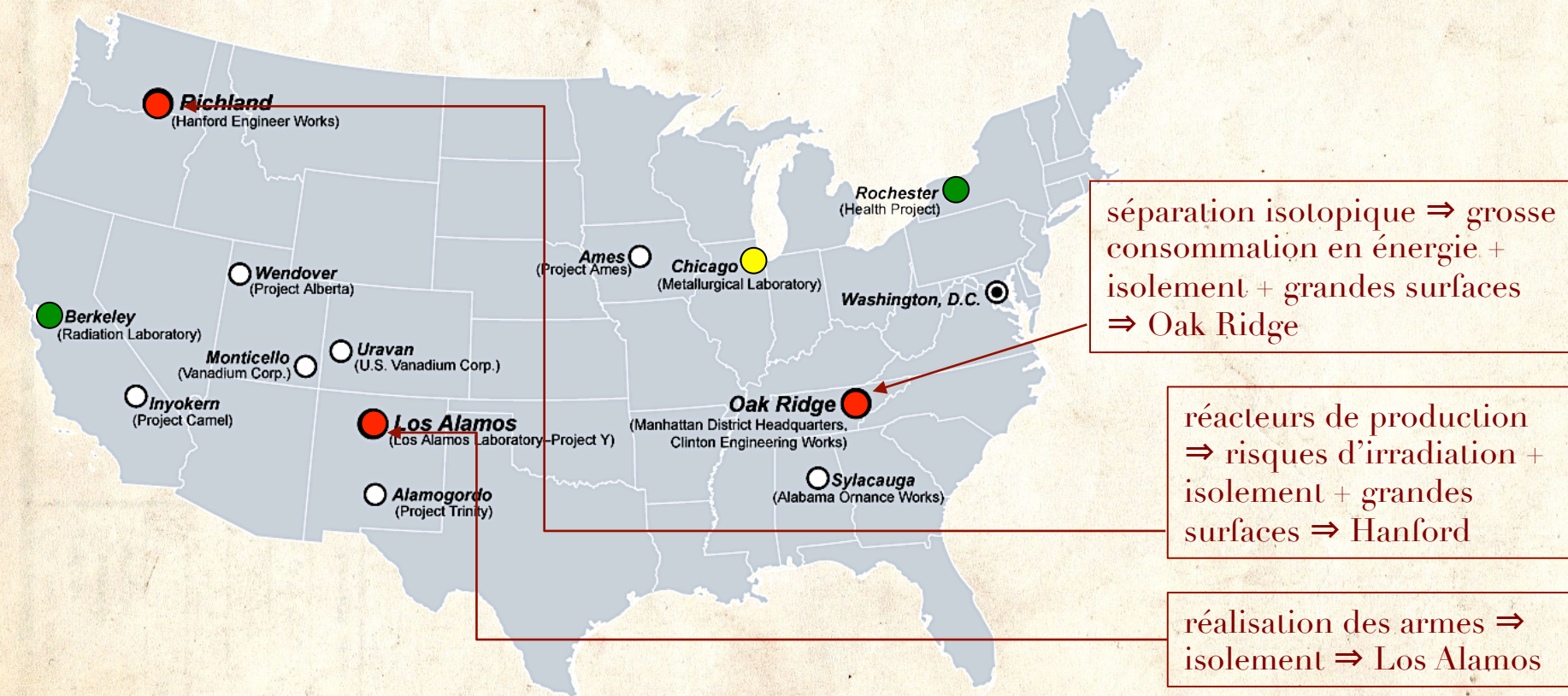
- Colonel du Corps des Ingénieurs (U.S. Army), il dirigea la construction du Pentagone (septembre 1941-janvier 1943)
- Création en août 1942 du *Manhattan District*, nomination à sa tête le 17 septembre de Groves (avec promotion au grade de général)



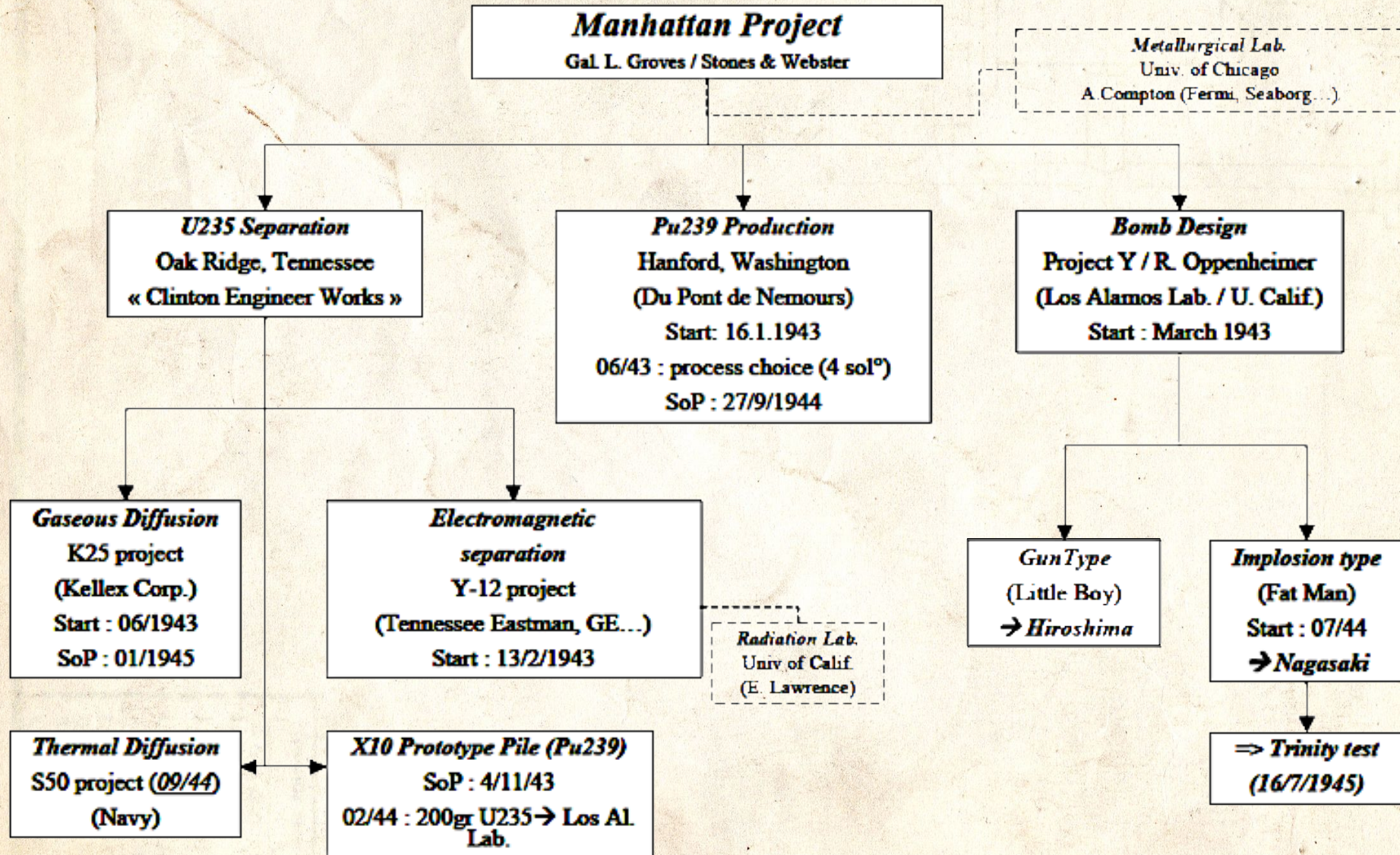
- Méfiant vis à vis des physiciens (surtout les étrangers) ⇔ relations souvent très tendues
- Contacts immédiats avec les grands industriels (Allis-Chalmers, Bell, DuPont, General Electric, Kellogg, Monsanto, Standard Oil, Union Carbide, Westinghouse...)
- Accélération des programmes
- Achat de terrains (Oak Ridge, Hanford, Los Alamos)

# LE MANHATTAN ENGINEERS DISTRICT

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

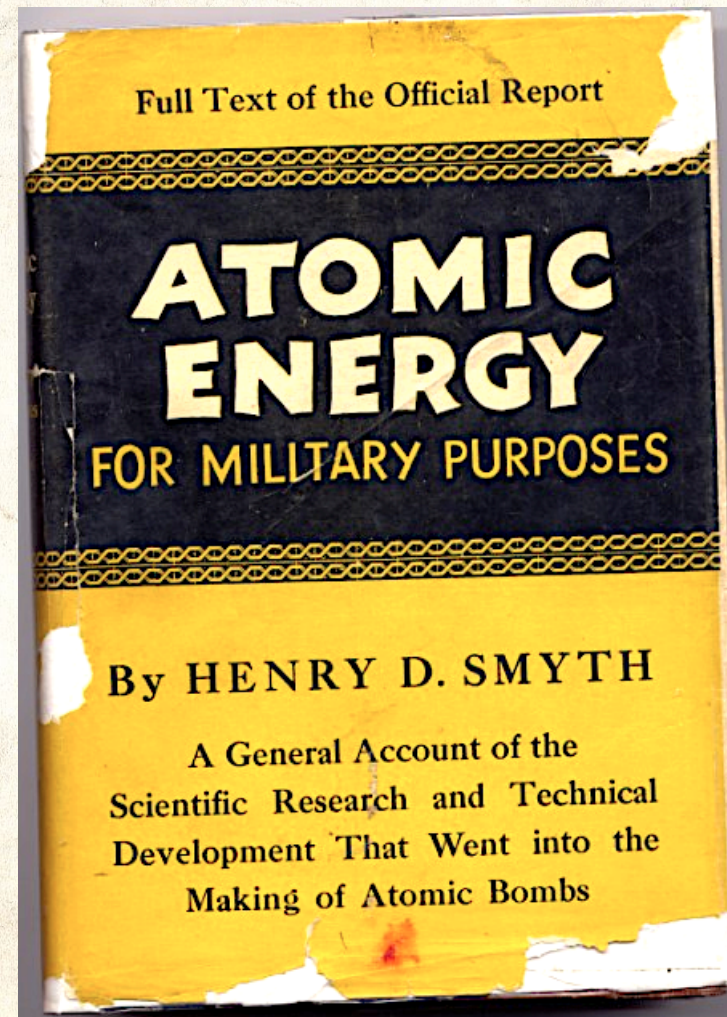


# ORGANIGRAMME SIMPLIFIÉ



# LE RAPPORT SMYTH

- Rédigé par Henry DeWolf Smyth à la demande de Vannevar Bush
  - Rendu public le 12 août 1945
  - Objectifs :
    1. Rendre compte auprès du public (et du Congrès!) des **2 milliards de dollars** de dépenses du programme Manhattan
    2. Permettre aux industriels de montrer leur savoir-faire
    3. Permettre à tous les ingénieurs et physiciens de justifier après la guerre de leurs compétences *malgré le secret militaire* continuant à couvrir leurs travaux
  - Beaucoup de détails donnés (mais **pas les secrets techniques!**)
  - Fut très utile cependant aux Soviétiques, aux Britanniques et aux Français



# NEUTRONIQUE



# 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.]

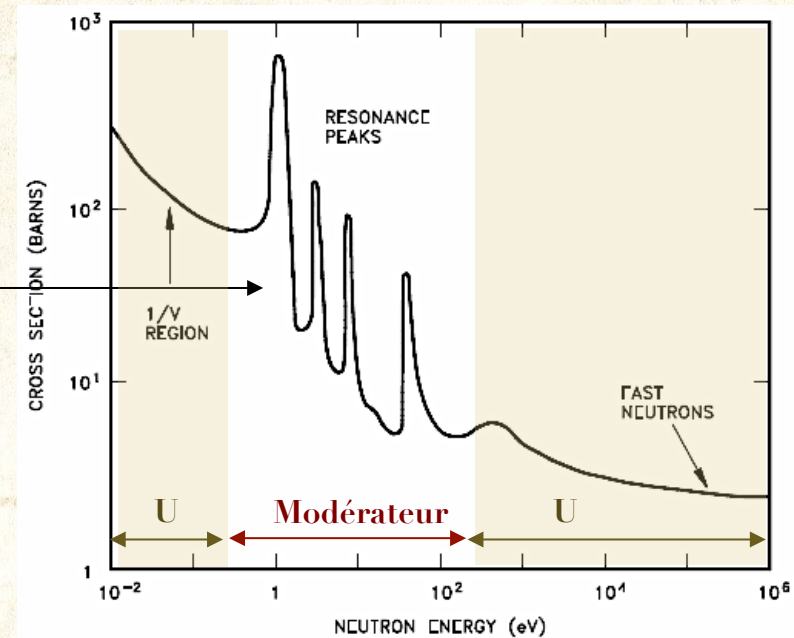
○  $\eta$  : coefficient de reproduction [nombre de neutrons produits par les fissions lentes/nombre de neutrons capturés par l'uranium]

○ Dimension finie du réacteur  $\rightarrow$  2 facteurs additionnels

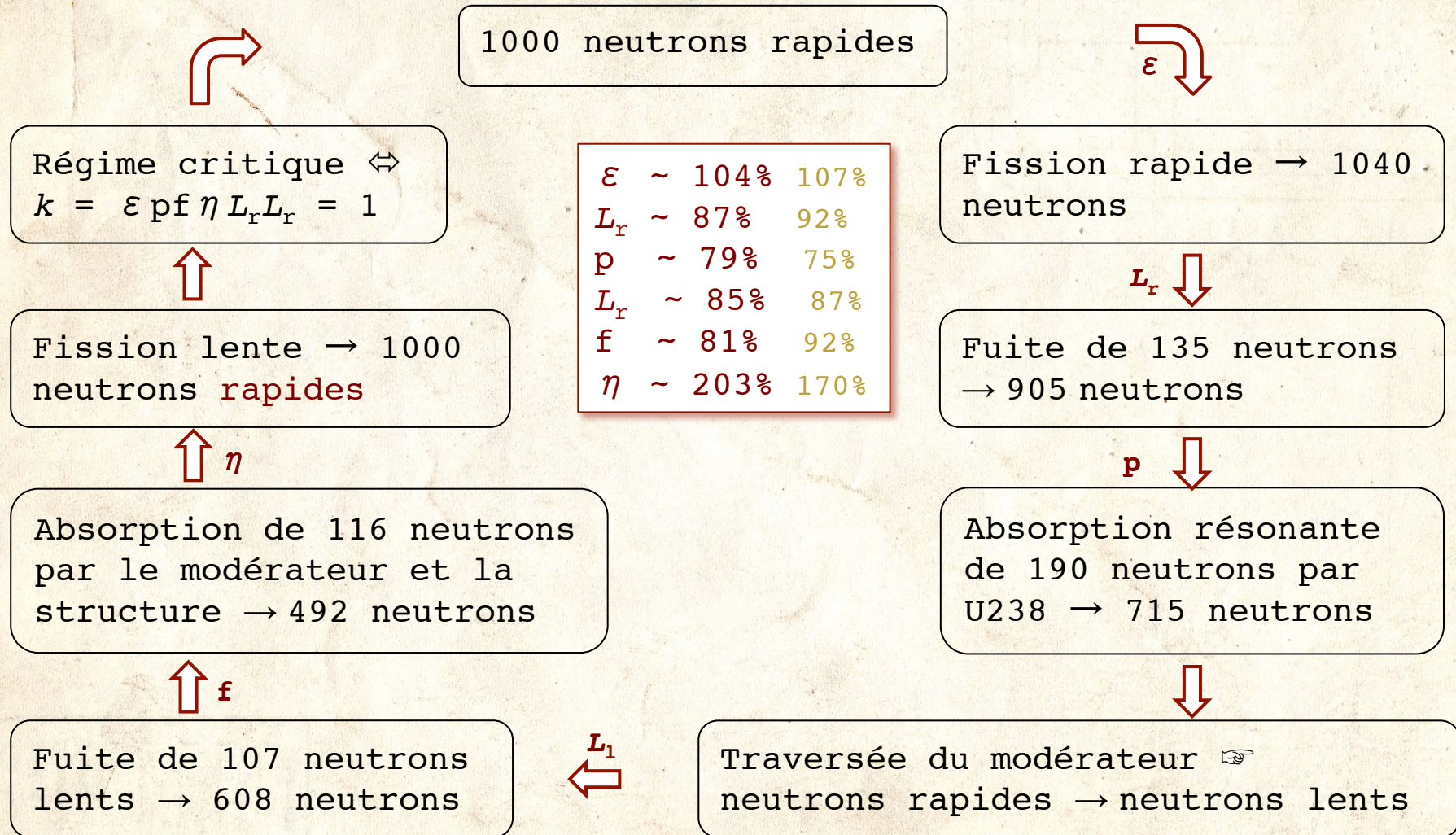
○ fuite des neutrons rapides  $\rightarrow$  proportion  $L_r$  qui ne fuit pas

○ fuite des neutrons lents  $\rightarrow$  proportion  $L_1$  qui ne fuit pas

$$\Rightarrow k = \epsilon p f \eta L_r L_1$$

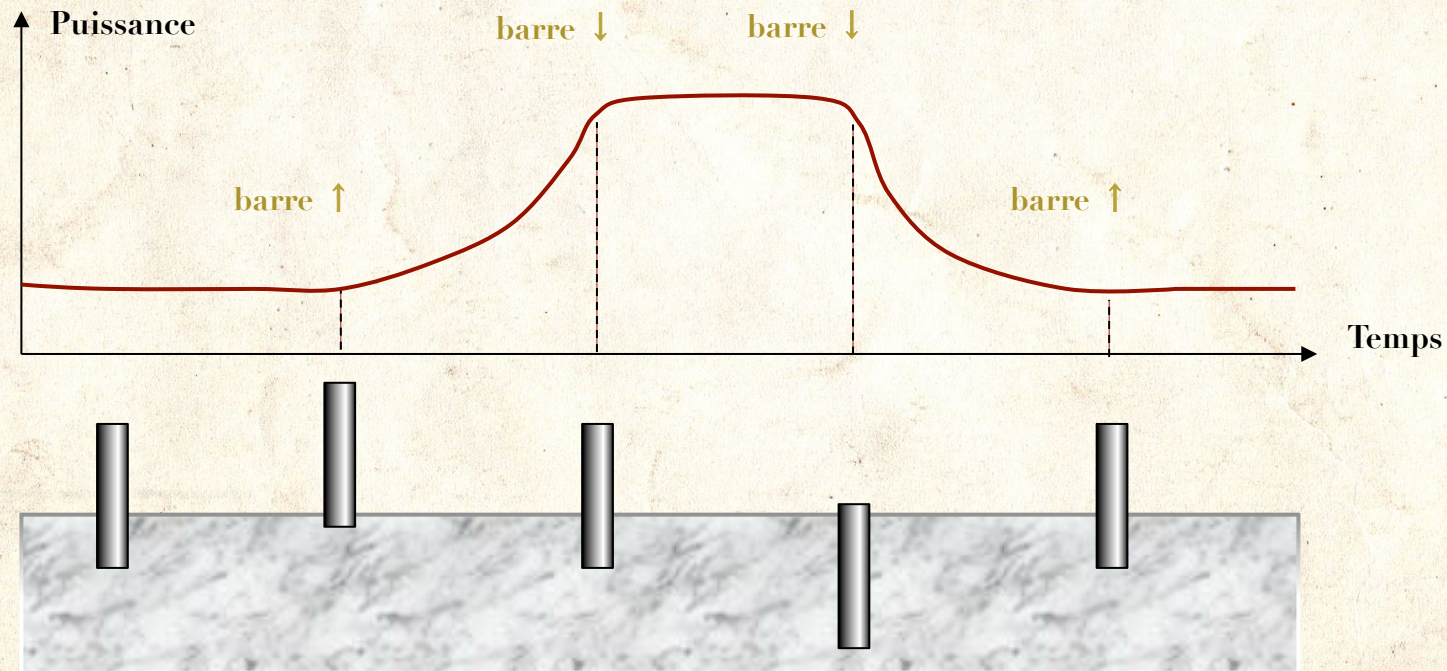


# ÉQUILIBRE POSSIBLE D'UN RÉACTEUR



# 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



# NEUTRONS PROMPTS ET NEUTRONS RETARDÉS

- Difficulté : la divergence exponentielle est très rapide
  - $k = 1,01 \Leftrightarrow$  doublement de puissance en 70 générations ( $1,01^{70} = 2$ )
  - vitesse des neutrons  $\sim 2000$  m/s, distances  $< 1$  m
  - $\Rightarrow$  intervalle de temps entre 2 fissions  $\tau < 0,5$  ms
  - $\Rightarrow$  **doublement de puissance en  $< 35$  ms**
  - $\Rightarrow$  en une seconde, la puissance est multipliée par  $2^{30} \sim$  un milliard
- $\Rightarrow$  un réacteur se pilote avec les neutrons retardés
  - les produits de fission de l'uranium sont «trop» riches en neutrons  $\Rightarrow$  cascades de transmutations  $\beta$  :  ${}^{87}_{35}\text{Br} \rightarrow {}^{87}_{36}\text{Kr} \rightarrow {}^{87}_{37}\text{Rb} \rightarrow {}^{87}_{38}\text{Sr}$
  - mais certains noyaux peuvent aussi perdre un neutron  ${}^{87}_{35}\text{Br} \rightarrow {}^{87}_{36}\text{Kr} \rightarrow {}^{86}_{36}\text{Kr}$
  - $\Rightarrow$  **neutrons retardés** apparaissant **0,2 s à 50 s** après la fission
  - Ils représentent **0,7%** des neutrons pour l'uranium 235
  - $\Rightarrow$  se placer dans une situation telle que  $k < 1$  avec les seuls neutrons prompts (sans les neutrons retardés) et  $k > 1$  avec les neutrons retardés
  - sinon **accident de criticité**

# 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>

# OBJECTIF PLUTONIUM

## ○ Évaluation rapide de la puissance requise

- 1 fission  $\Leftrightarrow$  2,5 neutrons  $\Leftrightarrow$  ~ 1 noyau de plutonium 239 formé
- 1 fission  $\Leftrightarrow$  200 MeV =  $200 \times 1,6 \times 10^{-13}$  J =  $3,2 \times 10^{-11}$  J
- 1 g Pu  $\Leftrightarrow$   $6 \times 10^{23} / 239 = 2,5 \times 10^{21}$  noyaux  $\Leftrightarrow$   $2,5 \times 10^{21}$  fissions
- 1 g Pu  $\Leftrightarrow$   $2,5 \times 10^{21} \times 3,2 \times 10^{-11} = 8 \times 10^{10}$  J
- 1 g Pu/jour  $\Leftrightarrow$   $8 \times 10^{10}$  J /  $10^5$  s ~ 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  $\Rightarrow$  ~ 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**

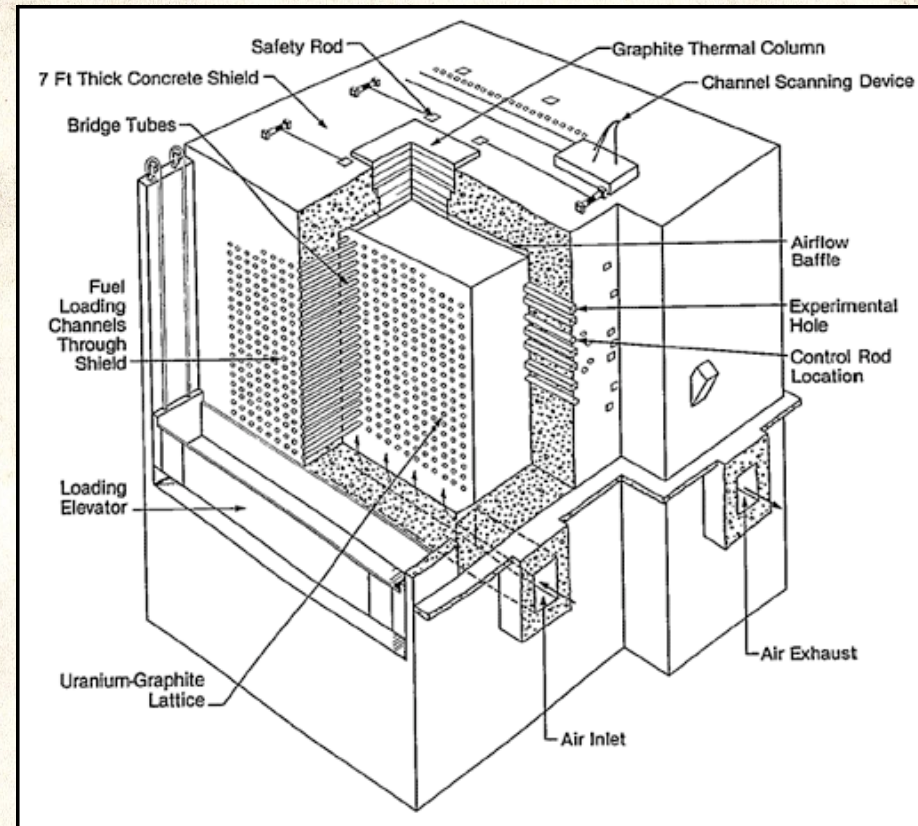
# MODÉRÉ PAR LE GRAPHITE, REFROIDI PAR L'EAU

- Nombreuses études pour le modérateur
    - eau légère, mais  $k < 0,9$  à moins d'enrichir l'uranium à  $\sim 1\%$
    - eau lourde  $\rightarrow$  usine au Canada (premières livraisons début 1943,  $6\text{m}^3/\text{an}$ )
    - béryllium
    - graphite, le plus simple, mais *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 EXPÉRIMENTAL X-10 À OAK RIDGE

- Plans de Wigner
- Construit de janvier à novembre 1943 par DuPont
- 500 tonnes de graphite (blocs de 10 cm \* 123 cm)
- Cylindres d'uranium insérés dans 1248 tubes d'aluminium
- Refroidissement par air
- Puissance 500 kW (↗ 4 MW en juillet 1944)
- Irradiation de l'uranium pendant quelques semaines, puis éjection des tubes, repos quelques semaines (produits de fission à vie courte) et extraction du plutonium (250 ppm) ➡ problème du Pu 240

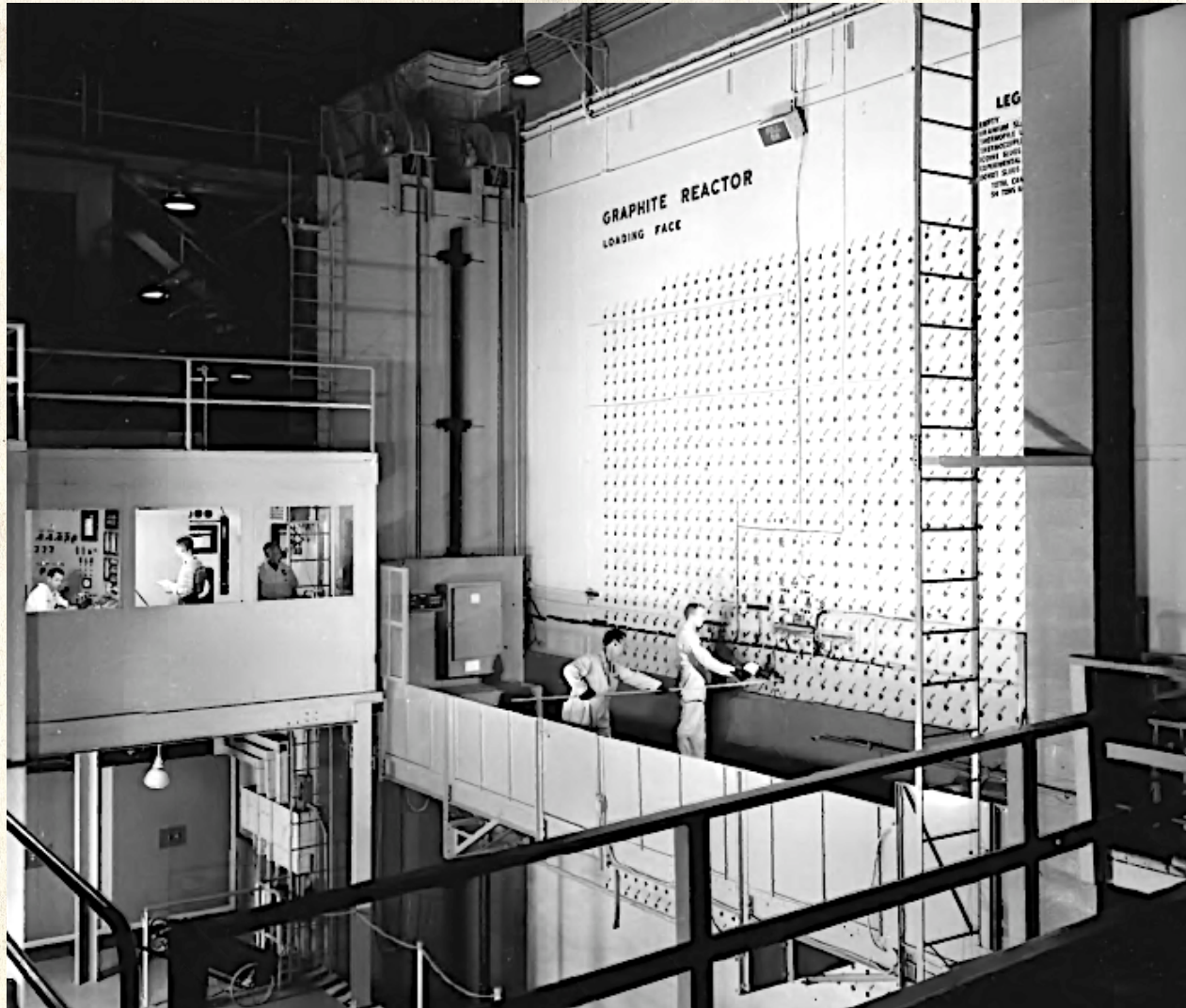




# LE RÉACTEUR EXPÉRIMENTAL X-10 À OAK RIDGE

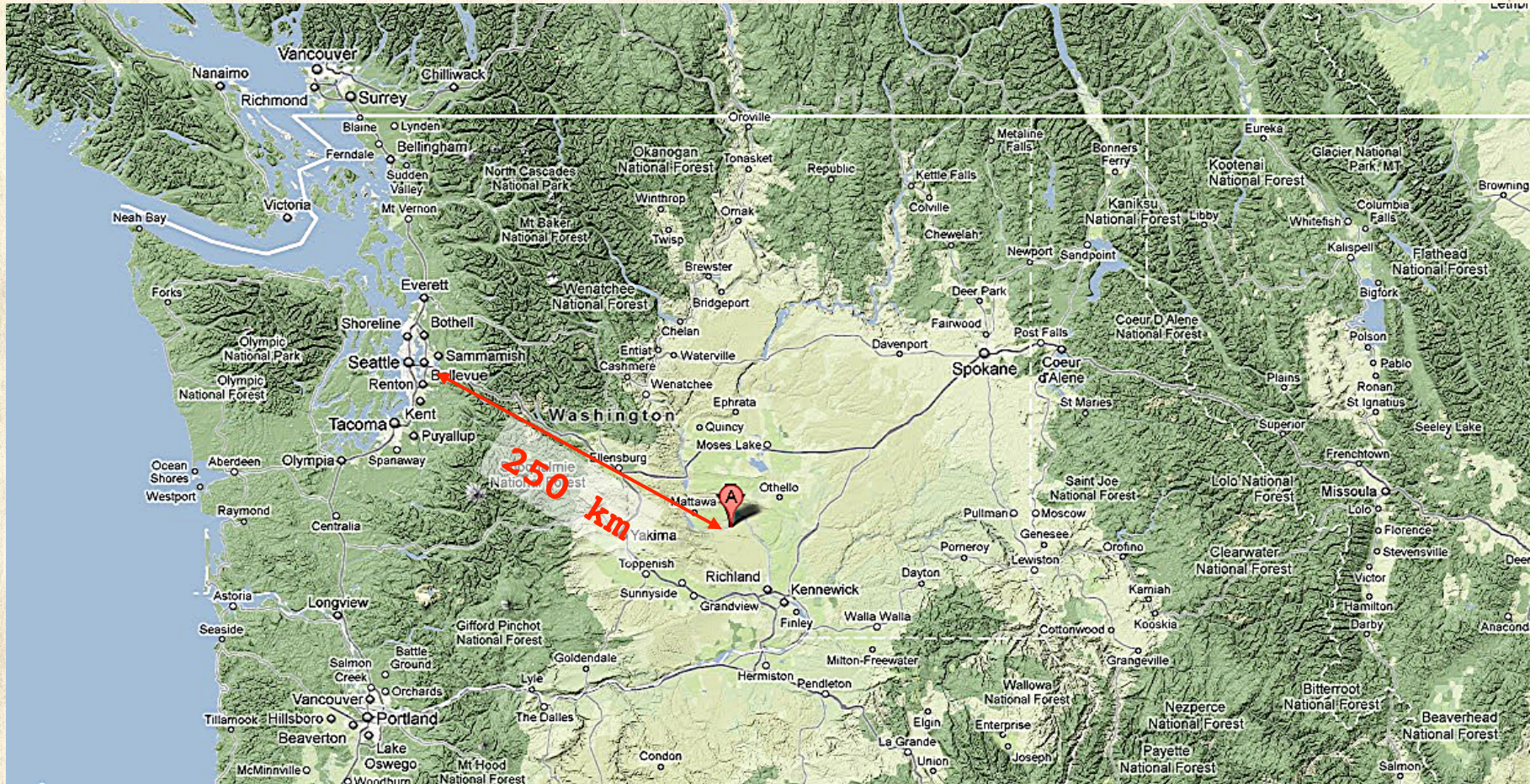


# LE RÉACTEUR EXPÉRIMENTAL X-10 À OAK RIDGE

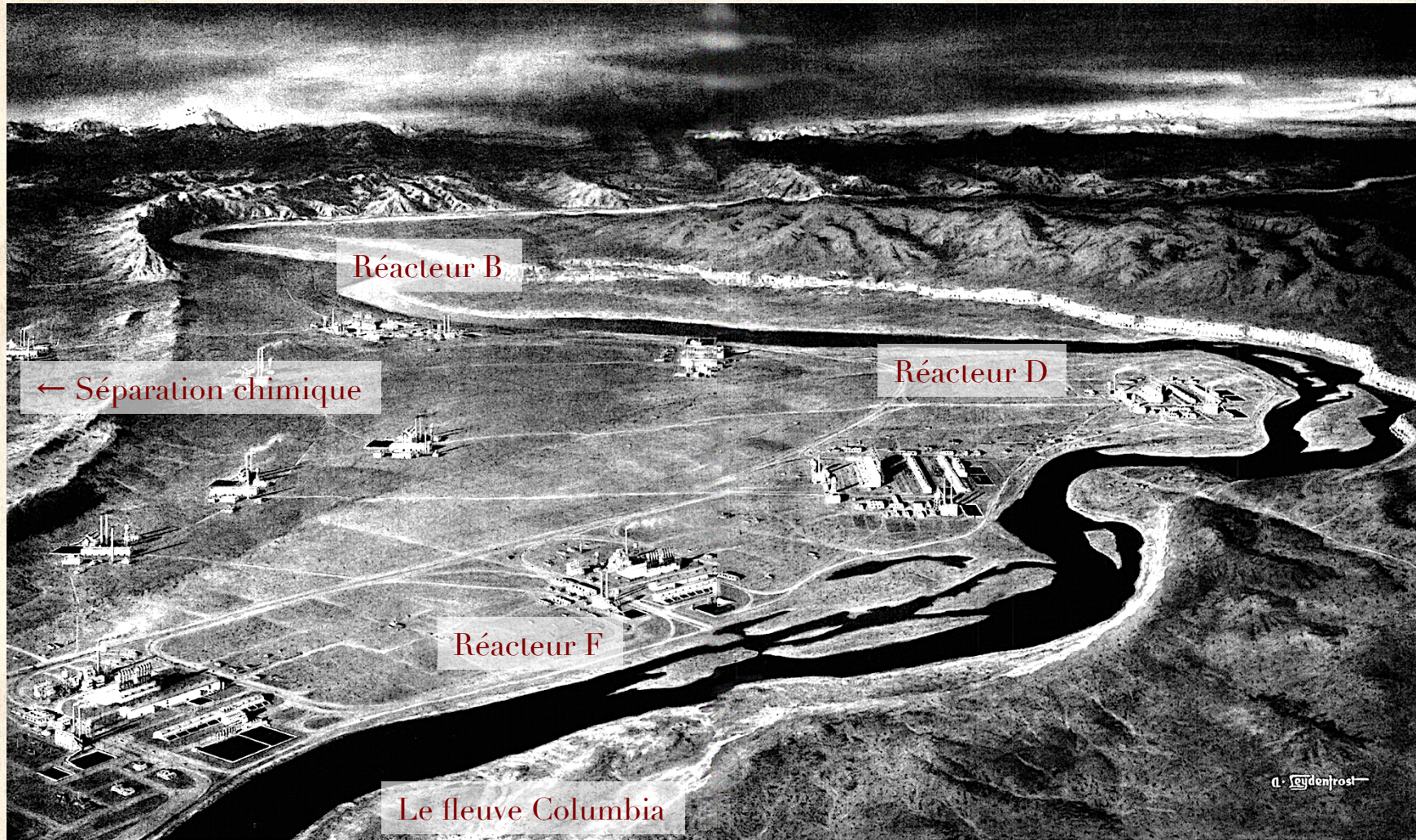


**PLUTONIUM 239**  
**HANFORD**

# HANFORD, SI LOIN DE TOUT



# LE SITE DE HANFORD



**THE HANFORD PLANT**, where all the plutonium for A-bombs is produced, stretches for miles along the valley of the Columbia River north of Richland, Wash. This drawing, which gives a general impression rather than the exact layout of the site, is based on the following published facts: 1) that the plants are located between 25 and 40

miles from Richland (General L. R. Groves in *The Military Engineer*, June, 1946). 2) that the buildings are placed several miles apart (*Smith Report* Chap. 8, par. 51). The appearance of the buildings (whose size is here exaggerated for clarity) and the proximity of the pile areas to the river are known from photographs which have been published

by the government. The number of pile areas and corresponding separation plants is presumably six: General Groves, in the magazine article mentioned above, referred to five production plants then in operation at Hanford, and a few weeks ago the Atomic Energy Commission announced the completion of an additional pile. Each pile

and its separation plant form a single unit which operates independently of all the others. The pile area contains a number of structures including the pile itself (large central building with elaborate superstructure); pumping and filtering plants to handle the millions of gallons of water required daily to cool the pile; and large, pondlike

retaining basins in which the slightly radioactive water that has passed through the pile is kept until it can safely be returned to the river. The separation plant, to which the uranium rods are sent underground after they have been "cooked" in the pile (p. 94, 95), is several miles away. (Only five of the six separation plants are shown above.)

The long, low building in each separation plant is the semisubterranean canyon where rods are dissolved and their plutonium content extracted. Near each canyon is a pool to which some of the fluid radioactive waste formed during the process are pumped. Gaseous wastes are released from tall chimneys when the wind is right.

# LE RÉACTEUR B

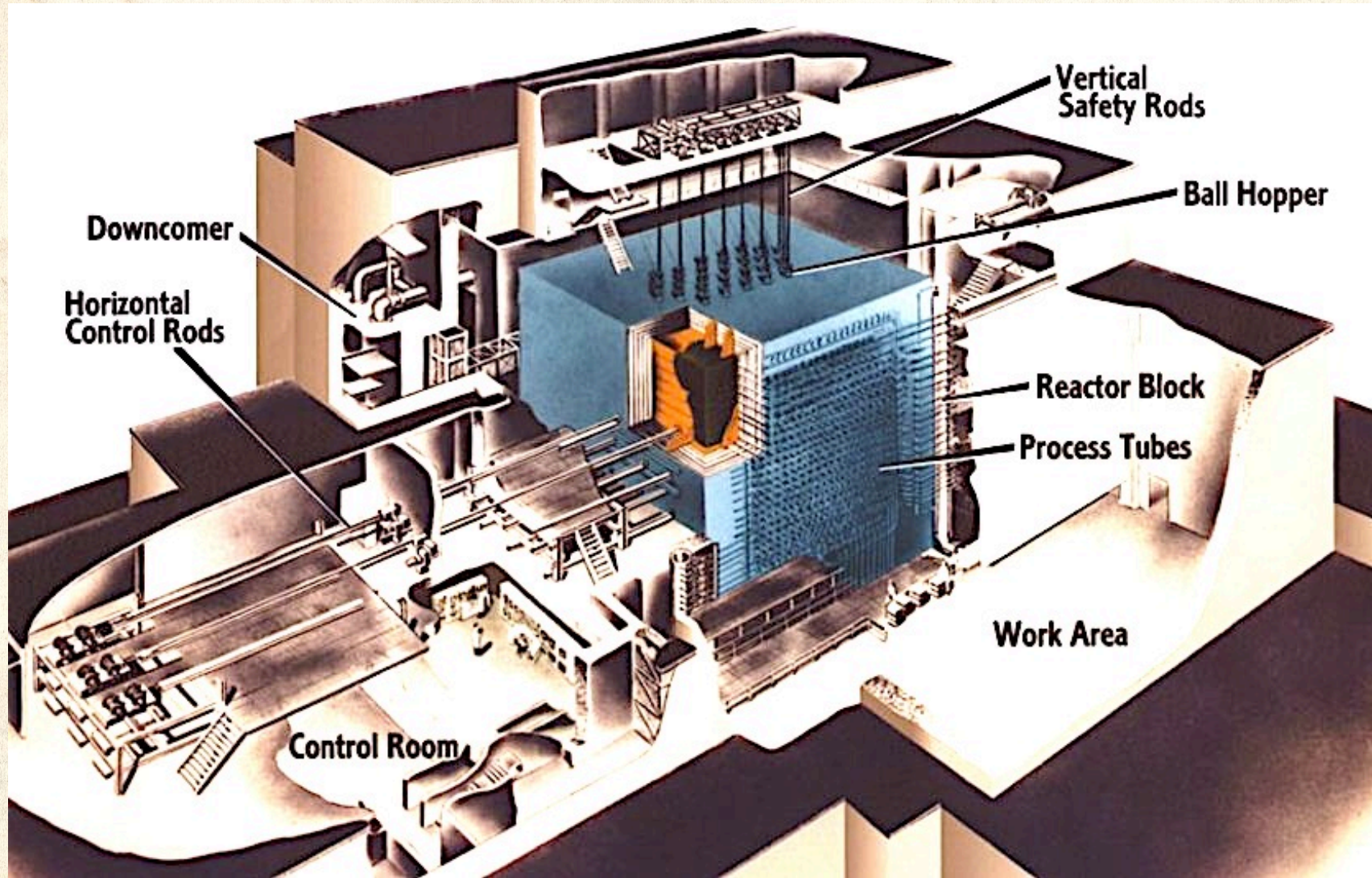


15 mars 2012

Alain Bouquet – Petite histoire de la physique nucléaire – 18

22

# LE RÉACTEUR B

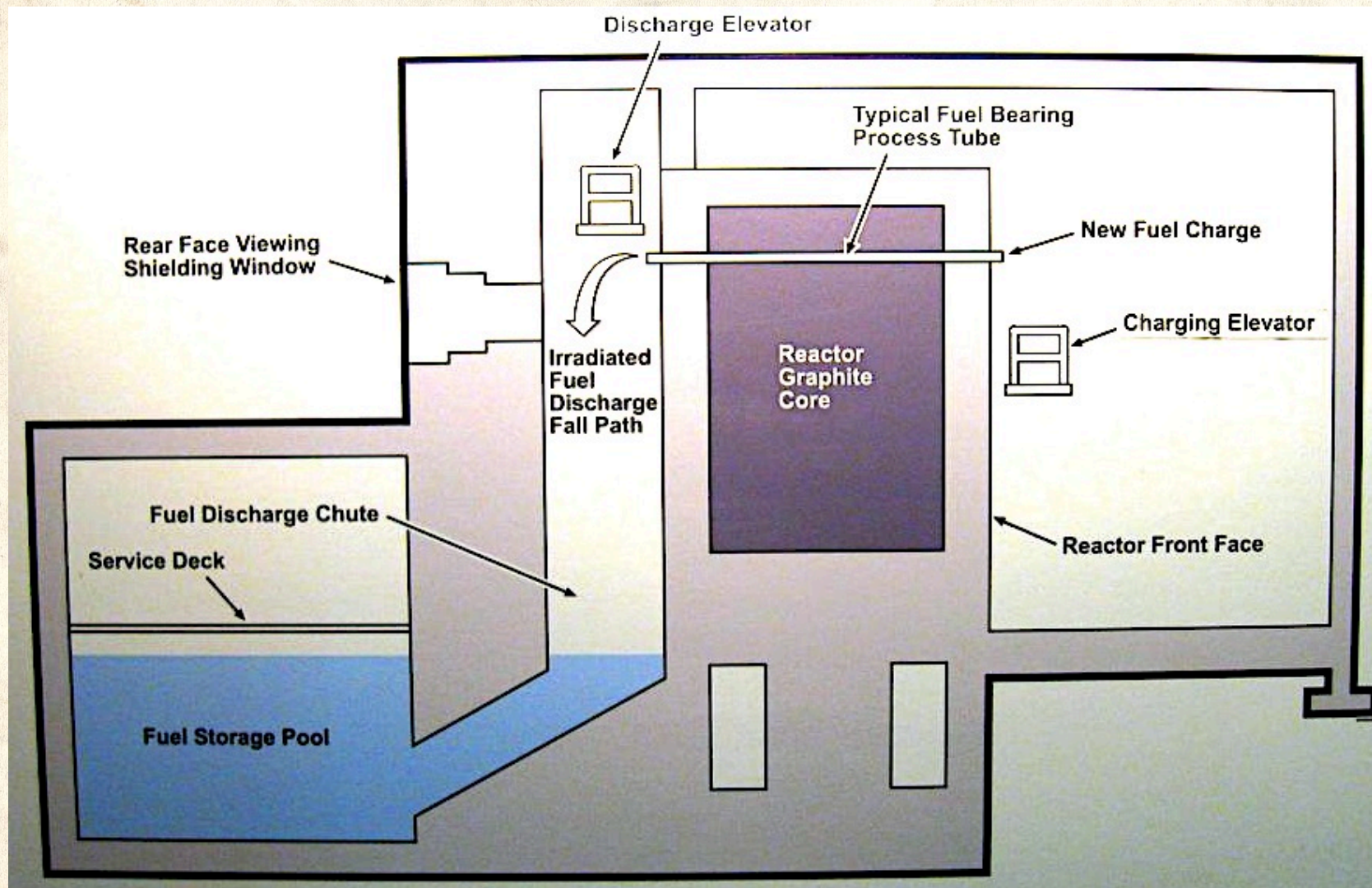


# LE RÉACTEUR B

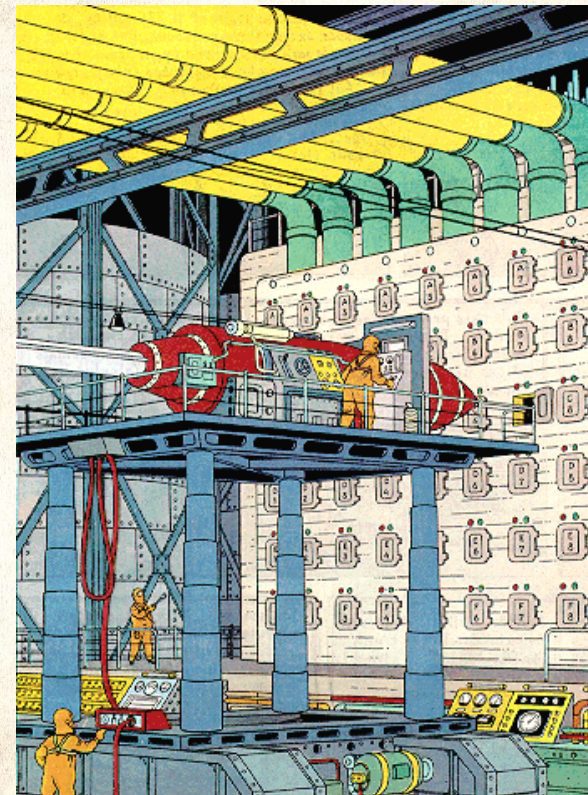
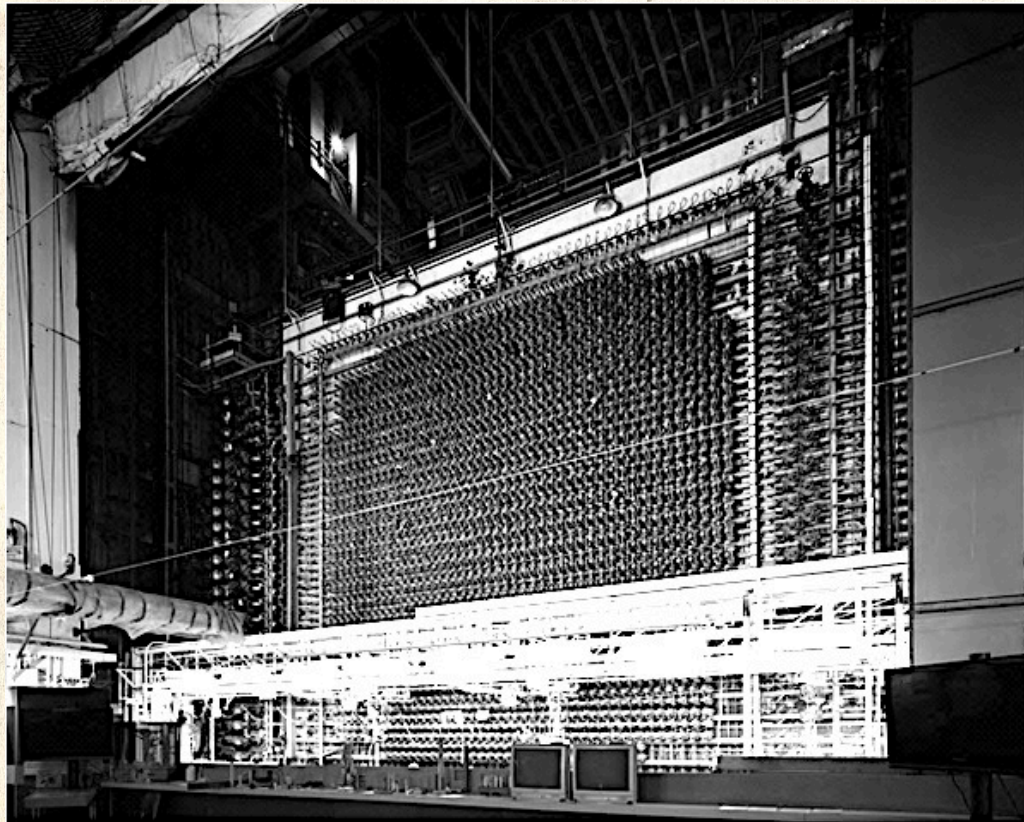
- Plans de Wigner (modifiés par DuPont: puissance  $\searrow$  250 MW et possibilité d'ajouter plus de barres d'uranium)
- Construction de juin 1943 à septembre 1944
- Cylindre de graphite de 12 m de diamètre et 9 m de long ( $\rightarrow$  2200 tonnes)
- Percé par 1500 puis 2004 barres d'uranium espacées de 22 cm, en 46 rangées ( $\rightarrow$  180 puis 250 tonnes d'uranium métallique)
- Pilotage par 9 barres d'acier au bore, horizontales
- Sécurité par 29 barres d'acier au bore, verticales
- Puissance 250 MWt  $\Rightarrow$  refroidissement par circulation d'eau autour de chaque barre d'uranium (débit total 5 m<sup>3</sup>/s)



# LE RÉACTEUR B EN COUPE



# LE RÉACTEUR B

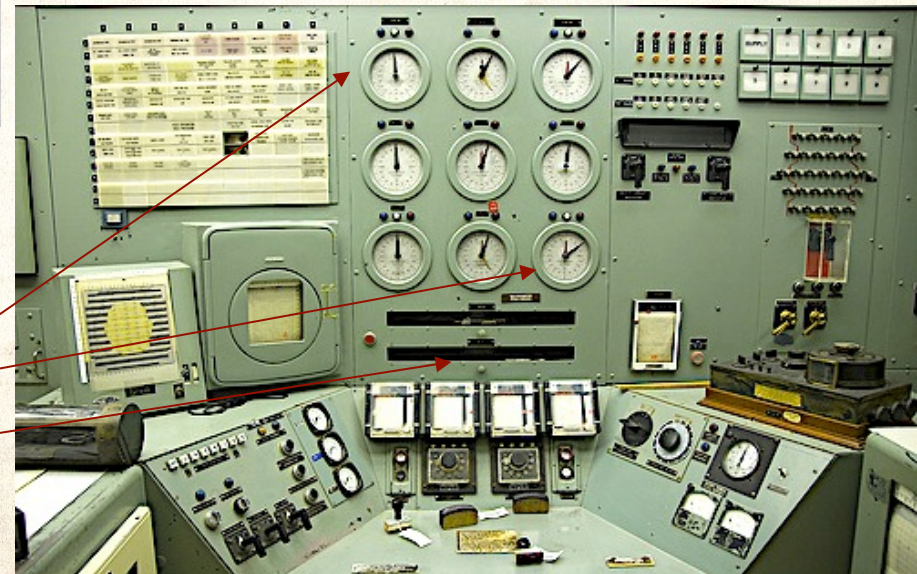


# UN CAUCHEMAR DE PLOMBIER



## AUX COMMANDES

Positions des 9 barres de contrôle  
Mesure du flux de neutrons



# XÉNON 135

- Le réacteur B fut mis en route le soir du 26 septembre 1944, avec 900 barreaux d'uranium seulement
- Puissance initiale 9 MW → fonctionnement satisfaisant
- Mais quelques heures après, la puissance diminua régulièrement
- ⇒ arrêt le matin du 27 et recherche de fuites
- Redémarrage *spontané* dans la nuit du 27, la puissance remontant à 9 MW
- Répétition du cycle ⇒ 2 hypothèses:
  1. Dépôt d'un absorbeur de neutron, dissous par l'eau pendant les arrêts?
  2. Production d'un absorbeur de neutrons, isotope à durée de vie de quelques heures? ⇒  $^{135}_{54}\text{Xe}$

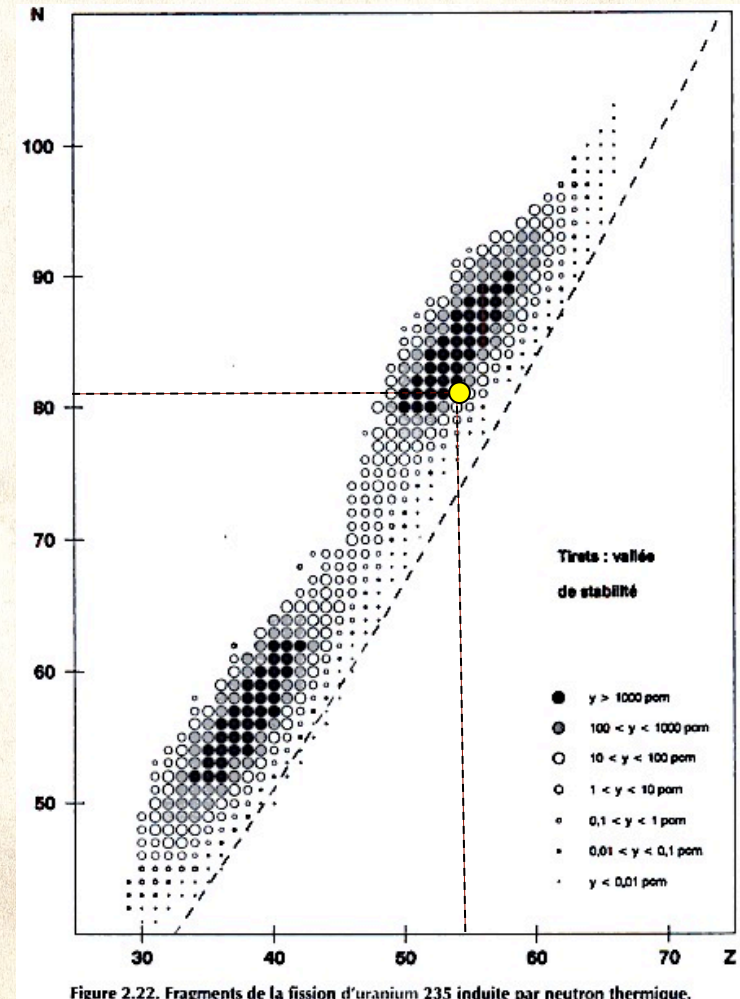
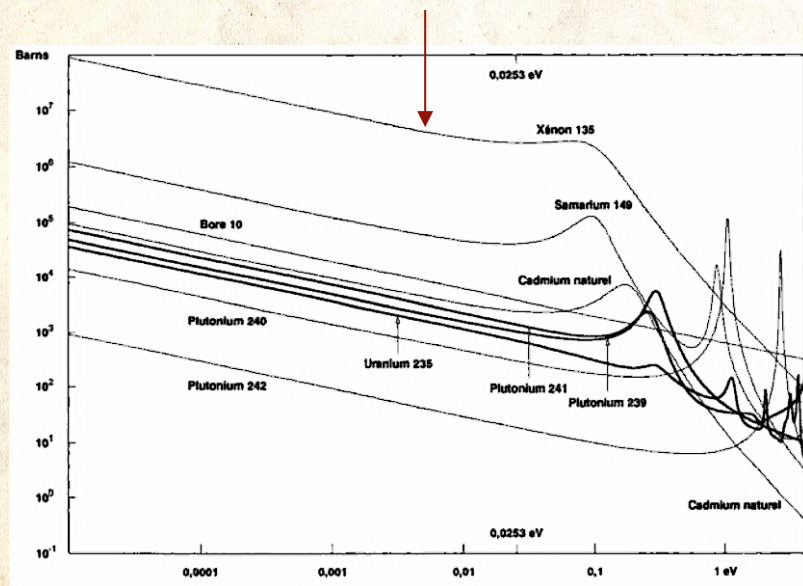


Figure 2.22. Fragments de la fission d'uranium 235 induite par neutron thermique.

# EMPOISONNEMENT AU XÉNON 135

- Le xénon 135 est un produit de fission de l'uranium
  - direct (mais c'est rare)
  - via  $^{135}_{53}\text{I} \rightarrow ^{135}_{54}\text{Xe}$  en 7 h
  - puis  $^{135}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{135}_{55}\text{Cs}$  en 9h
- $^{135}_{54}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}_{54}\text{Xe}$  stable
- Section efficace de capture de **1 à 10 millions de barns**



- $\Rightarrow$  un poison violent
- le xénon 136 a par contre une faible section efficace de capture

## ○ Conséquences

1. en fonctionnement régulier, abondance constante du xénon 135

- $\Rightarrow$  dimensionner le réacteur pour compenser la perte de neutrons ( $\sim 3\%$ )

2. arrêt du réacteur  $\Rightarrow \nearrow ^{135}\text{Xe}$   
( $^{135}\text{I} \rightarrow ^{135}\text{Xe}$ ) puis  $\searrow$  ( $^{135}\text{Xe} \rightarrow ^{135}\text{Cs}$ )

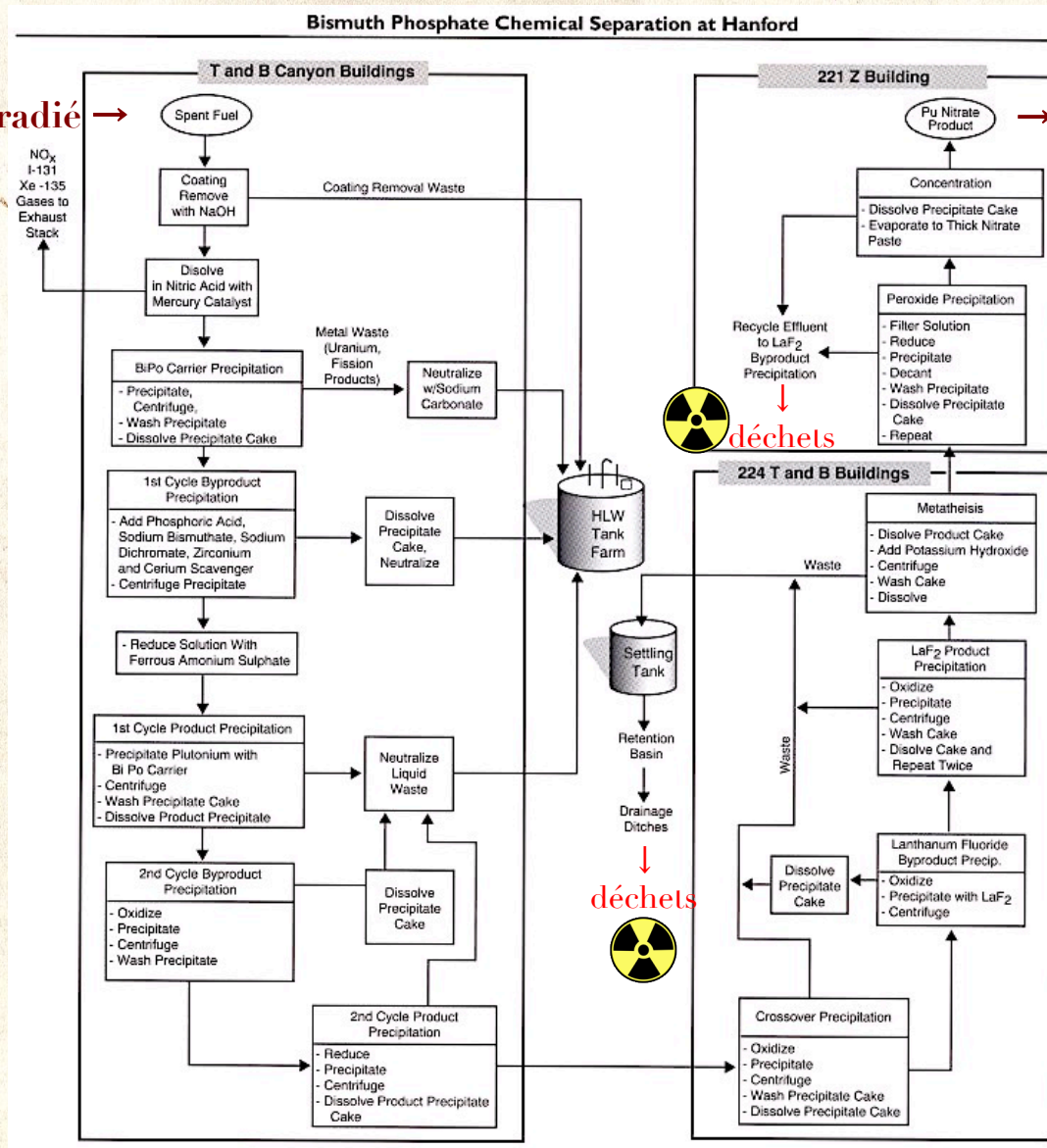
- $\Rightarrow$  instabilités

- $\Rightarrow$  origine de l'accident de Tchernobyl

# SÉPARATION DU PLUTONIUM À HANFORD

uranium irradié →

déchets ←



# 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)





# 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



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!