

# PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

## 20 – MANHATTAN LOS ALAMOS

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

# OPPENHEIMER

- J. Robert Oppenheimer (1904-1965)
  - Bref passage au Cavendish (Blackett) puis à Göttingen (Born) en 1927, puis Caltech, Leyde, et Berkeley (1929) où il collabora étroitement avec Lawrence
  - Astrophysique théorique (étoiles à neutrons et trous noirs) et théorie quantique des champs



- Choisi en mai 1942 par Compton (sous la pression de Lawrence) pour diriger la réalisation de la bombe (Projet Manhattan)
- → visites aux différents groupes impliqués
- → réunion de synthèse à Berkeley en juillet 1942
- → projet en septembre d'un *petit* laboratoire d'étude de la fission rapide ➡ Los Alamos
- Directeur de l'IAS de Princeton, et président du Conseil scientifique de l'AEC en 1947
- Dans le collimateur du FBI pour sympathies communistes à l'époque du McCarthysme, il perdit son habilitation aux secrets nucléaires en 1954

# LOS ALAMOS LE SITE Y



29 mars 2012

Alain Bouquet – Petite histoire de la physique nucléaire – 20

4

# LA ROUTE DE LOS ALAMOS (APRÈS MODERNISATION)

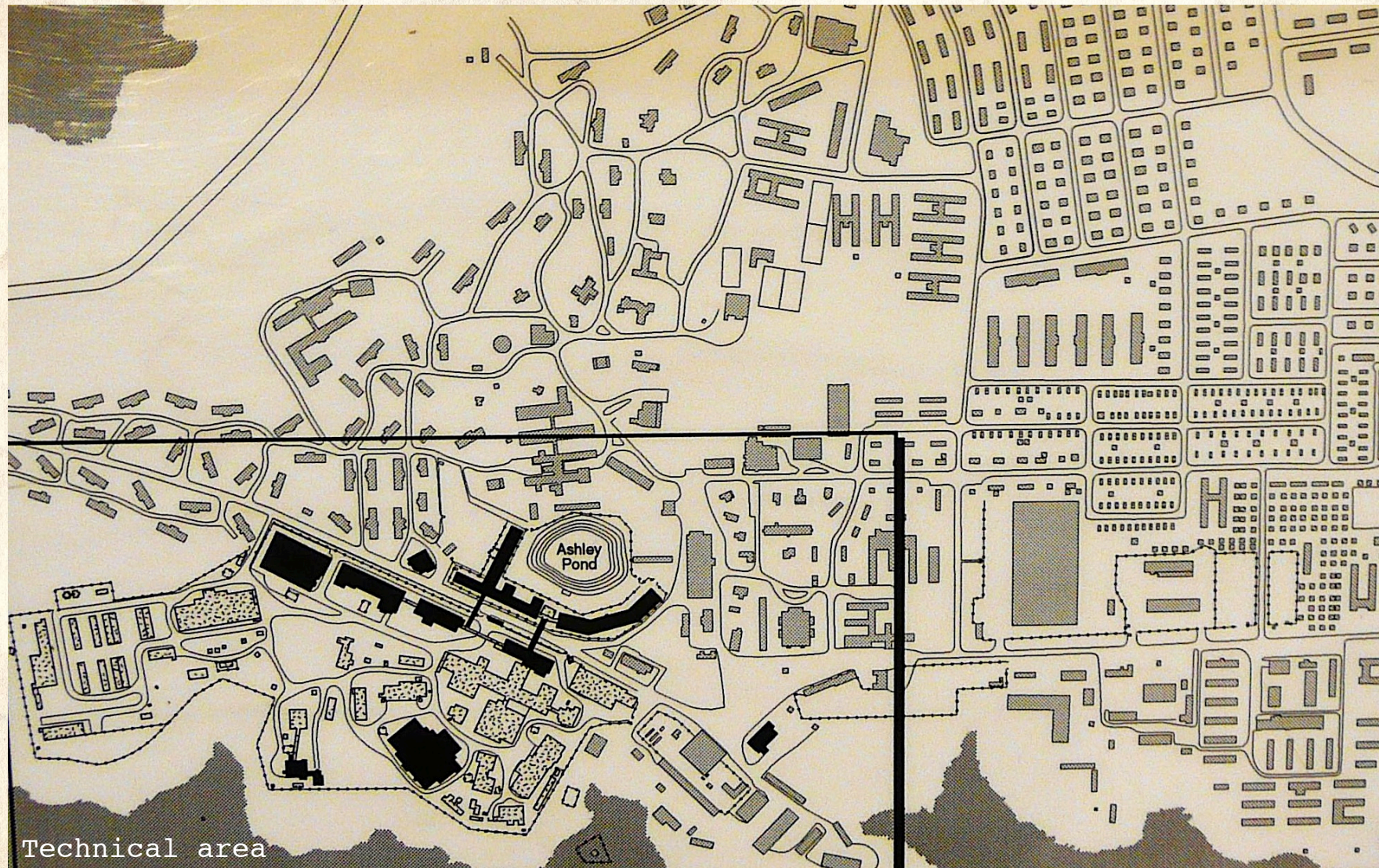


29 mars 2012

Alain Bouquet – Petite histoire de la physique nucléaire – 20

5

Logements



Technical area

# LA VIE À LOS ALAMOS

- Exemple de laboratoire « sur mission »
  - tous moyens humains et financiers pour réaliser une bombe opérationnelle
  - → pas de recherche pure
  - → pas de solution «élégante»
  - → fiabilité plus que performance
  - → organisation hiérarchique avec tâches précises
  - → rapports d'étape réguliers
- Délai très court ⇒ nécessité de mener en parallèle
  - recherche de laboratoire
  - conception et réalisation de prototypes
  - conception et réalisation de la fabrication en série

- Cohabitation malaisée entre
  - physiciens (et familles)
  - techniciens et personnel administratif
  - militaires (gardes, SED, WAC)



# LOGEMENTS





# LA VIE QUOTIDIENNE

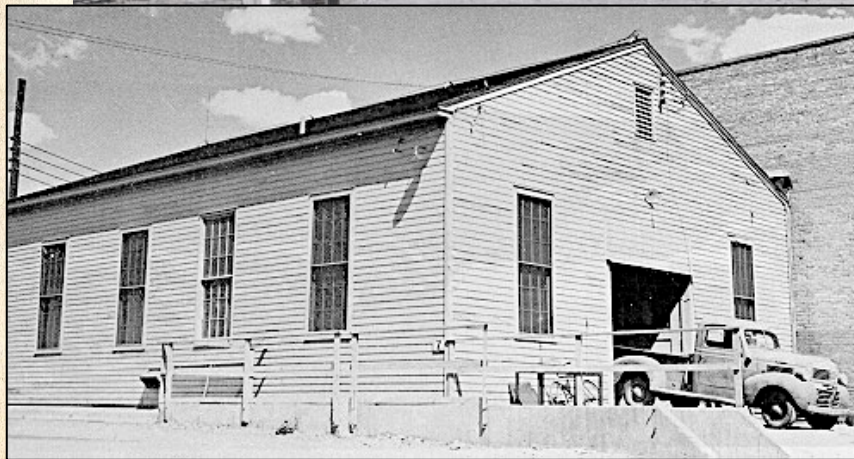


# LES SOIRÉES

## ○ Otto Frisch en concert



# LOS ALAMOS TECHNICAL AREA



29 mars 2012

Alain Bouquet – Petite histoire de la physique nucléaire – 20

11

# LOS ALAMOS TECHNICAL AREA

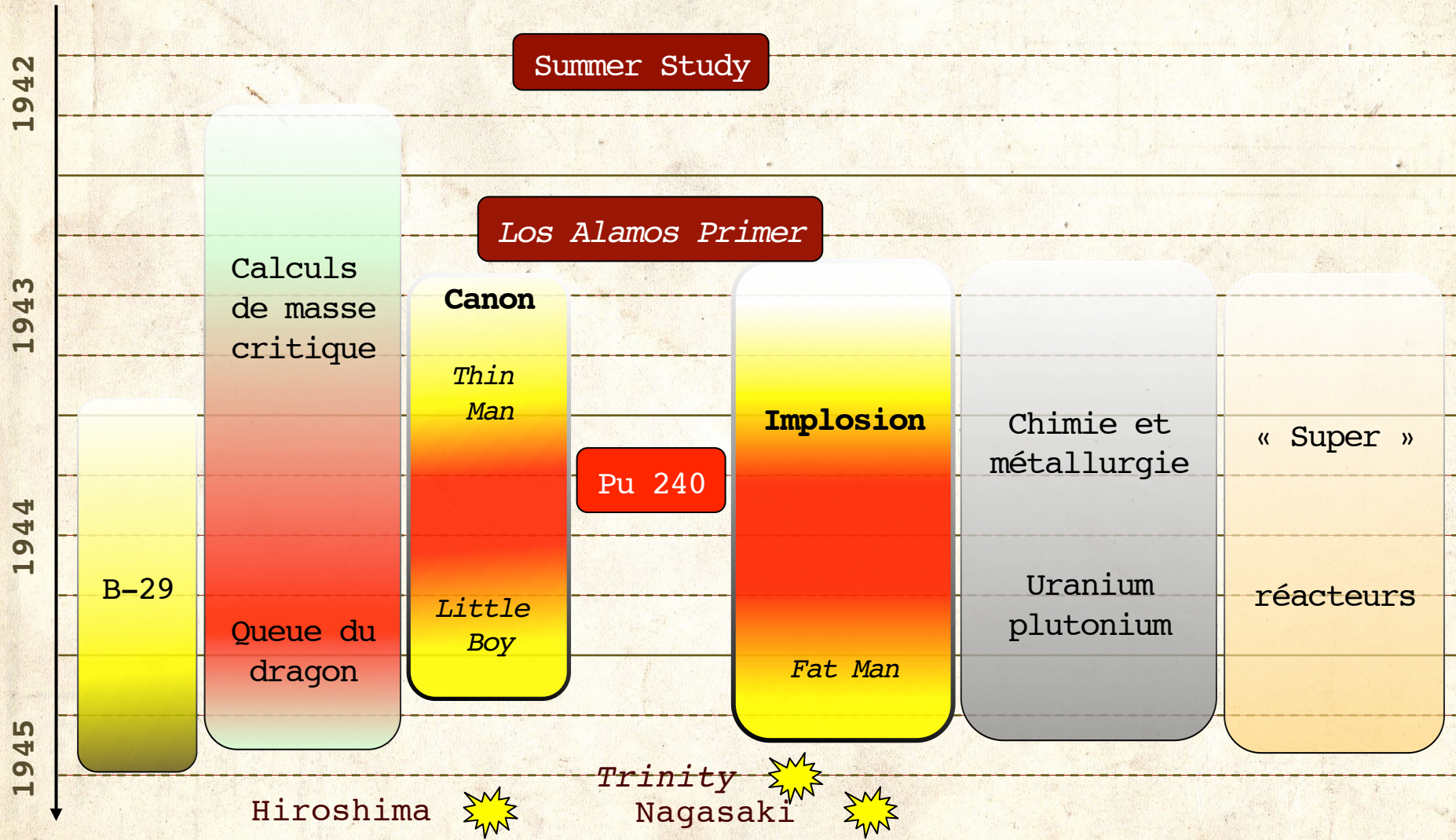
- Physiciens et ingénieurs civils (sous contrat avec Berkeley)
- Jeunes ingénieurs incorporés dans l'armée (*Special Engineer Department* SED)
- Personnel féminin du *Women's Army Corps* (WAC)



# LOS ALAMOS

- « *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* » début du *Los Alamos Primer*, mars 1943
- Délai imposé : 1<sup>er</sup> août 1945
- 4 divisions en 1943
  - **T** (Hans Bethe): théorie, masse critique, conception des bombes
  - **P** (Robert Bacher): cyclotron, Van de Graaf, sections efficaces, radioactivité [Segrè]
  - **CM** (Joseph Kennedy): chimie et métallurgie)
  - **E** (William Deke Parsons, US Navy): explosifs
- *Profonde réorganisation en juin 1944*
  - **Division T**
    - T-1 (hydrodynamique) : Edward Teller, puis Rudolf Peierls après juin 1944
    - T-2 (masse critique): Robert Serber
    - T-3 (efficacité): Victor Weisskopf
    - T-4 (diffusion): Richard Feynman
    - T-5 (calcul): Donald Flanders

# TIMELINE

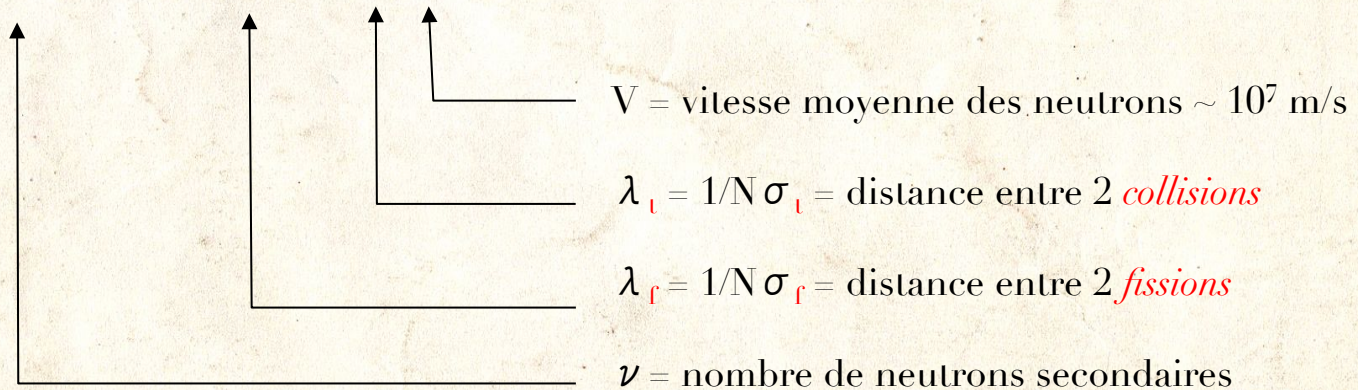


# MASSE CRITIQUE

# MASSE CRITIQUE

- Objectif : 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  $\mathbf{N}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$  → variation au cours du temps  $d\mathbf{N}/dt$
- $d\mathbf{N}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)/dt = [\text{fission}] + [\text{neutrons venant ou partant ailleurs}]$

○  $\Rightarrow d\mathbf{N}/dt = (\nu - 1)\mathbf{N}V/\lambda_f + \lambda_t V/3 \Delta \mathbf{N}$        $\Delta \mathbf{N} = d^2\mathbf{N}/dx^2 + d^2\mathbf{N}/dy^2 + d^2\mathbf{N}/dz^2$



- Simplifications : 1) sphère homogène, et 2) libre parcours moyen des neutrons petit devant la taille de la sphère



# MASSE CRITIQUE

○  $dN/dt = (\nu - 1)N V / \lambda_f + \lambda_t V / 3 \Delta N$  [rappel  $\lambda = 1/n\sigma$ ]

○  $\Rightarrow N(r,t) = N_0 \frac{\sin(\pi r / R)}{\pi r / R} \exp\{\gamma t\}$  où  $\gamma = \frac{(\nu - 1)V}{\lambda_f} - \frac{\lambda_t V}{3 R^2}$

○  $\Rightarrow$  rayon critique  $R_c \Leftrightarrow \gamma = 0$

○  $\Rightarrow R_c = \pi [\lambda_f \lambda_t / 3(\nu - 1)]^{1/2}$

Surestimation de 30% à 40% car la densité de neutrons s'annule en fait *après* la surface

Quantité	Unité	U 235	Pu 239
Densité n	$10^{28} \text{ m}^{-3}$	4,8	3,9
$\sigma_{\text{fission}}$	Barn ( $10^{-28} \text{ m}^2$ )	1,2	1,8
$\rightarrow \lambda_f$	cm	<b>17</b>	<b>14</b>
$\sigma_{\text{total}}$	Barn ( $10^{-28} \text{ m}^2$ )	5,8	6,2
$\rightarrow \lambda_t$	cm	<b>3,6</b>	<b>4,1</b>
$\nu$		2,6	3,2
$\Rightarrow R_c$	cm	<b>8,4</b>	<b>6,4</b>
$\Rightarrow M_c$	kg	<b>46</b>	<b>17</b>

$R_c \propto [\lambda_f \lambda_t]^{1/2}$

$\lambda = 1/n\sigma \Rightarrow R_c \propto 1/n$

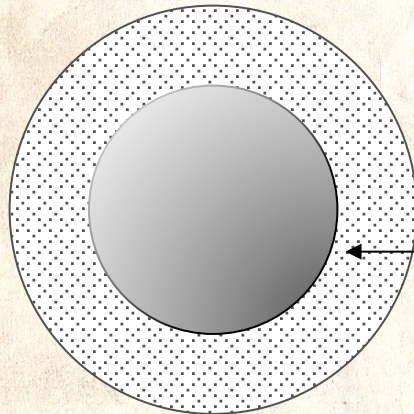
$M_c \propto n R_c^3 \propto 1/n^2$

$\Rightarrow$  doubler la densité diminue la masse critique d'un facteur 4

$\Rightarrow$  intérêt à comprimer fortement

# RÉFLECTEUR TAMPON

- Réflecteur de neutrons  $\Rightarrow$  diminution de la masse critique
- $\Rightarrow$  entourer le cœur par un réflecteur ou tampon (*tamper*)



- Une équation pour le cœur (fissions)

$$dN/dt = (\nu - 1)N V / \lambda_f + \lambda_t V / 3 \Delta N$$

- Une équation pour l'enveloppe (~~fissions~~)

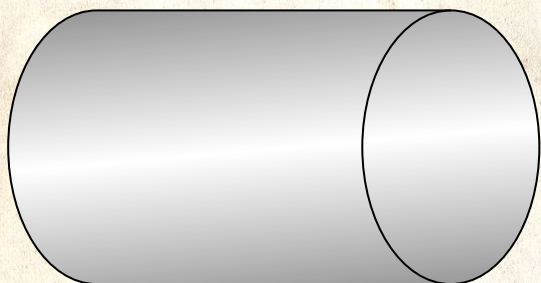
$$dN^*/dt = \lambda_t^* V / 3 \Delta N^* \quad [\lambda_t^* \neq \lambda_t]$$

- et raccordement des densités et des flux

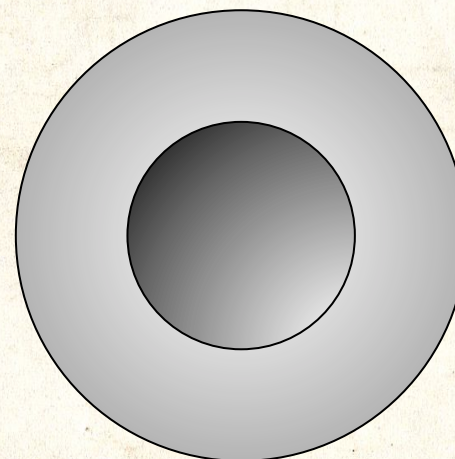
- Pour une enveloppe de rayon infini,  $R_c \rightarrow R_c/2$  ( $\Rightarrow M_c \rightarrow M_c/8$ )
- Pour une enveloppe de rayon fini, le gain est moindre et dépend de (la densité  $n^*$  et de la section efficace de diffusion  $\sigma^*$  du matériau) de l'enveloppe
- Carbure de tungstène  $\Rightarrow R_c(\text{U235}) \searrow 6,2$  cm et  $M_c(\text{U235}) \searrow 19$  kg pour une enveloppe de 18 cm d'épaisseur ( $\rightarrow 300$  kg)

# ET SI LE CŒUR N'EST PAS UNE SPHÈRE PLEINE?

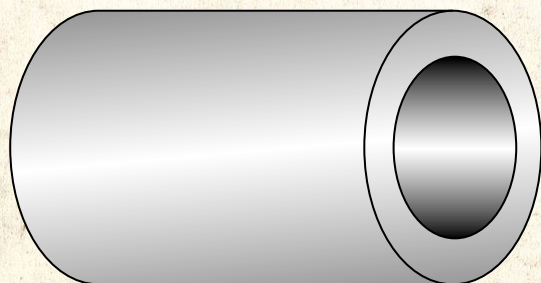
○ Un cylindre plein ?



○ Une sphère creuse ?



○ Un cylindre creux ?



○ Le libre parcours moyen des neutrons est de la taille (du cœur) de la bombe

○ ⇒ une « simple » théorie de diffusion ne suffit pas

○ ⇒ équation de Boltzmann, à résoudre numériquement

# ÉQUATION DE BOLTZMANN

○ Calcul de la densité de neutrons → équation intégrodifférentielle

○  $dN(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)/dt = [\text{fission}] - [\text{neutrons partis}] + [\text{neutrons arrivants}]$

↑                      ↑  
en *chaque* point  $\{\mathbf{x}, \mathbf{v}\}$

vers  $\{\mathbf{x}', \mathbf{v}'\}$   
→ intégrer sur  
*toutes* les positions  
et *toutes* les vitesses

depuis  $\{\mathbf{x}'', \mathbf{v}''\}$   
→ intégrer sur  
*toutes* les positions  
et *toutes* les vitesses

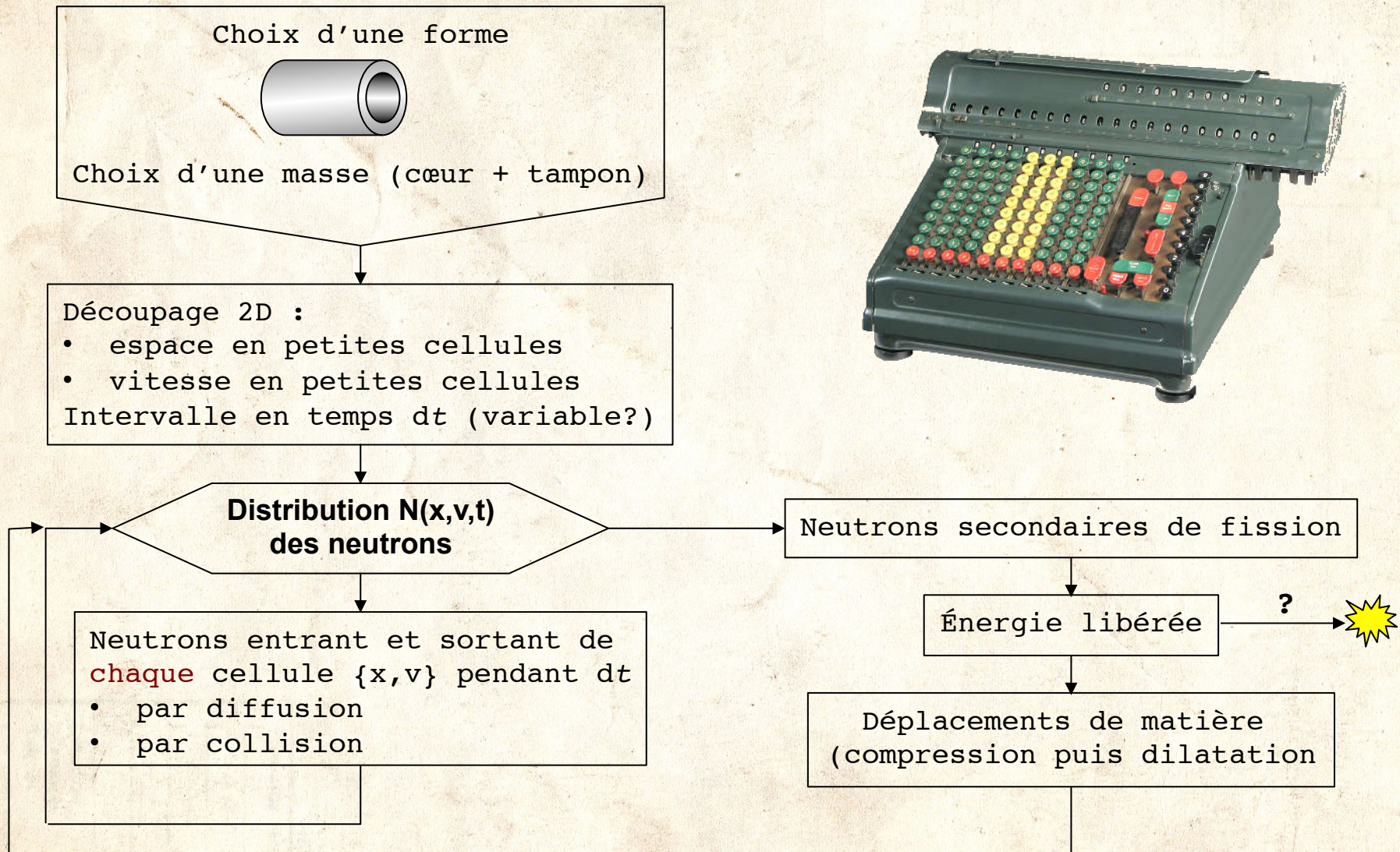
↑                      ↑  
**diffusion et collisions**

○ ⇒ résolution numérique

○ Le calcul de la masse critique n'était pas le seul à résoudre de manière numérique

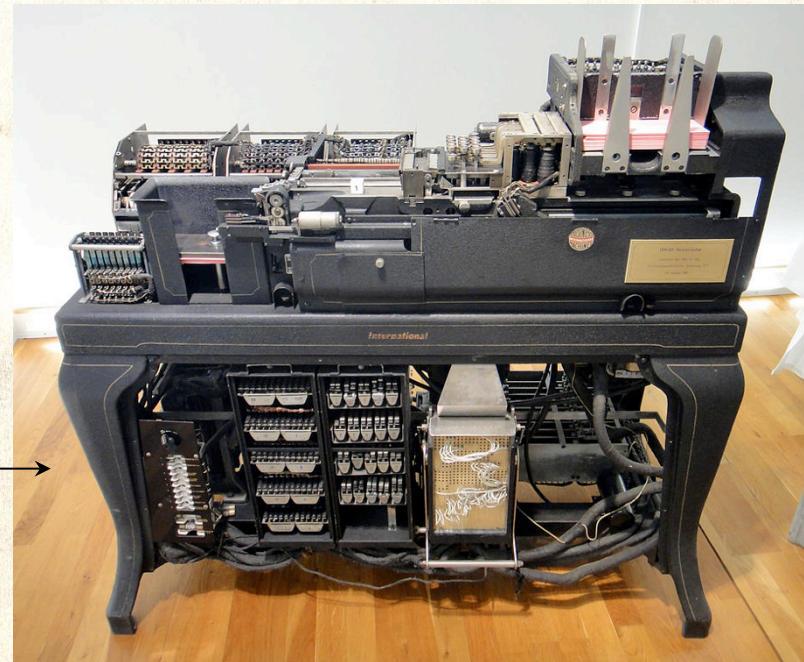
- implosion puis explosion
- inertie du tampon entourant le cœur
- transferts d'énergie produits de fission → rayonnement
- opacité et hydrodynamique de la boule de feu
- onde de choc directe et réfléchiée par le sol

# CALCUL D'UNE MASSE CRITIQUE

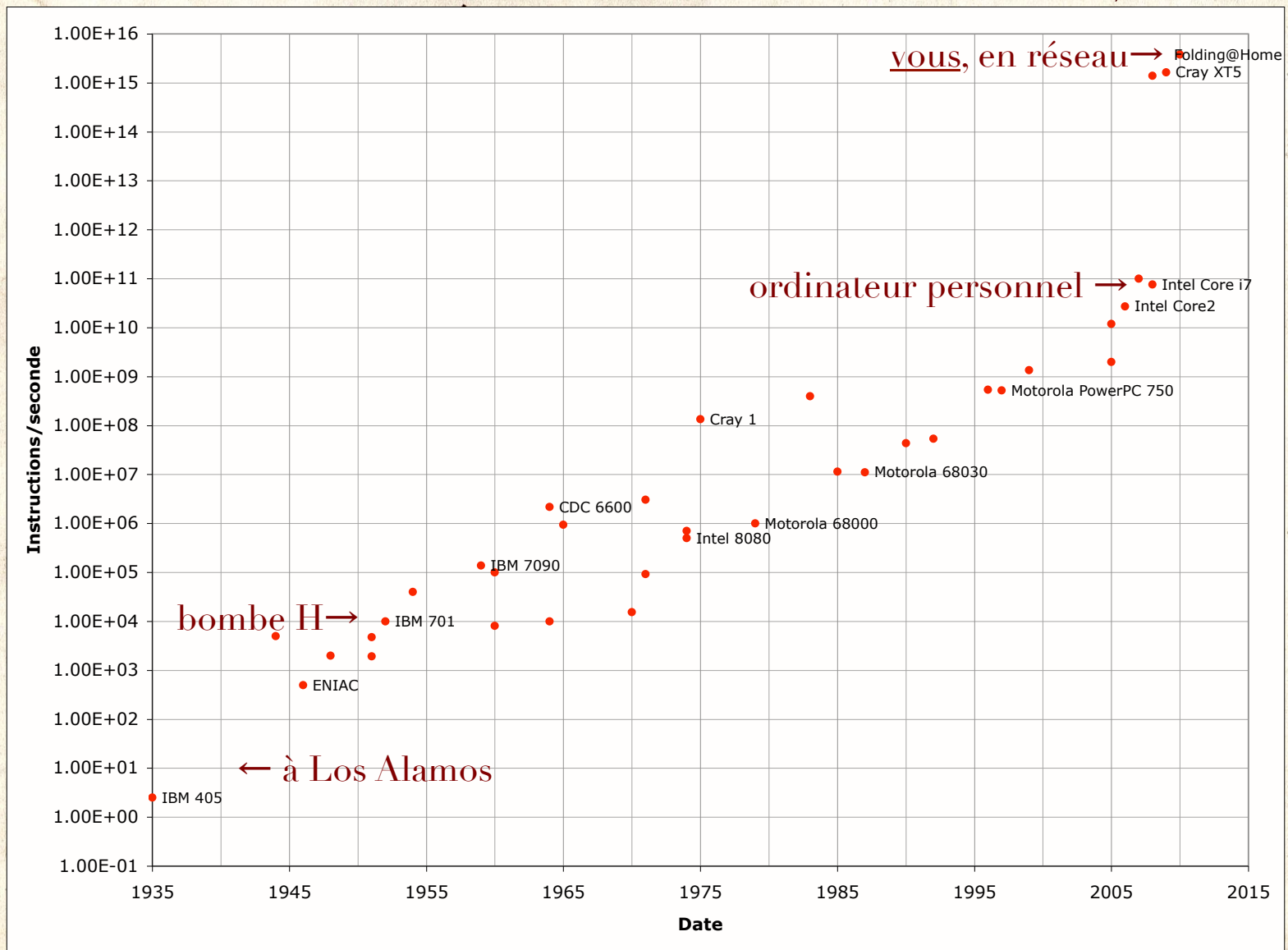


# CALCUL NUMÉRIQUE

- Estimation du temps [pour *chaque* forme et masse]
  - Nombre  $N$  de cellules  $\{x,v\}$
  - $Q$  additions, soustractions, multiplications et divisions pour *chaque paire* de cellules
  - $\Rightarrow QN^2T$  opérations pour l'ensemble des  $T$  pas en temps
- $N = 10 \cdot 10 \cdot 10 = 10^3$  (strict minimum),  $Q \sim 10$  et  $T = 100$
- $\Rightarrow 10^9$  opérations  $\Rightarrow 10^9$  s = 30 ans
- 3 équipes de  $\sim 30$  opératrices se relayant 24h/24, 6j/7
- $\Rightarrow$  4 mois/calcul fin 1943 avec les calculatrices électromécaniques
- $\Rightarrow$  4 semaines mi 1944 avec les tabulatrices IBM 601
- $\Rightarrow$  1 semaine fin 1944 (Feynman)



# (ÉVOLUTION DE LA PUISSANCE DE CALCUL)



# CHATOUILLER LA QUEUE DU DRAGON

- Dilemme
  - masse critique sous-évaluée → fiasco → milliards de dollars perdus (et secrets donnés à l'ennemi)
  - masse critique surévaluée → explosion prématurée à Los Alamos
- ⇒ Contrôle expérimental des valeurs de masse critique
- Otto Frisch ↗ peu à peu la masse de matière fissile → mesure du facteur de multiplication sous-critique  $M = 1/(1-k)$
- Janvier-mars 1945 : Uranium 235
- Avril-juin 1945 : Plutonium 239
- Dangers
  - Fuite d'eau → uranium brièvement supercritique (4/6/45)
  - Fausse manœuvre avec une brique de tungstène sur une sphère de plutonium → irradiation mortelle (5 Sv) de H. Daghlian (21/8/45)





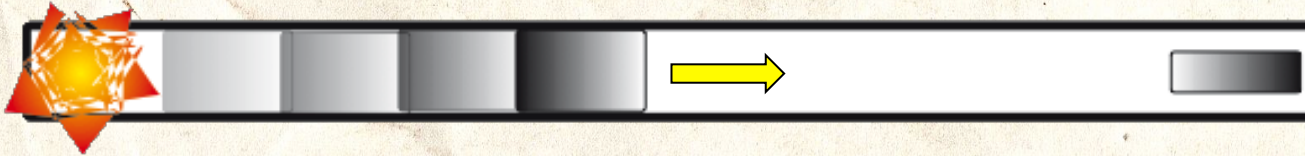
# **'THIN MAN & LITTLE BOY**

# PRÉDÉTONATION

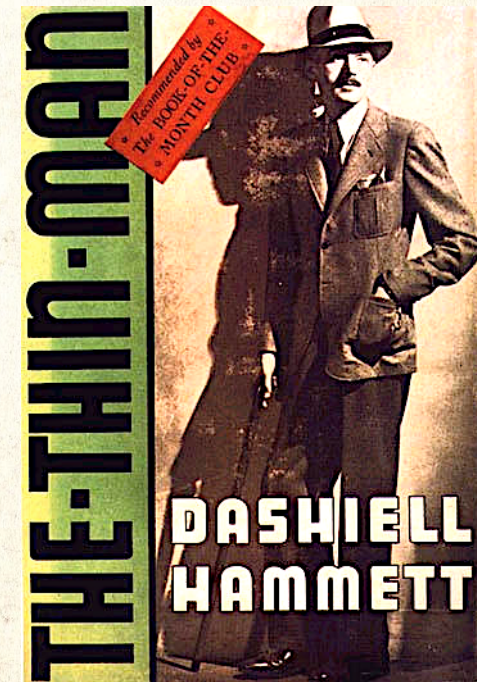
- Masse > masse critique  $\Rightarrow$  réaction en chaîne divergente possible
- ... mais pas obligatoire : il faut des neutrons (initiateur) !
  - Source béryllium-radon ou béryllium-polonium ( $\text{Be} + \alpha \rightarrow \text{n} + \text{C}$ )
  - Neutrons du rayonnement cosmique 150 neutrons/s/m<sup>2</sup>  $\rightarrow$  négligeable
  - Neutrons de **fission spontanée** N neutrons/kg/s
- Durée T d'assemblage d'une masse M telle que probabilité > 90% qu'il n'y ait pas de neutron venant d'une fission spontanée
  - s'il y en a un, il a une probabilité ~90% de s'échapper sans provoquer de nouvelle fission ( $\lambda_{\text{fission}} \sim 15 \text{ cm} \sim$  taille du cœur)
  - $\Rightarrow$  risque de fiasco de 1%
- $\Leftrightarrow \text{NTM} < 0,1 \Rightarrow T < 0,1/\text{NM}$
- Uranium (238) N ~ 14, M ~ 50  $\Rightarrow T < 140 \mu\text{s}$  et U235 ?
- Plutonium (239) N ~ 22, M ~ 50  $\Rightarrow T < 90 \mu\text{s}$  et Pu240 ?
- Cœur de 10 cm  $\Rightarrow$  vitesse de rapprochement > 10 cm/100  $\mu\text{s}$  = **1000 m/s**

# ASSEMBLAGE

- Un « simple » canon envoyant un projectile sur une cible

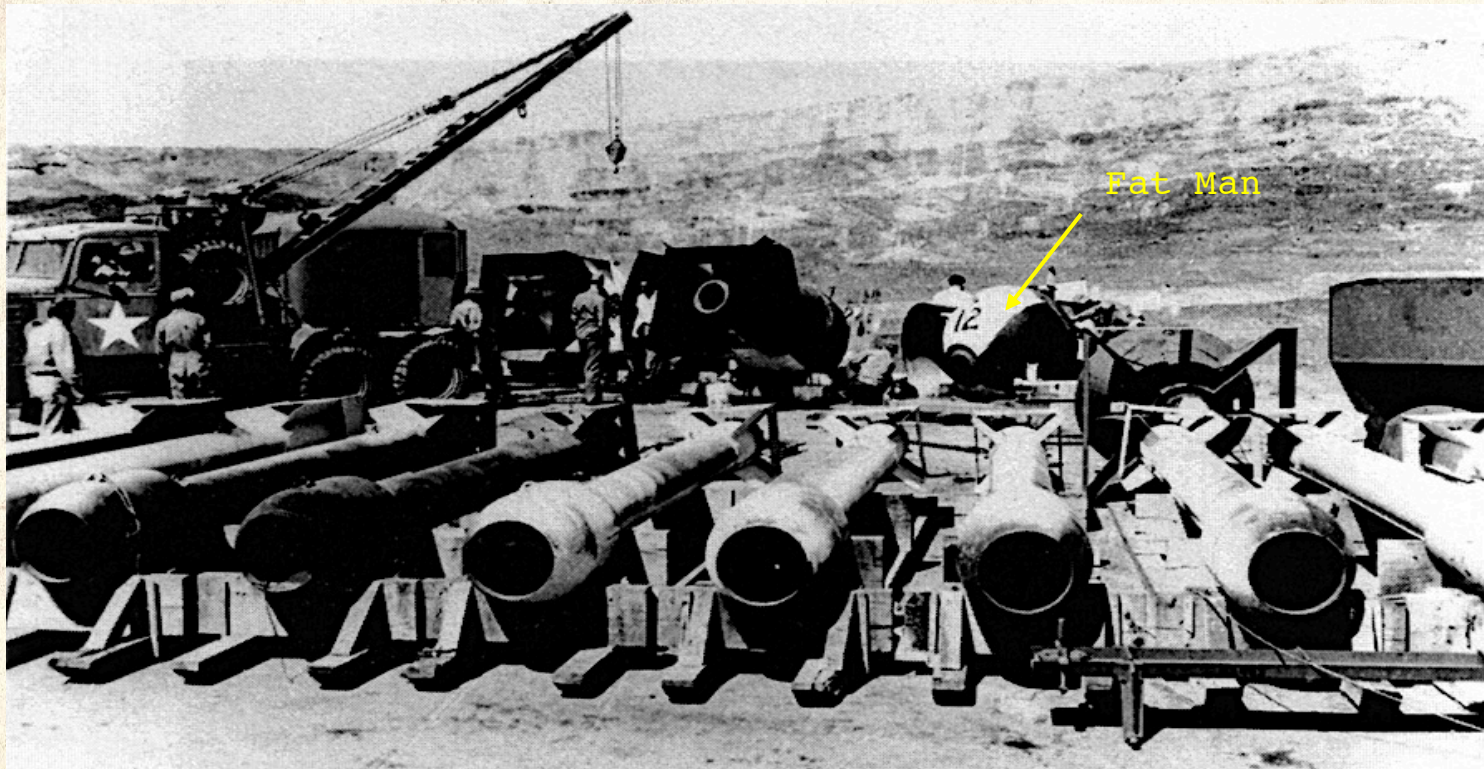


- Formes telles que
  - chaque élément  $\ll$  masse critique
  - et somme  $\gg$  masse critique
- $\Rightarrow$  cylindre creux venant emboîter un cylindre plein
- Vitesse d'un projectile  $\nearrow$  longueur du canon
- 1000 m/s  $\Rightarrow$  canon de 5 m de long
- Bombe longue et étroite  $\rightarrow$  *Thin Man*
- Taux de fission spontanée U235  $\ll$  U238  $\Rightarrow$  canon raccourci à 2,5 m  $\rightarrow$  *Little Boy*



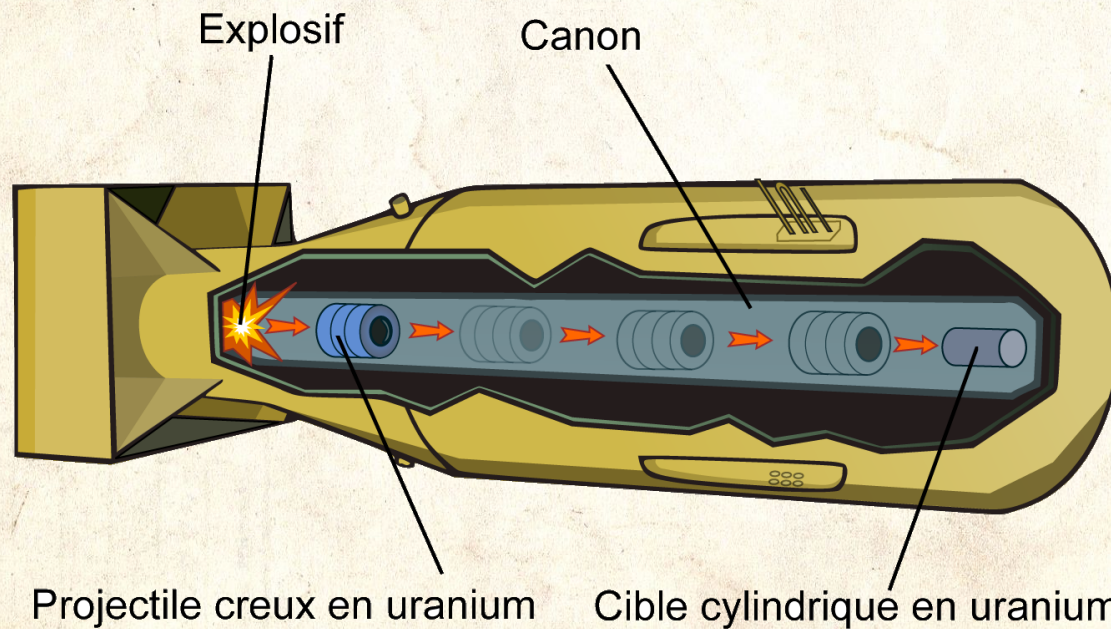
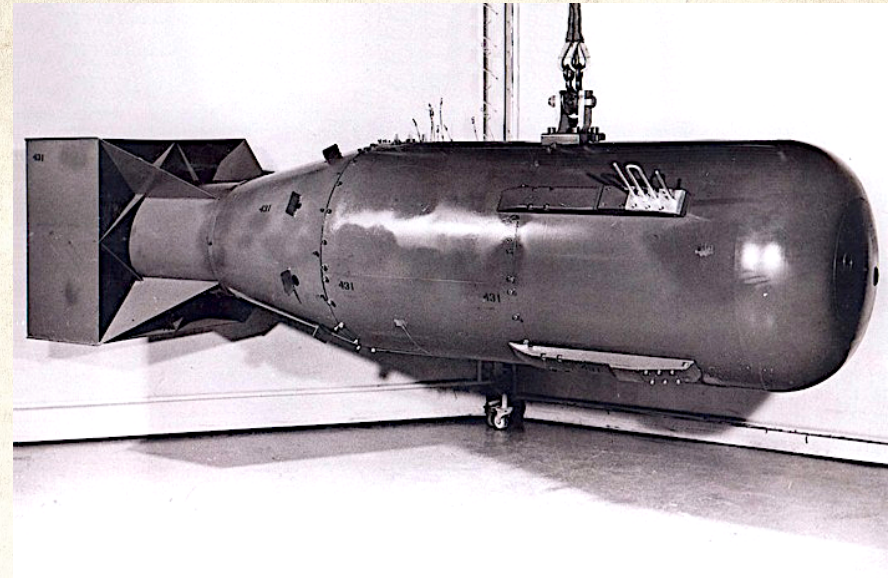
# THIN MAN : UN CANON POUR LE PLUTONIUM

- Longueur: 5,50 m
  - Diamètre: 0,61 m
  - Masse: 3 400 kg
  - Instabilité aérodynamique → nez bulbeux
- Les dimensions d'une torpille standard, mais deux fois plus lourde, et prévue pour être larguée à haute altitude



# 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

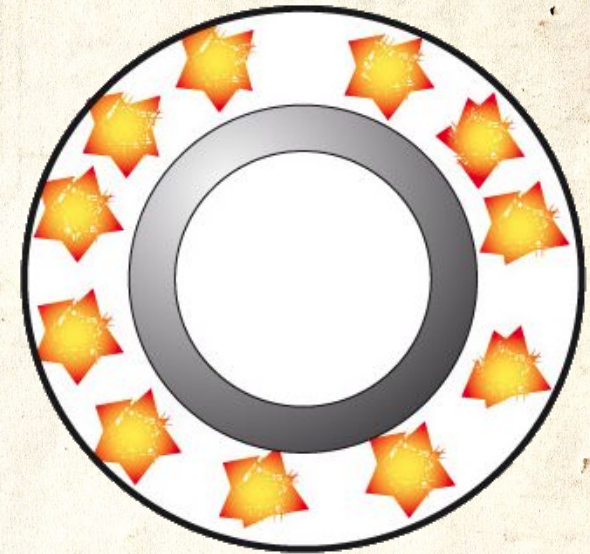


# FAT MAN



# IMPLOSION

- Nombreux avantages *a priori*
  - Explosion centripète s'opposant à la dilatation due à la fission  $\Rightarrow$  rendement  $\nearrow$
  - Masse critique  $\propto 1/\text{Densité}^2 \Rightarrow$  besoin de **beaucoup moins** de matière fissile
  - et pas de risque d'explosion prématurée !
  - Assemblage beaucoup plus rapide qu'avec un canon  $\Rightarrow$  moins de risque de **prédétonation**
- **Inconvénient : parfaite synchronisation de l'explosion**
- Idée avancée par Tolman début 1943 (?) et par Neddermeyer en avril 1943
- Nombreux essais infructueux de Neddermeyer jusqu'à l'automne 1943
- Suggestion par von Neumann d'augmenter fortement la quantité d'explosif  $\rightarrow$  amélioration, mais insuffisante
- Printemps 1944 : remplacement de Neddermeyer par Kistiakowsky, mais la bombe sphérique *Fat Man* reste dans l'impasse



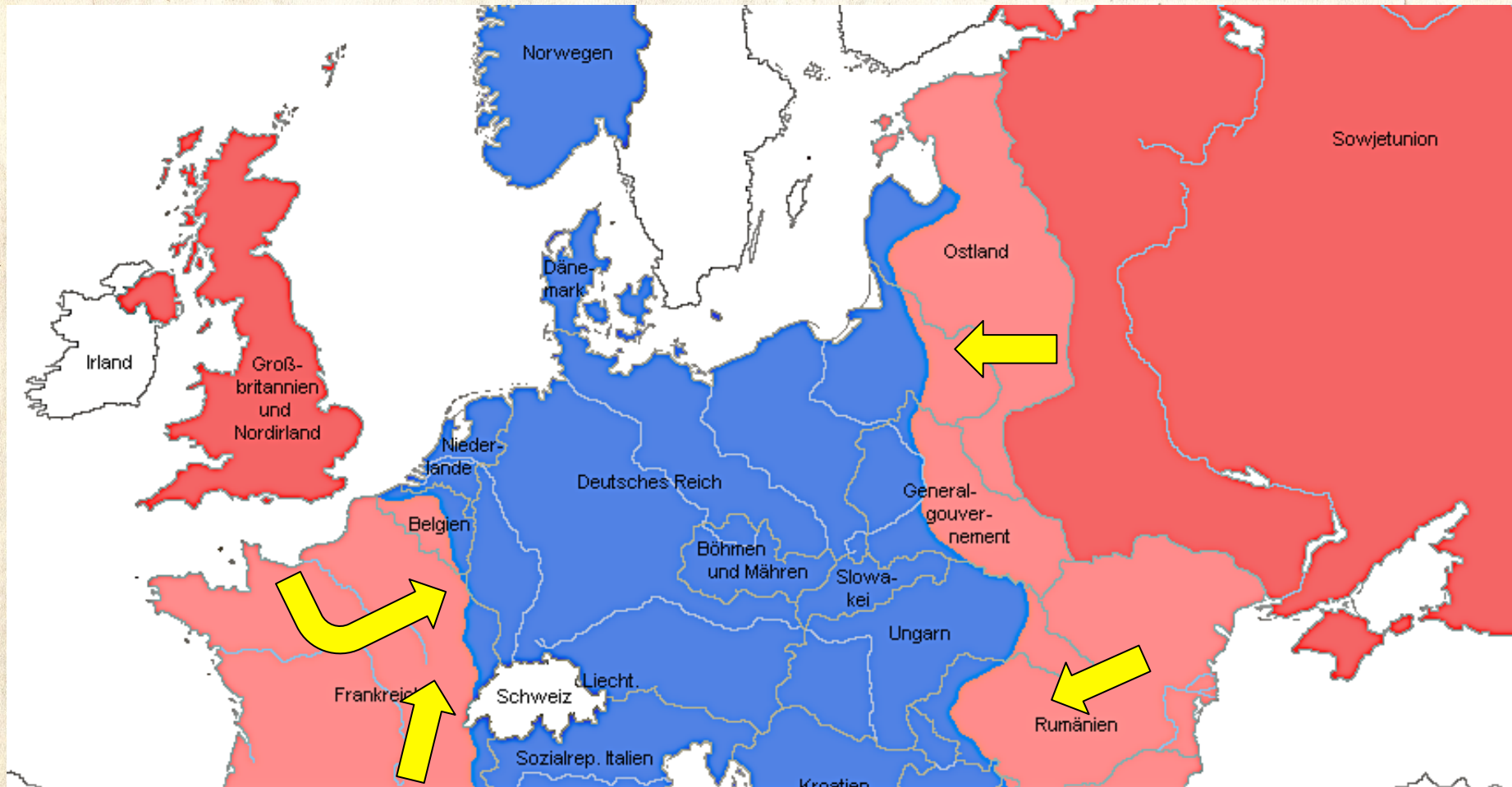
# LA CRISE DE JUIN 1944

- Pas d'uranium 235 disponible dans un avenir prévisible
  - calutrons (Y-12) manquant d'efficacité
  - diffusion gazeuse (K-25) pas au point
  - ☞ *Little Boy* au point, mais sans U235
- Fission spontanée du Plutonium 240
  - 920 000 neutrons/kg/j
  - (40 000 fois Pu239)
  - plutonium des réacteurs : ~ 1% Pu240
  - ⇒ durée d'assemblage  $\ll 1 \mu\text{s}$  ⇒ *Thin Man* abandonné le 17 juillet
- Et aucune implosion réussie ⇒ *Fat Man* en suspens
- ⇒ réorganisation complète de Los Alamos pour réussir une implosion
- ⇒ construction de S-50 à Oak Ridge, doublement du nombre de calutrons et accentuation des efforts sur les barrières poreuses de K-25

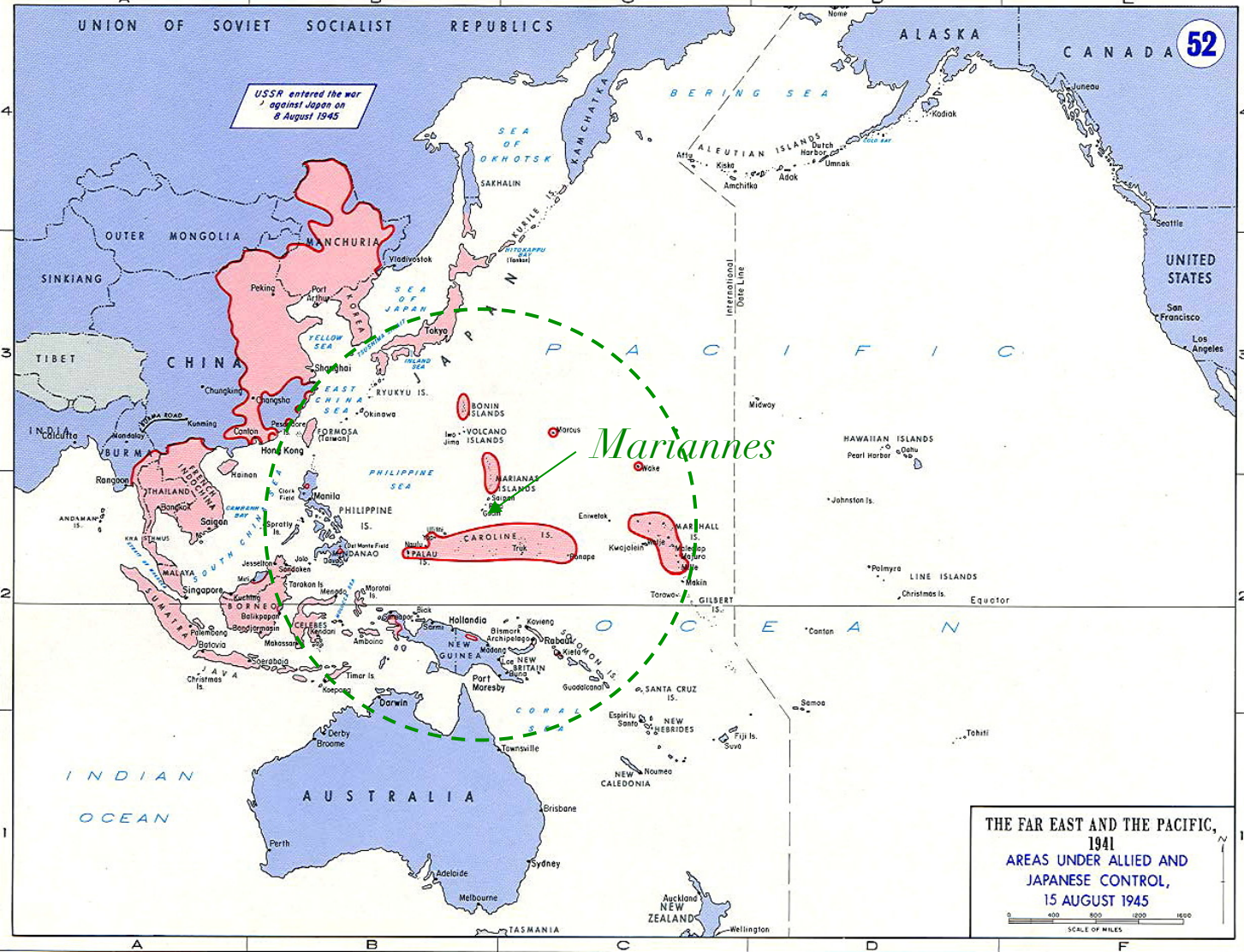




# SITUATION MILITAIRE, AOÛT 1944 (EUROPE)

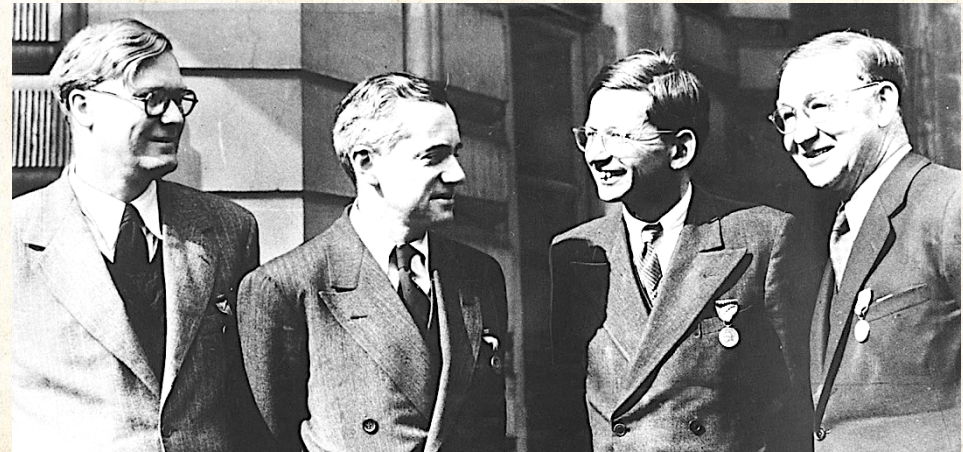


# SITUATION MILITAIRE, AOÛT 1945 (PACIFIQUE)



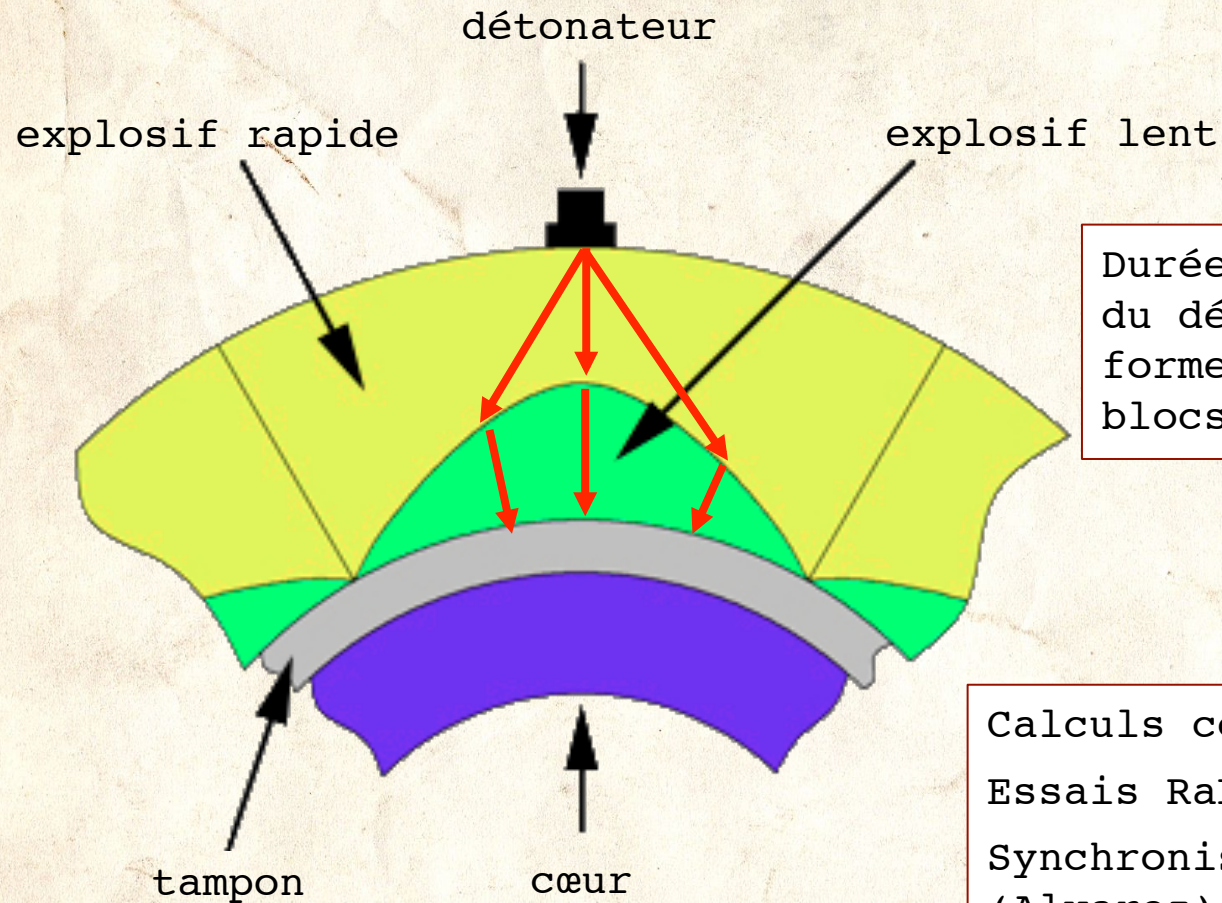
# LA MISSION BRITANNIQUE

- Accords de Québec (1943) → envoi de physiciens britanniques ( $\pm$ ) à Los Alamos au printemps 1944
- Principales contributions
  - détermination expérimentale des masses critiques (Frisch)
  - création d'une onde choc **convergente** comprimant **uniformément** un cœur de plutonium (Taylor, Tuck, avec Kistiakowsky)
  - calcul de la boule de feu suivant l'explosion (Penney, Fuchs, avec Bethe)
- Idée d'utiliser 2 types d'explosifs (lent et rapide)
- ⇒ « lentilles explosives »

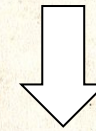


William Penney, Otto Frisch, Rudolf Peierls et John Cockcroft

# LENTILLES EXPLOSIVES

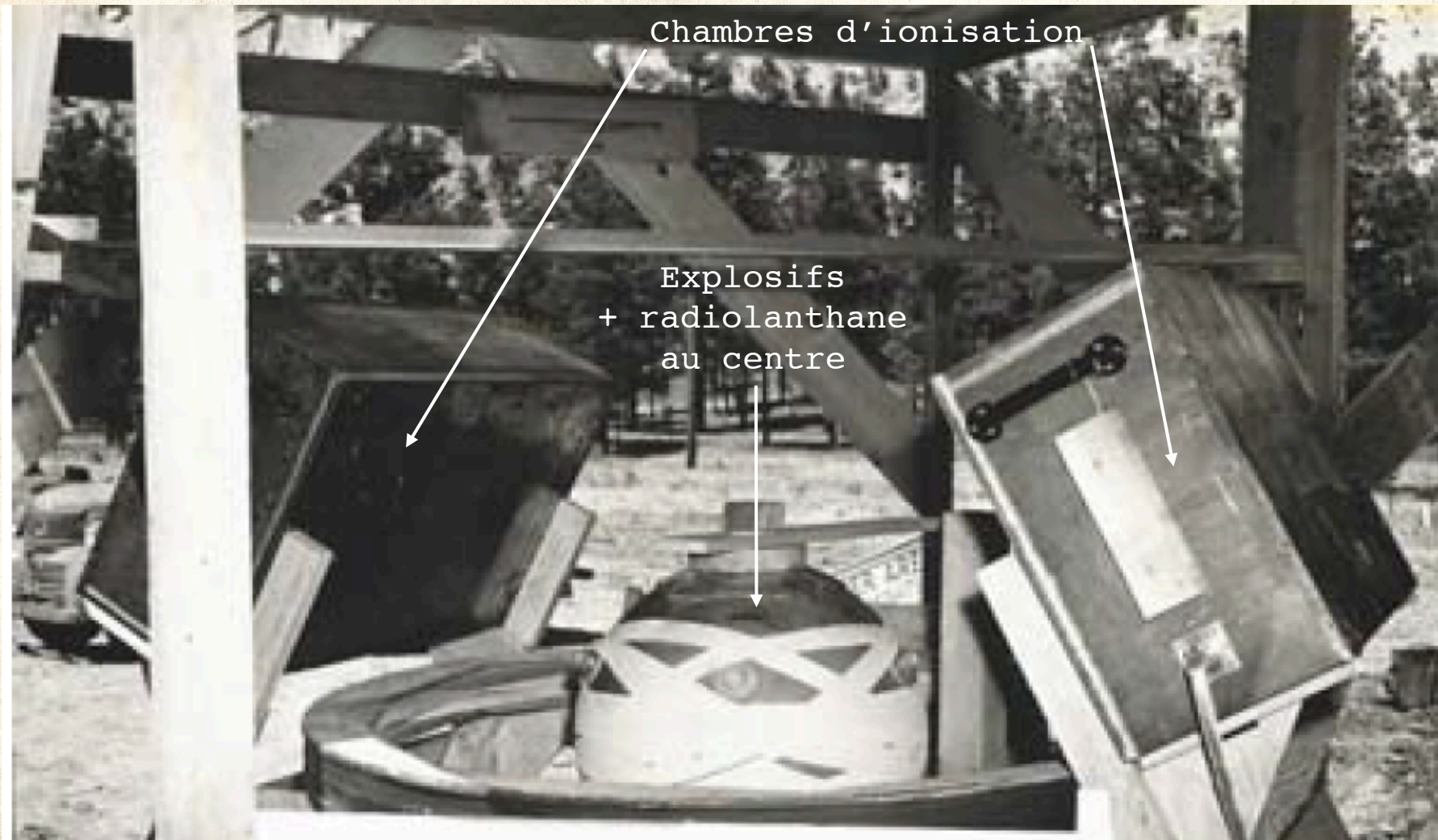


Durée identique des trajets du détonateur au tampon  $\Rightarrow$  forme *très précise* des blocs d'explosifs



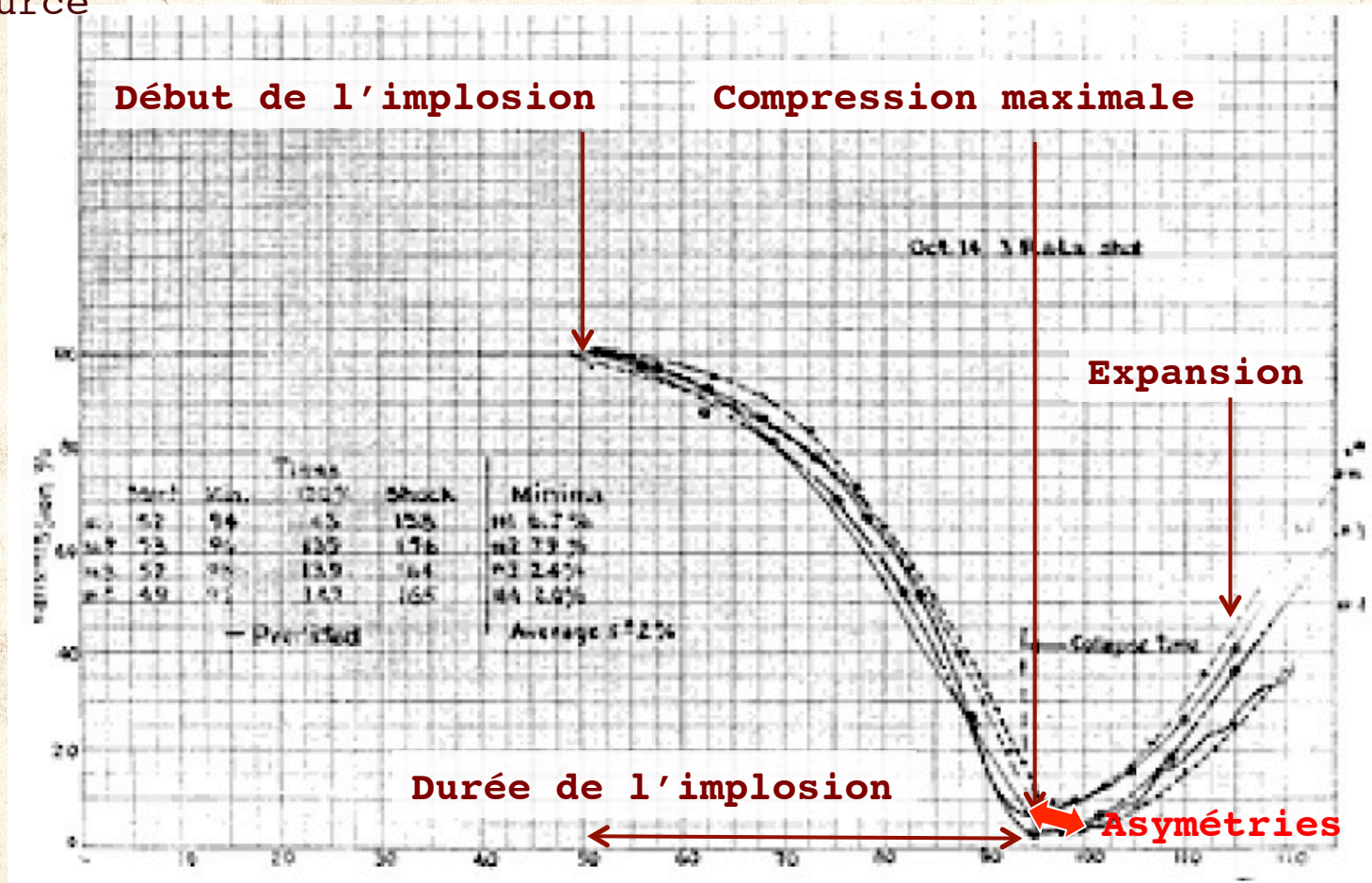
Calculs complexes (von Neumann)  
Essais RaLa (Serber, Rossi)  
Synchronisation des détonateurs (Alvarez)

# ESSAIS D'IMPLOSION RALA

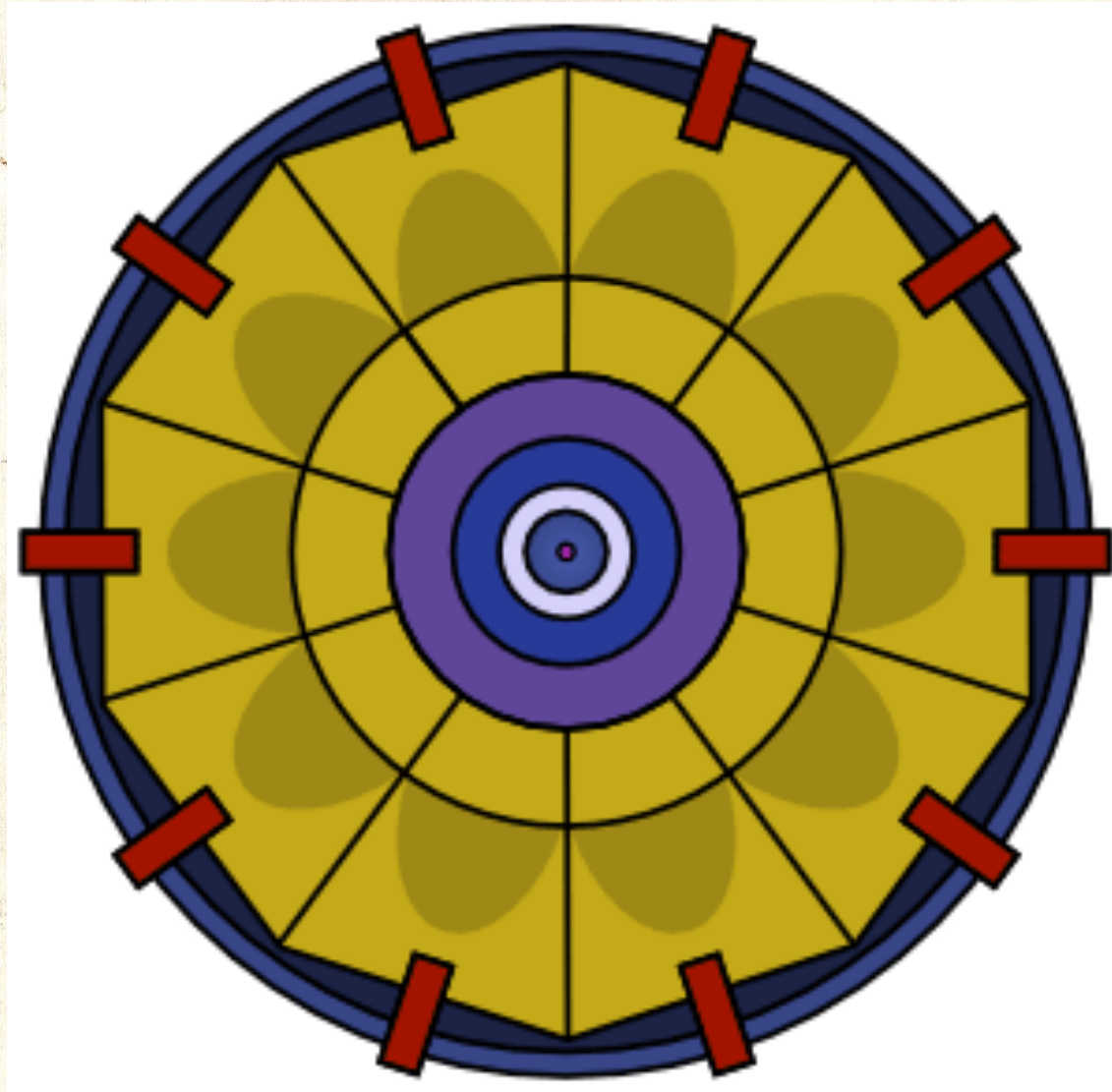


# ESSAIS D'IMPLOSION RALA

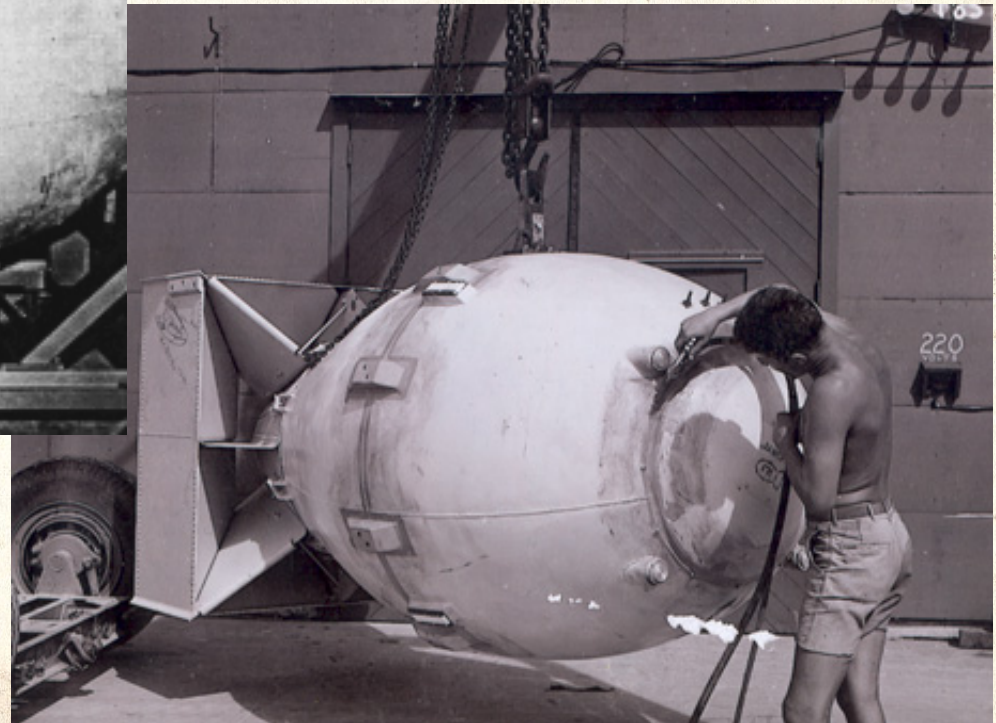
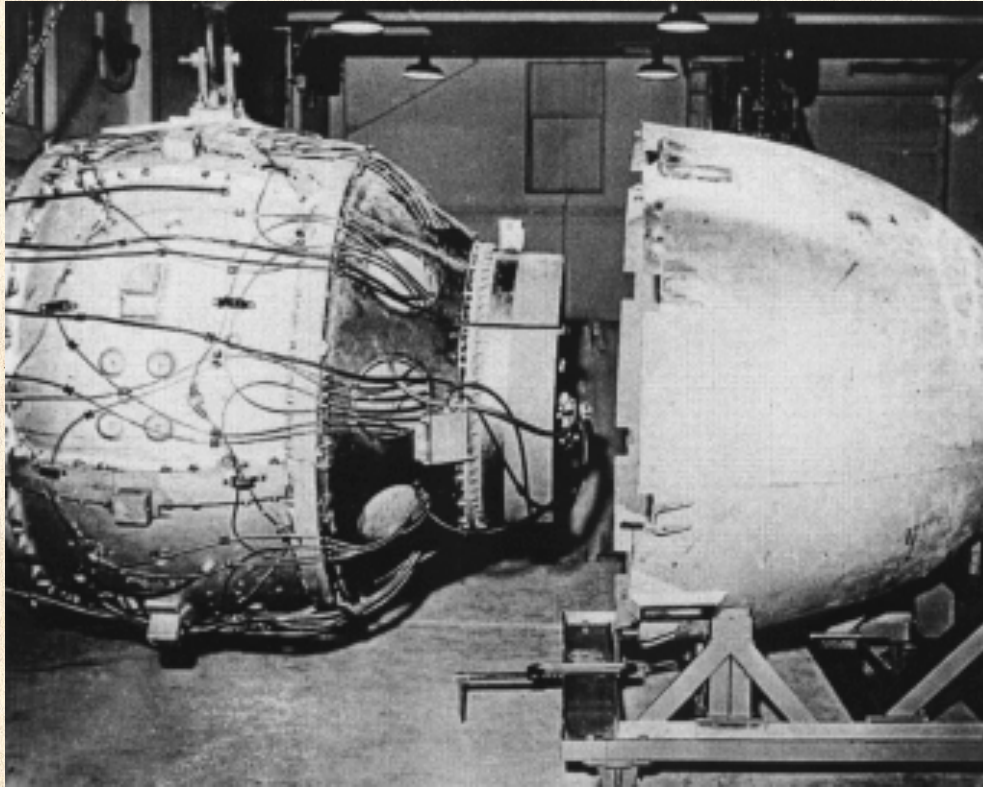
- Lanthane 140 (1 kCi) → cérium 140 en 40 h →  $\gamma$  de désexcitation plus ou moins absorbés selon densité de l'enveloppe autour de la source



# IMPLOSION



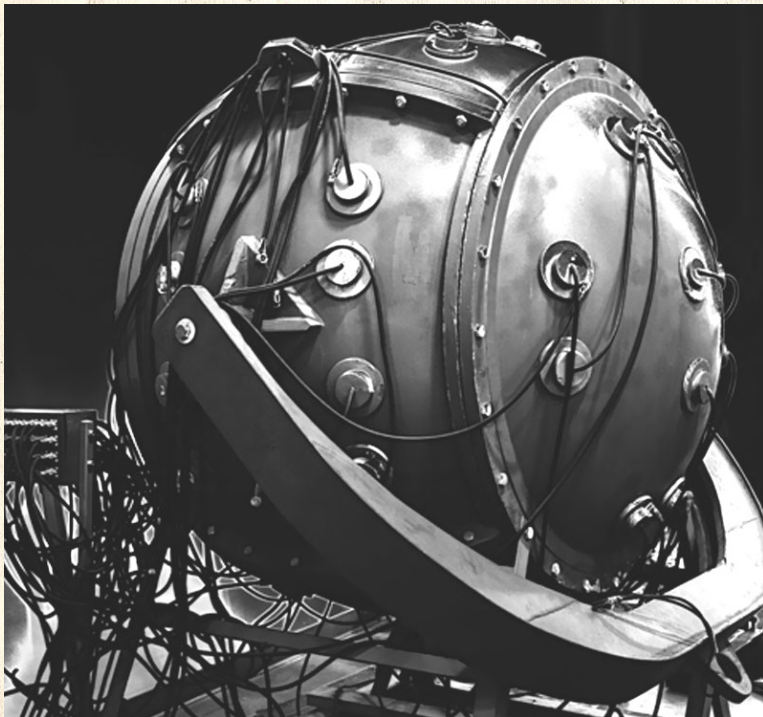
# FAT MAN DEVIENT OPÉRATIONNEL



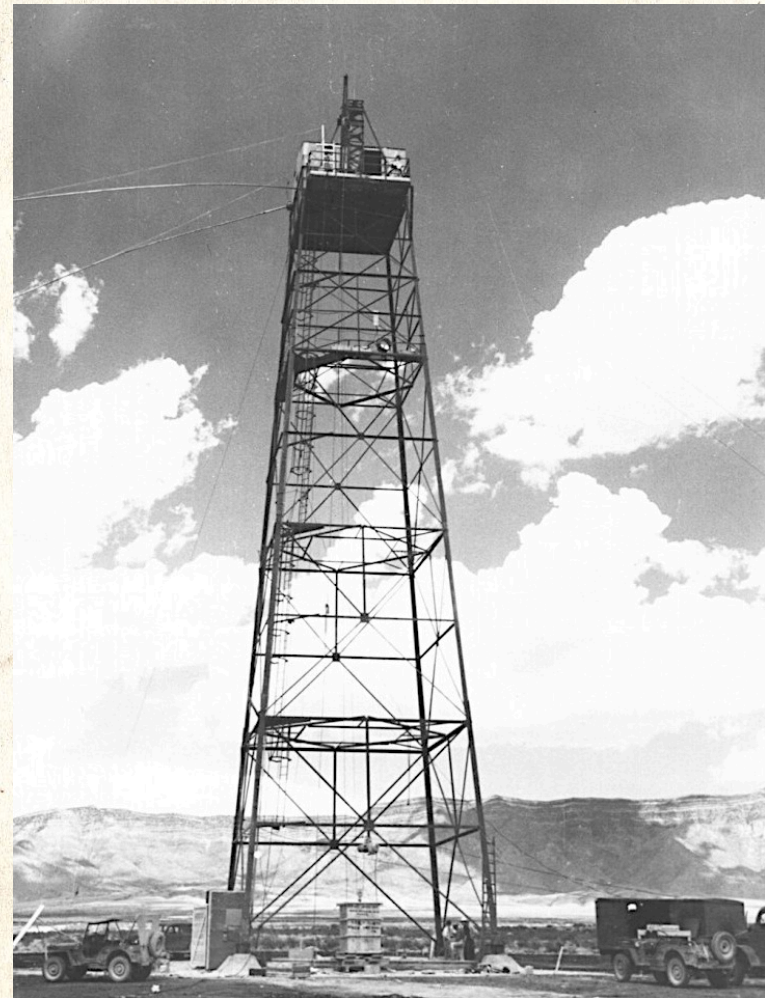


# TRINITY

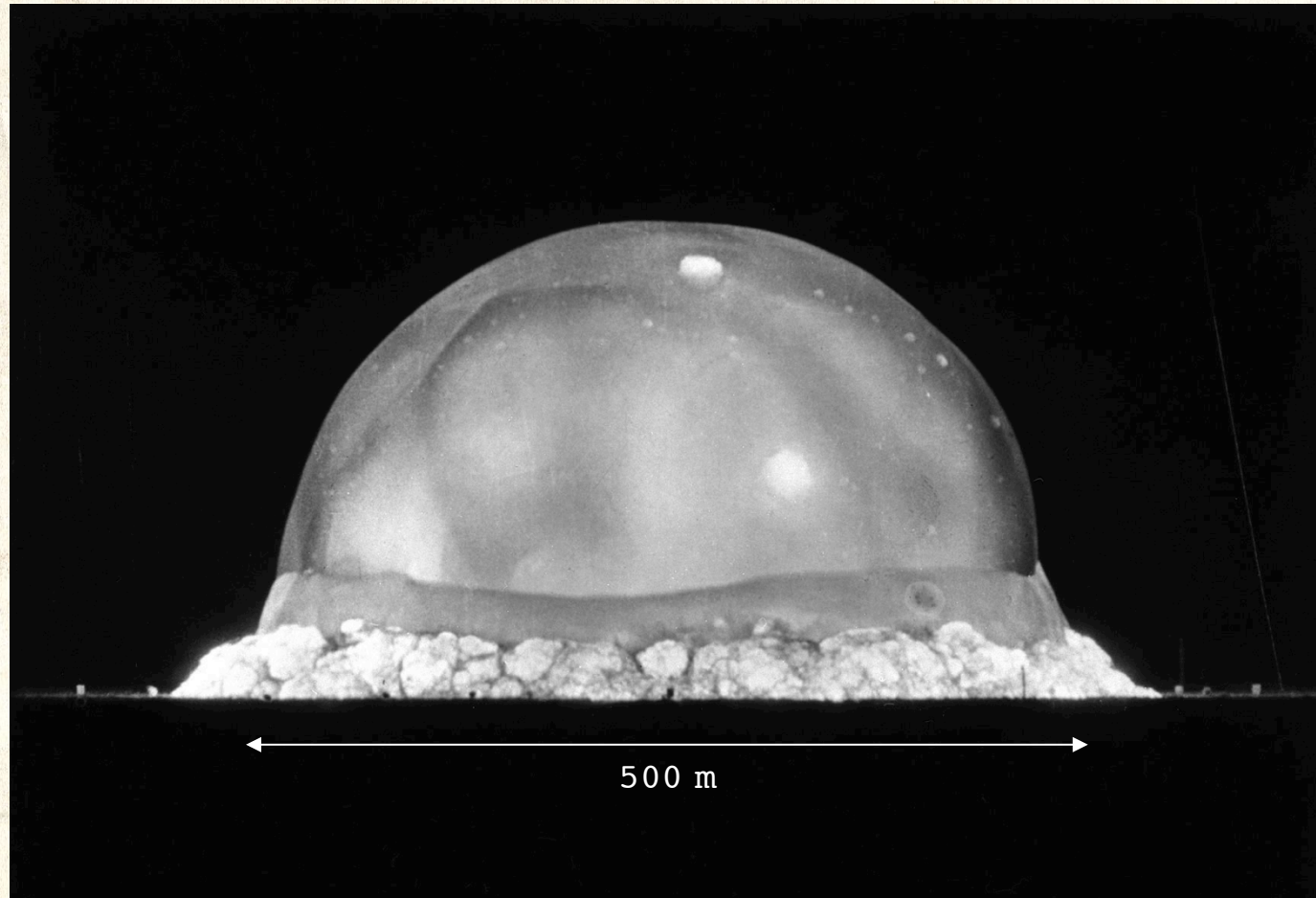
○ Gadget



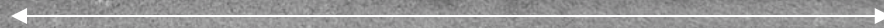
○ Alamogordo



# 25 MILLISECONDES



8 SECONDES



500 m

À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!