

PETITE HISTOIRE
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

21 – ARMES NUCLÉAIRES

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

EXPLOSION NUCLÉAIRE



EFFICACITÉ D'UNE BOMBE À FISSION

- **Durée de la fission ~ durée de la dilatation**
- ⇒ l'efficacité dépend de façon cruciale des dernières étapes de la fission
 - « première criticité »
 - réaction en chaîne divergeant exponentiellement
 - libération d'énergie par fission
 - augmentation de la température du cœur
 - dilatation du cœur
 - « seconde criticité »
 - arrêt des fissions
 - expansion de la boule de feu
- ⇒ rendement faible (1 à 2%) pour une bombe-canon
- ⇒ rendement meilleur (10 à 15%) pour une bombe à implosion (l'implosion freine la dilatation → ajoute quelques étapes à la réaction en chaîne)

ORDRES DE GRANDEUR

○ Approximations inessentielles

- $\nu = 2$ neutrons/fission
- distance entre 2 fissions **successives** $\lambda_f \sim 10$ cm
- vitesse du neutron $\sim 10^7$ m/s
- \Rightarrow intervalle $\sim 10^{-8}$ s = 0,01 μ s
- 50 kg U235 $\sim 10^{26}$ noyaux
- $10^{26} \sim 2^{84}$
- $\Rightarrow \sim 84$ générations pour tout fissionner
- **ou ~ 78 pour fissionner 1 kg**

○ D'où

- **fission en moins de 1 μ s**
- énergie \nearrow exponentiellement:
1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 16...
- $\sum 2^k = 2^n - 1$
- \Rightarrow l'énergie de la génération n est $>$ l'énergie totale des toutes les générations antérieures

\Rightarrow l'énergie est libérée en moins de 0,1 μ s

○ 2 erreurs, qui se compensent

- *allumeur Po-Be \rightarrow 100 ($\sim 2^7$) neutrons en 10 ns \rightarrow 7 générations de moins*
- *intervalle variable entre fissions \rightarrow les générations se mêlent*

- Mais cette énergie chauffe \Rightarrow dilate le cœur \Rightarrow il devient sous-critique

- **Avant ou après la fin de la fission ?**

DILATATION DU CŒUR

- Le nombre de fissions/ augmente exponentiellement

- $N_f(t) = N_f(0) \exp\{-\gamma t\}$

$$\gamma = (\nu - 1) V \sigma_f n - \frac{V \pi^2}{3 \sigma_t} \frac{1}{n R^2}$$

- le nombre ν de neutrons secondaires, leur vitesse V et leurs sections efficaces σ_f et σ_t restent \sim constantes
- de même que la masse M du cœur
- pas la densité $n \propto M/R^3$ des noyaux ni le rayon R du cœur

- $\Rightarrow \gamma = aM/R^3 - bR/M$

- Masse critique $M_c \Leftrightarrow \gamma = 0$

- $\Rightarrow a/b = R_c^4/M_c^2$

- Masse $M = k M_c$

- $\Rightarrow R_0 = k^{1/3} R_c \Leftrightarrow R_c = k^{-1/3} R_0$

- Dilatation $R_0 \nearrow$ jusqu'à R tel que $\gamma = 0$

- $\Rightarrow R^4 = (a/b) M^2 = (R_c^4/M_c^2) k^2 M_c^2$

- $\Rightarrow R^4 = k^{-4/3} R_0^4 k^2 = k^{2/3} R_0^4$

- $\Rightarrow R = R_0 (M/M_c)^{1/6}$

- $\Rightarrow M = 4 M_c \Rightarrow R = 1,26 R_0$

- $\Rightarrow R_0 = 10 \text{ cm} \Rightarrow R = 12 \text{ cm}$

- Durée de dilatation

- vitesse des noyaux $\sim 6 \cdot 10^4 \text{ m/s}$

- $\Rightarrow 0,02/6 \cdot 10^4 \text{ s} \sim 0,3 \mu\text{s}$

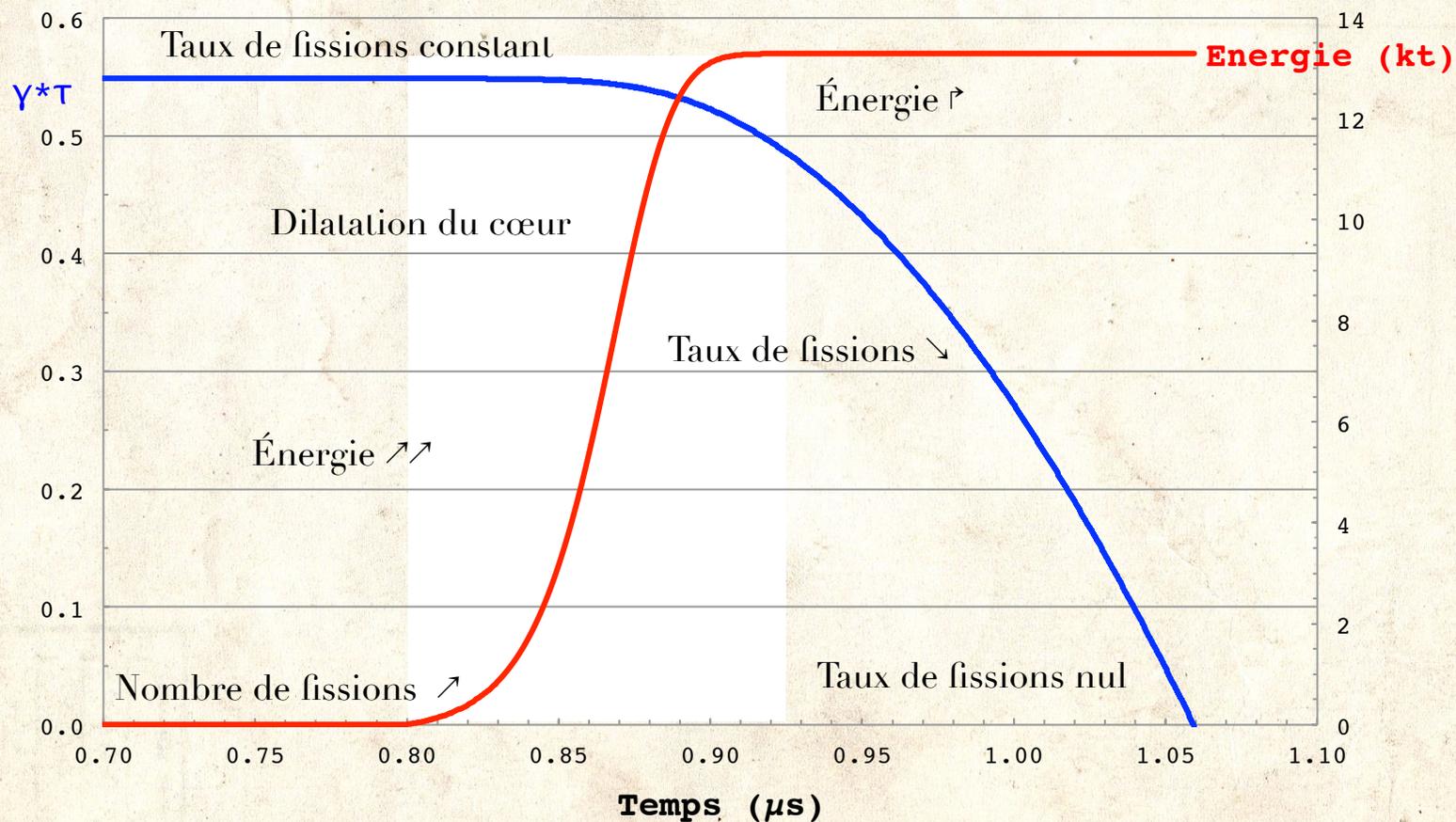
Calcul simple

Masse M en eV/c^2	$\rightarrow v = c \sqrt{E/M}$
Énergie E en eV	

EFFICACITÉ D'UNE BOMBE À FISSION

○ On ne peut éviter le calcul numérique

○ ⇒

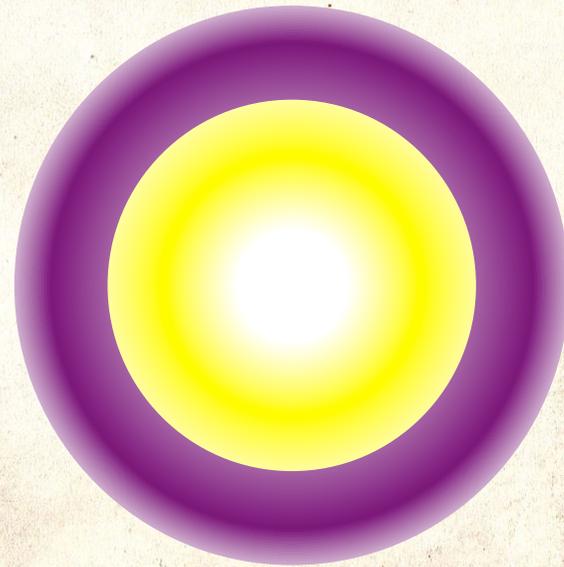


PREMIÈRE MICROSECONDE

- Chaque fission libère ~ 210 MeV
 - 10% «perdus» (neutrinos, transmutations des fragments de fission)
 - 7% en rayons gamma
 - 3% énergie cinétique des neutrons secondaires
 - 80% énergie cinétique des fragments de fission
- Collisions des fragments avec les autres noyaux ⇒ thermalisation
- 20 kt TNT ~ 10^{14} J = 100 TJ
- ~ $5 \cdot 10^{26}$ MeV ⇔ $2,5 \cdot 10^{24}$ fissions ⇔ 1 kg U235
- Énergie libérée dans un volume initialement $< 1 \text{ dm}^3$
 - ⇒ densité d'énergie ~ 10^{17} J/m^3
- Corps noir ⇒ densité d'énergie du rayonnement ~ $10^{-15} \text{ T}^4 \text{ J/m}^3$ (loi de Stefan) ⇒ $T = [10^{17}/10^{-15}]^{1/4} = 10^8 \text{ K} = 100 \text{ MK}$
- ⇒ intense émission de rayons X ($E = 10 \text{ keV}$)

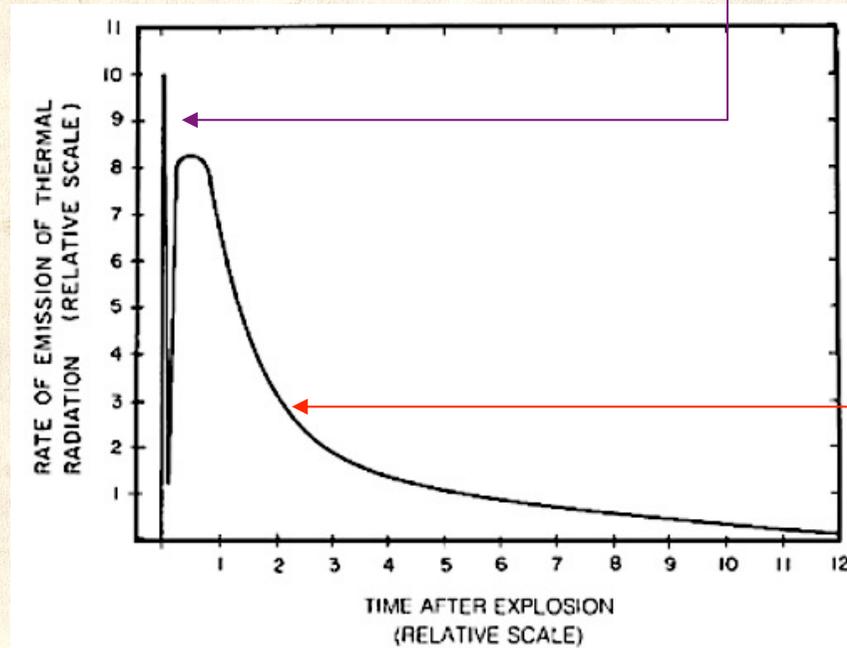
PREMIÈRE SECONDE

- Calculs en 1944-1945 par Bethe, von Neumann, Taylor et Fuchs
- Repris dans les années 1950-1960 et comparés aux observations des 520 explosions atmosphériques
- Expansion → refroidissement
- $t = 0,001 \text{ ms}$ → Boule de feu de $\varnothing 10 \text{ cm}$ et $T = 10^8 \text{ K}$
- $t = 0,01 \text{ ms}$ → $\varnothing 1 \text{ m}$ et $T = 3 \cdot 10^6 \text{ K}$
- $t = 0,1 \text{ ms}$ → $\varnothing 20 \text{ m}$, $T = 3 \cdot 10^5 \text{ K}$
- $t = 1 \text{ ms}$ → $\varnothing 1000 \text{ m}$
- Température $> 3000 \text{ K}$ → air ionisé → opaque au rayonnement
- Onde choc → compression → chauffage → rayonnement ultraviolet à l'extérieur de la boule de feu



RAYONNEMENT

- ⇒ bref (1 ms) flash UV



- $t = 100 \text{ ms}$, $T \searrow 3000 \text{ K} \Rightarrow$ l'air redevient transparent
- ⇒ **émission** (visible et infrarouge) pendant $< 1 \text{ s}$

- ⇒ effet thermique très important

1. direct (vague de chaleur $\sim 1 \text{ s}$)
2. indirect (incendies, attisés par le vent créé par la montée de la boule de feu)

- ⇒ brûlures

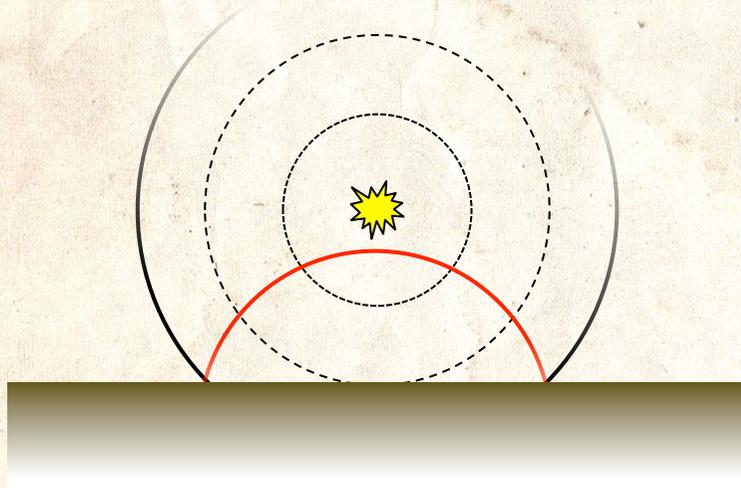
- 1° degré $\Leftrightarrow 100 \text{ kJ/m}^2$
- 2° degré $\Leftrightarrow 200 \text{ kJ/m}^2$
- 3° degré $\Leftrightarrow 350 \text{ kJ/m}^2$

- Comparaison

- Soleil : $1,4 \text{ kW/m}^2$
- Bombe 20 kt = 10^{14} J en $0,1 \text{ s}$
- ⇒ 1400 kW/m^2 à 7500 m du point d'explosion
- ⇒ **plus clair que 1000 soleils**

ONDE DE CHOC

- Explosion en altitude \Rightarrow réflexion de l'onde de choc en arrivant au sol



- L'onde réfléchiée rattrape (air déjà en mouvement) l'onde incidente **et la renforce**

- Plus l'explosion a lieu haut
 - plus la surface touchée est grande
 - mais plus la surpression est faible

- \Rightarrow altitude optimale : maximisant la surface où la surpression > 1 bar

- Effets d'une surpression
 - 0,07 bar : bris de vitres
 - 0,2 bar : destruction des maisons en bois
 - 0,4 bar : destruction des immeubles en briques
 - 0,7 bar : destruction des immeubles en béton
 - 1 bar : destruction totale

CHAMPIGNON

- *Pas une spécificité des explosions nucléaires*
- Boule de feu
- → chauffage de l'air ambiant
- → bulle de gaz chaud
- → ascension comme une montgolfière (100 m/s)
- → pression atmosphérique ↘
- → bulle s'élargit
- → forme de champignon
- Montée de la bulle ⇒ vents convergeant vers la base de la colonne



RADIOACTIVITÉ ET RAYONNEMENTS IONISANTS

- Fission [1 μ s]
 - → flux de neutrons
 - → rayons γ
 - 25% de la radioactivité
 - Rayons X [1 ms]
 - Matériau fissile *non fissionné*
 - U 235 100 MBq/kg
 - Pu 239 2 TBq/kg
 - Produits de fission [→ 1 s]
 - → rayons α (absorbés)
 - → rayons β (absorbés)
 - → rayons γ
 - 75% de la radioactivité
 - Débris activés soulevés par l'explosion (pluies noires)
 - Produits de fission à vie longue [→ 30 ans et plus]
 - Iode 131 (600 TBq/kt)
 - $\frac{1}{2}$ vie 8 jours
 - Émetteur β et γ , se fixe dans la thyroïde
 - Strontium 89 (1,4 TBq/kt)
 - $\frac{1}{2}$ vie 50 jours
 - Émetteur β , se fixe dans les os (similaire au calcium)
 - Strontium 90 (0,007 TBq/kt)
 - $\frac{1}{2}$ vie 29 ans
 - Émetteur β
 - Césium 137 (0,007 TBq/kt)
 - $\frac{1}{2}$ vie 30 ans
 - Émetteur β et γ , se fixe dans les muscles (~ potassium)
- 1 Bq = 1 désintégration/s
 - 1 Ci = 37 MBq \Leftrightarrow 1 g de radium
 - [10 km]³ = 1 Tm³

AMPLEUR DES DESTRUCTIONS (HORS ABRI)

○ Rayonnement thermique

- Effet létal \Leftrightarrow brûlures du 3° degré (350 kJ/m²)
- Effets \searrow avec la surface \Rightarrow rayon touché \propto [énergie]^{1/2}
- \Rightarrow $R_{\text{thermique}} = 2\,400 \text{ m} (\text{Énergie}/20 \text{ kt})^{0.41}$

○ Onde de choc et effet de souffle

- Effet létal \Leftrightarrow surpression de 0,3 bar
- Effets \searrow avec le volume \Rightarrow rayon touché \propto [énergie]^{1/3}
- \Rightarrow $R_{\text{souffle}} = 2\,000 \text{ m} (\text{Énergie}/20 \text{ kt})^{0.33}$

○ Radioactivité

- Effet létal \Leftrightarrow dose de rayonnement de 5 sieverts
- Absorption atmosphérique \Rightarrow rayon touché \propto [énergie]^{1/5}
- \Rightarrow $R_{\text{radioactivité}} = 1\,500 \text{ m} (\text{Énergie}/20 \text{ kt})^{0.19}$

○ Bombe de 1 Mt

- $R_{\text{thermique}} \sim 12 \text{ km}$ $R_{\text{souffle}} \sim 7 \text{ km}$ $R_{\text{radioactivité}} \sim 3 \text{ km}$
- \Rightarrow *intérêt limité des très grosses bombes vis à vis plusieurs petites*

HIROSHIMA & NAGASAKI

POURQUOI HIROSHIMA ?

○ Situation militaire

- pertes élevées lors des conquêtes d'Iwo Jima et d'Okinawa
- ⇒ risques de pertes plus grandes pour la conquête du Japon (opération *Downfall*)
- ⇒ estimations variant de 30 000 à 800 000 morts US

○ Mais

- blocus naval total du Japon
- + bombardement intenses
- ⇒ famine probable à brève échéance
- ⇒ industrie quasi anéantie

○ Et

- **entrée en guerre de l'URSS contre le Japon le 8 août 1945**

○ Situation politique

- très forte hostilité de la population américaine vis à vis du Japon
- ⇒ **impossibilité de *ne pas* utiliser une arme disponible**
- ⇒ accélérer la fin de la guerre
- [justification de 2 milliards de dollars dépensés]

○ Et

- ne pas laisser l'URSS s'implanter en Chine, en Corée et au Japon
- équilibrer la puissance supérieure de l'Armée Rouge

○ **Mais pourquoi Nagasaki ?**

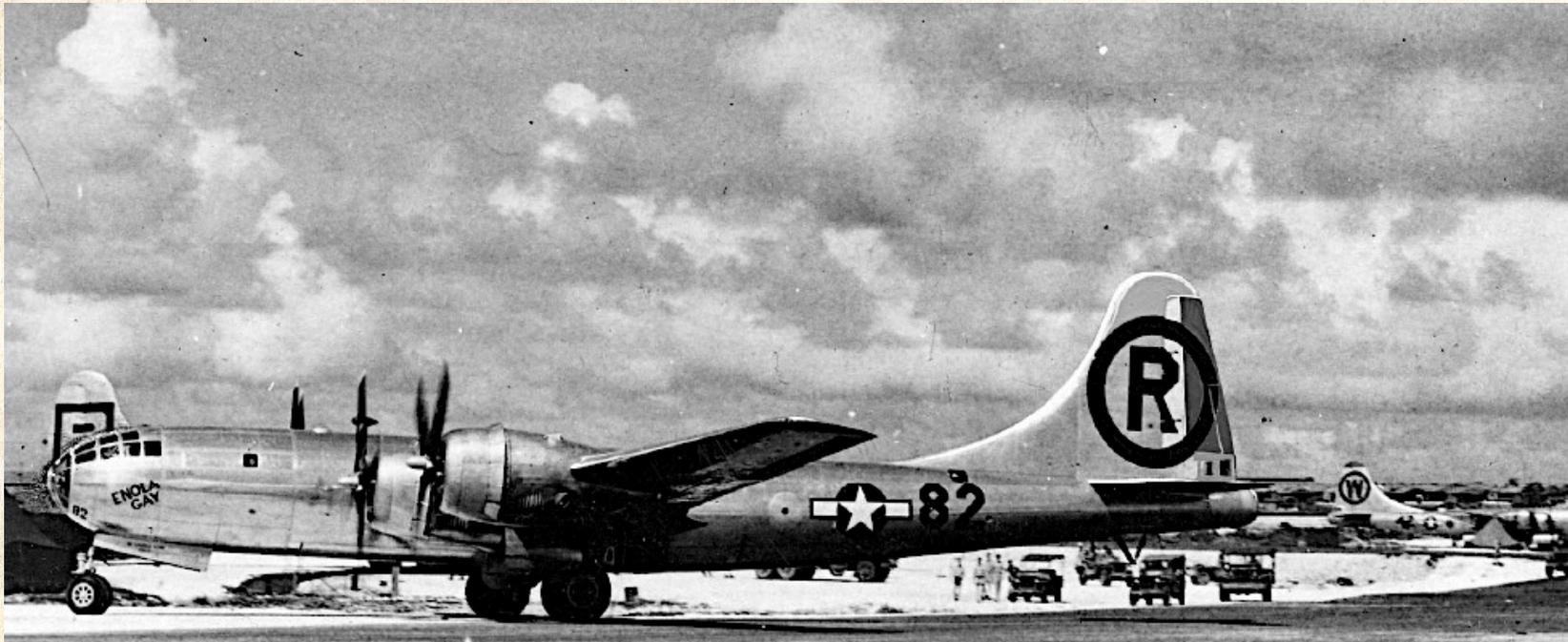
BOMBARDEMENT DE TOKYO, 9-10 MARS 1945



Bombardement incendiaire : 41 km² rasés, 100 000 morts, 125 000 blessés

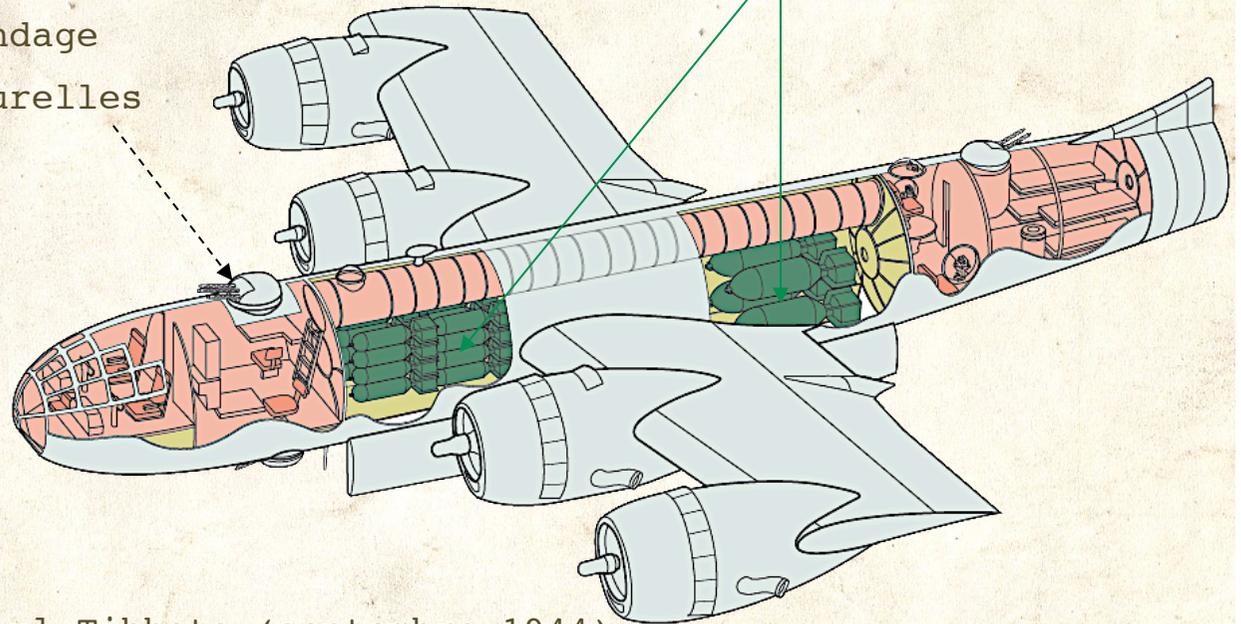
BOMBARDIER BOEING B-29 SUPERFORTRESS

- Dimensions et poids des bombes nucléaires → Boeing B-29
 - capable d'emporter 6 tonnes de bombes à 3000 km
 - 1° vol: 21 septembre 1942, 3970 construits (→ 3 milliards \$ 1945)
 - mise en service (difficile) au cours de l'été 1944 contre le Japon depuis des bases avancées en Chine
 - puis fin 1944 à partir des Mariannes (Tinian)



PROJET ALBERTA

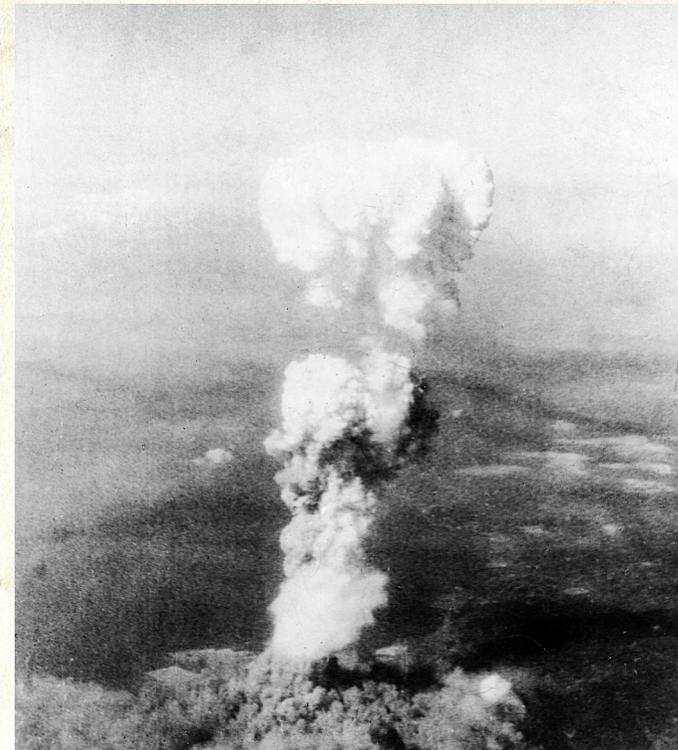
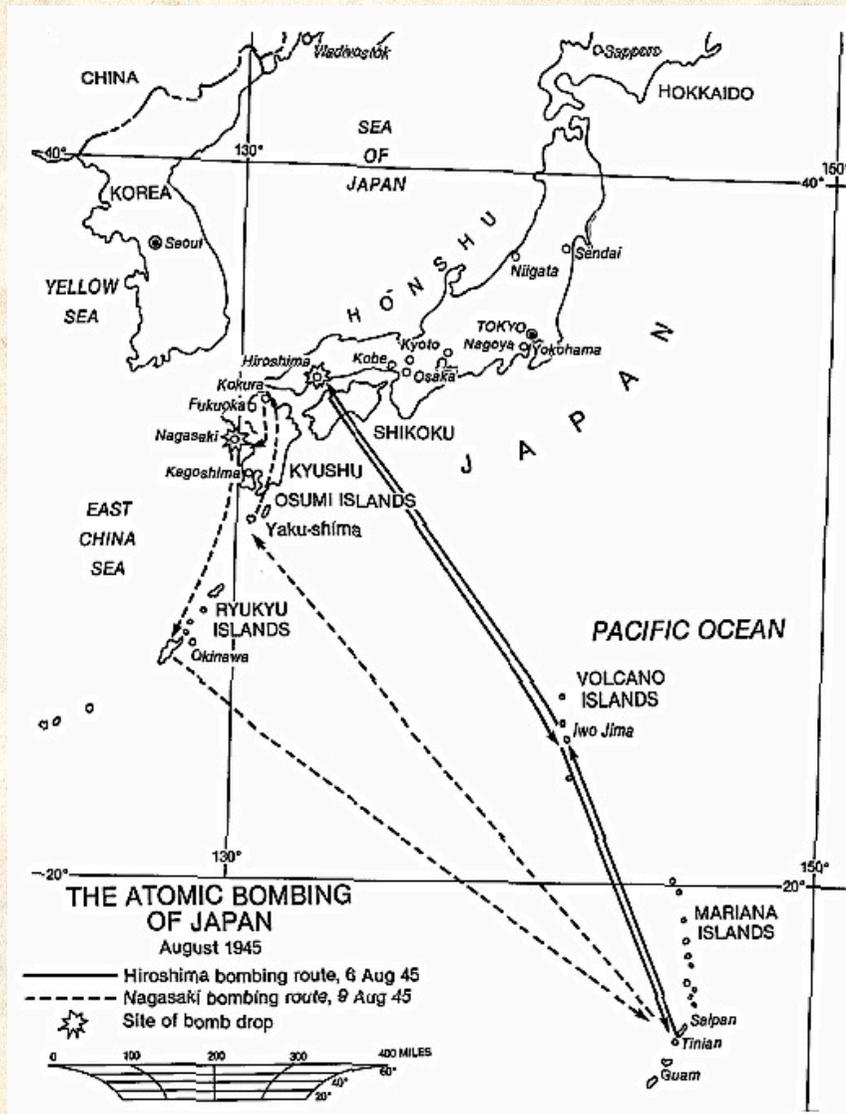
- Modification de 24 (↗ 48) avions (projet *Silverplate*)
 - réunion des 2 soutes en une seule (modification supprimée avec l'abandon de *Thin Man*)
 - possibilité d'armer la bombe en vol
 - suppression du blindage
 - suppression des tourelles



- Escadrille 509
 - choix du colonel Paul Tibbets (septembre 1944)
 - entraînement à Wendover (décembre 1944 → mai 1945)
 - installation à Tinian (juin 1945)
 - missions sur Hiroshima (6 août 1945) et Nagasaki (9 août)



MISSION SUR HIROSHIMA



HIROSHIMA 6 AOÛT 1945



5 avril 2012

Alain Bouquet – Petite histoire de la physique nucléaire – 21

21

DESTRUCTION D'HIROSHIMA

350 000 habitants

70 000 morts immédiats

80 000 blessés (brûlés surtout)

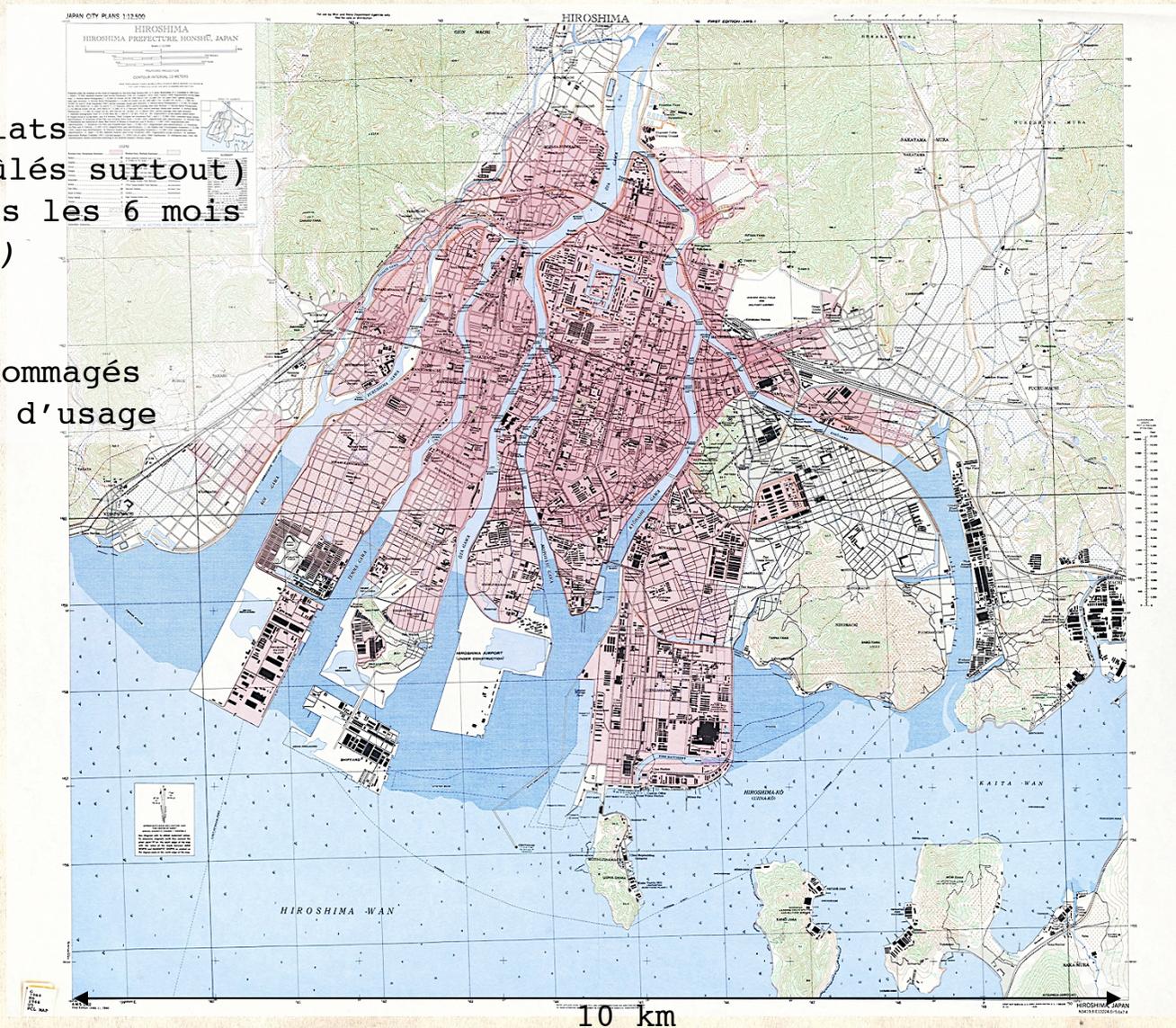
↳ 30 000 morts dans les 6 mois

(nombres incertains)

12 km² rasés

25 km² fortement endommagés

30% des usines hors d'usage



RÉACTIONS À TRAVERS LE MONDE

"All the News That's Fit to Print"

The New York Times.

LATE CITY EDITION
Ready, steady, go!
Special late night supplement
Available 8:30 P. M. to 11:30 P. M.

VOL. 117, No. 18,678
NEW YORK, MONDAY, AUGUST 6, 1945
THREE CENTS

FIRST ATOMIC BOMB DROPPED ON JAPAN; MISSILE IS EQUAL TO 20,000 TONS OF TNT; TRUMAN WARNS FOE OF A 'RAIN OF RUIN'

HIDALGO JOHNSON, REPUBLICAN LEADER IN THE SENATE, DIES

Washington, Aug. 5.—Hidalgo Johnson, 67, died here today after a long illness.

Jet Plane Explosion Kills Major Bong, Top U. S. Ace

Wichita, Kan., Aug. 5.—Major Gregory B. Bong, top U. S. ace, was killed today when his jet plane exploded on take-off.

KYUSHU CITY RAZED

By U. S. Bombers

REPORT BY BRITAIN

Steel Tower 'In Trial of'

Truman Takes Over Drive To Smash Nippon

Washington, Aug. 5.—President Truman today took over the drive to smash Japan.

Russians Declare War Against Japanese; Atomic Bomb Destroys Most Of Hiroshima

Moscow, Aug. 8.—(AP)—Russia has declared war on Japan. The declaration, announced in the United States by Franklin D. Roosevelt, and followed by a report on the Moscow radio, was effective at 3 P. M. Eastern War Time (2 P. M. Moscow time).

Truman Announcement Of Red Entry Into Fight Surprises U. S.

Washington, Aug. 8.—(AP)—Truman's announcement today that the United States would enter the fight against the Japanese surprised many here.

COMBAT

DE LA RÉSISTANCE À LA RÉVOLUTION

Les hommes de Vichy s'apprêtent à Fresnes

Le procès de Vichy a commencé hier à Fresnes.

LE PROBLEME constitutionnel et le mode du prochain scrutin étudiés en Conseil des ministres

Le conseil des ministres s'est réuni hier à l'Élysée.

Le général Groves et le Dr Richard Tolman

Les deux hommes qui travaillèrent à la mise au point de la bombe atomique.

Johnson's Body Will Lie In State In S. F. City Hall

The body of Senator Johnson will lie in state in San Francisco.

Le problème constitutionnel et le mode du prochain scrutin étudiés en Conseil des ministres

Le conseil des ministres s'est réuni hier à l'Élysée.

Le général Groves et le Dr Richard Tolman

Les deux hommes qui travaillèrent à la mise au point de la bombe atomique.

Le problème constitutionnel et le mode du prochain scrutin étudiés en Conseil des ministres

Le conseil des ministres s'est réuni hier à l'Élysée.

Le général Groves et le Dr Richard Tolman

Les deux hommes qui travaillèrent à la mise au point de la bombe atomique.

THE SACRAMENTO BEE

SACRAMENTO, CALIF., WEDNESDAY EVENING, AUGUST 8, 1945—20 PAGES—TWO SECTIONS

Truman Takes Over Drive To Smash Nippon

Washington, Aug. 5.—President Truman today took over the drive to smash Japan.

Russians Declare War Against Japanese; Atomic Bomb Destroys Most Of Hiroshima

Moscow, Aug. 8.—(AP)—Russia has declared war on Japan. The declaration, announced in the United States by Franklin D. Roosevelt, and followed by a report on the Moscow radio, was effective at 3 P. M. Eastern War Time (2 P. M. Moscow time).

Truman Announcement Of Red Entry Into Fight Surprises U. S.

Washington, Aug. 8.—(AP)—Truman's announcement today that the United States would enter the fight against the Japanese surprised many here.

Johnson's Body Will Lie In State In S. F. City Hall

The body of Senator Johnson will lie in state in San Francisco.

Le problème constitutionnel et le mode du prochain scrutin étudiés en Conseil des ministres

Le conseil des ministres s'est réuni hier à l'Élysée.

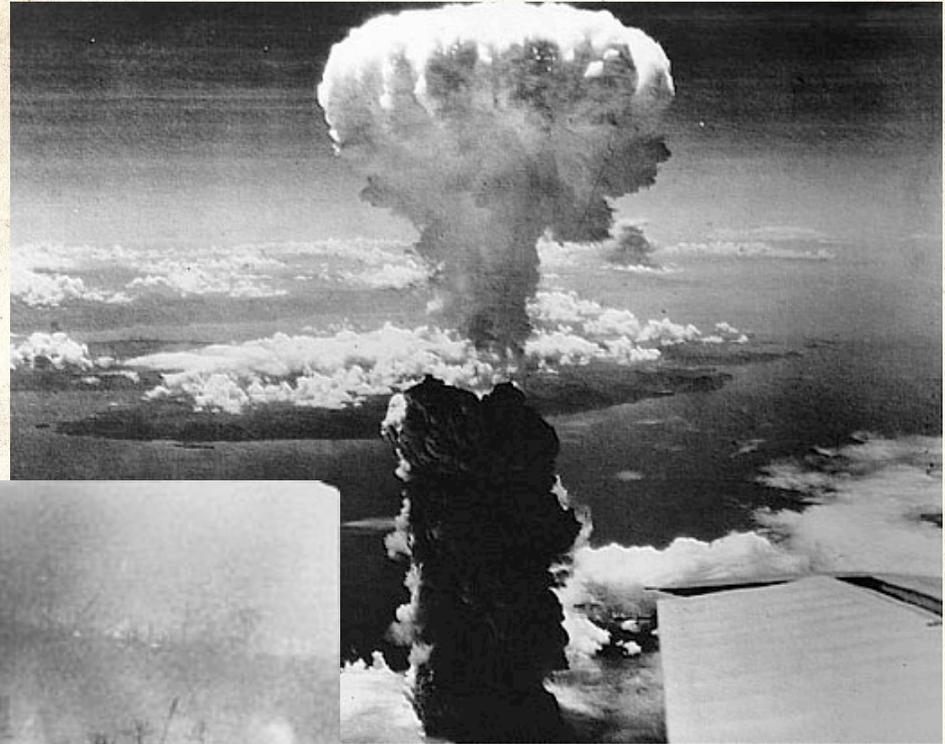
Le problème constitutionnel et le mode du prochain scrutin étudiés en Conseil des ministres

Le conseil des ministres s'est réuni hier à l'Élysée.

Le général Groves et le Dr Richard Tolman

Les deux hommes qui travaillèrent à la mise au point de la bombe atomique.

NAGASAKI



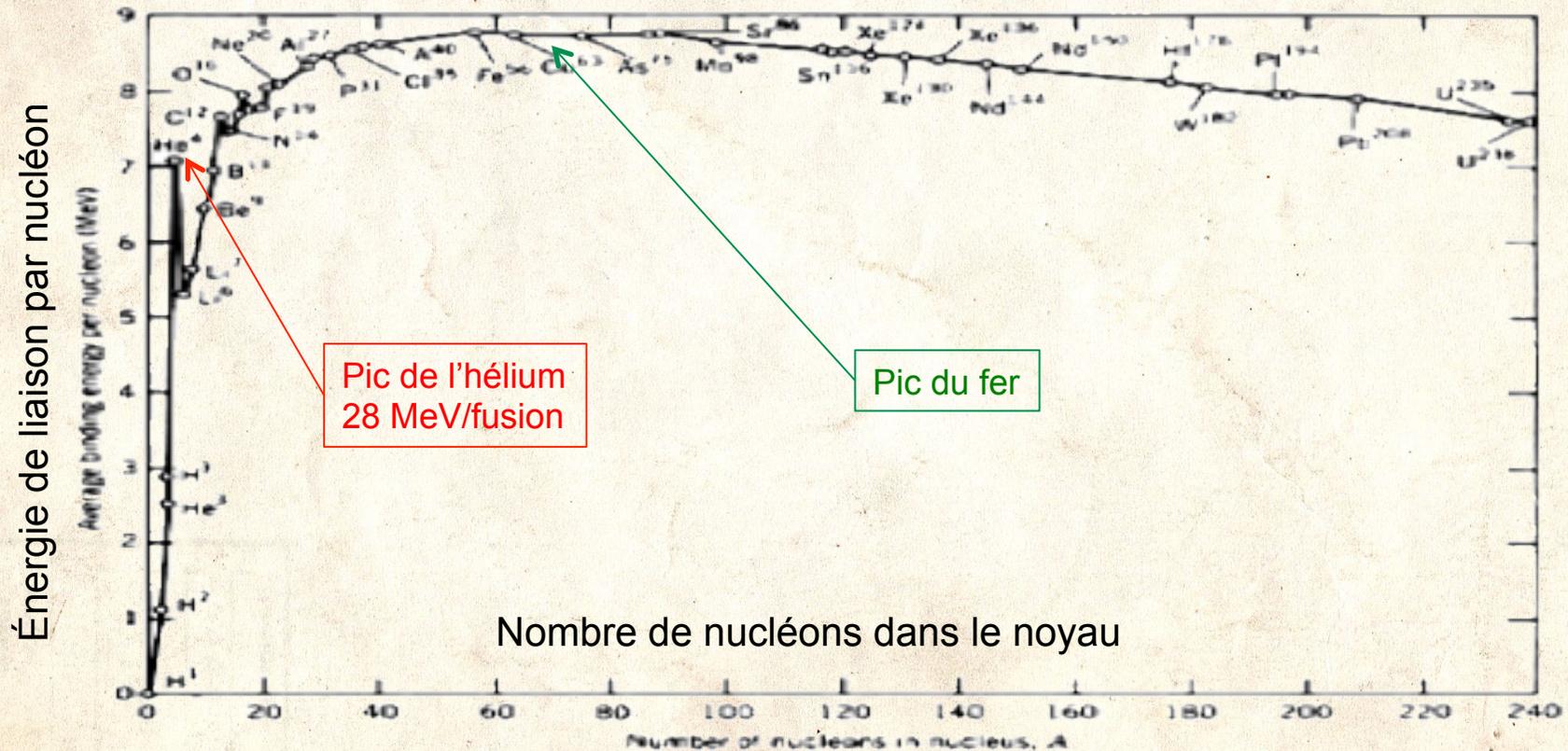
BOMBE H

APRÈS LA FIN DE LA GUERRE... LA SUIVANTE ?

- *Que faire du programme Manhattan, la guerre finie ?*
- **Des hommes ?**
 - Retour à la vie civile et à la recherche fondamentale (Oppenheimer → Princeton, Fermi → Chicago, Bethe → Cornell...)
 - Développement des réacteurs nucléaires (Zinn → Argonne, Wigner et Weinberg → Oak Ridge...)
 - Développement des armes nucléaires (Teller, Wheeler...)
- **Des connaissances ?**
 - Loi MacMahon (1946) → secret absolu (même vis à vis des Britanniques)
 - Mais **transfert aux industriels** → General Electric, Westinghouse...
- **Des usines et des laboratoires ?**
 - Les fermer (en partie ~~ou en totalité~~)
 - Les transférer à une université ou à l'industrie privée ?
- **Début de la guerre froide** → transformation de Los Alamos, Oak Ridge et Argonne (ex *MetLab* de Chicago) en Laboratoires Nationaux
- Puis bombe H et expansion du « complexe militaro-industriel »

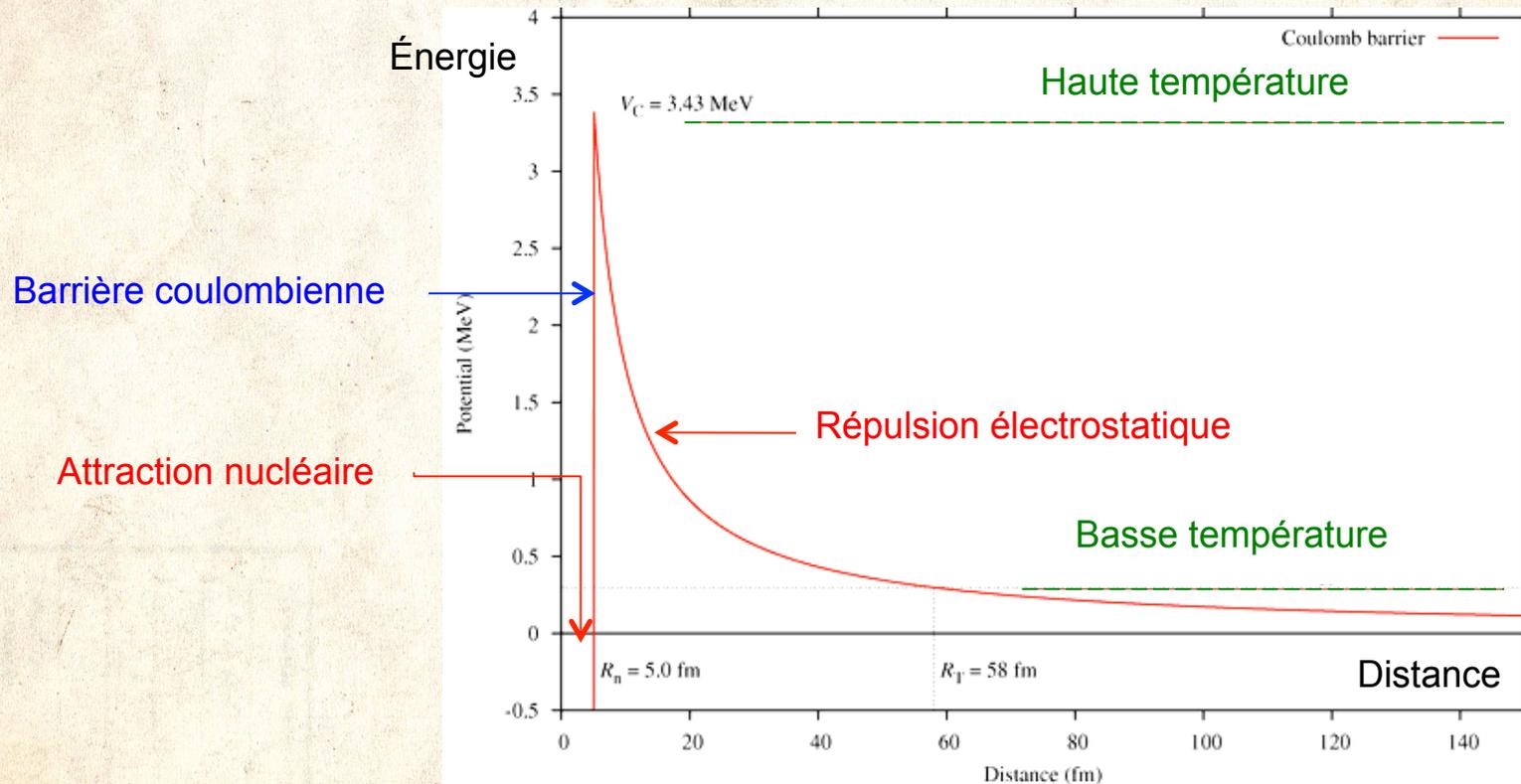
ÉNERGIE DE LIAISON ET FUSION

- $M(Z, N) < Z \cdot m_{\text{proton}} + N \cdot m_{\text{neutron}}$
- Défaut de masse \Leftrightarrow énergie de liaison $E = \Delta M c^2$
- \Rightarrow On libère de l'énergie en fusionnant des protons en noyau



FUSION THERMONUCLÉAIRE

- Les noyaux ont une charge électrique positive \Rightarrow répulsion électrostatique
- Il faut que les noyaux soient très proches ($<$ quelques fermis) pour que l'attraction nucléaire prenne le dessus \Rightarrow « barrière coulombienne »

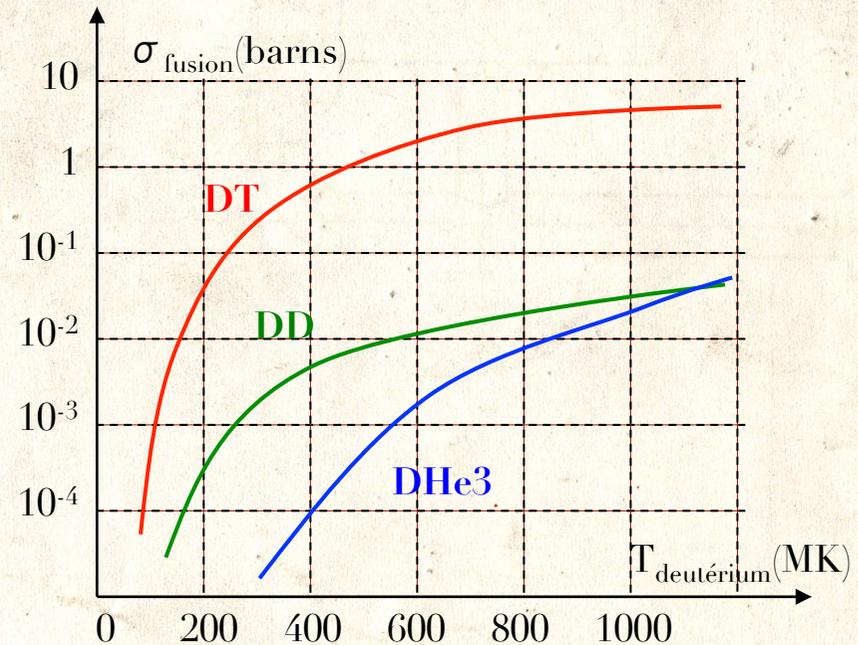


FUSION DE L'HYDROGÈNE ET DU DEUTÉRIUM

- Fermi (1941) : fission → haute température → assez pour fusions ?
- Teller (1941-42) : non oui peut-être
- Gros avantages
 1. hydrogène plus disponible qu'uranium ou plutonium
 2. aucune limite à l'énergie (pas de masse critique)

- Réunion de Berkeley (juillet 1942)
 - fusion du deutérium plus facile que celle de l'hydrogène
 - mieux encore: deutérium-tritium

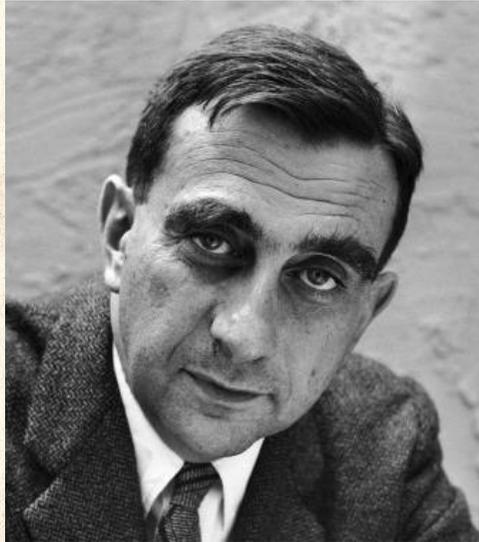
$$D + T \rightarrow He4 + n + 17,6 \text{ MeV}$$
 - raison: noyaux peu liés (\Leftrightarrow lâches \Leftrightarrow « gros »)



- Bonus : DT → 330 TJ/kg (U235: 88 TJ/kg, TNT: 4,6 MJ/kg)
- Inconvénient 1 : le tritium est radioactif ($\frac{1}{2}$ vie 12 ans) → il faut le fabriquer
- Inconvénient 2 : la fission atteint à peine 100 MK

CRISE POLITIQUE

- Teller travailla surtout sur la « super » à Los Alamos

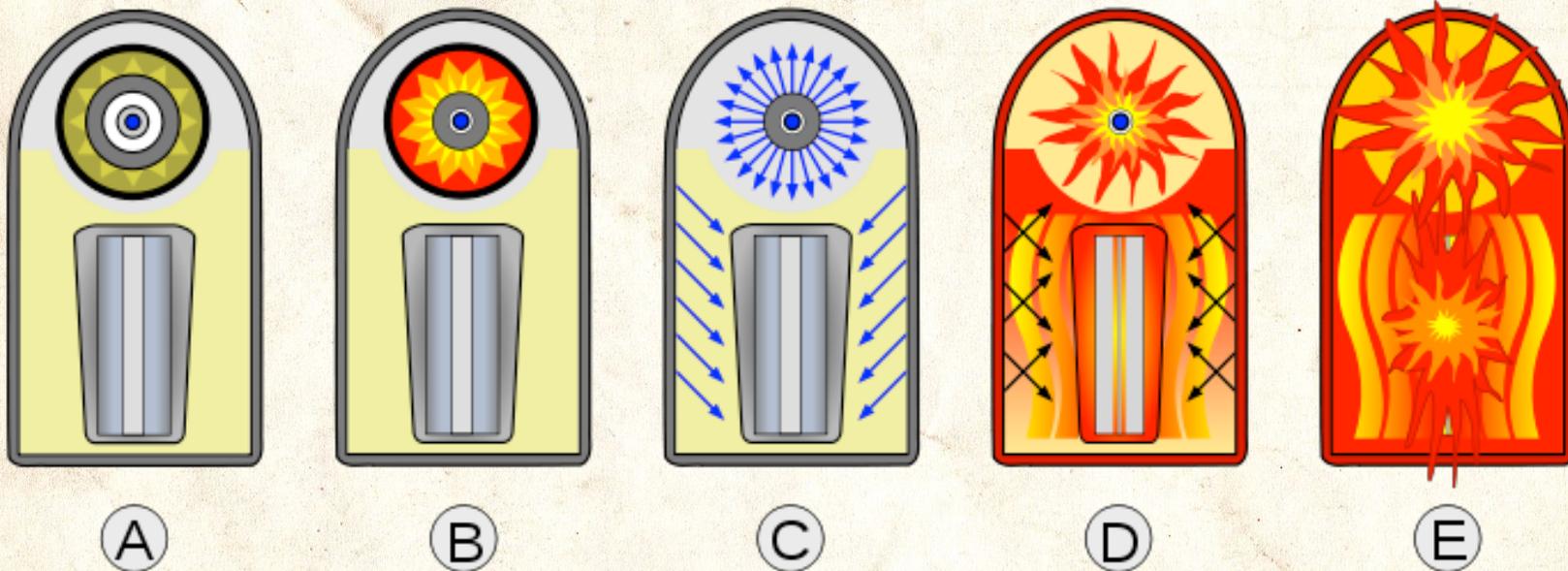


- Mais trouva qu'on ne lui accordait pas assez de moyens
- Les calculs indiquaient que la fission disperserait le deutérium bien *avant* qu'il n'entre en fusion

- ⇒ priorité réduite
- 1949 : 1^o bombe nucléaire soviétique (≡ *Fat Man*)
- ⇒ **crise politique**
 - Flambée d'anticommunisme
 - Oppenheimer accusé d'avoir freiné la « super »
- Mais aucun des projets de Teller ne semblait marcher
- 1951 : Stanislaw Ulam et Edward Teller ont l'**IDÉE** 
- Yakov Zeldovitch et Andrei Sakharov aussi, en 1953, *indépendamment* 
- Michel Carayol aussi, en 1967, *indépendamment* 

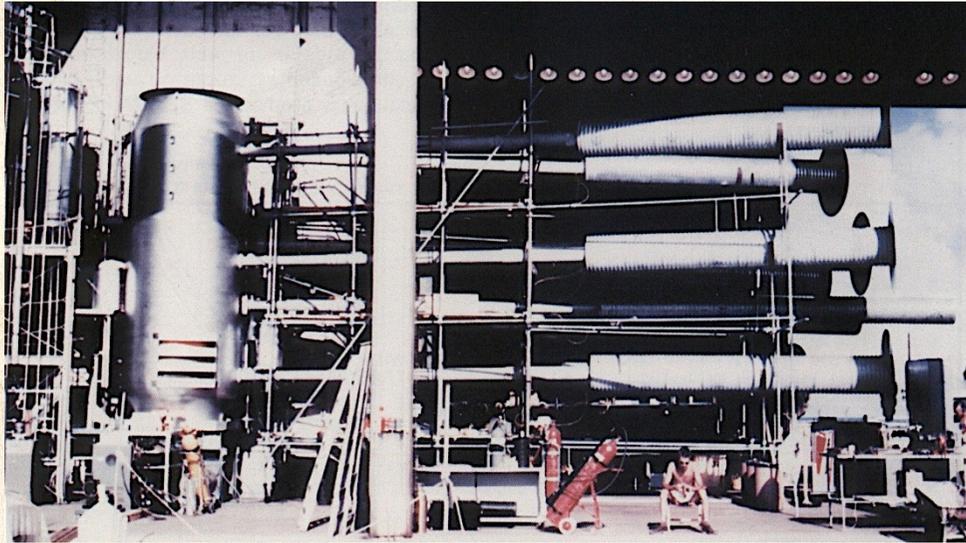
L'IDÉE D'ULAM ET TELLER

- Utiliser les *rayons X* de la fission pour *compresser* et *chauffer* le deutérium (et *fabriquer* le tritium à partir de lithium)



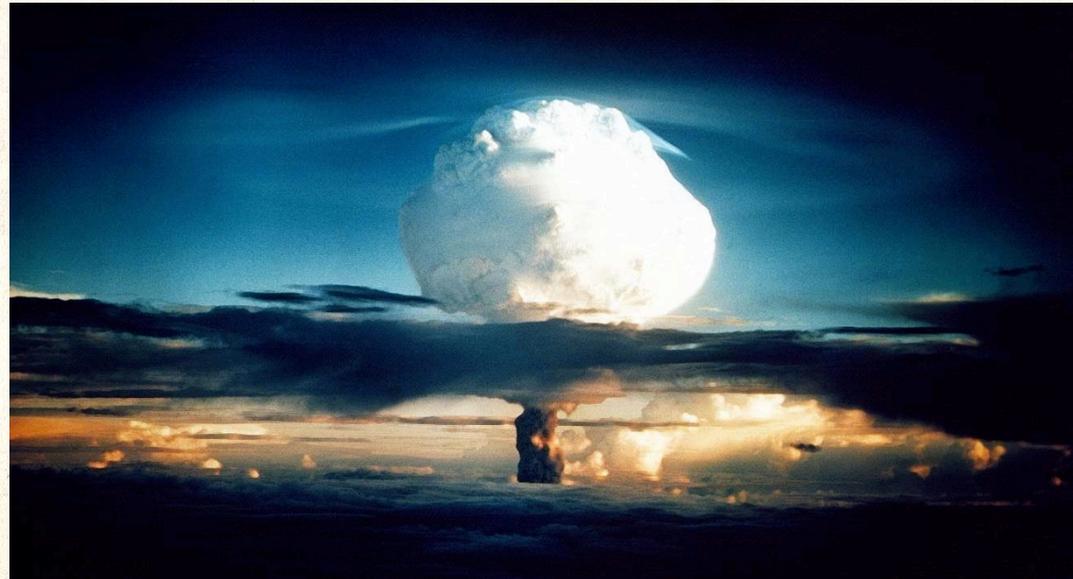
- **A** bombe à fission au-dessus de l'étage de fusion
- **B** implosion du cœur → supercritique → fission
- **C** fission → émission intense de rayons X, réfléchis par l'enveloppe
- **D** les rayons X compriment le tampon (U238) et le deutérium-lithium
- **E** le deutérium, comprimé et chauffé, fusionne avec le tritium → flux de neutrons → fission du tampon

IVY MIKE – ENIWETOK, 1^o DÉCEMBRE 1952



- Deutérium et tritium liquides (→ installation cryogénique) ⇒ 74 tonnes
- ↗ vite remplacé par du deutéride de lithium LiD (+compact et solide à température ambiante)

- Énergie libérée : 10,4 mégatonnes de TNT
- 23% de la fusion, 77% de la fission secondaire
- Miniaturisation → bombe de 15 à 25 mégatonnes ne pesant *que* 21 tonnes pour 7,5 m de long dès 1954



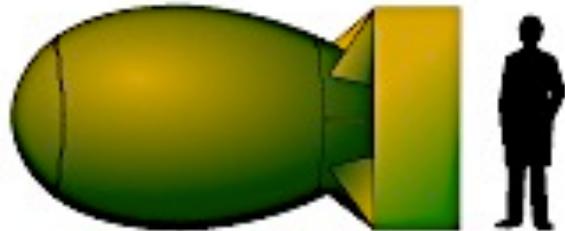
BOMBARDIER B-36 ET BOMBE THERMONUCLÉAIRE Mk-17



B-29 et B-36 →

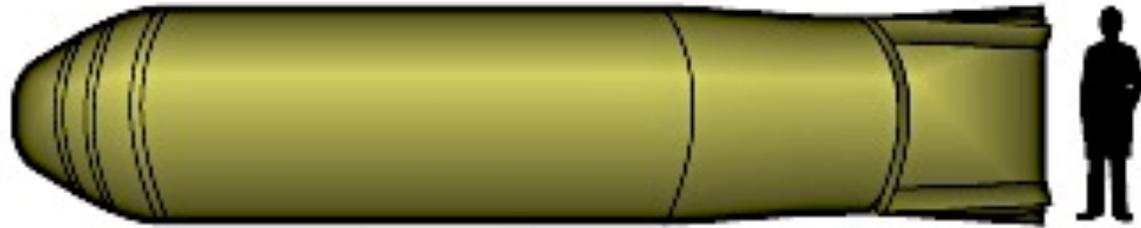
ÉVOLUTION DES BOMBES NUCLÉAIRES

FIRST FISSION BOMBS



MK IV (Fat Man), 20kt (1945)

FIRST FUSION BOMBS



MK-17 (Bravo), 15Mt (1955)

SINGLE WARHEAD DEVELOPMENT



W-59, 1Mt (1962)

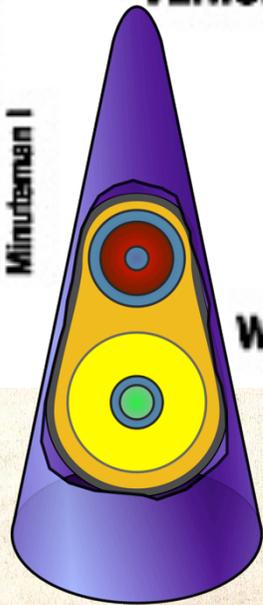


Minuteman I

MULTIPLE INDEPENDENT RE-ENTRY VEHICLE (MIRV) DEVELOPMENT



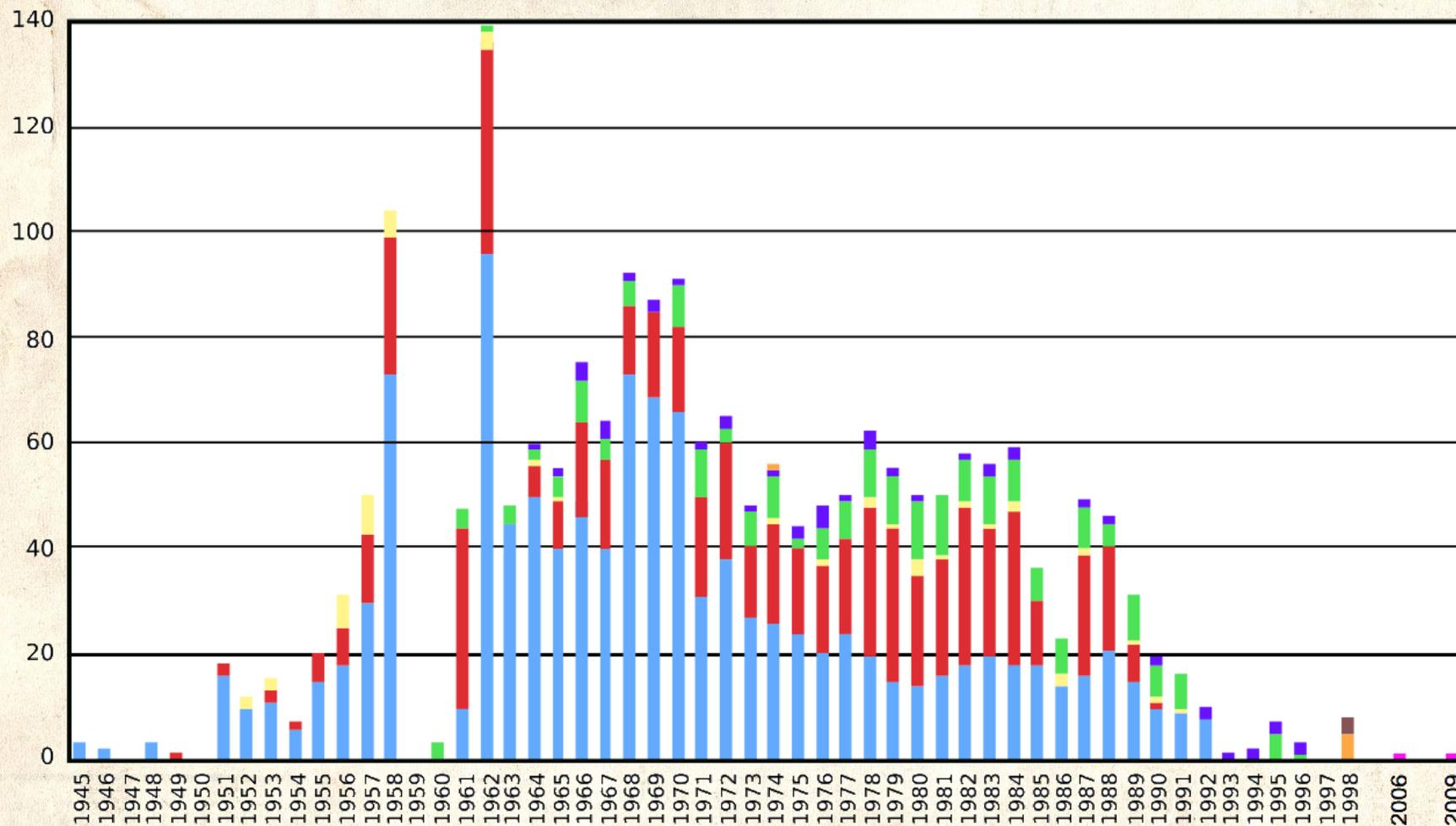
W-87, 475kt (1986)



Peacekeeper MX

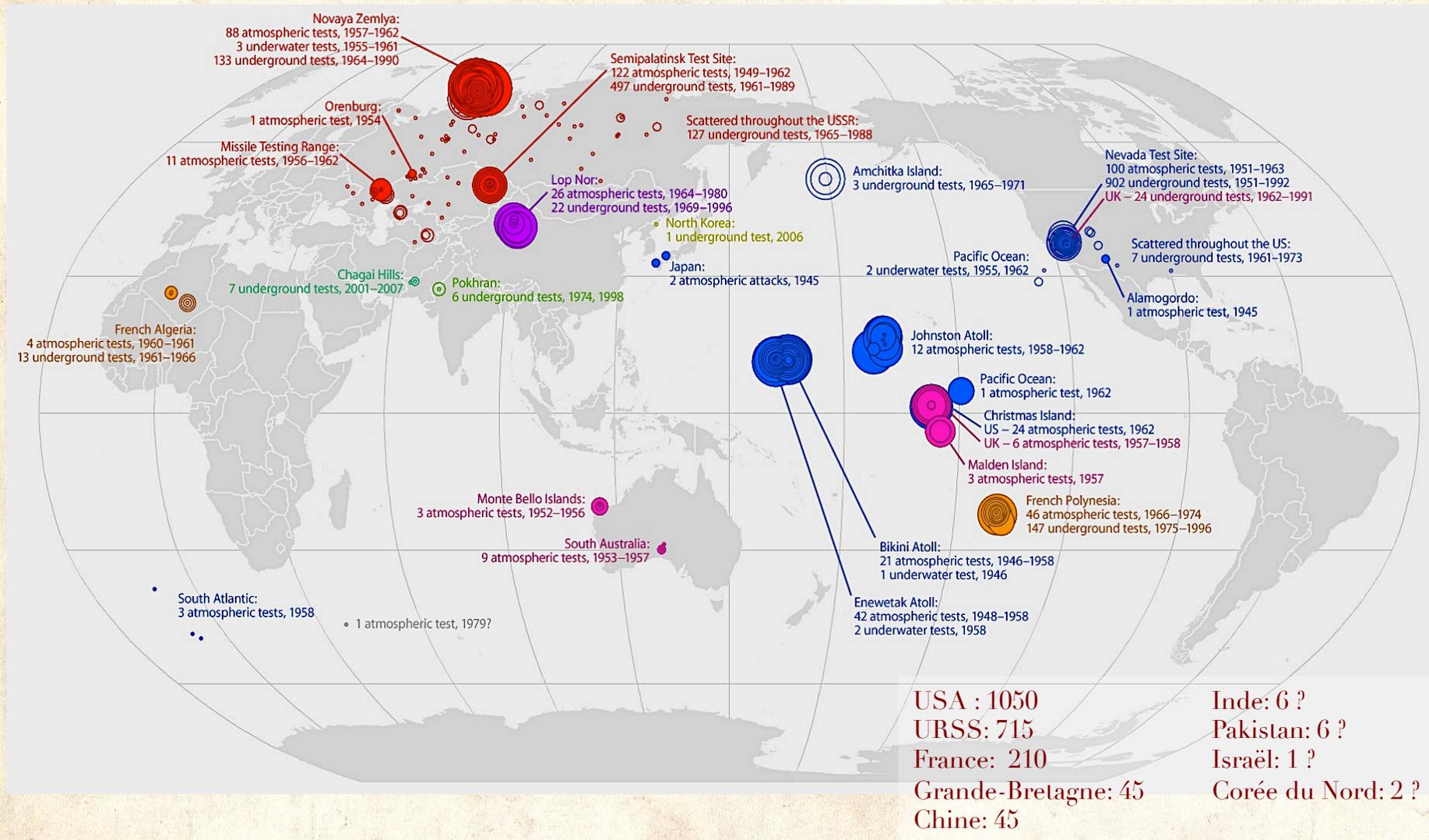
PROLIFÉRATION
GRANDE-BRETAGNE, FRANCE
CHINE, INDE, PAKISTAN
ISRAËL, BRÉSIL,
AFRIQUE DU SUD,
LYBIE, IRAQ, IRAN?

2080 EXPLOSIONS NUCLÉAIRES



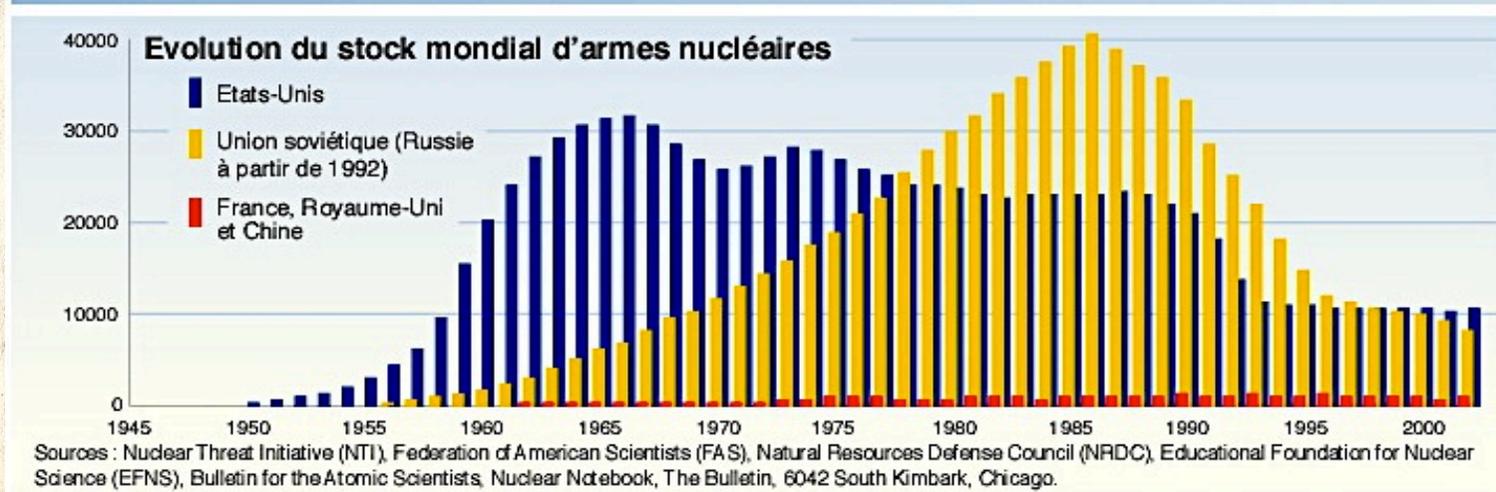
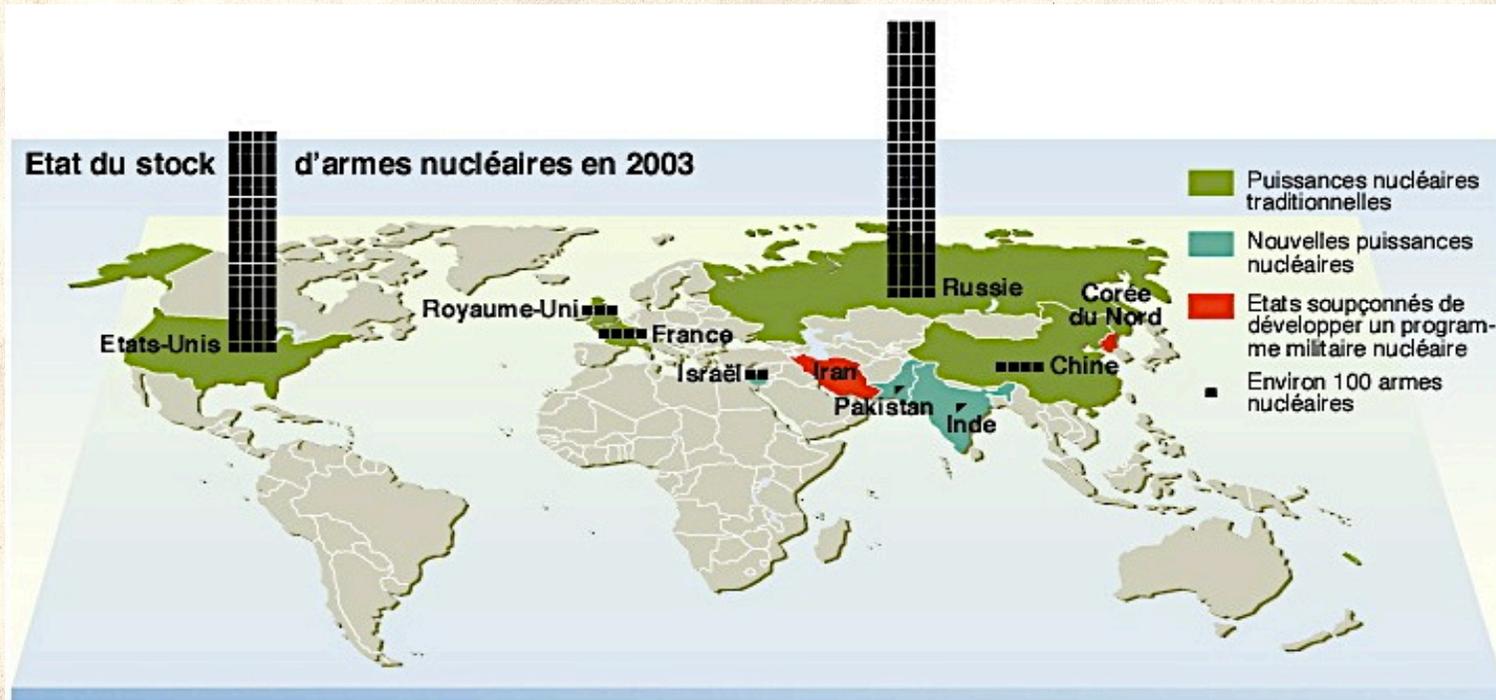
USA : 1050 Grande-Bretagne: 45 Pakistan: 6 ?
 URSS: 715 Chine: 45 Corée du Nord: 2 ?
 France: 210 Inde: 6 ? Israël: 1 ?

2080 EXPLOSIONS NUCLÉAIRES



PROLIFÉRATION...

TOUTE RELATIVE !



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!