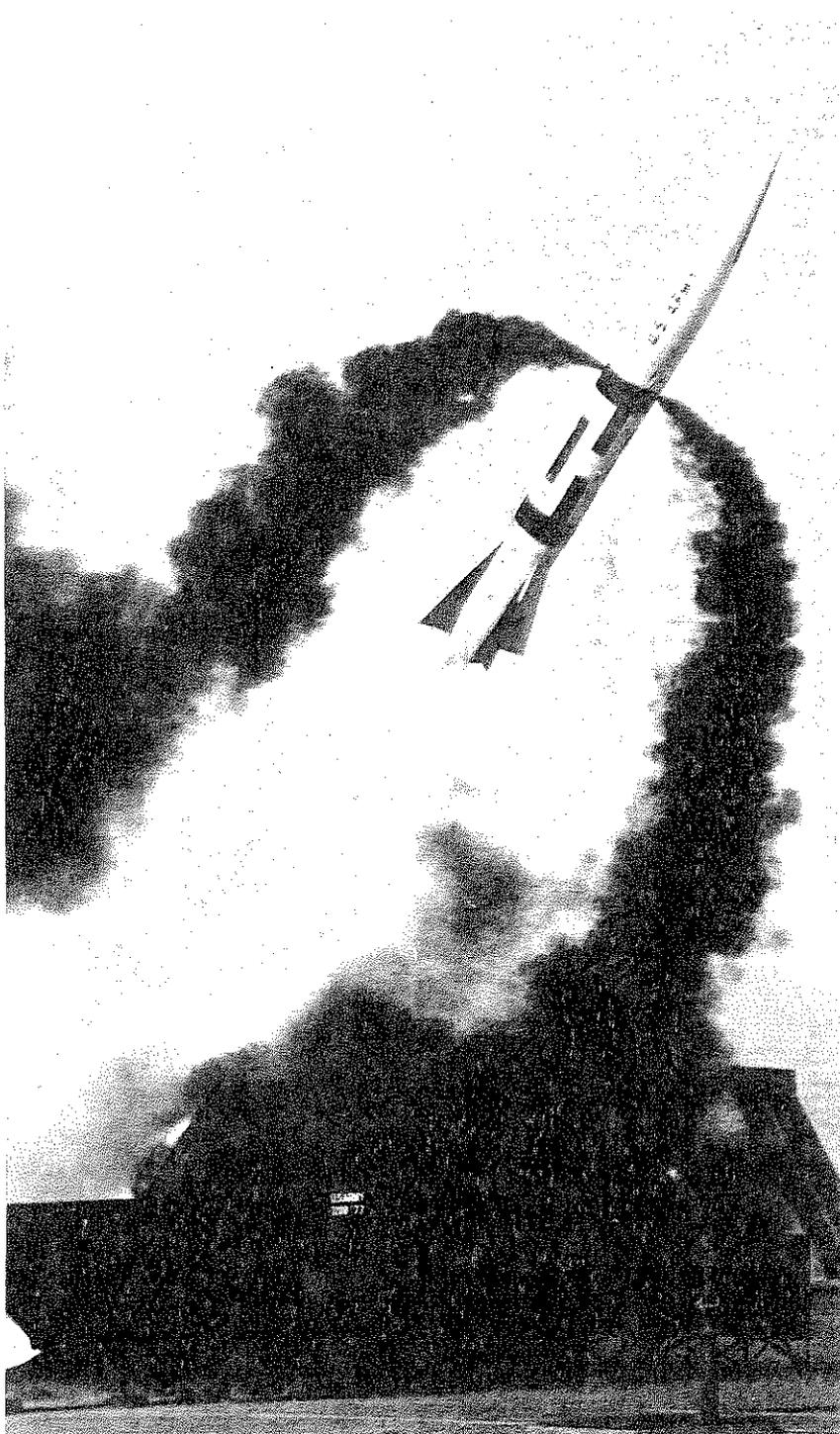


La bombe à neutrons

par André Gsponer

Il y a cinq ans environ, l'idée de la bombe à neutrons a fait son apparition dans le débat public européen. Arme ultra sophistiquée, elle devrait, selon les militaires, permettre de stopper une attaque ennemie déployée avec des chars en tuant les soldats, mais en laissant intacts les véhicules et l'environnement. En fait, la bombe N existe sur le papier depuis les années 1950. Son principe de fonctionnement est le même que celui de la bombe H. L'énergie libérée est donc fournie par la fusion du deutérium et du tritium. Mais à la différence de la bombe H, la production de neutrons vers l'extérieur est grandement amplifiée alors que les effets mécaniques et thermiques sont diminués. Ces propriétés impliquent la maîtrise de contraintes technologiques très complexes et souvent même contradictoires. La mise au point de la bombe N ne peut se faire que grâce à des essais nucléaires. C'est une des raisons d'être des tirs expérimentaux que la France a réalisés ces derniers temps à Mururoa. Les Américains et les Soviétiques s'emploient aussi activement à la fabrication de la bombe N. Et pourtant, grâce à des calculs plus élaborés dont nous fait part ici, en particulier, André Gsponer, il est probable que la bombe N sera beaucoup plus proche d'une bombe classique que ce qui était envisagé initialement.



André Gsponer, docteur en Sciences, a fait des recherches en physique nucléaire au CERN, au laboratoire Rutherford à Oxford, et à l'université de Chicago. Depuis cinq ans, il travaille sur les nouvelles générations d'armements nucléaires, dans le cadre d'instituts tels que le SIPRI (Stockholm) et l'ISRI (Genève), un institut de recherches scientifiques indépendant.

La première bombe à neutrons française aurait explosé le 21 mars 1982, à Mururoa, dans le cadre d'un programme d'études technologiques. Pourtant, aujourd'hui encore, la question reste posée : faut-il en demeurer là ou bien faut-il poursuivre les recherches et les développements nécessaires à la réalisation d'une arme opérationnelle ?

La principale justification de la bombe à neutrons, telle qu'elle a été présentée aussi bien aux autorités politiques et militaires qu'à l'opinion publique, serait d'être une arme anti-char particulièrement efficace, capable de stopper une offensive blindée en tuant les occupants des chars sans faire de dégâts matériels. En fait, pour peu que l'on examine en détail les aspects techniques et militaires que poseraient un tel usage de l'arme à neutrons, cette thèse apparaît comme peu convaincante.

Une nation ayant construit la bombe à hydrogène est théoriquement capable de réaliser la bombe à neutrons. Mais son perfectionnement, sa miniaturisation, sa production en série ainsi que sa maintenance occasionnent des difficultés considérables. De plus, la fabrication de centaines de bombes à neutrons, chacune capable d'arrêter une dizaine de blindés, exigerait la production, dans des réacteurs nucléaires, de grandes quantités de plutonium et de tritium, deux substances radioactives qui ne se trouvent pas dans la nature. D'où la question : le coût global de cette entreprise ne serait-il pas disproportionné par rapport à son utilité militaire supposée ?

Peut-on apporter des réponses claires à ces questions ? Peut-on seulement connaître les principes du fonctionnement d'une bombe à neutrons ? Pourrait-on ainsi évaluer, de manière rigoureuse, son efficacité réelle contre les blindés ? Apparemment, au vu du mystère qui entoure les armes nucléaires dans le grand public, et compte tenu de la discrétion des autorités militaires⁽¹⁾, la réponse semble négative. En réalité, tout ce qui est nécessaire au calcul des caractéristiques essentielles de la bombe à neutrons se trouve dans la littérature scientifique depuis longtemps (*la Recherche*, n° 89, p. 504, mai 1978). Deux livres consacrés aux principes physiques des armes thermonucléaires ont même été publiés récemment⁽²⁾. Pour l'essentiel, ces principes sont résumés dans les encadrés 1 et 2.

Le but de cet article est d'exposer

Figure 1. Le missile américain Lance a une portée de 120 km. C'est pour lui que 380 ogives à neutrons sont en cours de production aux Etats-Unis. Une telle fusée tactique, très maniable, n'existe pas dans l'arsenal français. Les deux fusées tactiques françaises actuellement opérationnelles sont le missile sous-son Pluton d'une portée de 130 km et le missile mer-mer Otomat. Le successeur de Pluton, le Hadès, dont la portée sera plus grande, n'est en général, pas plus que ce dernier, considéré comme adapté à la bombe N. (Cliché PPP/IPS.)

schématiquement ce que l'on peut savoir de la physique, du fonctionnement et des effets de la bombe à neutrons, ainsi que d'esquisser les problèmes posés par sa fabrication et son utilisation éventuelles.

De la bombe H à la bombe N.

La caractéristique spécifique de l'arme à neutrons, également nommée arme à radiations renforcées (en anglais : ERW, enhanced radiation warhead) ou, plus simplement, bombe N, est de produire une grande quantité de neutrons et d'en laisser sortir le plus possible de la bombe. Cette caractéristique résulte de la conjonction de trois contraintes.

En premier lieu, il faut utiliser la réaction de fusion du deutérium avec le tritium (l'une des réactions utilisées dans la bombe H) et non la fission de l'uranium ou du plutonium (utilisée dans la bombe A). La réaction de fusion D-T produit un noyau d'hélium et un neutron pour une énergie totale de 17.5 MeV : $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.5 \text{ MeV}$. Par contre, pour une énergie dix fois supérieure, soit 170 MeV, la fission ne libère en moyenne que 2 à 3 neutrons. Autrement dit, en admettant que pour les deux types de réactions, un neutron en moyenne parvienne à s'échapper de la bombe, une bombe à fusion D-T produira dix fois plus de neutrons qu'une bombe A de même puissance. De plus, les neutrons issus de la fission ont une énergie moyenne d'environ 1 MeV, alors que ceux résultant de la fusion D-T ont une énergie de 14.01 MeV. De ce fait, les neutrons de fusion sont beaucoup plus pénétrants et dangereux que les neutrons de fission. En second lieu, il faut que la bombe N soit « transparente » aux neutrons de 14 MeV, c'est-à-dire qu'ils puissent sortir après avoir subi un minimum d'interactions avec le matériel de la bombe. Cette contrainte de transparence est en fait le problème technique spécifique à la bombe N le plus difficile à résoudre⁽¹⁾. En revanche, cette contrainte n'intervient pas dans le cas des bombes H de grande puissance. Troisièmement, il faut que l'effet d'irradiation par les neutrons soit prépondérant par rapport aux autres effets de la bombe (effets mécaniques, thermiques et retombées radioactives).

Les effets mécaniques et thermiques sont dus à l'énergie déposée sur place, dans la boule de feu, ce qui, dans le cas de la bombe A, représente la quasi-totalité de l'énergie de fission. En revanche, sur un total de 17.5 MeV libérés par la fusion D-T, seulement 20 %, soit les 3.5 MeV correspondant à l'énergie du noyau d'hélium, sont déposés sur place, pour autant que le neutron ne perde pas d'énergie avant sa sortie de la bombe. Ainsi, les effets mécaniques et thermiques d'une bombe N, quelle que soit sa puissance, sont au moins équivalents à ceux d'une explosion conventionnelle ou de fission d'une puissance égale à 20 % de son

énergie de fusion. De plus lorsque l'on augmente la puissance d'une explosion nucléaire (de fission ou de fusion), les zones dans lesquelles ces effets sont prépondérants augmentent plus rapidement que la zone à l'intérieur de laquelle les neutrons constituent la principale cause de décès. Pour une explosion de fusion de 10 kt, par exemple, le rayon de la zone dans laquelle l'onde de choc détruit tous les bâtiments est égal à celui de la zone mortelle par irradiation, soit 1 200 m environ. L'effet « bombe à neutrons », qui est de tuer un maximum de personnes avec un minimum de dégâts matériels, n'existe donc que pour des puissances très faibles, inférieures à 2 kt.

Une configuration très complexe.

L'idée de la bombe N remonte à la Seconde Guerre mondiale. Toutefois, il faut attendre 1951, comme pour la bombe H, pour que naisse, simultanément aux Etats-Unis et en Union soviétique, le concept fondamental qui permettra d'envisager sa réalisation.

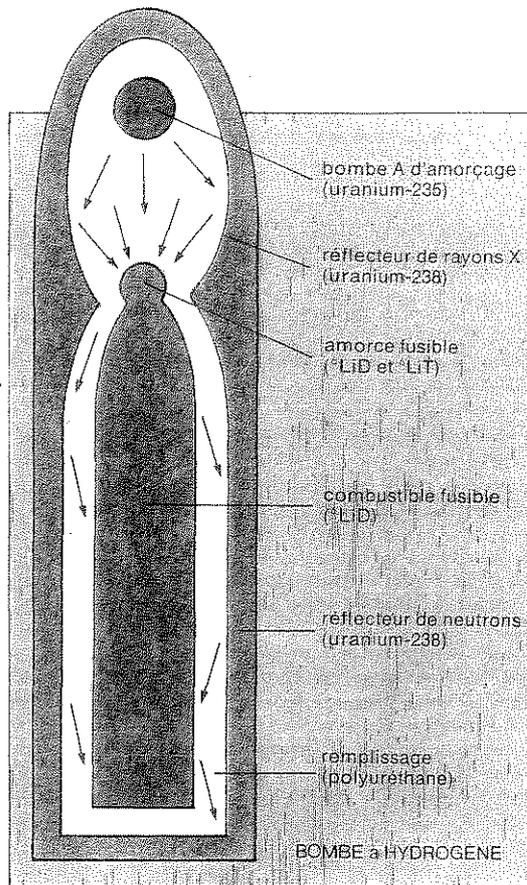
En effet, en raison de la température extraordinairement élevée nécessaire au démarrage d'une réaction de fusion thermonucléaire, il n'est pratiquement pas concevable de l'allumer autrement qu'à l'aide d'une bombe A (encadré 2). Le problème était donc de trouver une configuration permettant d'utiliser l'énergie dégagée par une bombe A pour amorcer la fusion, avant que ses débris ne détruisent le reste du système. Il se révèle qu'aucune configuration concentrique ne peut fonctionner en pratique. En effet, si la matière fusible est placée au centre d'une bombe A, les neutrons de fusion devront nécessairement interagir avec l'uranium ou le plutonium en essayant de s'échapper : de cette manière, on obtient une bombe A dopée, au rendement amélioré, mais pas une bombe N. A l'inverse, si la matière fusible est placée autour de la bombe atomique, le calcul montre qu'elle sera « soufflée » bien avant que la réaction de fusion ne démarre effectivement.

La seule possibilité est donc de placer la matière fusible à côté de la bombe A, et à une certaine distance. Dans ces conditions, la matière fusible est soumise aux effets de la bombe A dans un ordre déterminé par les vitesses auxquelles les différents phénomènes se propagent à partir de la bombe A. Dans le vide, la plus grande partie de l'énergie d'une bombe A est émise sous forme de rayons X (voir encadré 1). Comme leur vitesse est égale à celle de la lumière, 3×10^{10} cm/s, ils atteignent la matière fusible en premier. Ces rayons X sont suivis par les neutrons de fission, dont la vitesse est d'environ 1.5×10^9 cm/s. Ensuite seulement, et à condition que l'espace entre la bombe A et la matière fusible ne soit pas absolument vide, une onde de choc, dont la vitesse peut atteindre 1.5×10^8 cm/s, arrive sur la

Cet article fait partie des euro-articles qui sont publiés, avec le concours de la direction générale « Marché de l'information et innovation » de la Commission des communautés européennes, dans plusieurs revues européennes. Participent à ce projet les revues *Endeavour* en Grande-Bretagne, *Natuur en Techniek* aux Pays-Bas, *la Recherche* en France, *Scienza e Tecnica* en Italie, *Technology Ireland* en Irlande et *die Umschau* en République fédérale d'Allemagne.

L'effet « bombe à neutrons » n'existe que pour des puissances très faibles.

Figure 2. Une réaction de fusion thermonucléaire nécessite pour son démarrage une température extraordinairement élevée que seule, pratiquement, une bombe A (bombe à fission) peut fournir. Ce sont, en fait, les rayons X qui contiennent la plus grande partie de l'énergie de la bombe A qui vont être utilisés pour l'allumage. Dans la configuration habituelle, dite de « Teller-Ulam-Sakharov », les rayons X émis dans l'explosion d'une bombe A sont focalisés par un réflecteur sur la matière fusible d'une bombe H. Ils y exercent alors une telle pression que la réaction de fusion peut démarrer. Le combustible fusible est constitué par un long cylindre de deutériure de lithium-6 qui, au départ, ne contient pas de tritium. Le tritium est produit durant l'explosion même par l'interaction des neutrons de fusion avec le lithium-6. Pour que cela soit possible, il faut entourer le combustible fusible avec un manteau d'uranium-238. Pour les neutrons de basse énergie, ce manteau agit comme un réflecteur; pour les neutrons d'énergie suffisante pour fissionner l'uranium-238, comme un multiplicateur de neutrons; et pour les rayons X comme un réflecteur qui permet de comprimer la matière fusible. L'explosion se propageant le long du cylindre à partir de l'amorce, on peut concevoir des bombes H d'une puissance illimitée.

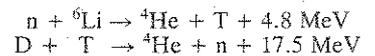


médiaire entre la bombe A et la matière fusible : il capte une partie des rayons X directs ou réfléchis, et les rediffuse sous forme de rayons d'énergie plus faible mieux absorbés par l'ablateur. De plus, comme le plasma remplit la totalité de la cavité, il entoure la matière fusible et améliore ainsi l'isotropie de la compression ablative.

Le tritium, élément indispensable.

Dans la configuration de Teller-Ulam-Sakharov qui vient d'être exposée, il n'a pas été fait mention du rôle éventuel des neutrons, que ce soit dans l'allumage de la fusion ou dans la poursuite de la réaction thermonucléaire. En fait, c'est là que réside l'une des différences entre la bombe H et la bombe N.

L'idée est d'utiliser les neutrons pour fabriquer le tritium à l'intérieur de la bombe, au lieu de le produire au préalable dans un réacteur où il est obtenu par irradiation du lithium-6. Dans ce cas, on utilisera comme explosif thermonucléaire du ${}^6\text{LiD}$, deutériure de lithium-6, et on envisagera une réaction continue basée sur le couple de réactions suivantes :



matière fusible. Suivent enfin les débris de la bombe A qui se déplacent à une vitesse inférieure à 5×10^7 cm/s, soit mille fois plus lentement que les rayons X.

Le concept fondamental qui est à la base des armes thermonucléaires, qu'il s'agisse des premières bombes H ou de la bombe N, réside dans l'utilisation des rayons X d'une bombe A pour comprimer et allumer un mélange fusible. A cette fin, la bombe A est placée à l'un des foyers d'un réflecteur en forme d'œuf ou d'ellipse, et la matière fusible à allumer à l'autre foyer. De cette façon, les rayons X, qui atteignent la matière fusible en premier, y exercent une telle pression que la réaction de fusion peut démarrer, bien avant que les débris de la bombe A n'arrivent. Ce concept est connu sous l'appellation de « configuration de Teller-Ulam-Sakharov », du nom de ses inventeurs.

Dans une bombe réelle, la matière fusible n'est pas constituée simplement par un mélange de deutérium et de tritium, mais par un mélange d'hydrures, telles que du ${}^6\text{LiD}$ et du ${}^6\text{LiT}$, qui présentent l'avantage pratique d'être solides à température ordinaire. De plus, il n'est pas nécessaire de placer la totalité de la matière fusible au deuxième foyer. Il suffit d'y mettre une amorce qui, une fois allumée, permet à la combustion thermonucléaire de s'étendre à l'ensemble du combustible fusible. Dans la pratique, la « configuration de Teller-Ulam-Sakharov » nécessite encore deux dispositifs supplémentaires.

Il faut, premièrement, que l'énergie

des rayons X réfléchis qui convergent sur le deuxième foyer serve d'abord à comprimer la matière fusible, et ensuite seulement à la chauffer. En effet, si la combustion thermonucléaire démarre avant que la compression soit maximale, le rendement de la fusion sera insuffisant pour produire une explosion puissante. Pour cette raison, la matière fusible est entourée d'une enveloppe, épaisse de quelques millimètres, d'une substance de poids atomique plus élevé, dont le rôle est d'absorber fortement les rayons X en provenance de la bombe A. La surface de l'enveloppe se vaporise ainsi instantanément, ce qui engendre par réaction une très forte pression sur la matière fusible. C'est le principe de la « compression ablative », qui permet d'atteindre une compression élevée tout en transférant un minimum de chaleur au combustible fusible durant la compression.

En second lieu, les différents composants situés à l'intérieur du réflecteur ne peuvent pas se trouver simplement « en l'air ». Ils doivent être fermement maintenus en place lors du lancement de la bombe notamment. Les espaces interstitiels sont donc remplis par une substance dont la caractéristique essentielle est d'être transparente aux rayons X, ce qui implique qu'elle soit de poids atomique peu élevé, tout en présentant des propriétés mécaniques exceptionnelles. Sous l'effet des rayons X, ce remplissage est instantanément transformé en un plasma dont la température est comparable à celle de la bombe A, si bien qu'il devient alors transparent aux rayons X. En fait, ce plasma joue également un rôle d'inter-

LA BOMBE A

L'énergie dégagée par une bombe atomique résulte de la fission, en un temps très court, d'un grand nombre de noyaux fissiles tels que le plutonium-239 ou l'uranium-235. La fission de chaque noyau libère une énergie totale $E_f = 190 \text{ MeV}$ ($1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), ainsi que 2 ou 3 neutrons. L'absorption de l'un de ces neutrons par un autre noyau fissile peut provoquer une nouvelle fission qui, à son tour, libère des neutrons; on parle alors de réaction en chaîne.

Pour que la réaction en chaîne soit explosive, le nombre des fissions doit croître constamment. Ceci exige que le nombre moyen de neutrons réabsorbés après chaque fission soit supérieur à 1. En admettant que la matière fissile se trouve sous la forme d'une sphère, il faut donc que son rayon soit au moins égal au libre parcours moyen de réabsorption des neutrons. Le libre parcours moyen étant inversement proportionnel à la densité, il en va de même pour le rayon minimum. A ce rayon critique correspond une masse critique de matière fissile, m_c , telle que la réaction en chaîne puisse devenir explosive. Par conséquent, pour une matière fissile donnée, la masse critique s'écrit :

$$m_c = M/\lambda^2,$$

où M est la masse critique pour une sphère de densité normale ρ_0 , et λ le coefficient de compression ($M = 11 \text{ kg}$ pour le Pu^{239} de densité $\rho_0 = 19.5 \text{ g/cm}^3$). Grâce à des explosifs chimiques, quelques kilos suffisent, il est aujourd'hui possible de comprimer la matière fissile trois, voire cinq fois ($\lambda = 3-5$). Ainsi, pour $\lambda = 2$, la quantité de plutonium nécessaire au déroulement d'une réaction en chaîne explosive n'est plus que de 2.75 kg.

Dans une réaction en chaîne explosive, le nombre des noyaux fissionnés augmente de façon exponentielle. De ce fait, le nombre de noyaux fissiles diminue rapidement, ce qui

(1) La bombe à neutrons, Commissariat à l'énergie atomique, Direction des applications militaires (CEA-DAM), n° 62, 20-21, janvier 1978.
(2) F. Winterberg, *The physical principles of thermonuclear explosive devices*, Fusion Energy Foundation, New York, 1981; W. Seifritz, *Nukleare Sprengkörper*, Karl Thiemig AG, Munich, 1984.

En effet, lorsque le lithium-6 est bombardé par des neutrons, il se transforme en hélium et en tritium. Le tritium peut fusionner avec le deutérium et produire un second noyau d'hélium ainsi qu'un nouveau neutron, lequel peut interagir avec un autre noyau de lithium, et ainsi de suite. On obtient ainsi un cycle thermonucléaire fermé (autocatalytique) avec une libération de 22.3 MeV d'énergie à chaque cycle.

Dans la pratique, cette idée est effectivement réalisable, mais seulement dans les bombes H de grande puissance comportant un épais manteau d'uranium-238 qui agit comme un réflecteur et un multiplicateur de neutrons. Cela implique que la fission contribue pour une part importante aux effets de l'explosion, phénomène contraire à ce que l'on attend d'une bombe N (fig. 2).

En fait, la fusion autocatalytique du ⁶LiD n'est pas utilisable dans une bombe N, car chaque neutron engendré dans la combustion autocatalytique étant nécessaire à la poursuite de la réaction, il n'en resterait aucun pour s'échapper de la bombe. On pourrait néanmoins se demander s'il ne serait pas possible d'utiliser les neutrons qui s'échappent de la bombe A d'amorçage pour transformer du ⁶LiD en DT, et ainsi fabriquer « sur

place » le tritium nécessaire à une bombe N. La réponse est négative, car dans les meilleures conditions il faudrait une bombe A d'amorçage d'une puissance de 10 kt pour produire le tritium nécessaire à une bombe N de 1 kt !

La situation est différente pour l'amorce d'une bombe H. En raison de l'énormité de l'énergie disponible sous forme de rayons X, il est même possible de démarrer la fusion dans du ⁶LiD pur, les premiers neutrons étant obtenus par les interactions du deutérium avec le lithium et la fusion du deutérium avec lui-même⁽³⁾. Cependant, à cause des difficultés inhérentes à cette technique, les amorces des bombes H contiennent tout de même quelques grammes de tritium.

En résumé, du point de vue de la neutronique, la différence la plus importante entre les bombes H et N réside dans la quantité minimale nécessaire de tritium. Si pour une bombe H, même de plusieurs Mt, la quantité de tritium indispensable au démarrage de l'amorce suffit, il faudra fournir, dans le cas d'une bombe N, la totalité du tritium nécessaire, c'est-à-dire une quantité sensiblement plus importante.

Avant d'examiner le schéma d'une bombe N, il est intéressant d'évaluer les

difficultés liées aux contraintes techniques qui découlent de son principe (utilisation de la réaction de fusion D-T, transparence aux neutrons, faible puissance) et de voir comment celles-ci sont influencées par le désir de minimiser le coût de la bombe, notamment en ce qui concerne le tritium, ingrédient le plus coûteux de l'arme à neutrons.

Des exigences contradictoires.

Dans la pratique, on utilise comme explosif fusible un mélange de LiD et de LiT dans des proportions proches de 50 %/50 %, le Li₂DT. Dans ce cas, on peut en effet mettre à profit les inévitables interactions d'une partie des neutrons de fusion avec le lithium pour produire une partie du tritium « sur place », ce qui permet déjà de réduire un peu les besoins en tritium.

Toutefois, la réduction la plus importante est obtenue en comprimant fortement le mélange fusible avant son allumage. En effet, comme le rappelle l'encadré 2, le rendement de la fusion, c'est-à-dire la fraction du combustible effectivement brûlé durant l'explosion, augmente fortement avec la compression. Ainsi, si le Li₂DT n'est pas comprimé, il faut 50 g de tritium pour fabriquer une bombe N de 1 kt, alors que s'il est

entraîne l'arrêt de la réaction en chaîne au moment où la masse totale des noyaux fissiles restants devient inférieure à la masse critique. Pour obtenir une explosion puissante, il faut donc que la quantité de matière fissile initiale soit nettement supérieure à la masse critique.

L'énergie effectivement dégagée par l'explosion d'une bombe A, ce que l'on nomme sa « puissance », est limitée par la quantité de matière fissile contenue dans la bombe. Sa puissance Y_f (de l'anglais « yield »), s'écrit donc :

$$Y_f = \eta_f V_{max}$$

où η_f est le rendement de fission, c'est-à-dire la fraction de noyaux fissiles effectivement fissionnés dans l'explosion. L'usage veut que cette puissance soit exprimée en kilotonnes d'équivalent TNT avec, par définition, 1 kt $\equiv 10^{12}$ cal (= 4.16 10^{19} erg, = 2.6 10^{25} MeV). Pour 2.75 kg de Pu²³⁹, par exemple, on a $V_{max} = 45$ kt.

En première approximation, le rendement de fission s'écrit :

$$\eta_f = \frac{\rho R - \Omega}{\rho R}$$

Dans cette expression, ρR correspond au produit de la densité par le rayon de la matière fissile lorsque la réaction en chaîne débute, et Ω , « l'opacité critique », vaut 160 g/cm² pour l'uranium-235 et 97 g/cm² pour le plutonium-239.

Le calcul détaillé des caractéristiques d'une explosion nucléaire est un problème très ardu. Cependant, pour s'en faire une première idée, il n'est pas nécessaire d'entrer dans les détails de la dynamique complexe du processus d'explosion : il suffit de connaître l'état dans lequel se trouve la matière fissile à la fin de la réaction en chaîne.

Le résultat de la fission d'un noyau lourd est un ensemble de particules (fragments de fis-

sion, neutrons, électrons, rayons gamma, neutrinos) entre lesquelles l'énergie de fission est répartie. Certaines de ces particules, notamment les neutrinos, les neutrons et une partie des rayons gamma, peuvent s'échapper de la matière fissile en explosion. Les autres, et en particulier les fragments de fission, restent à l'intérieur où ils dissipent leur énergie. Ainsi, pour une énergie totale de fission de 190 MeV, environ 170 MeV sont déposés dans la matière fissile.

Au cours de la réaction en chaîne, la température de la matière fissile ne cesse de croître, si bien que les atomes d'uranium ou de plutonium s'ionisent de plus en plus. Finalement, la matière fissile se trouve sous la forme d'un plasma à très haute température. De la sorte, une partie de l'énergie interne est présente sous forme d'énergie cinétique des particules (noyaux et électrons), et le reste sous forme d'énergie de radiation. Ce plasma, constitué de noyaux lourds et d'électrons, est opaque aux radiations ; ceci permet, en bonne approximation, de le considérer comme un corps noir. Ainsi, si l'on connaît la puissance de la bombe, on peut calculer sa température, et inversement. On peut de même calculer son rendement, la fraction de l'énergie interne se trouvant sous forme de radiations, etc.

En appliquant ce modèle thermodynamique

à une bombe A contenant 2.75 kg de plutonium, on obtient les résultats du tableau ci-dessous. Les deux premières colonnes donnent la température T en °K et eV (1 eV = 11 604 °K), et la troisième la puissance de la bombe. Pour une puissance de 0.5 kt, on constate que le rendement de la bombe n'est que de 1 % et que la compression correspondante, 2.03, n'est que légèrement supérieure au minimum de 2 nécessaire pour rendre critique la masse de 2.75 kg de plutonium. La dernière colonne indique la fraction de l'énergie interne se trouvant sous forme de radiations. Pour 0.5 kt, celle-ci est de 60 % ; pour 5 kt, de 92 %. La distribution en fréquence de ces radiations est celle d'un corps noir et, selon la loi de Wien, le maximum de cette distribution est donné par $h\nu = 2.8$ kT. Pour une puissance de 0.5 kt, ce maximum correspond à une énergie de photons de 17 keV : ces radiations sont donc des rayons X durs. Ainsi, à la fin de la réaction en chaîne explosive, et pour des puissances supérieures à quelques dixièmes de kt, l'énergie de fission se trouve principalement sous forme de rayons X.

(1) W. Seifritz, *Nucleare Sprengkörper*, Karl Thieme AG, Munich, 1983.
(2) J. Ligou, « Neutron kinetics of highly compressed fissionable pellets », *Nucl. Sci. and Engin.*, 63, 31, 1977.

T (keV)	T (°K)	Y _f (kt)	η _f	α	Y _r /Y _f
12	1.4 10 ⁸	5	0.12	2.42	0.92
6	7.0 10 ⁷	0.5	0.01	2.03	0.59
3	3.5 10 ⁷	0.13	0.003	2.01	0.14
1.2	1.4 10 ⁷	0.03	0.001	2.00	0.02

(3) W. Hälgl and A. Pritzker, « Concerning the ignition of LiD fusion by means of fission induced shock waves », *Atomkernenergie/Kern-technik*, 36, 61, 1980.

comprimé par un facteur 8 grâce aux rayons X émis par la bombe A, 20 g sont suffisants.

De même, les exigences de faible puissance et de retombées radioactives réduites conduisent aussi à comprimer la matière fusible. Il existe en effet, pour l'amorçage d'une bombe de fusion, une *énergie critique*, inversement proportionnelle au carré de la compression de la matière fusible. Ainsi, pour allumer une sphère de Li_2DT non comprimée, il faut lui fournir une énergie équivalant à 40 tonnes de TNT. Par contre, si cette sphère est comprimée par un facteur 8, une énergie 64 fois plus petite est suffisante.

Pour comprimer la matière fusible, il faut évidemment de l'énergie, qui devra aussi être fournie par la bombe A. Mais jusqu'à un certain point, la diminution de l'énergie nécessaire à l'allumage grâce à la compression est plus importante que l'énergie requise pour comprimer le combustible. Ainsi, en comprimant autant que possible la matière fusible, on réduit la puissance de la bombe A d'amorçage et, du même coup, les effets mécaniques et thermiques ainsi que les retombées radioactives dont elle est la cause.

Cependant, une forte compression de la matière fusible est incompatible avec la transparence aux neutrons qui est primordiale dans la bombe N. Le libre parcours moyen des neutrons étant inversement proportionnel à la compression, pratiquement tous les neutrons interagiront une ou plusieurs fois avec la matière fusible avant de sortir de la bombe, à moins qu'ils n'y soient absorbés. Ce manque de transparence présente deux inconvénients majeurs : d'une part, l'énergie perdue par les neutrons dans leurs collisions à l'intérieur de la bombe augmente les effets thermiques et mécaniques au détriment des radiations et, d'autre part, les neutrons qui parviennent à s'en échapper auront une énergie moyenne plus faible, ce qui diminue d'autant l'efficacité de la bombe N en tant qu'armé anti-personnelle. Il n'est donc pas possible de comprimer la matière fusible jusqu'au point où les effets indésirables de la bombe A d'amorçage deviendraient négligeables, sans faire disparaître du même coup l'effet « bombe à neutrons » recherché.

La mise au point de la bombe N consiste donc à trouver un compromis difficile entre plusieurs exigences contradictoires. Dès lors, si l'on se souvient que les Américains ont fait exploser leur première bombe N en 1963, on ne s'étonnera pas qu'il ait fallu attendre 1977 pour qu'une version miniaturisée et militairement utilisable soit finalement achevée.

Comment construire une bombe N.

Muni de toutes ces contraintes, on peut maintenant décrire le schéma de principe d'une bombe N. Le système de déclen-

chement représenté sur la figure 3 utilise la méthode dite du « canon » : à l'aide d'explosifs chimiques, on provoque l'emboîtement de deux pièces de matière fissile de formes complémentaires, en l'occurrence un cylindre dans une sphère dont l'évidement lui correspond. De cette façon, on rassemble en un temps très bref une masse supérieure à la masse critique, et il suffit de quelques neutrons pour démarrer la réaction en chaîne et faire exploser la bombe A. La partie inférieure contient les principaux composants nucléaires (bombe A et matière fusible). La partie supérieure renferme l'électronique et le système de déclenchement de la bombe A. Cette construction facilite le démontage et permet l'entreposage séparé des deux parties, de sorte que si l'une était volée il serait difficile d'en faire un usage illicite. De plus, dans le cas d'un déclenchement accidentel de l'explosif chimique, on évite une dispersion trop importante de matières radioactives, problème particulièrement grave s'il s'agit de plutonium ou de tritium, et surtout on écarte la possibilité d'une explosion nucléaire accidentelle.

La méthode du « canon » a été em-

ployée dans toutes les premières bombes H, et dans ce cas la matière fissile était généralement de l'uranium-235. Dans les bombes modernes, on préfère utiliser le plutonium-239, notamment parce que sa masse critique est inférieure. Il faut alors résoudre les problèmes posés par le plutonium-240, dont une certaine quantité se trouve toujours mélangée au plutonium-239, et dont l'importante fission spontanée conduit à une production indésirable de neutrons et de chaleur.

Pour réduire encore la masse critique, on entoure la matière fissile avec du béryllium qui agit comme un réflecteur pour les neutrons de fission, mais laisse tout de même passer les rayons X. Cependant, pour réduire la masse critique au-dessous de 5 kg, il faut renoncer à une méthode du « canon » qui se contente d'assembler rapidement une quantité suffisante de matière fissile : il faut aussi chercher à la comprimer. Dans ce cas, l'idéal serait la méthode de « l'implosion », dans laquelle des explosifs chimiques sont disposés autour de la matière fissile, c'est-à-dire à l'intérieur du réflecteur de rayons X. Ceci complique évidemment la construction de la bombe et

2 LA BOMBE H

L'énergie d'une bombe thermonucléaire provient de la fusion d'un grand nombre de noyaux légers. Par exemple, dans le cas du deutérium (D) et du tritium (T), la réaction de fusion $\text{D} + \text{T} \rightarrow \alpha + \text{n}$, donne un noyau d'hélium (α) de 3.5 MeV et un neutron (n) de 14 MeV.

Il y a plusieurs différences essentielles entre la fission et la fusion. En particulier, pour qu'une fusion ait lieu, il faut que les deux noyaux légers se rencontrent avec une énergie cinétique suffisante pour surmonter la répulsion due à leur charge électrique. Par exemple, pour provoquer une fusion DT, il faut que l'énergie cinétique relative des deux noyaux soit au moins égale à quelques keV, ce qui correspond à une température d'au moins 10^7 °K, alors que la fission peut s'initier à la température ordinaire. Dans le cas de la fusion, il existe donc une température minimum nécessaire au démarrage de la réaction. Pour un mélange DT elle est d'environ 3 keV; pour tous les autres combustibles fusibles, cette température minimale est plus élevée.

D'autre part, le processus de réaction en chaîne n'intervient pas dans la fusion. En fait, les explosions thermonucléaires sont des réactions de combustion qui peuvent s'accompagner d'un front de détonation. Une fois la combustion initiée en un point de la matière fusible, par exemple au centre d'une sphère ou à l'extrémité d'un cylindre, la propagation d'un tel front de détonation permet d'étendre progressivement la réaction à l'ensemble du combustible. De cette manière, il est possible, contrairement à une bombe à fission, d'obtenir des explosions de fusion d'une puissance en théorie illimitée.

La propagation d'un front de détonation thermonucléaire se fait par l'intermédiaire des produits de fusion, qui chauffent le combustible autour de la région déjà allumée. Pour que cette propagation puisse avoir lieu, il faut non seulement que la région où s'initie la combustion soit portée à la température minimum, mais aussi que l'énergie dégagée soit suffisante

pour permettre la propagation du front de détonation à une vitesse supersonique afin que l'ensemble du combustible puisse brûler avant la dislocation de la bombe. Il en résulte l'existence d'une énergie minimum critique, E_c , telle que

$$E_c = E/\alpha^2$$

où E est l'énergie critique pour une sphère de densité normale et α est le coefficient de compression du combustible fusible. Pour le mélange DT, le calcul de E donne $E = 0.002$ kt. Pour l'hydrure de lithium Li_2DT , le combustible thermonucléaire solide le plus facile à allumer, on trouve $E = 0.04$ kt. Il faudrait alors quelque 40 tonnes de TNT pour allumer un tel combustible non comprimé. A cela s'ajoute le fait que l'énergie critique doit être délivrée en un temps très bref; enfin, la température initiale minimum est extrêmement élevée. Dans ces conditions, on voit que seule une bombe atomique peut permettre, en pratique, la compression et l'allumage d'un explosif thermonucléaire, à moins de recourir à des lasers capables de comprimer la matière fusible par des facteurs $\alpha = 1\ 000$ ou plus, procédé qui n'est réalisable qu'en laboratoire à l'heure actuelle.

En pratique, l'une des caractéristiques les plus importantes d'une explosion de fusion est le rendement de fusion, τ_f , qui lie l'énergie effectivement délivrée à l'énergie maximum qui serait dégagée par la fusion de la totalité du combustible :

$$Y_f = \tau_f Y_{\text{max}}$$

En supposant que le rendement soit de 100 % ($\tau_f = 1$), une puissance de 1 kt est obtenue par la fusion deutérium-tritium de 7.4 g de tritium, ce qui correspond à la combustion de 12.3 g de DT, ou de 42 g de Li_2DT . Le calcul exact du rendement est en réalité très compliqué. Le modèle le plus simple consiste à admettre que la combustion, une fois amorcée par le passage du front de détonation, se fait à température

peut perturber l'ensemble avant que la réaction en chaîne ne démarre. Pour cette raison, il est très probable que l'on utilise, dans les bombes N miniaturisées, une version améliorée de la technique du « canon » permettant d'obtenir une certaine compression. De plus, pour économiser le plutonium, qui est sensiblement plus coûteux que l'uranium-235, on utilise un arrangement qui combine ces deux matières fissiles. On réalise ainsi une amorce de bombe N en combinant quelques kg d' U^{235} avec environ 3 kg de Pu^{239} . Le diamètre de la sphère est alors de 9 cm environ, ce qui correspond à la moitié du diamètre disponible dans un obusier habituel pour ce genre de lancement de 203 mm (fig. 4).

Lorsque la bombe est lancée par un obusier, elle se trouve soumise à une accélération de 15 000 g. Par conséquent, les différents constituants de la bombe, et en particulier l'amorce fissile et le combustible fusible (environ 100 g de Li_2DT pour une bombe N de 1 kt) doivent être fermement maintenus en place, à savoir aux deux foyers du réflecteur de rayons X, par un remplissage qui possède des propriétés mécaniques exceptionnelles. Une des rares substances véritablement appropriée est une mousse de polyuréthane : en plus de sa faible densité et de son poids atomique peu élevé, elle présente l'avantage d'être un excellent isolant thermique. Elle permet donc de protéger la matière fusible de la chaleur pendant le stockage ou le lancement de la bombe (les hydrures de lithium se décomposent au-dessus de 100 °C).

Lorsque la bombe N explose, les neutrons de fusion n'ont alors qu'à sortir de la matière fusible et à traverser le réflecteur et le boîtier pour arroser le sol. Certains des neutrons qui partent vers le haut interagissent avec le reste de la matière fissile de la bombe A en expansion, et y produiront des fissions supplémentaires. Cet effet de « rétrocouplage » est loin d'être négligeable, puisque dans le cas d'une bombe N de 1 kt, le rétrocouplage de la fusion sur la bombe A d'amorçage provoque une production additionnelle d'énergie de fission de l'ordre de 0.1 kt !

La fonction du réflecteur de rayons X est de focaliser une partie de l'énergie de radiation de la bombe A sur l'ablateur qui entoure la matière fusible. Il s'agit là, aussi bien pour la bombe H que pour la bombe N, de la partie la plus délicate et la plus secrète. Compte tenu du rôle essentiel joué par ce système réflecteur-ablateur, nous allons l'examiner un peu plus en détail.

La clé de la réussite : le réflecteur.

La clé de la réussite : le réflecteur.

Les rayons X émis par une bombe A ont une énergie moyenne qui va de 0.1 à 10 keV suivant la puissance de la bombe (encadré 1). Comme cette énergie est beaucoup plus élevée que celle des photons de la lumière visible (quelques eV), les techniques habituelles de l'optique ne s'appliquent plus⁽⁴⁾. En effet, pour prendre un exemple, la longueur d'onde des rayons X d'une énergie de 2 keV n'est que de 4 Å, c'est-à-dire du même ordre que la distance interatomique dans un solide, si bien que les rayons X y pénètrent au lieu d'être réfléchis à sa surface. Pour de tels rayons X, ce n'est donc que pour un angle d'incidence rasant (tel que la distance interatomique apparaisse à nouveau comme petite par rapport à la longueur d'onde) que le coefficient de réflexion sera non négligeable. Par exemple, dans le cas du nickel, et pour des rayons X de 1.2 keV, la réflectivité est de 0.8 pour une incidence rasante de 1°, mais n'est plus que de 0.0001 pour un angle de 45°⁽⁵⁾. Le réflecteur à rayons X d'une arme thermonucléaire nécessite donc d'avoir recours à des dispositifs spéciaux, très différents des techniques utilisées en optique ordinaire : les miroirs multicouches⁽⁴⁾.

Le principe d'un miroir multicouches consiste à déposer sur un support approprié un grand nombre de couches successives de matériaux de poids atomique très différents. On alterne, par exemple, de l'uranium et du carbone. En choisissant convenablement les épaisseurs respectives de ces couches, on obtient, pour une énergie donnée de rayons X, un angle d'incidence déterminé, tel que les ondes réfléchies par chacune des couches interfèrent constructivement et que la réflectivité obtenue pour cet angle soit beaucoup plus élevée qu'avec une seule couche. Ainsi, avec un miroir composé de 100 couches de tungstène séparées par du carbone, on trouve une réflectivité théorique de 40 % pour des rayons X de 1.2 keV⁽⁵⁾.

Dans le cas d'un réflecteur destiné à des armes thermonucléaires, il y a au moins deux différences par rapport à cette technique. La première est qu'un miroir multicouches agit en fait comme un filtre, c'est-à-dire qu'il ne réfléchit de manière appréciable que les photons qui tombent sur lui avec une énergie donnée et sous un angle bien précis. En fait, plus la réflectivité est élevée, plus la bande de fréquence acceptable par le miroir est faible. Ainsi, comme les rayons X émis par une bombe A n'ont pas tous la même énergie (celle-ci étant distribuée selon un spectre semblable à celui d'un corps

constante. On peut alors écrire :

$$\eta_{\phi} = \frac{\rho R}{B + \rho R}$$

A une température fixée, B, le « paramètre de combustion », permet d'estimer le rendement en fonction de la densité ρ et du rayon R de la sphère de matière fusible. Dans les conditions optimum, $B \approx 5 \text{ g/cm}^3$ pour le DT et $B \approx 17 \text{ g/cm}^2$ pour le Li_2DT .

tible opaque aux neutrons qui y sont produits. En effet, le diamètre initial d'une sphère non comprimée de 100 g de Li_2DT (6 cm) est pratiquement égal au libre parcours moyen des neutrons de 14 MeV dans ce combustible (7 cm), qui est alors essentiellement transparent aux neutrons. Mais si sa densité est multipliée par 8, le libre parcours moyen diminue d'un facteur 8 alors que le diamètre ne diminue que de moitié. Le libre parcours étant alors 4 fois plus petit que le diamètre, les

T (keV)	T (°K)	$\alpha = 1$		$\alpha = 8$	
		η_{ϕ}	Y_{ϕ} (kt)	η_{ϕ}	Y_{ϕ} (kt)
100	1.2 · 10 ⁶	0.09	0.21	0.29	0.69
40	4.6 · 10 ⁶	0.13	0.31	0.38	0.91
20	2.3 · 10 ⁷	0.11	0.26	0.32	0.76
12	1.4 · 10 ⁸	0.07	0.17	0.22	0.52
6	7.0 · 10 ⁷	0.02	0.05	0.06	0.14
3	3.5 · 10 ⁷	0.002	0.005	0.006	0.014

Le tableau ci-dessus donne le rendement de fusion d'une sphère de 100 g de Li_2DT , pour une densité normale ($\rho_0 = 0.88 \text{ g/cm}^3$) et pour un facteur de compression $\alpha = 8$. A des températures de combustion inférieures à la température d'allumage, 6 keV, les rendements restent faibles. Par contre, au-dessus de 20 keV, température nécessaire à la propagation d'un front de détonation, le rendement atteint une valeur de 30 à 40 %, à condition que le combustible soit comprimé au moins 8 fois. La compression offre donc deux avantages : d'une part elle abaisse l'énergie critique, ce qui facilite l'allumage, et d'autre part elle augmente le rendement, ce qui réduit les besoins en tritium.

neutrons produits dans le combustible interagiront plusieurs fois avant d'en sortir, à moins qu'ils n'y soient absorbés. Ce phénomène est mis à profit dans la bombe H, où les interactions des neutrons avec le lithium-6 servent à fabriquer du tritium « sur place ». En revanche, cette opacité constitue un inconvénient majeur dans le cas de la bombe à neutrons, où l'on cherche justement à laisser s'échapper les neutrons sans entrave.

(1) K. A. Brueckner *et al.*, « Laser-driven fusion », *Rev. Mod. Phys.*, 46, 325, 1974.
 (2) G. S. Fraley *et al.*, « Thermonuclear burn characteristics of compressed deuterium-tritium microsphere », *Phys. of Fluids*, 17, 474, 1974.

(4) J. H. Underwood and D. T. Attwood, « The renaissance of X-ray optics », *Physics Today*, p. 44, avril 1984.
 (5) B. L. Henke *et al.*, « Low-energy X-ray interaction coefficients : photoabsorption, scattering, and reflection », *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 27, 1, 1982.

Des essais nucléaires souterrains sont indispensables pour mettre au point le réflecteur de rayons X.

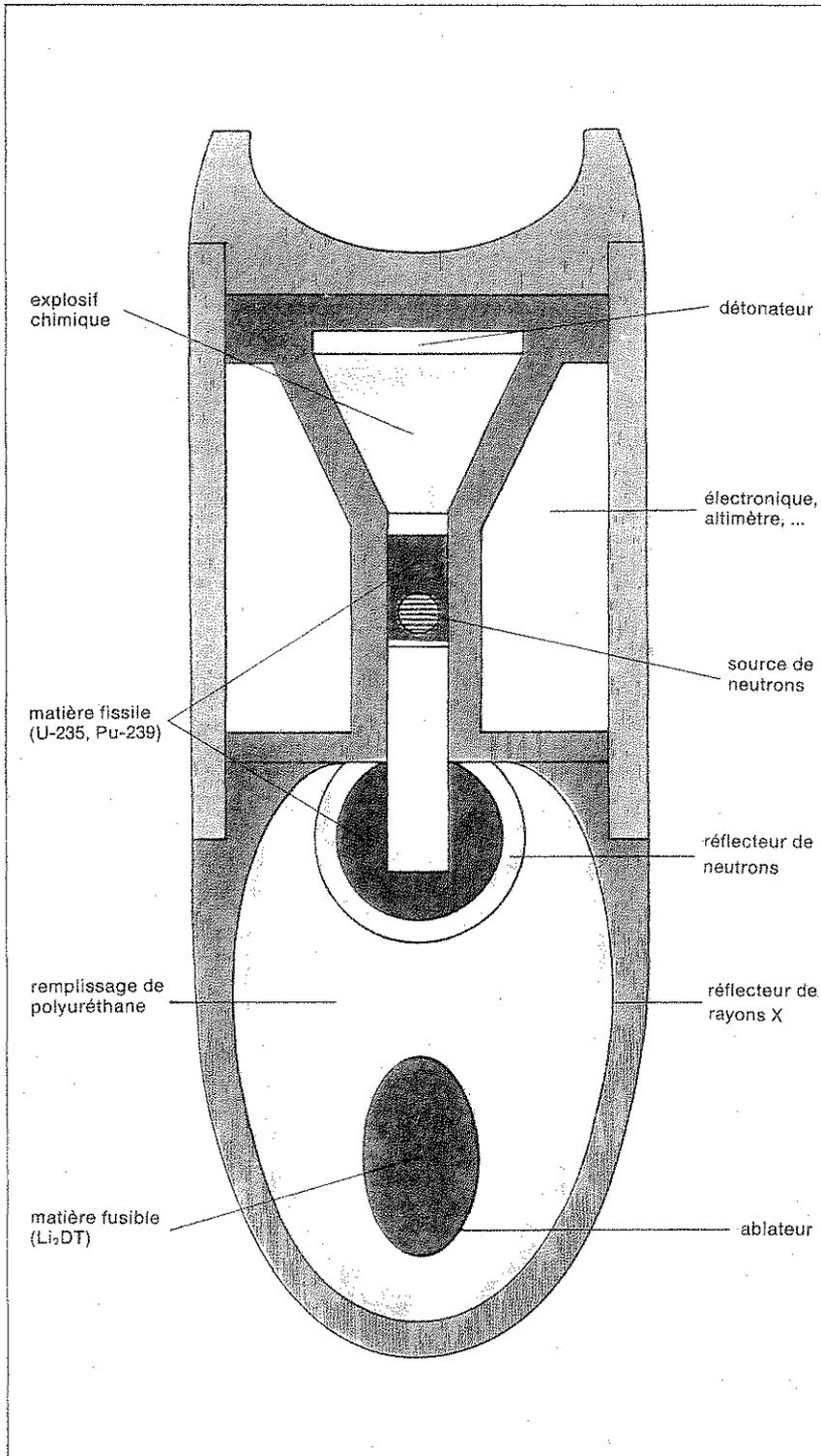


Figure 3. Le modèle de bombe N représenté ici est celui d'un projectile destiné à être lancé par un obusier de 203 mm. La bombe A, dont le système de déclenchement utilise ici la méthode du « canon », est constituée de deux pièces de matières fissiles (U 235, Pu 239) complémentaires que l'on rassemble avec les explosifs chimiques en un temps très bref, permettant ainsi d'atteindre très rapidement une masse supérieure à la masse critique. Il suffit alors de quelques neutrons pour démarrer la réaction en chaîne et faire exploser la bombe A. Cependant, au lieu d'attendre la première fission spontanée, on utilise une source de neutrons activée au moment le plus approprié, comme, par exemple, une capsule dans laquelle, au moment de l'impact, du polonium-210 et du béryllium se mélangent intimement en émettant une énorme bouffée de neutrons. Pour réduire la masse critique, on entoure la matière fissile avec du béryllium qui agit comme un réflecteur pour les neutrons de fission. Lorsque les rayons X émis par l'explosion de la bombe A atteignent l'ablateur qui entoure la matière fusible, l'explosion de la bombe N proprement dite commence. Les neutrons sortent alors de la matière fusible, traversent le réflecteur et le boîtier, pour arroser le sol.

noir), seule une infime partie de l'énergie totale émise sous forme de rayons X pourrait être réfléchiée par un miroir multicouches construit pour une seule longueur d'onde. La solution consiste alors à fabriquer un miroir multicouches « multiple », constitué d'une superposition de miroirs multicouches différents, et chacun optimisé pour réfléchir une partie différente du spectre de rayons X de la bombe A. En pratique, il est donc très difficile de réaliser un miroir qui focalise plus de quelques pour cent de l'énergie de la bombe A sur la matière fusible.

Deuxièmement, ce réflecteur de rayons X doit pouvoir fonctionner malgré l'intense flux de radiations provenant de la bombe A auquel il est soumis. Sous l'effet de ces radiations de toutes fréquences, la température du réflecteur augmente très rapidement, et les couches exposées du miroir commencent à se volatiliser. Les atomes composant le miroir sont évidemment ionisés, et dans ces conditions, indépendamment de sa destruction progressive, les propriétés optiques du miroir deviennent très différentes de ce qu'elles étaient avant l'explosion, et il faut en tenir compte lors de sa construction.

Ainsi, l'étude et la réalisation du réflecteur est un problème vraiment très compliqué. On comprend, dès lors, l'importance des essais nucléaires souterrains pour parvenir à le mettre au point. Toutefois, dans le cas de la bombe H, on est arrivé à une solution assez rapidement. En effet, comme on n'est pas limité par la puissance de la bombe A d'amorçage, celle-ci peut être de l'ordre de 10 kt ou plus; on peut alors se contenter d'une réflectivité très faible. Pour ce faire, il suffit d'assembler quelques dizaines de couches d'uranium séparées par des feuilles d'une matière légère, après avoir bien choisi l'épaisseur de ces couches ainsi que la forme du réflecteur.

Mais dans le cas de la bombe à neutrons, il ne faut pas utiliser des matériaux lourds, et surtout pas de l'uranium, bien qu'ils réfléchissent le mieux les rayons X. De plus, afin de réduire au maximum la puissance de la bombe A, il faut que la réflectivité soit optimale pour une plage aussi large que possible du spectre des rayons X. Dans les meilleures conditions, on peut estimer qu'un tel miroir aura une réflectivité intégrale de 5 %, c'est-à-dire que 5 % de l'énergie émise par la bombe A sous forme de rayons X seront effectivement focalisés sur la matière fusible. En pratique, un tel miroir ne sera pas très épais; mais, pour lui conférer une inertie suffisante afin qu'il ne se déforme pas trop vite sous l'effet des rayonnements, il devra être fixé sur un support qui, avec le boîtier de la bombe, aura une épaisseur équivalente à environ 1 cm d'acier.

Enfin, en admettant que l'ablateur absorbe convenablement les rayons X, il faut encore connaître le rendement de la compression ablative, c'est-à-dire estimer

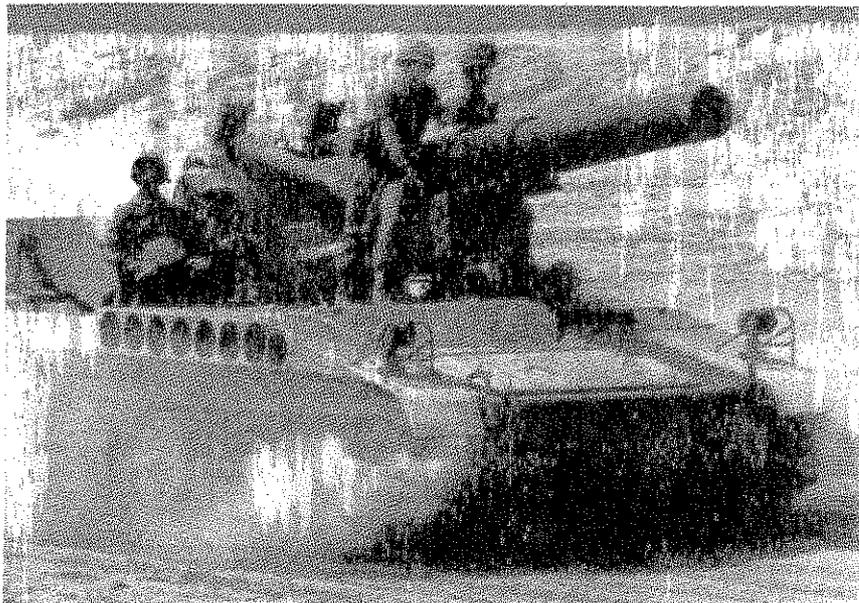


Figure 4. Cette photographie représente un obusier M-110 en manœuvre. Ce canon autotracté de 203 mm peut lancer une bombe N à 20 ou 40 km. Les Etats-Unis sont en train de produire 800 obus à neutrons pour ce type d'obusier, dont 450 exemplaires sont en service en Europe occidentale. En France, l'idée d'utiliser un obusier pour le lancement de la bombe à neutrons n'a pas la faveur des spécialistes. (Cliché Univ. of California, Lawrence Livermore Natl. Lab. and Dept. of Energy.)

la fraction de l'énergie finalement communiquée au combustible fusible par rapport à l'énergie déposée sur l'ablateur. Comme la compression ablative agit par la force de réaction de la matière éjectée de sa surface sous l'effet des rayons X, son rendement peut se calculer de la même façon que celui d'une fusée. On trouve alors qu'il dépend essentiellement du rapport entre la masse de l'ablateur et la masse utile (en l'occurrence la masse de Li_2DT à comprimer), et lorsque ce rapport est de 5, le rendement de la compression ablative est maximum, et est de l'ordre de 5 %⁽⁶⁾. Dans le cas d'un ablateur en acier, son épaisseur sera environ de 5 mm.

Le secret de « l'opacité » aux rayons X.

L'explosion d'une bombe N peut se résumer en six étapes.

— En mettant le feu aux explosifs chimiques, on rassemble la matière fissile, qui est encore comprimée jusqu'à ce que la réaction en chaîne commence et que la bombe A explose.

— Les rayons X émis par cette bombe A transforment l'ensemble des matériaux contenus dans le réflecteur en un plasma qui devient transparent aux rayons X.

— Environ 5 % des rayons X sont alors réfléchis par le réflecteur, qui les focalise sur l'ablateur entourant la matière fusible.

— L'évaporation de la surface de l'ablateur produit, par réaction, une force qui comprime fortement la matière fusible.

— La fusion commence au moment où, à la fin de la compression, l'énergie communiquée à la matière fusible, qui est

de l'ordre de 5 % de l'énergie focalisée sur l'ablateur, devient égale à l'énergie critique.

— Le combustible fusible explose, et finalement les neutrons commencent à irradier, après avoir pu sortir de la matière fusible comprimée, traverser l'ablateur, le réflecteur et enfin le boîtier de la bombe.

Dans l'ensemble de ces processus, les matériaux impliqués se trouvent dans des conditions extrêmes de température et de pression. Ils se comportent alors comme des fluides ionisés : il s'agit donc d'un problème d'hydrodynamique des plasmas où toutes sortes de phénomènes se déroulent simultanément. Problème pour lequel les caractéristiques d'émission, de transport, de réflexion et d'absorption des rayons X aux températures élevées sont essentielles. Pour cette raison, ces diverses données, et en particulier les « opacités » aux rayons X des matières de poids atomique élevé sont gardées secrètes. De plus, les calculs demandent des ordinateurs très puissants et, finalement, contrairement à la bombe A, la mise au point des bombes H et N et leur miniaturisation nécessitent un grand nombre d'essais en vraie grandeur. D'ailleurs, la majorité des essais nucléaires sont généralement de faible puissance, car ils concernent l'étude de l'amorçage des réactions thermonucléaires. Toutefois, deux nouvelles techniques de laboratoire permettant aujourd'hui de compléter efficacement les essais souterrains : la fusion inertielle par micro-explosion et le rayonnement synchrotron⁽⁷⁾.

Dans la fusion par micro-explosion, on comprime une petite pastille contenant du combustible fusible en l'exposant à des faisceaux intenses de particules ou de

lumière laser (la Recherche, n° 157, p. 950, juillet-août 1984). Ce genre de recherches, dont les applications à la production d'énergie électrique sont très peu probables, permettent d'étudier en laboratoire les détails du processus d'explosion thermonucléaire. En France, les recherches concernant ce domaine sont couvertes par le secret depuis quelques années⁽⁸⁾.

Le rayonnement synchrotron est émis lorsque des particules chargées se déplacent sur une trajectoire courbe. En plaçant des aimants spécialement construits dans un faisceau intense d'électrons, tels que ceux que l'on trouve dans les anneaux de stockage utilisés pour les recherches en physique des particules élémentaires, on obtient un spectre de rayons X dont les caractéristiques sont proches de celui des rayons X émis par une bombe A, quoique d'une intensité beaucoup plus faible (la Recherche, n° 77, p. 316, avril 1977). Toutefois, la brillance des sources de rayonnement synchrotron actuellement disponibles ou en construction est telle qu'on les utilise déjà pour mesurer un grand nombre de données nécessaires au perfectionnement des armes thermonucléaires⁽⁹⁾.

Bien que le calcul et la mise au point d'une bombe N soit très complexe dans la réalité, il est possible de connaître, en première approximation, la puissance de sa bombe A d'amorçage. On admettra que le facteur de compression est de 8, ce qui est proche de la valeur maximum admissible pour une bombe N; que le rendement de la compression est de 5 %, et la réflectivité du miroir à rayons X de 5 %. Dans des conditions, la puissance nécessaire sous forme de rayons X est alors d'environ 0.25 kt

(i.e. $\frac{40 \text{ t}}{64 \times 0.05 \times 0.05}$). Or, pour une bombe A de 0.5 kt, les rayons X correspondent à environ 50 % de l'énergie totale, c'est-à-dire 0.25 kt (tableau de l'encadré 1). Ainsi, la puissance de la bombe A d'amorçage sera finalement d'environ 0.5 kt. Cette puissance ne dépend d'ailleurs pas de la puissance de fusion de la bombe N. Elle détermine donc le minimum possible pour la puissance d'une bombe N.

Jusqu'à 780 mètres du point d'explosion.

Parmi les nombreux aspects controversés de la bombe N, celui de ses effets physiques est l'un des plus importants, notamment parce que des réponses précises sont possibles en principe. Au chapitre des armes nucléaires, l'existence de cette controverse contraste vivement avec le cas des armes nucléaires stratégiques, pour lesquelles une abondance d'informations précises et officielles existe depuis les années 1950⁽¹⁰⁾; ainsi que de nombreuses études scientifiques indépendantes.

Récemment, dans le but de clarifier les bases techniques des discussions sur la

(6) K. A. Brueckner and S. Jorna, « Laser-driven fusion », *Review of Modern Physics*, 46, 325, 1974.
 (7) A. Gsponer et al., « Emerging nuclear energy systems and nuclear weapon proliferation », *Atomkern-energie/Kern-technik*, 43, 169, 1983.
 (8) *Journal Officiel*, Décret 80-247 du 3 avril 1980 relatif aux activités d'études et de recherches dans le domaine de la fusion thermonucléaire par confinement inertiel, Paris, 3 avril 1980.
 (9) C. Norman, « Weapons Proposal Stirs Disquiet at Stanford », *Science*, 219, 936, 1983; P. J. Ebert, « Synchrotron-Radiation Research Project », *Energy and Technology Review*, Lawrence Livermore Laboratory, April, 1984.
 (10) S. Glasstone and P. J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, United States Department of Defense, United States Department of Energy, 1^{re} édition 1950, dernière édition 1977.

La dose de radiation d'une bombe N réelle est presque trois fois plus petite que celle d'une bombe N idéale.

bombe N, le laboratoire militaire américain de Los Alamos a publié deux rapports sur les effets de cette arme. Le premier concerne les effets mécaniques, thermiques et d'irradiation⁽¹¹⁾, et le second l'activation de l'acier d'un blindé par l'effet des neutrons⁽¹²⁾. On y décrit aussi les méthodes à utiliser pour calculer ces différents effets, tant pour la bombe N que pour les armes nucléaires tactiques à fission. Il est ainsi possible de calculer les contributions respectives des parties de fission et de fusion aux effets de l'arme à neutrons, par exemple lorsque l'énergie de fusion est de 1 kt :

— Les effets mécaniques et thermiques sont dus à l'énergie déposée par les particules chargées et les rayons X dans la bombe et dans l'air à proximité immédiate, ainsi qu'à l'énergie perdue par les neutrons dans leurs collisions à l'intérieur de la bombe. Cette énergie est donc égale à la totalité de celle de la bombe A d'amorçage, environ 0.5 kt, à quoi s'ajoute au minimum celle des particules chargées engendrées dans la fusion, soit 20 % de 1 kt. La publication de Los

(11) H. A. Sandmeier et al., *How to calculate effects of tactical low-yield enhanced-radiation and fission warheads*, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-9434, October 1982.

(12) H. A. Sandmeier, and M. E. Battat, *Radiation to Personnel from activities induced in tank armor for enhanced-radiation and fission nuclear weapons*, Los Alamos Scientific Laboratory, LA-9592-MS, december 1982.

(13) A. Gspöner and S. Sahin, « Protection capability of modern tank armor against enhanced-radiation and fission nuclear warheads », to be published in *Atomkernenergie/Kerntechnik*, 1984.

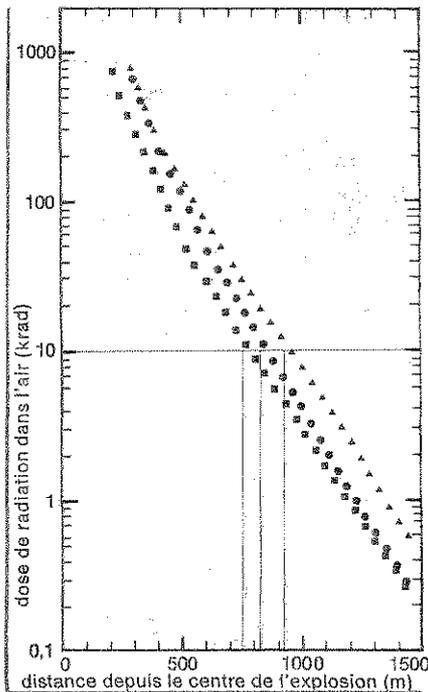


Figure 5. Les discussions sur les effets de la bombe N portent principalement sur ceux des radiations. Nous avons représenté ici les doses de radiation dans l'air en fonction de la distance depuis le centre de l'explosion, pour trois types d'explosion. Les triangles correspondent à une bombe N hypothétique, parfaitement transparente aux neutrons et d'une puissance de fusion de 1 kt; les carrés à une bombe N réelle de même puissance; et les cercles à une bombe de fission dopée de 10 kt. Dans les deux exemples de bombe N, les radiations de la bombe A d'amorçage sont négligées. Du point de vue militaire, la dose de radiation la plus importante est celle qui provoque une incapacité permanente immédiate, suivie par le décès dans l'espace de quelques minutes : cette dose est de 10 krad. Suivant la distance, on constate que la dose de radiation d'une bombe N réelle est presque 3 fois plus petite que celle d'une bombe N idéale.



Figure 6. Le char français AMX-32 est un exemple de blindé moyen (38 t) de la génération actuelle, offrant une protection renforcée (semblable à celle d'un blindé lourd des années 1960) contre les armes anti-char et les neutrons. L'armée française ne dispose pas de chars de bataille offrant un degré de protection comparable aux blindés lourds (45-55 t) américains ou soviétiques les plus récents. (Cliché Keystone.)

Alamos donne 30 % pour la fraction de l'énergie des neutrons perdue dans la bombe. La contribution de la fusion est donc égale à 50 % de 1 kt, ce qui donne au total, pour les effets mécaniques et thermiques, une source d'énergie équivalente à 1 kt de fission.

— Les effets d'irradiation sont dominés par les neutrons de fusion, beaucoup plus nombreux et énergiques que les neutrons provenant de la bombe A d'amorçage. Pour l'activation du sol, des véhicules militaires, etc., il en sera de même⁽¹²⁾.

— Bien que les interactions des neutrons de fusion avec le matériel de la bombe, l'air environnant et le sol produisent également des substances radioactives, les plus dangereuses sont celles qui proviennent de la fission de l'uranium ou du plutonium. D'ailleurs, cette fission ne provient pas seulement de l'explosion de la bombe A d'amorçage, mais encore des interactions d'une partie des neutrons de fusion avec la matière fissile. Au total, ceci correspond à environ 0.5 kt, et les retombées radioactives seront donc équivalentes à celles d'une bombe de fission de 0.5 kt.

En admettant que ces valeurs soient représentatives d'une bombe N typique, les principaux effets d'une telle arme sont présentés dans le tableau 1. On y indique les critères de seuil des différents effets ainsi que leur rayon d'action, c'est-à-dire la distance maximum depuis le centre de l'explosion telle que ce seuil se trouve dépassé.

Il est facile de comparer les effets mécaniques et thermiques d'une bombe N à ceux d'une bombe à fission de 10 kt, l'arme nucléaire tactique que la bombe N est censée remplacer sur le champ de bataille européen. En ce qui concerne les effets mécaniques, leur rayon d'action varie avec la racine cubique de la puissance : celui de la bombe N est donc $(10)^{1/3} = 2.2$ fois plus petit que celui de la bombe de 10 kt. Quant aux effets thermiques, leur rayon d'action varie selon la racine carrée de la puis-

sance : pour la bombe N il est alors $(10)^{1/2} = 3.1$ fois plus petit. Malgré ces réductions substantielles, on voit que la bombe N est loin de présenter une absence totale d'effets mécaniques et thermiques.

Mais la discussion sur la bombe N concerne surtout l'effet des radiations. Dans la figure 5 on compare les doses de radiation dans l'air pour trois types d'explosion : celles d'une bombe N typique, celles d'une bombe N hypothétique parfaitement transparente aux neutrons, et enfin celles d'une arme nucléaire tactique dopée de 10 kt⁽¹³⁾. Une dose de radiation de 10 krad provoque une incapacité permanente immédiate suivie par le décès dans l'espace de quelques minutes. Pour une personne à découvert, le rayon d'action correspondant est de 930 m pour une bombe N hypothétique, et de 780 m pour une bombe N réelle. La valeur de 930 m (3 000 pieds), qui est souvent mentionnée à propos du rayon d'action létale d'une bombe N, apparaît supérieure de 150 m à la réalité.

Un autre rayon d'action important, non seulement pour les militaires mais aussi pour la protection des civils, est celui à partir duquel la probabilité de mourir un jour d'un cancer devient négligeable. Cette dose est de 50 rad environ, ce qui correspond à un rayon d'action de 1 700 m, que ce soit pour l'arme nucléaire tactique ou pour la bombe N.

Des blindés de mieux en mieux protégés.

Afin d'évaluer l'efficacité d'une bombe N à mettre hors de combat les équipages des chars d'assaut, il faut tenir compte du facteur de protection offert par les blindages modernes. Aujourd'hui, pour les blindés lourds, ce facteur de protection est tel que le rayon mortel par irradiation tombe de 800 m à moins de 300 m. Paradoxalement, un tel degré de protection atteint par ces blindés n'est pas directement dû à la menace de la bombe N, mais au perfectionnement des

armes anti-char conventionnelles. Ces armes sont actuellement capables de percer près de 100 cm de fer. Il a donc fallu inventer des techniques de blindage faisant appel à des matériaux nouveaux (alliages spéciaux, matières plastiques, composites, etc.) qui, à poids égal, ralentissent mieux que le fer aussi bien les neutrons que les projectiles anti-char (fig. 6).

Pour comprendre la technique du blindage, il faut rappeler que son but principal est de protéger les hommes d'équipage contre toutes les formes de menaces possibles, dont la principale demeure toutefois celle posée par les armes anti-char conventionnelles : charges creuses, obus-flèche, mines, etc. En effet, ces armes anti-char ont pour objectif primordial de tuer les hommes d'équipage, en comptant principalement sur les effets secondaires qu'elles sont capables de produire à l'intérieur du blindé. C'est le cas, par exemple, des projectiles à charge creuse, où un jet de plasma perce un trou d'environ 1 cm de diamètre et projetée à l'intérieur des particules de métal susceptibles de mettre l'équipage hors de combat, et éventuellement de provoquer un incendie ou de faire exploser la munition. De plus, en raison de l'existence de l'hélicoptère et des munitions guidées des précision, il faut encore que le blindage des chars modernes offre une protection suffisante selon tous les angles d'attaques possibles.

Dans tous les cas, le principe de base consiste à interposer un maximum d'obstacles entre les hommes et l'extérieur. Pour cette raison, les parties lourdes telles que le moteur et le train de roulement jouent un rôle protecteur très important. Diverses précautions sont également prises à l'encontre des radiations nucléaires, en profitant du fait que certains matériaux, notamment ceux qui sont riches en hydrogène, ralentissent et absorbent les neutrons beaucoup mieux que d'autres. Pour cette raison, les réservoirs de carburant, les munitions, etc., sont disposés autour de l'équipage.

Dans ces conditions, les surfaces du char les moins protégées par ses parties lourdes sont celles qui doivent être particulièrement renforcées, c'est-à-dire l'avant et le dessus du blindé. Cette protection frontale constitue en fait la technique du blindage proprement dit. Trois générations de chars se sont succédées depuis la Seconde Guerre mondiale. On peut observer que si l'épaisseur totale de ces blindages est passée de 10 cm à 30 cm, l'épaisseur d'acier n'a pratiquement pas augmenté. La différence réside dans l'utilisation de matériaux légers permettant d'augmenter la résistance aux armes anti-char. Dans la génération de 1960, l'un de ces matériaux était le verre qui, à poids égal, est 3.5 fois plus résistant aux charges creuses que l'acier. Aujourd'hui, on a recours à des matières plastiques et des composites.

Bien évidemment, les épaisseurs et la

	critère de seuil	rayon d'action
irradiation provoquant 10% de décès dans les années qui suivent l'explosion.	50 rad	1700 m
flux de radiations thermiques provoquant encore des brûlures au second degré et allumant des incendies pouvant entraîner un incendie général.	4 cal/cm ²	800 m
irradiation provoquant 100% de décès dans les minutes qui suivent l'explosion.	10'000 rad	780 m
seuil de destruction des bâtiments par la surpression durant le passage de l'onde de choc.	0.2 kg/cm ²	760 m
destruction totale des villes	0.4 kg/cm ²	430 m

Tableau 1. Ce tableau présente les rayons d'action des effets d'une bombe N typique sur les personnes à découvert et sur les villes. On peut constater, à l'inverse de ce qui a été souvent mis en avant par les partisans de l'arme à neutrons, que ses effets mécaniques et thermiques sont loin d'être négligeables.

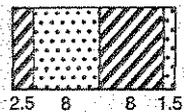
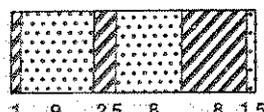
type de blindage frontal	exemple	rayon d'action	aire létale
0	personne à découvert transporteur de troupes blindé léger	780 m	1.9 km ²
1940 : 10 cm. 	blindé lourd (1940-1960) ex. : M 48, T-10...	640 m	1.3 km ²
1960 : 20 cm. 	blindé lourd (1960-1980) ex. : M 60, T-72...	400 m	0.50 km ²
1980 : 30 cm. 	blindé lourd (1980-2000) ex. : XM 1, T-80...	280 m	0.25 km ²

Tableau 2. L'utilisation militaire de la bombe N la plus souvent envisagée aujourd'hui est la mise hors de combat des équipages de chars d'assaut. Mais l'efficacité de cette application dépend du blindage, technique qui a largement évolué depuis la Seconde Guerre mondiale. Dans les blindés de la génération 1940, le blindage était simplement constitué par de l'acier. Dans la génération suivante, le blindage comportait en général 4 couches : deux couches d'acier entre lesquelles est insérée une couche d'une matière résistante aux charges creuses (par exemple du verre), et une dernière couche destinée à empêcher la projection d'éclats à l'intérieur du char (par exemple du nylon). Dans la génération actuelle, les blindés lourds tels que le XM-1 américain ou le T-80 soviétique comportent 3 couches principales d'acier, suivies chacune de diverses couches de matériaux légers aux propriétés exceptionnelles : céramiques ultrarésistantes et réfractaires comme l'alumine, composites incorporant des fibres de kevlar ou de carbure de bore, polycarbonates, etc. Tous ces matériaux contiennent des noyaux légers, notamment de l'hydrogène et certains du bore, qui sont d'excellents modérateurs ou absorbeurs de neutrons. Dans ce tableau sont indiqués les rayons d'action des neutrons émis par une bombe N utilisée contre différents types de blindés. On a aussi présenté les aires létales, c'est-à-dire la surface maximale à l'intérieur desquelles les équipages peuvent être mis hors de combat par les radiations.

structure des différentes parties du blindage d'un char ne sont pas en tous points identiques à celles de la protection frontale. Toutefois, le degré de protection devant être le même sous tous les angles, ce blindage permet d'estimer le facteur minimum de protection offert par un blindé contre les radiations des armes nucléaires⁽¹³⁾. Par exemple, si le blindé se trouve à 400 m du centre de l'explosion d'une bombe N, le facteur de protection (c'est-à-dire la réduction de la dose reçue par rapport à une personne à découvert) est de 2.2, 12 ou 35 selon que le blindage est épais de 10, 20 ou 30 cm.

Dans le cas des blindés construits entre 1940 et 1960, dont le blindage est constitué par 10 à 15 cm d'acier homogène, un facteur de protection proche de 2 est conforme aux chiffres officiels disponibles⁽¹⁴⁾. Pour ce type de chars, on possède également des informations concernant l'activation de l'acier par les neutrons⁽¹²⁾. Par exemple, si l'on veut remplacer l'équipage d'un char qui se trouvait à 200 m de l'explosion d'une bombe N, il faut savoir que les nouveaux occupants recevront une dose décroissante au cours du temps, mais égale à 300 rad pendant la première heure, ce qui serait grave. Par contre, avec un char lourd moderne, cette dose serait inférieure à 30 rad, et le blindé pourra continuer le combat s'il n'a pas été autrement endommagé.

La tableau 2 donne le rayon d'action d'une bombe N contre les blindés des trois générations : 640, 400 ou 280 m. Dans le cas de la bombe N idéale, le rayon d'action théorique est de 930 m. Ceci correspond à une aire létale de 2.7 km² (il s'agit de la surface maximum à l'intérieur de laquelle les équipages des blindés peuvent être mis hors de combat). Par contre, pour une bombe N réelle utilisée contre des blindés, modernes, l'aire létale n'est que de 0.25 km², c'est-à-dire dix fois moindre. Ceci réduit d'autant le nombre de blindés qu'il serait possible de stopper à l'aide d'une seule bombe N. De plus, pour les blindés lourds modernes, le rayon mortel d'irradiation est égal au rayon pour lequel la bombe N inflige déjà des dommages importants au blindé lui-même : 280 m environ. En effet, pour les trois générations, ce rayon d'action correspond à une suppression telle que le char est susceptible d'être visiblement endommagé, par exemple en ayant une chenille arrachée, ou en étant retourné. Dans ces conditions, il n'est pas possible d'utiliser l'arme à neutrons autrement qu'en la faisant exploser à basse altitude, ce qui provoquera des dommages matériels considérables, notamment à d'éventuels bâtiments se trouvant à moins de 800 m du centre de l'explosion.

Où trouver le tritium et le plutonium ?

Pour analyser complètement la question de la bombe N, il faudrait discuter en

détail des aspects militaires, économiques et politico-stratégiques de son utilisation, de sa production et de son déploiement. Le but de cet article étant de faire le point sur les bases techniques de ce débat, on se contentera donc d'évoquer, en guise de conclusion, les principales conséquences qui en découlent (*la Recherche*, n° 116, p. 1304, 1980).

Du point de vue militaire, une bombe N qui explose à 400 m au-dessus du sol est capable de mettre hors de combat toute personne à découvert dans un rayon au sol de 700 m environ. Toutefois, ce rayon mortel étant dû aux neutrons, il est facile de s'en protéger, par exemple par une épaisseur de 30 cm de terre ou de ciment. Par contre, si la bombe N est utilisée comme arme anti-char, il faudra la faire exploser à une faible hauteur au-dessus du sol, 200 m au maximum. Les effets mécaniques et thermiques produiront alors des dommages collatéraux considérables au-delà du rayon de 250 à 350 m dans lequel les occupants des blindés lourds seront tués.

De surcroît, en plus de son faible rayon d'action, l'utilisation de la bombe N pose des problèmes logistiques considérables. En effet, depuis le début des années 1960, les tactiques soviétiques sont déterminées par l'existence en grand nombre d'armes nucléaires tactiques en Europe. Dans ces conditions, il semble bien qu'une offensive soviétique serait montée en formation dispersée et les blindés ne se rassembleraient en fer de lance qu'à moins d'un kilomètre du contact. De la sorte, ils ne constitueraient une cible favorable que durant les quelques minutes précédant l'attaque. Il faudrait donc repérer la formation, puis commander (avec tous les problèmes de délégation du commandement que cela suppose), préparer et exécuter le tir dans un délai très bref, et avec une très grande précision afin d'éviter l'irradiation des troupes alliées⁽¹⁵⁾. Et tout ceci, pour arrêter quelques dizaines de blindés au plus, dans des conditions telles que des armes anti-char modernes permettraient d'obtenir le même résultat.

Du point de vue économique, il y a plusieurs différences entre la bombe N et les armes nucléaires stratégiques. La première est le nombre : s'il suffit, en principe, de quelques dizaines d'ogives montées sur des fusées intercontinentales pour prétendre à une dissuasion crédible, il faut des centaines, voire des milliers de bombes N pour qu'elles puissent jouer un rôle déterminant sur le champ de bataille. Cependant, les ogives nucléaires ne sont qu'une petite partie de ce qui est nécessaire pour réaliser un système d'armement nucléaire stratégique moderne. Les vecteurs (fusées, sous-marins, etc.) et les systèmes annexes (satellites artificiels, radars, etc.) sont aujourd'hui notablement plus complexes et coûteux que les têtes nucléaires elles-mêmes. Il y a donc une deuxième différence essentielle avec les armes stratégiques : pour l'arme à neutrons, les vecteurs sont moins

complexes (par exemple les fusées tactiques à courte portée) ou même déjà existants comme les avions, les obusiers, etc.

Une fois la bombe N au point, sa construction se ramène donc principalement à la production des matières nucléaires : au moins 3 kg de plutonium et 20 g de tritium pour chaque bombe. Pour 300 bombes N, on voit que ces besoins seraient considérables, notamment en ce qui concerne le tritium.

En France, il existe à Marcoule deux réacteurs, Céléstin 1 et 2, chacun capable de produire au moins 600 g de tritium ou bien 45 kg de plutonium par année⁽¹⁵⁾. Comme les besoins en tritium pour les bombes H sont relativement faibles, l'utilisation principale de ces réacteurs est aujourd'hui de produire du plutonium pour les programmes militaires. Cependant, s'il fallait fabriquer 300 bombes N, l'ensemble de la capacité de production de ces réacteurs devrait être consacrée au tritium. De plus, la demi-vie du tritium n'est que de 12 ans. Il faudrait donc périodiquement compléter les charges en tritium des bombes ce qui, pour 300 bombes N, représente au moins 500 g par an. Ainsi, sans même parler des besoins en plutonium, il n'est pas certain que les installations actuelles puissent répondre à une pareille demande de matières nucléaires.

Du point de vue stratégique et politique, il faut tenir compte du rôle symbolique joué par les armes nucléaires. En raison de leur coût considérable, qui conduit à des sacrifices importants dans le domaine des armements conventionnels, elles sont devenues l'expression d'une volonté de défense qui accepte l'idée d'une possibilité de dommages réciproques irréparables en cas d'agression. Dans ce contexte, l'efficacité militaire de la bombe N sur le champ de bataille n'est pas une nécessité absolue. Par contre, si le rôle de la bombe N est plus que celui d'adresser un « ultime avertissement » avant le recours aux représailles massives, il faut qu'elle procure un avantage décisif à son utilisateur. Comme cela n'est techniquement pas possible, d'autres aspects doivent compenser cette déficience. Ainsi, on doit tenir compte de l'intérêt des scientifiques pour les études conduisant à la mise au point de la plus complexe des têtes nucléaires; de la fascination des militaires pour un concept qui s'apparente à celui d'une arme absolue; de l'importance politique d'affirmer la maturité et la continuité du programme nucléaire; de l'utilisation qu'elle permet de faire des vastes installations de production de matières nucléaires qui ont été construites pour faire les bombes A et H, etc. Finalement, si l'on tient compte du prestige qu'une nation retirerait de la possession d'un arsenal de bombes N, on voit que l'absence d'une justification militaire indiscutable⁽¹⁶⁾ risque de ne pas peser lourd dans la décision de produire la bombe à neutrons⁽¹⁷⁾.

(14) K. F. Wisner, « Military aspects of enhanced radiation weapons », *Survival*, XXIII, 246, 1981.

(15) « Les réacteurs Céléstin », *B.I.S.T.-C.E.A.*, No. 153-154, novembre-décembre 1970, p. 6, p. 36.

(16) « L'arme à neutrons, pour quoi faire ? », acte du colloque organisé conjointement par le Comité d'étude de défense nationale et la Fondation de défense nationale en décembre 1981. *Défense nationale*, 38, p. 5, mars 1982.

(17) L'auteur remercie Suren Erkman pour l'aide précieuse qu'il lui a apportée.