

GIPRI-80-02  
6 août 1980ABSTRACT

De nouvelles technologies nucléaires sont en cours de développement, qui ont des implications claires pour le Traité de non-prolifération des armes nucléaires (NPT) et l'éventuel Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (CTBT). Certaines implications des technologies de la fusion et des accélérateurs de particules sont examinées en détail. A l'heure actuelle, le développement et l'utilisation de ces technologies n'est soumis à aucun contrôle international.

IMPLICATIONS DES TECHNOLOGIES DE LA FUSION ET DES ACCELERATEURS  
DE PARTICULES SUR LA PROLIFERATION VERTICALE ET HORIZONTALE DES  
ARMES NUCLEAIRES

A. Gsponer  
GIPRI, Genève

1980

GIPRI

INSTITUT INTERNATIONAL DE RECHERCHES POUR LA PAIX, A GENEVE

Le GIPRI est un institut indépendant de recherches scientifiques et transdisciplinaires dans des domaines d'importance pour la paix et la sécurité.

L'Institut, fondé en 1979, est constitué sous forme d'une association. Son financement provient entièrement des cotisations de ses membres, de dons et de legs, de subventions qui pourraient lui être accordées sous réserve d'acceptation par son Comité directeur, de la vente de ses publications, et d'autres ressources éventuelles.

Le Directeur de l'Institut est M. André Gsponer.

Comité directeur

M. Roy PREISWERK (Président), Mme Monique BAUER-LAGIER (Vice-Présidente), M. Barthold BIERENS de HAAN, M. Alexandre BERENSTEIN, M. Edouard DOMMEN, M. Orio GIARINI, M. Theo GINSBURG, M. Albert JACQUARD, Mme Denise KESSLER-NICOLET, Mme Marlyse MULLER, M. Michel de PERROT.

Comité d'honneur

M. Denis de ROUGEMONT (Président), M. Frank BARNABY, Mme Elise BOULDING, M. Johan GALTUNG, M. Robert JUNGK, Mme Alva MYRDAL, M. Aurelio PECCEI, M. Max PETITPIERRE, M. Hans RUH, M. Yoshikazu SAKAMOTO, Victor F. WEISSKOPF.

I. Introduction

Trois technologies nucléaires de base peuvent être utilisées (indépendamment ou en combinaison) pour produire de l'énergie ou pour fabriquer des matières fissiles ou fusibles à des fins civiles ou militaires. Ces technologies sont associées à la fission des noyaux lourds, à la fusion des noyaux légers et à l'accélération des particules (électrons, protons ou ions).

Depuis le début de l'âge nucléaire, beaucoup de progrès ont été réalisés dans ces 3 technologies. Bientôt, à côté des réacteurs de fission utilisés pour la recherche ou la production d'énergie, de nouvelles voies s'ouvriront probablement à la prolifération horizontale des armes nucléaires. De plus, ces progrès permettront d'effectuer en laboratoire une partie de plus en plus importante des expériences liées au perfectionnement des armes nucléaires et à leur utilisation sur le champ de bataille. Cela permettra probablement de diminuer le nombre des explosions nucléaires souterraines, mais contribuera aussi à la prolifération verticale des armes nucléaires en facilitant l'étude de la physique et des effets de ces armes.

Parmi les progrès importants réalisés ces dernières années, ceux qui concernent les réacteurs de fission et l'enrichissement de l'uranium ont déjà été examinés dans de nombreux articles (1). Les problèmes de prolifération posés par la fusion ont aussi déjà été examinés (2), mais restent relativement peu connus. Ci-après, nous allons développer certains problèmes posés par la fusion et aborder ceux qui sont impliqués par les accélérateurs de particules (3).

## II. Sources de neutrons et production de matières fissiles ou fusibles

Toutes les méthodes de production de matières fissiles artificielles (Plutonium-239, Uranium-233) à partir des matières fertiles correspondantes (Uranium-238, Thorium-232) requièrent une source de neutrons intense. De même le Tritium, la matière fusible utilisée dans les bombes H et N, est produit en irradiant du lithium avec des neutrons.

Pour fabriquer 1 kg de plutonium ou d'uranium-233, ou encore 13 g de tritium par an, un calcul simple montre qu'il faut disposer d'une source de  $8 \cdot 10^{16}$  neutrons par seconde au moins. Des intensités de neutrons de cet ordre existent dans le coeur des réacteurs nucléaires si bien que tout réacteur en fonctionnement produit inévitablement du plutonium.

Les réacteurs nucléaires conventionnels ne sont cependant qu'un des moyens les plus simples pour fabriquer du plutonium. Cette production de plutonium se fait d'ailleurs au détriment de l'uranium-235 fissionné dans le réacteur et avec un taux de conversion (nombre de noyaux de plutonium produits par fission) inférieur à l'unité. Pour cette raison, avec des réacteurs conventionnels, moins de 1% de l'uranium-238 disponible peut être converti en plutonium.

Les réacteurs rapides (aussi appelés surrégénérateurs) permettent en principe de convertir jusqu'à près de 70% de l'uranium-238 en plutonium. D'autres méthodes plus récentes, qui utilisent la fusion thermonucléaire ou des accélérateurs de particules comme source de neutrons, permettent d'obtenir un résultat semblable. Dans ces nouveaux systèmes (contrairement aux réacteurs conventionnels et aux surrégénérateurs), la source de neutrons est séparée de l'assemblage fertile

dans lequel les neutrons convertissent l'uranium-238 en plutonium. Cette séparation facilite non seulement la résolution des problèmes de sécurité de fonctionnement, mais encore le retraitement de l'uranium irradié du fait qu'il contient alors relativement peu de produits de fission. De plus, l'optimisation de ces systèmes conduit à minimiser le temps d'irradiation de la matière fertile, si bien que le plutonium fabriqué sera de bonne qualité militaire.

Le tableau I permet de comparer les caractéristiques relatives des principales sources de neutrons. Dans ce tableau, les sources de neutrons sont classées en fonction de l'énergie déposée dans la source par neutron utile produit. Pour les sources susceptibles d'être utilisées pour la fabrication de matières fissiles ou fusibles, le tableau indique la production annuelle d'une installation typique.

On constate d'emblée que quelques méthodes classiques couramment utilisées en recherche nucléaire ou en médecine (épluchage des deutérons, réaction deuterium-tritium sur cible solide ou gazeuse, photoproduction par rayonnement de freinage d'électrons) ne peuvent pas convenir à la production du plutonium en quantités industrielles: le rendement neutronique est trop faible et l'énergie déposée par neutron utile trop élevée.

Parmi les méthodes utilisant des réacteurs de fission, on voit que le réacteur à eau lourde demeure nettement le plus intéressant. C'est d'ailleurs pour cette raison, et par le fait qu'il peut fonctionner avec de l'uranium naturel, que les risques de proliférations posés par ce type de réacteurs sont particulièrement grands.

En ce qui concerne les surrégénérateurs rapides, pour une puissance thermique donnée, on constate qu'ils ne sont pas particulièrement intéressants du point de vue de la quantité nette de plutonium produite.

En revanche, les nouvelles méthodes qui utilisent des accélérateurs de hautes énergies (500 à 1500 MeV) ou des réacteurs de fusion peuvent produire 10 à 20 fois plus de matière fissile que des réacteurs de fission de puissance thermique comparable. Toutefois, à l'heure actuelle, ces systèmes n'existent que sous la forme de projets.

Il est intéressant de remarquer que si l'ensemble des installations nucléaires d'un pays membre du Traité de non-prolifération sont placées sous le contrôle de l'Agence internationale de l'énergie atomique, les accélérateurs de particules ne sont soumis à aucun contrôle international. D'autre part, il n'y a encore aucun débat sur cette technologie du point de vue de la prolifération des armes nucléaires (4).

### III. Accélérateurs

Le plutonium-239 fut produit pour la première fois en 1941 à Berkeley en soumettant de l'uranium-238 à un flux de neutrons obtenus en irradiant une cible de beryllium par des deutérons accélérés dans un cyclotron. Par la suite, et jusqu'en automne 1943, les accélérateurs furent la seule source de plutonium et durant cette période plus de 2 milligrammes de plutonium furent ainsi fabriqués (5).

La première tentative d'utilisation des accélérateurs pour la production de matières fissiles en quantités industrielles est due à un groupe de Berkeley et remonte au début des années 50. Ce projet secret était appelé MTA ("Materials Testing Accelerator"). Le but était de produire du plutonium militaire à partir de l'uranium appauvri qui s'accumulait à l'usine d'enrichissement de Oak Ridge. Cette usine était à l'époque essentiellement alimentée par de l'uranium importé, principalement du Congo Belge et de l'Afrique du Sud. Si l'uranium appauvri pouvait être transformé en plutonium, les Etats-Unis auraient été libérés de leur dépendance à l'égard de l'étranger pour leur approvisionnement en uranium. Le projet fut abandonné lorsque de grands gisements d'uranium furent découverts dans l'Ouest américain. La construction de l'accélérateur avait déjà commencé et un prototype testé avec succès, lorsque le projet fut abandonné en 1954 (6).

La technologie des accélérateurs s'est considérablement développée depuis les années 50. On peut actuellement construire des accélérateurs linéaires ou circulaires capables de produire du plutonium en quantités substantielles. Depuis quelques années, il semble même que des systèmes de production de matières fissiles avec des accélérateurs puissent être économiquement compétitifs (6). Ces systèmes peuvent devenir intéressants pour des pays désireux de disposer d'un moyen autre que les réacteurs pour la production de matières fissiles. C'est entre autre le cas pour des pays relativement pauvres en uranium mais riches en thorium. En effet, un seul accélérateur de protons de 1000 MeV, 300 mA, pourrait fournir en principe suffisamment d'uranium-233 pour alimenter une douzaine de réacteurs CANDU de 1000 MW (e) utilisant le cycle uranium-thorium (7).

Le processus physique mis en oeuvre dans les sources de neutrons utilisant des accélérateurs de hautes énergies est la spallation. Lorsque une particule de haute énergie frappe un noyau, des nucléons (protons ou neutrons) sont arrachés ou éjectés du noyau. Si l'énergie de ces produits de spallation est suffisante pour induire des spallations additionnelles, ce mécanisme engendre une cascade nucléaire et de nombreux neutrons sont libérés. Pour une cible d'uranium naturel, le nombre de neutrons ainsi engendrés est de l'ordre de 100 par proton de 1000 MeV (8).

Le tableau II donne les principales sources intenses de neutrons de spallation en fonctionnement ou en projet dans le monde. Ces sources sont généralement construites pour la recherche en physique nucléaire. Elles permettent aussi l'étude des systèmes de production de plutonium à l'aide d'accélérateurs. On appelle souvent ces systèmes "accélérateurs surrégénérateurs", ou même "surrégénérateurs électriques", car en fait ils convertissent en plutonium l'électricité fournie à un accélérateur avec un rendement qui est de l'ordre de 12 en principe (7,8).

La référence (6) donne des détails sur les projets d'accélérateurs surrégénérateurs au Canada et aux Etats-Unis, ainsi que sur d'autres applications possibles des accélérateurs dans le cycle du combustible nucléaire. Son auteur estime que des accélérateurs surrégénérateurs pourraient être construits et mis au point, à un coût raisonnable, dans une dizaine d'années et utilisés commercialement avant 20 ans. On notera l'intérêt pour ces systèmes de pays comme la République Fédérale d'Allemagne (9) et la Suisse (10).

Plusieurs centaines d'accélérateurs de basses et hautes énergies fonctionnent ou sont actuellement en construction dans

le monde. Le tableau III donne une répartition par pays des plus grands accélérateurs de hautes énergies (11).

Le tableau IV donne les principaux accélérateurs en fonctionnement ou en construction dans le Tiers-Monde (12). Dans ce contexte il faut remarquer que la Chine vient de se lancer dans un important programme de recherches en physique des hautes énergies et de construction d'accélérateurs (13). De même, à la suite d'une conférence nationale qui s'est tenue en octobre 1979 à Bombay, il semble maintenant que les Indes aussi vont commencer à développer la technologie des accélérateurs, avec un intérêt particulier pour la réalisation d'une source intense de neutrons de spallation (14).

Une autre conséquence importante du développement considérable de la technologie des accélérateurs de particules est la possibilité qu'ils offrent maintenant d'étudier en laboratoire les effets de rayonnement des armes nucléaires. Ces effets comprennent ceux qui sont causés par "l'impulsion électromagnétique", par les radiations X et gamma, ainsi que par les neutrons émis au moment de l'explosion.

Dans le but de simuler en laboratoire l'intense impulsion de radiations électromagnétiques (X et gamma) produite par une explosion nucléaire, on a construit d'énormes accélérateurs d'électrons de basses énergies (1 à 14 MeV) mais à très hauts courants (0.1 à 1.6 MA) pour des durées très brèves (25 à 100 ns) (15). Le tableau V donne quelques exemples d'accélérateurs de ce type en fonctionnement ou en construction aux USA et en URSS.

La méthode classique pour obtenir des bouffées brèves et intenses de neutrons est la construction de réacteurs spéciaux

pulsé par des accélérateurs d'électrons. On peut maintenant obtenir des impulsions plus courtes et plus intenses à l'aide d'accélérateurs de hautes énergies couplés à des anneaux de stockage. Ces anneaux permettent d'accumuler un nombre important de protons et de les éjecter par la suite en une seule brève impulsion sur une cible de spallation. Un tel anneau de stockage est en construction à Los Alamos aux Etats-Unis pour le WNR (Weapons Neutron Research Facility) (16). La construction d'un anneau de stockage similaire a été proposé pour le projet de source de neutrons intense de spallation envisagé en République Fédérale d'Allemagne (9).

Les sources de neutrons pulsées utilisant des accélérateurs et des anneaux de stockage sont particulièrement intéressantes du fait que le spectre des neutrons de spallation est très semblable à celui produit par l'explosion d'une bombe A. Ces installations permettent d'obtenir ce spectre avec un niveau de radiations électromagnétiques relativement bas. Les accélérateurs d'électrons permettent au contraire d'obtenir un fort niveau de radiations X et gamma avec un bruit de fond neutronique négligeable. Il y a donc complémentarité entre ces deux types d'accélérateurs.

Les implications de la technologie des accélérateurs sur la prolifération verticale et le possible "Traité d'interdiction complète des essais nucléaires" (CTBT) sont clairement exprimées par R.R Fullwood à propos du WNR : "Le développement futur d'armes nucléaires sophistiquées nécessitera de meilleures connaissances en neutronique et en hydrodynamique. L'étude de l'effet de ces armes, requiert la connaissance des performances opérationnelles des systèmes dans un environnement de radiations, ainsi que la connaissance détaillée de la physique pour les calculs. Ces faits, couplés aux contraintes possibles limitant les tests à l'aide d'explosions

nucléaires, préconisent des investigations en laboratoire avec des accélérateurs" (16).

#### IV. Fusion thermonucléaire

Deux techniques principales font actuellement l'objet de développements majeurs pour la construction de réacteurs de fusion thermonucléaire. Premièrement la "fusion par confinement magnétique", dans laquelle un mélange de deuterium-tritium ionisé (plasma), confiné par des champs magnétiques, est chauffé à des températures extrêmement élevées pour allumer la réaction thermonucléaire. Deuxièmement, la technique de la "fusion par confinement inertiel", dans laquelle des pastilles de deuterium-tritium (micro-bombes à hydrogène) sont comprimées et chauffées par des faisceaux laser ou des faisceaux de particules accélérées (électrons, protons ou ions) jusqu'à ce que la réaction thermonucléaire s'enclenche. Cette deuxième technique est aussi appelée "fusion par micro-explosion".

Une des particularités de la fusion deuterium-tritium est que la plus grande partie de l'énergie est emportée par le neutron produit dans la réaction. Si le réacteur de fusion est entouré par un manteau d'uranium, l'énergie des neutrons de fusion (14MeV) est suffisante pour induire la fission rapide de l'uranium. Cette fission permet d'augmenter considérablement l'énergie totale produite et de multiplier le nombre des neutrons par la même occasion. Ce principe est utilisé dans les réacteurs de fusion hybrides "fusion-fission" (17). Dans ces hybrides on combine la réaction de fusion (riche en neutrons) à la réaction de fission (riche en énergie). Si l'on veut optimiser le réacteur hybride non pas pour produire

le l'énergie, mais pour produire des neutrons afin de convertir de la matière fertile en matière fissile, on peut recouvrir la paroi intérieure du manteau par une couche de beryllium dans laquelle les neutrons sont multipliés par la réaction  $(n,2n)$ . On parle alors de "manteaux à fission supprimée" et les hybrides utilisant ce principe sont parmi les systèmes les plus efficaces pour la production de matières fissiles (voir Table I et référence (18)).

Les techniques que nous venons de décrire sont extrêmement sophistiquées et il est probable que seuls les plus grands pays pourront les utiliser avant longtemps. Il existe toutefois de nombreuses variantes de ces techniques et l'une d'entre elles (le "plasma focus dense") semble requérir un niveau technologique moins élevés et son utilisation possible comme hybride pour la production de plutonium a récemment été suggérée (voir Table I et référence (19)).

Le lien étroit entre les applications civiles et militaires de la fusion (surtout en ce qui concerne le confinement inertiel) ne fait aucun doute aujourd'hui. Une grande partie des recherches dans ce domaine aux USA est financée par des programmes militaires (20) et la France vient de placer l'ensemble de ses recherches sur la fusion par confinement inertiel sous le couvert de la défense nationale (21). De plus, si les applications militaires de la fusion semblent constituer une justification importante pour son niveau de financement, la possibilité de produire un jour directement de l'énergie à l'aide d'un réacteur de fusion pure semble être encore très éloignée.

D'après Edward Teller, "Il existe une 'petite chance' qu'un réacteur de fusion magnétique puisse être construit ce siècle encore. En revanche, les chances d'un réacteur à confinement

inertiel sont 'extrêmement éloignées'. Néanmoins, un hybride fusion-fission pourrait être construit dans une dizaine d'années et devrait être développé comme une alternative pour la production d'énergie" (22).

Il est probable que le principal problème de prolifération horizontale posé par la fusion proviendra de la capacité des réacteurs hybrides de produire annuellement de 1 à 10 tonnes de matières fissiles. De plus, comme tout réacteur de fusion, ces hybrides produiront aussi du tritium en abondance (de 10 à 100 kg par année) et avec une efficacité nettement plus élevée que les réacteurs spécialisés que l'on utilise à cette fin actuellement. Finalement, le plutonium produit par les hybrides sera de bonne qualité militaire, si bien que, d'après A.W. Maschke "il est virtuellement assuré que la première application d'une installation de fusion sera la production de matériaux pour les armes nucléaires" (23).

De plus, "étant donné la nécessité de garder secret les techniques associées à la production du tritium, et tenant compte du fait que l'on ne peut pas avec une installation de 'fusion pure' faire de l'électricité à meilleur compte qu'avec une centrale nucléaire, les options pour la fusion sont plutôt limitées. De toute évidence, la préférence ira à la fabrication de matériaux pour les armes nucléaires" (23).

Cependant, avant même la construction d'un réacteur hybride, les recherches sur la fusion seront utilisées pour perfectionner les armes nucléaires et étudier leurs effets. A ce sujet, parlant du laser Nova en construction aux Etats Unis pour la fusion par inertie, Melvin Price (Président du "House Armed Services Committee") a récemment déclaré: "Il y a toutes les raisons de penser que Nova procurera des flux de neutrons utilisables pour des expériences de laboratoire sur la phy-

sique des armes nucléaires. De plus, Nova est le meilleur candidat pour arriver à une combustion thermonucléaire suffisante pour permettre l'étude des effets des armes nucléaires en laboratoire" (24).

L'application de la fusion par confinement inertiel à l'étude de la physique des armes nucléaires concerne principalement l'étude des équations d'état de la matière à très haute densité d'énergie, l'étude de la dynamique des implosions, et des explosions exoatmosphériques (25). Par l'intermédiaire de ces recherches on espère mieux comprendre les mécanismes inhérents à l'allumage et à l'explosion des bombes thermonucléaires. En effet, à l'heure actuelle le seul moyen à disposition est constitué par les explosions nucléaires souterraines qui fournissent sous forme de rayons X une impulsion suffisamment brève et intense pour comprimer la matière fusible et la faire exploser. Une conséquence possible de ces recherches pourrait être une miniaturisation encore plus grande des bombes H et N.

En ce qui concerne l'étude des effets des armes nucléaires, les technologies et les installations de fusion par confinement inertiel ont des applications à court, moyen et long termes. A court terme, des impulsions brèves de rayons X peuvent être engendrées pour étudier leurs effets sur les composants électroniques. A moyen terme, on pourra développer la possibilité d'exposer des composants à des flux de rayons X de freinage et de neutrons de hautes énergies. A long terme, l'exposition de systèmes complets et d'ogives nucléaires sera possible si l'on arrive à mettre au point des pastilles thermonucléaires de gain suffisant (25). Les installations de fusion par inertie vont donc compléter celles qui utilisent des accélérateurs et des anneaux de stockage en fournissant des impulsions intenses de neutrons thermonuclé-

aires. Le but principal de ces études est d'augmenter la résistance des systèmes d'armements et de communications aux effets d'une guerre nucléaire.

Le tableau VI donne quelques renseignements sur différentes installations de fusion par inertie en construction ou en projet dans le monde. Parmi ces installations, celles qui utilisent des faisceaux laser ou d'électrons sont les plus avancées. Il est intéressant de remarquer que les accélérateurs intenses d'électrons utilisés maintenant pour la fusion avaient été développés d'abord pour la simulation des effets d'armes nucléaires, alors que la motivation actuellement avancée pour les accélérateurs intenses de protons et de ions lourds reste encore la recherche fondamentale.

De nombreux pays, comprenant la plupart des pays industrialisés, participent activement à des recherches sur la physique des plasmas et la fusion. Ce genre de recherches conduit inmanquablement à une prolifération de plus en plus large de la connaissance de la physique de la bombe à hydrogène. En particulier, les mécanismes de compression et d'allumage des microbombes à hydrogène dans les systèmes de fusion par inertie sont semblables à ceux qui sont utilisés dans des bombes à hydrogène ou des bombes à neutrons. La possibilité d'étudier ces mécanismes en laboratoire offre à des pays de moyenne puissance (comme le Japon par exemple) la possibilité d'atteindre un niveau de connaissance considérable dans ce domaine.



## V. Conclusion

En raison des progrès technologiques accomplis ces dernières années, les accélérateurs de particules et la fusion thermonucléaire vont avoir une importance grandissante pour la prolifération des armes nucléaires:

- D'ici une dizaine d'années, des installations utilisant des réacteurs de fusion hybrides ou des accélérateurs vont permettre de fabriquer des matières fissiles (plutonium, uranium-233) ou fusibles (tritium) en très grandes quantités.
- Dans l'immédiat, la construction de nouveaux grands accélérateurs et d'installations de fusion par confinement inertiel va faciliter le perfectionnement des armes nucléaires en permettant d'effectuer en laboratoire une grande partie des expériences faites actuellement à l'aide d'explosions nucléaires souterraines.
- Finalement, les recherches concernant la fusion thermonucléaire vont contribuer à disséminer de plus en plus largement la connaissance de la physique des armes thermonucléaires.

Les conséquences de ces nouvelles technologies pour le Traité de non-prolifération des armes nucléaires (NPT) et l'éventuel Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (CTBT) doivent être sérieusement évaluées.

Le débat actuel sur les risques de prolifération des armes nucléaires est centré sur les problèmes posés par la production d'énergie nucléaire par des réacteurs de fission. Ce

débat devrait être étendu aux technologies nucléaires nouvelles, y compris celles qui ne sont pas rentables pour la production d'énergie, mais qui peuvent être utilisées pour la production de matières fissiles et pour l'étude des armes nucléaires. Dans cette éventualité, une extension des mesures de contrôle international aux technologies de la fusion et de l'accélération des particules devrait être étudiée.

## Remerciements

L'auteur remercie Monsieur Bhupendra Jasani du SIPRI pour plusieurs discussions stimulantes ainsi qu'une lecture critique du manuscrit du présent article.

## REFERENCES

1. "Nuclear Energy and Nuclear Weapon Proliferation", SIPRI, Taylor & Francis Ltd, 1979.
2. D. Westervelt and R. Pollock, "Laser fusion and fusion hybrid breeders: Proliferation implications", *ibid.*, p. 161.
3. B. Jasani, *ibid.*, p. 121.
4. B. Jasani, *ibid.*, p. 7.
5. G.T. Seaborg, IAEA Bulletin, Dec. 1962, p. 15.
6. P. Grand, "The use of high energy accelerators in the nuclear fuel cycle", *Nature*, 278, 19 April 1979, p. 693.
7. "Could accelerators replace fast breeder reactors?", *CERN Courier*, 18, May 1978, p. 152.
8. H. Takahashi et al., "Nuclear fuel breeding by using spallation and muon catalysis fusion reactions", (\*).
9. Bericht des ad hoc Ausschusses "Mittelflussreaktor" des EMFT, Teil II, "Spallationsneutronenquelle", Bonn, 1979.
10. J.P. Blaser, "What accelerators for future nuclear and meson physics?", *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, NS-26, 1979. W.E. Fischer et al., "Studie über eine kontinuierliche Spallations-neutronenquelle am SIN", SIN Villigen, Dezember 1978.
11. "Catalogue of High-Energy Accelerators", CERN, July 1980.
12. J.A. Martin, "Cyclotrons - 1978", *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, NS-26, April 1979.
13. "China: The eight-year plan", *Nature*, 274, 1979, p. 836. "The proton synchrotron for China", *CERN Courier*, 19, April 1979, p. 59.
14. "Report on the national workshop on advanced high-energy accelerators in India. 8-11 October 1979", Bombay, January 15, 1980.
15. H.H. Fleischmann, "High-current electron beams", *Physics Today*, May 1975, p. 35.
16. R.R. Fullwood, "Design Study for a Medium-Energy, Intense, Proton-Storage Ring (WNR Ring)", LA-4946, Los Alamos, July 1972.
17. V. Kuleshov, "Fusion-fission hybrid reactors", Ref. (1), p. 155.
18. J.D. Lee, "Tandem mirror fusion-fission hybrid studies", (\*).
19. V.A. Gribkov, "Feasibility of developing a hybrid reactor base on the dense plasma focus device", (\*).
20. D. Dickson, "Military in clash over US nuclear fusion research", *Nature*, 281, 11 October 1979, p. 414.
21. Décret n° 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.
22. M.K. Matzen, "Topical fusion", *Nature*, 284, 17 April 1980, p. 598.
23. A.W. Maschke, "Heavy ion fusion development plan", Proceedings of the Heavy Ion Fusion Workshop, Argonne, Sept. 1978, ANL-79-41.
24. "Budget for fusion also rises 9%", *Physics Today*, May 1980, p. 114.
25. A.J. Toepfer and L.D. Posey, "Application of inertial confinement fusion to weapon technology", Sandia Labs., SAND-77-0913, Dec. 1978.

---

(\*) Paper presented at the Second International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, Lausanne, Switzerland, April 1980. To be published in *Atomkernenergie/Kerntechnik*.

TABLE I : CARACTERISTIQUES DE QUELQUES SOURCES DE NEUTRONS POUR LA PRODUCTION DE MATIERES FISSILES

Processus physique	Technologie	Exemple	Rendement neutronique	Déposition d'énergie (MeV/n)	Puissance thermique totale (MW(th))	Production nette de plutonium (kg Pu/an)
Epluchage des deutérons	Accélérateur de deutérons	Deutérons de 35 MeV sur du Li ou du Be	$2.5 \cdot 10^{-3}$ n/D	14'000		
Reaction D-T sur cible	Accélérateur de deutérons	D de 0.4 MeV sur cible de T dans du titane	$4 \cdot 10^{-5}$ n/D	10'000		
Photoproduction de neutrons	Accélérateur d'électrons	Electrons de 100 MeV sur cible d'uranium-238	$5 \cdot 10^{-2}$ n/e	2'000		
Fusion thermonucléaire	Plasma focus dense	Plasma focus dense avec manteau d'uranium-nat(19)	$5 \cdot 10^{18}$ n/s	1'600	1000	50
Fission rapide	Surrégénérateur rapide	Surrégénérateur rapide au plutonium (1)	.14 n/fission	1'300	3333	200
Fission lente	Réacteur thermique	Réacteur à eau légère (1)	.21 n/fission	900	3333	300
Fission lente	Réacteur thermique	Réacteur à eau lourde (1)	.35 n/fission	500	3333	500
Spallation	Accélérateur de protons	Protons de 1000 MeV sur cible d'uranium nat (8)	100 n/proton	130	4000	3'000
Fusion thermonucléaire	Réacteur hybride	Hybride fusion-fission avec manteau normal (18)	1.3 n/fusion	100	4000	3'000
Fusion thermonucléaire	Réacteur hybride	Hybride avec manteau à fission supprimé (18)	1.3 n/fusion	30	4000	9'000

TABLE II : CARACTERISTIQUES DE QUELQUES SOURCES INTENSES DE NEUTRONS DE SPALLATION POUR LA RECHERCHE

Installation	Pays	Energie des protons (MeV)	Cible	Longueur de l'impulsion ( $\mu$ s)	Courant moyen ( $\mu$ A)	Fréquence de répétition (Hz)	Intensité de la source (n/s)	Situation
ZING-P'	USA	800	W	0.2	5	30	$2 \cdot 10^{14}$	En operation
IPNS-I	USA	500	U-238	0.2	24	30	$2 \cdot 10^{15}$	En construction
IPNS-II	USA	800	U-238	0.2	480	60	$9 \cdot 10^{16}$	Projet
WNR	USA	800	W	10.	6	120	$1 \cdot 10^{15}$	En operation
WNR	USA	800	U-235	10.	6	120	$2 \cdot 10^{16}$	En operation
WNR-RING	USA	800	W	0.27	100	12	$1 \cdot 10^{16}$	En construction
WNR-RING	USA	800	U-235	0.27	100	12	$2 \cdot 10^{17}$	En construction
SNS	Angleterre	800	U-238	0.2	200	53	$4 \cdot 10^{16}$	En construction
TRIUMPF	Canada	500	Pb	-	100	-	$5 \cdot 10^{15}$	En operation
KENS	Japon	500	U-238	0.07	15	15	$3 \cdot 10^{14}$	En operation
SNQ	Allemagne	1100	U-238	1000.	5000	100	$3 \cdot 10^{16}$	Projet
SNQ-RING	Allemagne	1100	U-238	1.	5000	100	$3 \cdot 10^{16}$	Projet
SIN	Suisse	600	Pb-BI	-	1000	-	$7 \cdot 10^{16}$	Projet

TABLE III : PRINCIPAUX ACCELERATEURS, INJECTEURS ET ANNEAUX DE STOCKAGE DE HAUTES ENERGIES DANS LE MONDE

Pays	Accélérateurs	Anneaux de stockage	Total
USA	13	4	17
URSS	9	3	12
CERN*	5	3	8
Japon	5		5
France	3	1	4
RFA	2	2	4
Chine	3		3
Suisse	1		1
Canada	1		1
Italie		1	1

\* CERN : Centre Européen de Recherches Nucléaires, Genève, Suisse.

TABLE IV : PRINCIPAUX ACCELERATEURS (CYCLOTRONS) EN FONCTIONNEMENT OU EN CONSTRUCTION DANS LE TIERS-MONDE

Pays		Energie (MeV)	Courant interne ( $\mu$ A)	Premier faisceau
Argentine	Buenos Aires	28	25	1954
Brésil	Rio de Janeiro	14	150	1974
Brésil	Sao Paulo	14	100	1979
Chili	Santiago	6	10	1967
Indes	Calcutta	130	1000	1977
Indes	Chandigahr	5	15	1971
Afrique du Sud	Pretoria	17	700	1958
Afrique du Sud	Stellenbosch	200	10	(1983)
Afrique du Sud	Stellenbosch	8	100	(1984)
Arabie Saoudite	Riyadh	24		(1979)

TABLE V : QUELQUES ACCELERATEURS D'ELECTRONS AMERICAINS ET

SOVIETIQUES DE TRES HAUTE INTENSITE

Installation	Courant (MA)	Tension (MV)	Longueur de l'im- pulsion (ns)	Puissance (TW)
<u>USA</u>				
Aurora	1.6	14.	120	22.
Proto I	0.8	3.	24	2.4
Blackjack	1.1	1.3	50	1.4
Owl	0.75	1.5	110	1.2
Gamble II	1.	1.	50	1.
Hydra	1.	1.	100	1.
Hermes II	0.1	10.	80	1.
<u>URSS</u>				
Angara-1	1.	2.	100	2.
Lebedev	0.06	30.	100	1.8
Tonus	0.06	2.	50	0.12
Rius-5	0.03	4.	40	0.12
Vodyancy	0.12	0.5	40	0.06
Neptun	0.03	1.	40	0.03

TABLE VI : QUELQUES INSTALLATIONS DE FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL

Installation	Pays	Faisceau		Energie (kJ)	Longueur de l'im- pulsion (ns)	Puis- sance (TW)	
		Type	Nombre				
Nova	USA	Laser-Nd	40	200.	<1	250.	(1983)
Antares	USA	Laser-CO <sub>2</sub>	72	100.	<1	100.	(1983)
Shiva	USA	Laser-Nd	20	10.	<1	25.	1978
Helios	USA	Laser-CO <sub>2</sub>	8	10.	<1	10.	1978
Delfin	URSS	Laser-Nd	216	10.	<1	10.	
Lekko X	Japon	Laser-CO <sub>2</sub>	10	10.	<1	10.	
Gekko XII	Japon	Laser-Nd	12	10.	<1	10.	
Octal	France	Laser-Nd	8	1.	<1	2.	1978
Proto II	USA	Electrons	12	100.	24	8.	1977
EBFA	USA	Electrons	36	500.	40	40.	(1983)
Angara-5	URSS	Electrons	48	5000.	50	100.	(1984)
PBFA I	USA	Protons	36	1000.	30	30.	(1981)
PBFA II	USA	Protons	72	3500.	30	100.	(1986)
HIDE (LBL)	USA	U <sup>+4</sup> ions	20	1000.	6	160.	(1986)