

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 48 (1957)
Heft: 7

Artikel: Les réactions thermonucléaires comme nouvelle source d'énergie
Autor: Kroms, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058667>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

ORGANE COMMUN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS (ASE) ET
DE L'UNION DES CENTRALES SUISSES D'ELECTRICITE (UCS)

Les réactions thermonucléaires comme nouvelle source d'énergie

Par A. Kroms, Boston (USA)

621.039.42 : 539.17

(Traduction)

La technique atomique actuelle est fondée sur un certain genre de réactions nucléaires: la fission de noyaux atomiques d'éléments lourds. On dispose maintenant de deux matériaux pour ces réactions: l'uranium et le thorium, qui sont répartis inégalement dans l'écorce terrestre et très fortement mélangés à différents autres corps. C'est la raison pour laquelle on s'intéresse vivement, depuis quelque temps, à un autre genre de réactions nucléaires: la *fusion* de noyaux atomiques d'éléments légers. Les transmutations nucléaires de ce genre posent toutefois des problèmes techniques beaucoup plus compliqués que ceux de la fission de noyaux lourds, car elles exigent des températures élevées, d'où leur nom de réactions thermonucléaires. Si l'on parvenait à utiliser ces réactions dans des installations de production d'énergie, l'humanité disposerait alors d'une source d'énergie pratiquement inépuisable, car les éléments légers existent partout en abondance. Toutes les autres sources d'énergie techniquement utilisables, y compris l'uranium et le thorium, sont si faibles, comparées à cette nouvelle source d'énergie, qu'elles cesserait d'avoir une importance quelconque. L'utilisation pratique des réactions thermonucléaires pourrait donc transformer complètement le standard de vie de l'humanité.

Durant la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, tenue à Genève, en août 1955, les délégués de quelques pays ont officiellement confirmé, pour la première fois, que des essais sont entrepris dans le but de réaliser pratiquement les réactions thermonucléaires destinées à produire de l'énergie. Ce problème avait été mentionné en premier lieu par le physicien indien *Bhabha*, sur quoi les délégués du Royaume-Uni, des Etats-Unis d'Amérique et de Russie admireront que les institutions scientifiques de ces pays cherchaient effectivement une solution à ces problèmes. Lors de quelques autres réunions ultérieures et dans des publications des commissions de l'énergie atomique du Royaume-Uni et des USA, on a signalé également que des essais sont très activement poursuivis dans ce domaine. Les savants sont convaincus que la production d'énergie par transmutation de noyaux atomiques légers est parfaitement possible, bien qu'elle exige encore de nombreux travaux de recherche et de construction.

Dans ce qui suit, nous donnerons un aperçu des réactions thermonucléaires, des difficultés que présente leur réalisation pratique, ainsi que des moyens qui sont tentés pour parvenir à ce but. Pour permettre de mieux comprendre de quoi il s'agit, nous nous occuperons tout d'abord de quelques relations fondamentales de la transmutation nucléaire.

I

Les phénomènes qui conduisent à une transformation des noyaux atomiques sont appelés des réactions nucléaires. Ces réactions peuvent soit libérer de l'énergie, soit en absorber. Selon la loi de l'équivalence de la masse et de l'énergie, la masse des agents de la réaction diminue dans le premier cas, tandis qu'elle augmente dans le second. Ce sont évidemment les réactions nucléaires transformant de la matière en énergie qui ont de l'importance au point de vue de notre ravitaillement en énergie. Le gain d'énergie dépend du caractère de ces réactions, selon les relations suivantes:

1. Masse. Unités: 1 g et le nombre de masse.

Le nombre de masse (unité de masse des atomes) est égal au seizième de la masse de l'atome d'oxygène (₈¹⁶) = $1,66 \cdot 10^{-24}$ g. Par conséquent, 1 g = $6,02 \cdot 10^{23}$ le nombre de masse.

La masse des parties qui constituent un atome:

	Nombre de masse
a) Proton (p ou $_1^1 p$):	$m_p = 1,00758$
b) Neutron (n ou $_0^1 n$):	$m_n = 1,00894$
c) Electron (e ou $_1^- e$):	$m_e = 0,00055$

Le nombre d'atomes dans 1 g de matière est

$N = \frac{L}{M_a}$ où $L = 6,02 \cdot 10^{23}$ (le nombre d'atomes dans un gramme-atome, nombre de Loschmidt) et M_a la masse atomique (en nombres de masse).

2. Energie. Unités: erg, MeV, kWh.

1 MeV = 16^6 eV = $1,6 \cdot 10^{-8}$ erg = $4,45 \cdot 10^{-20}$ kWh

3. Loi masse-énergie:

$$W = M c^2 \quad [\text{ergs}]$$

où M [g] est la masse et $c = 3 \cdot 10^{10}$ [cm/s] la vitesse de la lumière.

Il s'ensuit:

a) La valeur énergétique de l'unité de masse atomique

$$W_0 = 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 0,00149 \text{ erg} = \\ = 931 \text{ MeV} = 4,15 \cdot 10^{-17} \text{ kWh}$$

b) La valeur énergétique d'une masse de 1 g

$$W = 1 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 9 \cdot 10^{20} \text{ erg} = 5,61 \cdot 10^{26} \\ \text{MeV} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 25 \text{ GWh}^1)$$

A une perte de masse de ΔM [g] correspond donc le gain d'énergie

$$W = \Delta M \cdot c^2 = 25 \cdot \Delta M \quad [\text{GWh}]$$

De l'énergie est libérée dans des réactions chimiques exothermiques et dans des réactions nucléaires. La production spécifique d'énergie est d'un ordre de grandeur différent pour ces deux genres de réactions. Les réactions chimiques ne modifiant que le niveau énergétique des électrons, les quantités d'énergie libérées sont si faibles qu'il n'est pratiquement pas possible de mesurer la perte de masse de la matière initiale. Par contre, dans le cas des réactions nucléaires, des quantités beaucoup plus grandes de la masse des agents de la réaction sont transformées en énergie. Lors de la fission des noyaux atomiques lourds (noyaux d'uranium, par exemple), environ 0,001 de la masse initiale est transformé en énergie et l'on obtient une production spécifique d'énergie de

$2,5 \cdot 10^7 \cdot 10^3 \cdot 0,001 = 2,5 \cdot 10^7 \text{ kWh/kg} = 25 \text{ GWh/kg}$
Etant donné que 1 kg de bonne houille fournit environ $7000/860 = 8,15 \text{ kWh}$ d'énergie de combustion, la production d'énergie de la matière de fission nucléaire est égale à $2,5 \cdot 10^7 / 8,15 = 3 \cdot 10^6$ fois celle d'un combustible de bonne qualité.

Le rendement spécifique d'énergie des réactions nucléaires W [kWh/kg] dépend du genre de l'agent de la réaction et du déroulement de celle-ci. Le nombre de masse des atomes est toujours plus petit que la somme des nombres de masse de ses constituants, les nucléons (protons et neutrons) et les électrons. Cette différence

$$\Delta m = Z(m_p + m_e) + Ym_n - M_a$$

est appelée perte de masse, Z étant le nombre de protons ou le nombre d'ordre de l'élément chimique, Y le nombre de neutrons et M_a la masse atomique. Le nombre total des nucléons dans le noyau atomique $A = Z + Y$ est le nombre de masse de l'atome. A la perte de masse Δm correspond l'énergie de cohésion, qui est libérée par la formation des noyaux atomiques. Pour pouvoir subdiviser un noyau atomique en ses parties constitutantes, il faut apporter une quantité d'énergie égale à l'énergie de cohésion. Cette dernière atteint donc

$$W = 931 (N \cdot \Delta m) \quad [\text{MeV/g}]$$

En introduisant $N = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{M_a}$ [atomes/g], on a

$$W = 5,61 \cdot 10^{26} \left(\frac{\Delta m}{M_a} \right) [\text{MeV/g}] = 2,5 \cdot 10^7 \left(\frac{\Delta m}{M_a} \right) [\text{kWh/g}],$$

où $\Delta m/M$ est la perte de masse relative.

¹⁾ GWh (gigawattheure) = 10^9 kWh.

Si nous considérons, par exemple, le cas de l'atome d'hélium ${}_2\text{He}^4$ ($Z = 2$; $Y = 2$; $M_a = 4,00280$), ces relations nous donnent

$$\Delta m = 2 \cdot (1,00758 + 0,00055) + \\ + 2 \cdot 1,00894 - 4,00280 = 0,03134 \text{ (nombre de masse)}$$

et l'énergie de cohésion

$$\frac{931 \cdot 0,0313}{4} = 29,2 \text{ MeV/nucléon}$$

Lors de la formation de l'hélium en partant des constituants élémentaires de la matière, une quantité d'énergie de

$$2,5 \cdot 10^7 \frac{0,03134}{4,00280} = 1,95 \cdot 10^5 \text{ kWh/g}$$

est donc libérée.

L'énergie de cohésion par nucléon W_b dépend de la grandeur et de la structure des noyaux atomiques (fig. 1). La courbe d'énergie s'élève rapidement dans le domaine des éléments légers et atteint des valeurs maxima de 8,0 à 8,7 MeV/nucléon, dans le domaine $A = 40 \dots 100$. Pour des valeurs de A encore plus élevées, la courbe baisse peu à peu et l'énergie de cohésion n'atteint plus que 7,4 MeV/nucléon dans le cas de l'uranium. Ce sont donc les noyaux atomiques des éléments mi-lourds qui présentent les forces cohésives les plus grandes et qui constituent le domaine atomique le plus stable.

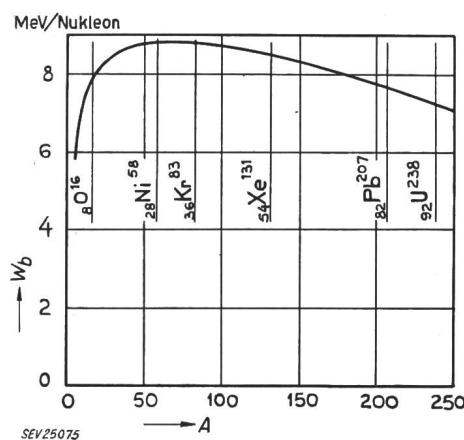


Fig. 1
Energie de cohésion des noyaux atomiques
 W_b , Energie de cohésion; A , Nombre de masse; O Oxygène; Ni Nickel; Kr Krypton; Xe Xénon; Pb Plomb; U Uranium

De l'énergie est libérée lors des réactions nucléaires qui produisent des noyaux atomiques plus stables que ceux de la matière initiale. En considérant la courbe d'énergie, on constate qu'il existe deux genres de réactions fournissant de l'énergie:

a) Fission de noyaux atomiques lourds en fragments mi-lourds, par exemple désintégration de l'uranium ou du thorium.

b) Fusion de noyaux atomiques très légers, par exemple formation d'hélium en partant de l'hydrogène.

Dans un cas comme dans l'autre, les produits de la réaction sont plus rapprochés du domaine stable du système des éléments que les noyaux primitifs.

Si l'on parvient à créer des conditions telles que les réactions se poursuivent d'elles-mêmes, on a affaire aux *réactions nucléaires en chaîne*. L'obtention de celles-ci dépend de la grandeur et de la composition des noyaux atomiques à transmuter. Pour cela, le rapport entre le nombre des neutrons et celui des protons a une grande importance:

$$Y/Z = A/Z - 1$$

Dans le cas des éléments légers, Y/Z est à peu près égal à 1,0, tandis qu'il dépasse 1,0 dans le cas des éléments lourds. Pour $Y/Z > 1,5$, les noyaux atomiques lourds commencent à se désintégrer spontanément. Ce phénomène, appelé radioactivité, dure jusqu'au moment où le noyau atomique a atteint un état stable. Les éléments lourds du groupe de l'uranium sont radioactifs; ils se transforment peu à peu en plomb (Pb). C'est pourquoi il est beaucoup plus facile de décomposer des atomes d'uranium que de transmuter les noyaux atomiques des éléments légers, de sorte que, dans les usines atomiques, on n'utilise pour le moment que les réactions nucléaires des éléments lourds comme source d'énergie. Les problèmes techniques soulevés par les réactions nucléaires de ce genre sont déjà résolus d'une façon générale. Par contre, les réactions de l'autre genre, qui consistent à transmuter des noyaux atomiques légers, exigent des conceptions tout à fait nouvelles, car elles ne peuvent se produire qu'à des températures extrêmement élevées, de l'ordre de millions de °C. Elles ont été réalisées à des fins militaires, sous forme de phénomènes explosifs. Or, l'alimentation en énergie nécessite des réactions nucléaires uniformes et contrôlables, qui peuvent être réglées selon les besoins, ne mettent pas en danger les installations et fournissent de l'énergie sous la forme désirée. Les savants tentent maintenant de réaliser de telles réactions dans leurs laboratoires, afin de trouver le moyen de les utiliser pour la production d'énergie.

II

Les réactions nucléaires se déroulent comme suit:

Une particule mobile de la matière (p , n , α ou autres) vient frapper un noyau atomique et lui cède une quantité plus ou moins grande de son énergie. Lors d'un tel choc, deux phénomènes peuvent se produire: une dispersion ou une capture. La probabilité de ces phénomènes dépend de multiples facteurs, tels que la vitesse relative, la masse et la charge électrique de la particule incidente et du noyau atomique, la structure de celui-ci, etc. Les particules mobiles sont de divers genres:

- a) Particules chargées électriquement:
Protons p ou ${}_1^1H$ (noyau de l'atome d'hydrogène). Deutons d ou ${}_1^2H$ (noyau de l'atome d'hydrogène lourd).
- Particules α ou ${}_2^4He$ (noyau de l'atome d'hélium).
- b) Particules neutres: les neutrons n ou ${}_0^1n$.
- c) Enfin, des réactions nucléaires peuvent être provoquées par un rayonnement γ .

La dispersion a lieu lorsque l'énergie de la particule incidente est faible; celle-ci est repoussée par le noyau atomique, auquel elle cède une partie de son énergie. L'énergie ainsi transmise dépend de l'angle d'incidence et du nombre de masse du noyau. Les noyaux lourds ne peuvent être que faiblement accélérés, aussi la particule incidente est-elle repoussée à peu près à la même vitesse et son énergie n'est-elle que très peu modifiée. Par contre, lorsque la particule vient frapper un noyau atomique léger, elle met l'atome en mouvement et perd elle-même sa vitesse; dans ce cas, une grande partie de l'énergie est cédée au noyau et la particule est efficacement freinée. L'énergie cinétique de la particule est ainsi transformée en énergie d'excitation du noyau et est diffusée sous forme de rayonnement γ .

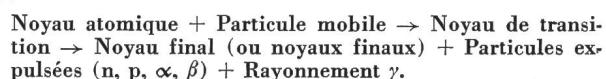
Lors de la capture, la particule pénètre dans le noyau atomique et forme un nouveau noyau. L'énergie que cela nécessite dépend du genre de la particule incidente et du noyau. Les particules électriquement chargées doivent traverser le champ électrique du noyau et posséder pour cela une grande quantité d'énergie ou une grande vitesse, afin de pouvoir atteindre le noyau de l'atome. Par contre, les particules (n) peuvent être captées avec beaucoup moins d'énergie. C'est ainsi que les noyaux atomiques d' U_{235} captent déjà les neutrons thermiques, dont l'énergie n'est que d'environ 0,025 eV.

La particule captée cède au noyau son énergie cinétique et libère une certaine quantité d'énergie de cohésion, car à la suite de la capture de la particule le noyau se transforme en un nouveau noyau; l'énergie libérée provient de la différence entre l'énergie de cohésion du noyau primitif et celle du nouveau noyau. Ce dernier possède un excédent d'énergie qui transforme le noyau atteint, aussi l'appelle-t-on noyau intermédiaire ou de transition. Ces transformations peuvent se dérouler comme suit:

- a) Par émission de particules nucléaires p , n , α , β ou autres.
- b) Par rayonnement γ (quantum γ).
- c) Par fission du noyau en plusieurs fragments.

Les réactions nucléaires ont lieu selon différentes combinaisons et durant des intervalles de temps très différents, avant qu'un noyau stable ne soit finalement obtenu.

Ces réactions peuvent être représentées schématiquement comme suit:



L'intervalle de temps entre les deux phases de la réaction dépend de la stabilité du noyau primitif. Dans quelques cas, le noyau de transition se transforme immédiatement, en 10^{-14} s ou même plus rapidement, tandis que dans d'autres cas la transformation est plus lente. L'énergie cinétique des particules ou fragments de noyau expulsés constitue la partie la plus importante de l'énergie nucléaire libérée, qui se manifeste sous forme d'énergie thermique. Les plus grandes quantités d'énergie sont libérées lors d'une transmutation considérable des

noyaux atomiques, par exemple lors de la fission de ceux-ci en plusieurs fragments.

Pour fissioneer un noyau atomique, il faut un certain minimum d'énergie, qui peut être apportée au noyau sous forme d'énergie cinétique et de cohésion. On appelle noyaux fissiles ceux pour lesquels l'énergie cinétique est d'importance secondaire. Ils peuvent être désintégrés à l'aide de particules lentes (à faible énergie). Il s'agit de quelques-uns des éléments lourds, principalement de l'U235, du Pu239 et de l'U233, pour lesquels la fission intervient déjà avec l'énergie de capture d'un neutron. L'énergie de fission nécessaire est d'environ 6 MeV pour l'U235, de 10 MeV pour le Pb et de 14 MeV pour le W. Tous les noyaux lourds peuvent être fissions par bombardement avec des protons rapides, des particules α , etc. Ce phénomène ne peut toutefois être utilisé pour l'obtention d'énergie que si l'énergie nécessaire au bombardement est moindre que l'énergie libérée par les réactions nucléaires.

Ces réactions sont donc caractérisées par le genre des particules de bombardement et des particules d'émission; on les désigne par les symboles de ces particules. La réaction (p, n) est due à un proton et le noyau atteint expulse un neutron. La réaction (n, γ) est également due à un neutron, mais l'excédent d'énergie est cédé sous forme de rayonnement γ .

Il est généralement très difficile d'entretenir des réactions nucléaires, car les noyaux atomiques sont extrêmement petits, tandis que les forces de cohésion entre les nucléons sont très grandes. Le diamètre des noyaux atomiques est environ 10 000 fois plus petit que le diamètre des orbites des électrons, de sorte qu'un noyau atomique offre aux particules de bombardement une cible si minuscule que la probabilité qu'elle soit atteinte par l'une d'elles est très faible. En outre, le puissant champ électrique du noyau repousse les particules électriquement chargées (p, α); pour pouvoir traverser ce champ, les particules de bombardement doivent posséder une très grande vitesse. Pour expliquer scientifiquement les phénomènes qui se déroulent lors des réactions nucléaires, il faudra encore procéder à des recherches approfondies sur la structure et les forces internes des noyaux atomiques. Nos connaissances actuelles sont nettement insuffisantes sur ce point. On suppose qu'il existe deux champs de force entre les nucléons (fig. 2):

- a) Les protons chargés électriquement tendent à s'écartier les uns des autres et à désintégrer le noyau.
- b) Les masses des nucléons s'attirent et forment le champ cohésif, qui maintient les nucléons entre eux. L'importance de ces deux champs de force varie avec la distance par rapport au noyau. Aux distances les plus grandes, c'est le champ électrique qui prédomine, tandis qu'à proximité du noyau c'est le champ cohésif qui est le plus fort. Les particules électriquement chargées ne peuvent donc pénétrer dans le noyau que si elles sont capables de franchir le champ électrique et de parvenir très près du noyau. Par contre, les neutrons n'ont besoin

que d'une vitesse beaucoup plus faible pour être captés.

Les particules servant à amorcer les réactions nucléaires peuvent être obtenues de différentes façons:

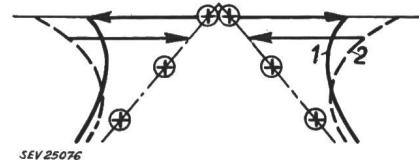


Fig. 2
Forces internes du noyau atomique
1 Forces répulsives des charges électriques
2 Forces cohésives des masses nucléoniques

1. Lors de la fission du noyau, des nucléons (n, p) ou des fragments sont expulsés avec une énergie si grande, qu'elle suffit à transmuter d'autres noyaux atomiques. C'est ce qui se produit au cours de la fission de noyaux lourds et peut donner lieu, dans certaines circonstances, à des réactions (n, n) en chaîne.

2. Dans des appareils spéciaux (cyclotrons, synchrotrons, etc.), des particules chargées électriquement sont accélérées et amenées à des vitesses si grandes, qu'il peut en résulter une transmutation nucléaire dans la matière bombardée.

3. La température des agents de réaction est élevée suffisamment (à des millions de °C) pour que les noyaux atomiques qui s'entrechoquent franchissent le champ électrique et se fondent ensemble. Ces réactions thermonucléaires se produisent entre les noyaux atomiques légers du soleil et des autres astres qui livrent de l'énergie; elles sont l'origine de leurs prodigieuses radiations.

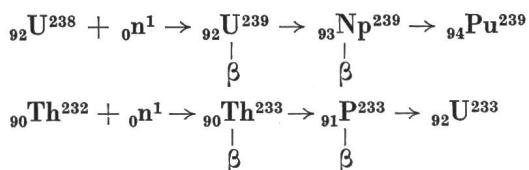
III

Les transmutations nucléaires de quelques-uns des éléments lourds constituent, comme on le sait, la base énergétique des installations atomiques actuellement en construction et en essai. Pour pouvoir juger des chances d'une utilisation pratique des réactions thermonucléaires, il faut comparer celles-ci avec la transmutation des noyaux atomiques lourds.

1. Les noyaux atomiques possèdent un excédent considérable de neutrons ($Y/Z > 1,5$), de sorte que leur stabilité est faible et qu'ils peuvent être désintégrés à l'aide de neutrons relativement lents. Lors de la fission, quelques neutrons en excédent sont libérés et peuvent, dans certaines circonstances, donner lieu à une réaction (n, n). Cette réaction en chaîne est réalisable si l'on parvient à maintenir un bilan positif de neutrons dans les agents de la réaction. Les neutrons libérés doivent être suffisamment nombreux pour que la réaction en chaîne puisse se poursuivre et que les pertes de neutrons, dues à différentes réactions secondaires ou à une diffusion vers l'extérieur, puissent être compensées. La quantité spécifique de neutrons libérés dépend de la matière fissile, de sorte qu'on peut régler l'intensité de la réaction en modifiant les pertes de neutrons.

L'isotope U235 de l'uranium est la seule matière naturelle chez laquelle l'énergie de capture d'un neutron suffit à provoquer la fission. Cette énergie est de 5,0 à 5,6 MeV. Dans le cas d'un neutron, l'énergie libérée lors de la capture est de 6,4 MeV; elle dépasse donc l'énergie de fission, de sorte que l'U235 peut déjà être fissioneer avec des neutrons lents ou thermiques. C'est la raison pour laquelle l'U235 est la matière première utilisée actuellement dans les usines atomiques. Pour diminuer les pertes en neutrons dans les réactions secondaires imprudentes, les neutrons sont freinés rapidement à leur vitesse thermique par des matières spéciales (D_2O , graphite, H_2O , etc.). L'U235 est malheureusement un isotope rare, car l'uranium naturel n'en renferme que 0,7 %.

Pour la fission de l'isotope U238, on a besoin de neutrons rapides, à grande énergie. Par résonnance, on peut toutefois faire capter par l'U238 un neutron à vitesse moyenne ($\approx 0,1$ MeV), ce qui produit un nouvel élément, le plutonium (Pu239), qui est fissile à l'aide de neutrons thermiques. De même, un autre isotope, l'U233, peut produire, par capture de neutrons, du thorium (Th 232). Ces phénomènes sont appelés réactions à surrégénération; ils se déroulent schématiquement comme suit:



L'énergie de fission S et l'énergie de cohésion B libérée pour un neutron à capturer sont indiquées au tableau I pour les éléments lourds dont il vient d'être question. Ces éléments, pour lesquels $S > B$, sont fissiles avec des neutrons thermiques.

Il est probable que l'on pourra utiliser comme source d'énergie toutes les réserves en U et Th, à l'aide des réactions à surrégénération.

Energie de fission et énergie de cohésion

Tableau I

Matière	Energie de fission [MeV]	Energie de cohésion [MeV]
U235	5,0...5,6	6,4
U238	4,9...5,3	4,8
Pu239	5,0...5,6	6,4
U233	4,9...5,5	6,5
Th232	5,2...5,6	5,1

La fission du noyau d'U235 se déroule comme suit:



(Xe, Mo, La, etc.) + 2 (ou 3) ${}_0n^1$

Exemple de bilan de masse de cette réaction:

Avant la réaction	Après la réaction
U235 — 235,124	Mo 95 — 94,945
${}_0n^1$ — 1,00894	La 139 — 138,955
U226 — 236,13294	$2 {}_0n^1$ — 2,01788
	$\Sigma = 235,91788$

La perte de masse atteint dans ce cas $\Delta m = 0,215$ ou 0,091 % de la masse initiale, ce qui correspond à un gain d'énergie de $931 \cdot 0,215 = 200$ MeV. Théoriquement, 1 kg d'U235 peut libérer

$$\frac{10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{235,124} \cdot 200 \cdot 4,45 \cdot 10^{-20} = 2,3 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 23 \text{ GWh}$$

Chaque noyau atomique fissioneer produit 2 à 3 neutrons ayant généralement une quantité d'énergie de 1 à 2 MeV et entretiennent la réaction. Les neutrons en excédent peuvent donc servir à produire du Pu239 ou de l'U233 par réaction à surrégénération. Les produits de fission sont des noyaux mi-lourds, avec $A = 80\ldots150$; ils sont très radioactifs et doivent être périodiquement retirés du réacteur, car ils affectent le bilan des neutrons.

L'utilisation technique de ces réactions nucléaires est favorisée par plusieurs circonstances:

a) Les réactions peuvent avoir lieu à n'importe quelle température, ce qui facilite grandement les problèmes de matériel; les réactions en chaîne commencent dès que la masse critique est atteinte, c'est-à-dire dès que le bilan positif des neutrons peut être maintenu.

b) Elles peuvent être facilement réglées, en modifiant les pertes en neutrons dans des matières servant de ballast ou par diffusion.

Quelques autres circonstances limitent toutefois l'utilisation de ce type réacteur:

a) La teneur en matières fissiles lourdes dans l'écorce terrestre est faible; du fait que ces éléments sont très peu concentrés dans leurs gisements, l'extraction en est fort coûteuse.

b) Etant donné que les réactions commencent spontanément, dès que la masse critique est atteinte, il faut toujours veiller à ce qu'elles demeurent sous contrôle.

c) Les produits de fission s'accumulent dans le porteur d'énergie et doivent en être extraits chimiquement après une certaine période de service, bien que seule une partie de la matière fissile ait été effectivement utilisée; de plus, la forte radioactivité de ces produits de fission en complique l'extraction.

Vu ces inconvénients et surtout le peu de réserves en matières fissiles, il faut chercher à utiliser pratiquement un autre genre de réactions nucléaires, celui de la transmutation de noyaux atomiques légers.

2. Comme l'indique la courbe de l'énergie de cohésion (fig. 1), la fusion de noyaux atomiques légers permet de libérer de grandes quantités d'énergie par nucléon. Ces éléments légers étant très répandus, ils constitueront une source d'énergie pratiquement inépuisable, si l'on parvenait à utiliser pratiquement ces transmutations nucléaires.

Les circonstances de la transmutation des noyaux atomiques légers ne sont pas les mêmes que lors de la fission des noyaux lourds:

a) Les noyaux légers possèdent une plus grande stabilité, de sorte que les particules de bombardement doivent avoir une énergie bien plus considérable.

b) Les transmutations de noyaux légers ne produisent pas de particules secondaires (par exemple des neutrons) qui pourraient poursuivre la réaction.

La réalisation de ces réactions nucléaires nécessite donc d'autres sources de particules de bombardement très énergiques. Pour cela, il faudra soit des installations d'accélération des particules atomiques, soit des températures très élevées.

La physique moderne dispose d'appareils dans lesquels les noyaux atomiques ou leurs particules peuvent atteindre des vitesses si élevées qu'ils sont capables d'amorcer la transmutation des noyaux bombardés. Etant donné que seules des particules à charge électrique entrent dans ce cas en ligne de compte (p , α , d), elles exigent une teneur en énergie particulièrement grande, afin de pouvoir franchir le champ électrique des noyaux bombardés. Plusieurs transmutations nucléaires ont déjà été réalisées par un flux de particules accélérées arti-

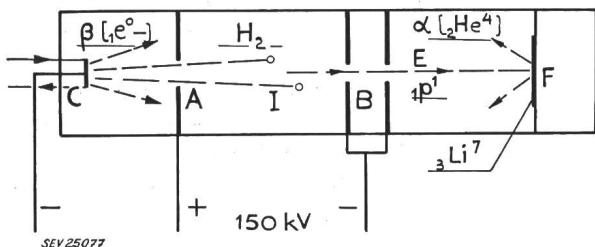
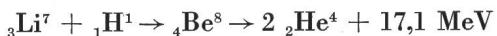


Fig. 3
L'essai de Cockcroft et Walton

C Cathode chauffée; A Anode; I Enceinte d'ionisation; B Cathode d'accélération; E Faisceau de protons; F Film de lithium; α Noyau d'hélium; β Electron; p Proton; H_2 Hydrogène; Li^7 Lithium

ficiellement. Le premier essai de ce genre a eu lieu en 1932, à l'Université de Cambridge, lorsque les physiciens *Cockcroft* et *Walton* bombardèrent un film de lithium avec un flux de protons (fig. 3). La transmutation nucléaire se déroulait comme suit:



Pour pouvoir utiliser les appareils d'accélération dans le but de produire de l'énergie, il faut atteindre un bilan énergétique positif, c'est-à-dire que l'énergie fournie par les réactions nucléaires amorcées doit être supérieure à l'énergie nécessaire pour accélérer les particules de bombardement. Or, les installations actuelles d'accélération ne peuvent pas répondre à cette exigence. En effet, lorsqu'une matière à basse température est bombardée par des particules rapides, celles-ci perdent beaucoup d'énergie dans les orbites des électrons de l'atome et, après un bref parcours, elles sont freinées à tel point qu'elles ne sont plus capables de franchir le champ électrique du noyau. Le diamètre du noyau étant extrêmement petit par rapport à celui des orbites des électrons, il est fort peu probable qu'une particule de bombardement soit captée par le noyau et amorce la réaction nucléaire. Bien que l'énergie fournie par chacune des transmutations nucléaires soit largement supérieure à l'énergie d'accélération de la particule de bombardement correspondante, les pertes que celle-ci subit sont si grandes qu'il en résulte une perte nette en énergie. C'est la raison pour laquelle les installations d'accélération ne

peuvent pas servir à la production d'énergie. Elles sont cependant indispensables pour les recherches sur la constitution interne de la matière et peuvent indiquer de nouveaux moyens de libérer l'énergie nucléaire. Dans tous les pays où la technique est très développée, on consacre par conséquent de grandes sommes à la construction de puissantes installations d'accélération pour les recherches. Si l'on parvenait à amorcer, avec le flux de particules très énergiques, un nombre de réactions nucléaires suffisant pour qu'il en résulte un excédent d'énergie, on créerait ainsi un groupe énergétique dont la fourniture d'énergie pourrait être commodément réglée par l'intensité du flux des particules de bombardement. La technique atomique aura toutefois encore un fort long chemin à parcourir avant de pouvoir mettre au point une installation de production d'énergie aussi idéale. C'est pourquoi il y a lieu d'aménager tout d'abord des installations d'énergie atomique basées sur les réactions en chaîne se déroulant spontanément.

Les réactions en chaîne des noyaux atomiques légers exigent des températures de l'ordre de plusieurs millions de °C. À des températures aussi élevées, les gaz sont ionisés, c'est-à-dire qu'ils consistent en ions chargés positivement et en électrons libres; cet état des gaz est appelé plasma. Les noyaux atomiques d'un plasma gazeux possèdent une énergie cinétique suffisante pour pouvoir provoquer les transmutations nucléaires lors de leurs chocs avec d'autres noyaux. La réaction se poursuit par l'énergie thermique ainsi libérée, d'où la qualification de *thermonucléaires* donnée aux réactions de ce genre. Pour engendrer une réaction thermonucléaire, il faut une source d'énergie extérieure, afin d'atteindre le niveau de température exigé. Pour entretenir la réaction, un bilan d'énergie positif doit être assuré entre les agents de la réaction, c'est-à-dire que les déperditions de chaleur ne doivent pas dépasser la quantité d'énergie libérée par la réaction. Il s'ensuit que, pour ce genre de réaction également, il faut une certaine quantité minimum d'agents de réaction, c'est-à-dire une quantité critique. Celle-ci dépend de la fourniture spécifique d'énergie dans le porteur d'énergie (MW/m^3) et des conditions de soutirage de la chaleur, qui dépendent à leur tour de la surface spécifique (m^2/m^3) de l'espace dans lequel se déroule la réaction, ainsi que de la conductibilité thermique des agents de la réaction.

C'est la température qui caractérise l'énergie cinétique moyenne des molécules et des atomes. Les vitesses réelles diffèrent selon les atomes. La répartition des atomes selon leur énergie thermique W est exprimée par la courbe des fréquences cumulées de Maxwell (fig. 4). Il n'existe donc pas de limite déterminée de la température, en dessous de laquelle les réactions thermonucléaires seraient impossibles. Le niveau de la température influence toutefois très fortement l'intensité du déroulement de la réaction. Plus la température est élevée, plus nombreux sont les atomes qui possèdent la vitesse requise pour provoquer des transmutations nucléaires; aux températures élevées, la quantité

d'énergie fournie par ces réactions augmente rapidement. Ces relations sont représentées schématiquement par la fig. 4, où $a = f(W)$ est la répartition relative des noyaux, $b = \varphi(W)$ la probabilité de la transmutation nucléaire et $c = ab = \psi(W)$ la part des noyaux de différentes teneurs en énergie qui participent à la réaction. Plus la température est élevée, plus la courbe $a = f(W)$ est décalée vers la droite et plus les ordonnées c augmentent.

Dans chaque corps, la température est déterminée par l'équilibre entre le gain et la perte en

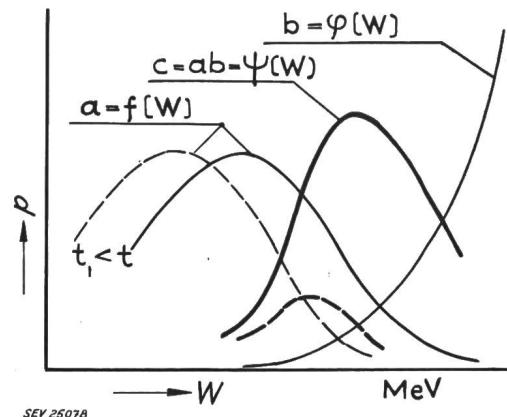


Fig. 4

Influence de la température sur les réactions nucléaires
W Energie cinétique (thermique) des noyaux; $a = f(W)$ Courbe des fréquences cumulées de l'énergie thermique; $b = \varphi(W)$ Possibilité de transmutations nucléaires; $c = \psi(W)$ Répartition des transmutatons nucléaires; p Probabilité; t Température

énergie thermique. Le rayonnement de chaleur augmente proportionnellement avec la surface F du corps et avec la quatrième puissance de la température absolue T (pour une température ambiante $T_0 = 0$). Au cas où la quantité d'énergie libérée par les réactions nucléaires est proportionnelle au volume V des agents de la réaction, le bilan de l'énergie peut être exprimé approximativement comme suit (en admettant qu'à chaque endroit du corps règne la même température):

$$W = w V = k F T^4$$

où w (MW/m^3) est la quantité spécifique d'énergie fournie et k le coefficient de conversion. Il s'ensuit:

$$T = \frac{1}{k_1} \sqrt[4]{\frac{wV}{F}}$$

Pour un corps sphérique, $V/F = r/3$ (r étant le rayon) et $T = k_2 \sqrt[4]{wr}$. Plus r est grand, plus T est élevé pour une valeur w donnée. C'est pourquoi, dans de très grandes masses d'agents de la réaction, les processus nucléaires lents peuvent maintenir une température suffisamment élevée pour que la poursuite de la réaction soit assurée. Lorsque la relation entre la quantité d'énergie fournie et la température $w = F(T)$ est connue, on peut calculer la quantité (ou le volume) critique de l'agent de la réaction. La fig. 5 montre deux groupes de courbes, les courbes $w = F(T)$ représentant la quantité

d'énergie disponible et les courbes $w = \Phi(T)$ la quantité d'énergie nécessaire, selon la température et pour différentes valeurs de r . Le point d'intersection K des deux courbes correspond à la quantité critique de l'agent nécessaire pour entretenir la réaction nucléaire. Pour que l'on puisse poursuivre la réaction avec une petite quantité de matière, la quantité spécifique d'énergie fournie w et la température T doivent atteindre des valeurs très élevées. Cela pose des problèmes difficiles pour l'utilisation technique des réactions thermonucléaires.

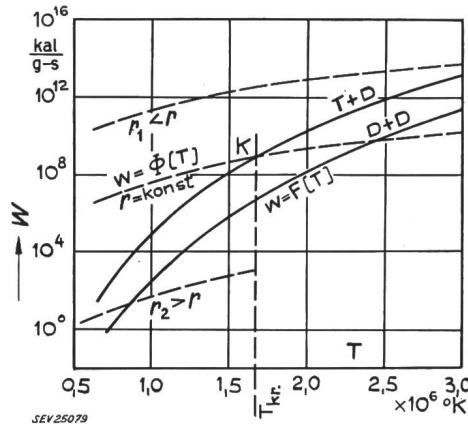


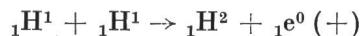
Fig. 5

Bilan de l'énergie des réactions thermonucléaires
T Température de l'agent de réaction; $w = F(T)$ Quantité d'énergie fournie par les réactions nucléaires; $w = \Phi(T)$ Cession de chaleur; r_1, r_2 Rayons de l'enceinte de réaction; P Point critique; T_{kr} Température critique (pour $r_2 > r_1$, $T_{kr2} < T_{kr1}$)

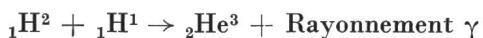
IV

Vu les difficultés que présente l'utilisation technique des réactions thermonucléaires, on peut se demander comment ces réactions ont lieu sur le soleil et les autres étoiles et si les recherches à ce sujet pourraient fournir de précieux renseignements pour la solution de ces problèmes. Dans l'univers, les réactions thermonucléaires se déroulent d'une façon ininterrompue sur une échelle immense et constituent la source de rayonnement des corps célestes. Le genre de ces réactions qui libèrent de l'énergie dépend des éléments disponibles et de la température qui règne à l'intérieur des astres. Les réactions appartiennent en majeure partie au type (p, α), c'est-à-dire que les particules de bombardement sont des protons ou des noyaux de l'atome d'hydrogène (${}_1\text{H}^1$), qui pénètrent à de hautes températures dans les noyaux des éléments légers présents et forment dans la plupart des cas des noyaux d'hélium. On distingue plusieurs stades de ces réactions nucléaires:

1. Les réactions entre les protons et les deutons et



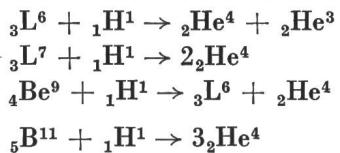
et



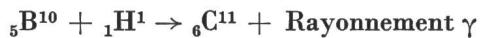
se déroulent à des températures de 1 à 2 millions de $^\circ\text{C}$, car les charges électriques des noyaux sont faibles. On suppose que ces réactions ont lieu dans les nouvelles étoiles rouges, qui présentent une

faible densité et des températures relativement basses.

2. A des températures de l'ordre de 2 à 7 millions de °C, les réactions ont lieu entre les protons et les noyaux atomiques de Li, Be ou B:



3. La réaction



exige une température qui se rapproche de celle de la plupart des étoiles jaunes blanchâtres. En général, la probabilité des transmutations nucléaires, qui produisent des quantas γ au lieu de l'émission α ou β , est faible, de sorte qu'elles exigent des températures élevées.

4. Une fois que les éléments légers D, Li, Be et B ont été consommés dans ces réactions et que la température à l'intérieur de l'astre s'est élevée à 20...25 millions de °C, une lente réaction se fait, par des catalyseurs, entre les protons, et fournit finalement de l'hélium (${}_2^{\text{He}}\text{He}^4$). C'est cette réaction qui explique la longue durée et l'uniformité des rayonnements. Notre soleil est parvenu à ce stade-là. H. Bethe et C. von Weizsäcker ont étudié les phénomènes éner-

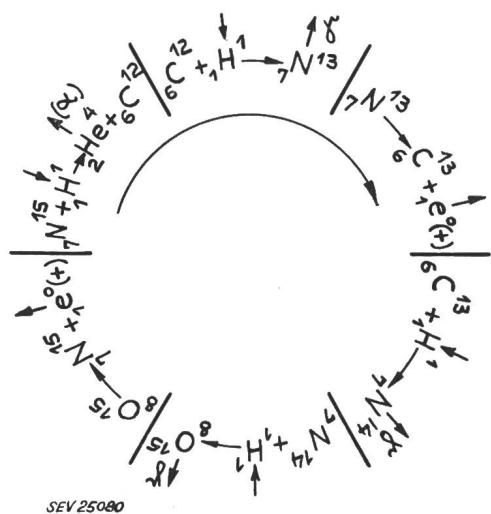
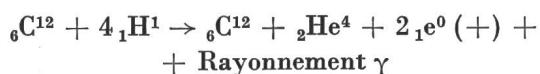


Fig. 6
Chaîne cyclique des réactions du soleil

gétiques du soleil et sont arrivés à la conclusion que la source d'énergie la plus importante du rayonnement solaire est une réaction nucléaire (p, α), qui se déroule en cycle fermé et revient à son état initial après six transformations successives (fig. 6). Dans cette chaîne de réactions, les catalyseurs sont le C et le N, qui se régénèrent constamment. Le résultat final peut être exprimé sous la forme suivante:



On peut s'étonner que ce cycle soit lent, malgré la température d'environ 20 millions de °C qui

règne dans le soleil, et que la quantité spécifique d'énergie libérée ne soit que de 2 ergs ou $1,25 \cdot 10^6$ MeV/gs. Grâce à l'immense masse du soleil et des autres étoiles, cette faible quantité spécifique d'énergie suffit toutefois à entretenir les températures élevées et les puissants rayonnements. A l'intérieur de corps aussi volumineux, seules les réactions lentes de ce genre peuvent se poursuivre constamment, car si les quantités d'énergie libérées étaient plus grandes, les réactions se précipiteraient à une allure d'avalanche et provoqueraient une immense explosion. Sous chaque cm^2 de la surface du soleil, il y a environ 33 000 t de matière, de sorte que le déroulement de la réaction est réglé par cette masse imposante. D'autre part, un accroissement de la température provoque une expansion correspondante de cette masse, ce qui ralentit la réaction, tandis que la compression due à la gravitation empêche un abaissement de la température.

Dans des installations techniques de production d'énergie, les réactions thermonucléaires doivent être réalisées dans de tout autres conditions. On est obligé de travailler avec de très faibles quantités d'agents de réaction, de sorte que leur masse critique doit être aussi faible que possible. Il faut donc faire intervenir des réactions nucléaires qui libèrent une grande quantité spécifique d'énergie à des températures relativement basses. Cela permet d'atteindre plus facilement la température initiale nécessaire et l'amorçage de la réaction nucléaire. Les meilleurs agents de ces réactions sont surtout les isotopes lourds de l'hydrogène, qui possèdent une faible charge électrique; de plus, la présence de neutrons supplémentaires diminue la stabilité de leurs noyaux.

Pour une utilisation technique, diverses réactions thermonucléaires peuvent entrer en considération. Les agents de réaction les plus importants sont:

1. Les isotopes de l'hydrogène:

Deutérium D ou ${}_1^{\text{H}}\text{H}^2$ ($Y/Z = 1$)
Tritium T ou ${}_1^{\text{H}}\text{H}^3$ ($Y/Z = 2$)

2. Les isotopes du lithium: ${}_3^{\text{Li}}\text{Li}^6$ et ${}_3^{\text{Li}}\text{Li}^7$

Quelques exemples de réactions sont indiqués au tableau II. On entend par réactions secondaires celles auxquelles participent les produits des réactions primaires (${}_0^{\text{n}}\text{n}^1$, ${}_1^{\text{H}}\text{H}^3$).

Transmutations nucléaires d'éléments légers

Tableau II

N°		Déroulement de la réaction	Energie produite MeV
1	Réaction primaire	${}_1^{\text{H}}\text{H}^2 + {}_1^{\text{H}}\text{H}^2 \rightarrow {}_2^{\text{He}}\text{He}^3 + {}_0^{\text{n}}\text{n}^1$	4,0
2		${}_1^{\text{H}}\text{H}^2 + {}_1^{\text{H}}\text{H}^2 \rightarrow {}_1^{\text{H}}\text{H}^3 + {}_1^{\text{H}}\text{H}^1$	3,3
3		${}_3^{\text{Li}}\text{Li}^6 + {}_1^{\text{H}}\text{H}^2 \rightarrow {}_4^{\text{Be}}\text{Be}^7 + {}_0^{\text{n}}\text{n}^1$	3,4
4		${}_3^{\text{Li}}\text{Li}^6 + {}_1^{\text{H}}\text{H}^2 \rightarrow {}_2^{\text{He}}\text{He}^4$	22,4
5	Réaction secondaire	${}_1^{\text{H}}\text{H}^2 + {}_1^{\text{H}}\text{H}^3 \rightarrow {}_2^{\text{He}}\text{He}^4 + {}_0^{\text{n}}\text{n}^1$	17,6
6		${}_3^{\text{Li}}\text{Li}^6 + {}_0^{\text{n}}\text{n}^1 \rightarrow {}_1^{\text{H}}\text{H}^3 + {}_2^{\text{He}}\text{He}^4$	4,8
7		${}_3^{\text{Li}}\text{Li}^7 + {}_0^{\text{n}}\text{n}^1 \rightarrow {}_3^{\text{Li}}\text{Li}^8$	2,0

Le deutérium est la matière première la plus importante pour les réactions thermonucléaires, car il existe en assez grandes quantités dans la nature. Dans l'eau naturelle, la teneur en eau lourde est

d'environ 0,014 %, c'est-à-dire qu'il y a un atome de deutérium pour 7000 atomes d'hydrogène ordinaire. Les réserves de deutérium dans l'eau des océans sont toutefois si grandes que le deutérium peut être considéré comme une source d'énergie pratiquement inépuisable. Quant au tritium, son noyau, qui comporte deux neutrons, est instable, de sorte qu'il représente le meilleur agent pour les réactions thermonucléaires. Le tritium n'existe toutefois pas à l'état naturel et ne peut pratiquement être obtenu que sous forme de produit de quelques réactions nucléaires. Le lithium est passablement répandu; il consiste en deux isotopes: $^3\text{Li}^7$ (93 %) et $^7\text{Li}^7$ (7 %), qui peuvent tous deux servir d'agents de réaction. De même, les éléments plus lourds Be et B peuvent être utilisés comme matières premières pour des réactions thermonucléaires, mais leurs noyaux possèdent des charges électriques plus grandes, ce qui nécessite des températures plus élevées.

En règle générale, diverses réactions thermonucléaires se déroulent simultanément, les réactions primaires étant accompagnées de réactions secondaires. Lors de certaines réactions primaires, il se forme des noyaux de tritium ou neutrons, qui provoquent immédiatement d'autres réactions. Les neutrons énergiques des réactions thermonucléaires peuvent également servir à fissionner des noyaux atomiques lourds. Les produits de la transmutation de noyaux légers ne possèdent qu'une brève radioactivité. Les réactions thermonucléaires libèrent toutefois des neutrons très énergiques, de sorte qu'il faut compter, durant la réaction, avec un très fort rayonnement de neutrons. En supposant que, dans le deutérium, les réactions nos 1 et 2 du tableau II se déroulent avec la même vitesse, un neutron est libéré pour chaque 7,3 MeV, l'énergie de ce neutron étant d'environ 3 MeV. Dans ce cas, l'énergie neutronique constitue le 40 % de l'ensemble de l'énergie libérée. Dans la réaction secondaire no 5, l'énergie neutronique atteint même 80 %. Par contre, lors de la fission de l'uranium, 2 ou 3 neutrons seulement sont libérés avec une énergie de 5 à 6 MeV, c'est-à-dire 2,5 % de l'énergie totale de 200 MeV. Les réacteurs thermonucléaires doivent donc être protégés très soigneusement contre le rayonnement de neutrons. En revanche, l'élimination des produits de la réaction ne pose aucun problème, ce qui peut être considéré comme un important avantage des réactions thermonucléaires.

La quantité d'énergie fournie par les réactions thermonucléaires dépend du genre des transmutations. Le tableau II montre que ces quantités d'énergie sont très différentes. Ainsi par exemple, lors des réactions primaires nos 1 et 2 simultanées, et lors de la réaction secondaire no 5, cinq atomes de deutérium libèrent $4 + 3,3 + 17,6 = 24,9$ MeV. Dans ce cas, 1 kg de deutérium transformé (poids atomique $M_A = 2,0147$) pourrait fournir une quantité d'énergie

$$W = \frac{24,9 \cdot 10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{5 \cdot 2,0147} 4,45 \cdot 10^{-20} = 6,65 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 66,5 \text{ GWh}$$

Le deutérium qui se trouve dans 1 kg d'eau lourde ($A = 2 \cdot 2 + 16 = 20$) pourrait alors fournir $66,5 \cdot 4/20 = 13,3$ GWh. En admettant que le 20 % de cette énergie puisse être transformé en énergie électrique, on aurait une production de $13,2 \cdot 0,20 = 2,66$ GWh/kg. Pour tirer 1 kg de D_2O de l'eau naturelle, au moyen de l'électrolyse, il faut consommer environ 10 000 kWh. Ainsi donc, le gain d'énergie dans les réactions nucléaires dépasserait 250 fois l'énergie consommée pour la préparation de la matière première. Cela prouve que les réserves en deutérium dans l'eau des océans constituerait une source d'énergie quasi inépuisable, si l'on parvenait à réaliser techniquement des réactions nucléaires réglables du deutérium.

V

Les problèmes essentiels qui se posent lors des réactions thermonucléaires sont ceux des températures extrêmement élevées. Ces problèmes présentent deux aspects:

1. Il faut atteindre la température initiale nécessaire, c'est-à-dire amorcer la réaction nucléaire.
2. Le déroulement de la réaction doit être réglé et l'énergie libérée doit être utilisée efficacement.

Des réactions thermonucléaires non réglées ont déjà été réalisées sous forme de processus explosifs à des fins militaires. La température initiale est atteinte dans ce cas à l'aide des fissions de noyaux atomiques lourds (U235 et Pu239). Pour l'instant, c'est là le seul moyen d'amorcer la transmutation nucléaire d'éléments légers. Dans des installations de production d'énergie, il faudra procéder autrement. On s'efforce, en laboratoire, d'atteindre ces températures élevées par différents moyens, notamment par des impulsions électriques extrêmement puissantes dans des gaz d'éléments légers (D_2), des oscillations à très haute fréquence, etc. Si l'on parvient, par l'un ou l'autre de ces moyens, à atteindre un niveau de température capable d'amorcer la réaction nucléaire, le premier des problèmes serait résolu. On admet que des impulsions de courant supérieures ou égales à 10^6 ampères permettraient d'atteindre une température d'environ 1 million de °C, qui suffirait déjà à amorcer certaines réactions thermonucléaires.

L'autre problème consiste à régler la réaction amorcée et à en utiliser l'énergie libérée. La difficulté réside surtout dans le fait qu'aucune matière technique n'est capable de supporter des températures aussi élevées; toute matière se vaporise avant que la température d'amorçage des réactions thermonucléaires ne soit atteinte. Il faudra donc trouver le moyen de limiter ces réactions dans l'espace. Les atomes de l'agent de la réaction étant ionisés à ces hautes températures, ils peuvent être dirigés à l'aide d'un champ magnétique. On pourrait ainsi maintenir la réaction à l'écart des parois du réacteur, de façon à isoler en quelque sorte l'enceinte de celui-ci. Dans les appareils d'accélération, les faisceaux des particules chargées électriquement sont déjà dirigés par le champ magnétique

tique d'une manière déterminée, sans toucher les parois de l'appareil. Un tel système serait applicable aux réacteurs d'énergie, mais il faudra que l'énergie nécessaire à la création du champ magnétique soit aussi faible que possible, afin que l'installation puisse travailler avec un bon rendement.

L'enrobage de l'enceinte de réaction par le champ magnétique offre en outre, théoriquement, une autre possibilité extrêmement importante, celle de soutirer l'énergie de réaction directement sous forme d'énergie électrique. On éviterait de la sorte les grandes pertes qui résulteraient d'une transformation de la chaleur en énergie mécanique. La transformation directe de l'énergie chimique et nucléaire en énergie électrique est l'une des tâches les plus importantes de la technique de l'énergie. Lors du dernier congrès de l'UNIPEDE, à Londres, en 1955, le directeur de la Commission britannique pour l'énergie atomique a déclaré qu'il était convaincu que l'on parviendrait à résoudre ce problème et que le rendement global de la production d'énergie en serait sensiblement amélioré.

La fission de noyaux atomiques lourds est contrôlée par le réglage du bilan des neutrons (le facteur de croissance). Ces réactions nucléaires ont la tendance à se régler d'elles-mêmes car, lorsque la température devient très élevée, la section efficace de capture des matières fissiles diminue. Dans le cas des réactions thermonucléaires, la température est le facteur principal qui favorise la réaction. Dans les grandes masses de matière des astres, il se produit également un autoréglage, car le travail de compression de la force de gravitation compense une baisse éventuelle de la température. Dans les installations techniques de production d'énergie, où la réaction doit avoir lieu avec de petites quantités de matière, il semble qu'un réglage de ce genre soit impossible. On pourra cependant envisager un réglage de la quantité ou du remplissage, l'énergie cédée étant contrôlée par la modification de la quantité de matière à introduire dans l'enceinte de réaction. S'il était possible de maintenir en un point la température nécessaire, l'admission de petites quantités d'agents de réaction pourrait alors libérer une quantité d'énergie réglable, qui dépendrait de la quantité de matière. En introduisant dans le noyau du réacteur une très petite quantité d'agents de réaction, la réaction en chaîne ne pourrait toutefois pas se développer, car la cession d'énergie a

lieu beaucoup trop rapidement. La réaction ne pourrait être entretenue qu'en amenant périodiquement la température à la valeur nécessaire, par exemple au moyen d'oscillations, d'impulsions électriques, etc., ce qui provoquerait une succession de réactions explosives. En modifiant la séquence ou l'importance de ces explosions, on pourrait ainsi régler la puissance du réacteur et la température moyenne dans l'enceinte de réaction, ce qui permettrait de résoudre plus facilement le problème du matériel. La production d'énergie aurait alors un caractère pulsatoire, analogue à celui des machines à combustible.

Si l'on parvenait à résoudre les deux problèmes principaux — l'obtention de la température initiale nécessaire et le réglage de l'allure de la réaction —, on disposerait alors des bases techniques permettant la construction de réacteurs thermonucléaires. Les réserves d'éléments légers étant pratiquement inépuisables, les besoins mondiaux en énergie pourraient être satisfaits presque sans restriction. Pour le moment, on ne procède toutefois qu'aux premiers essais dans ce sens.

En résumé, la situation relative à l'utilisation de l'énergie nucléaire peut être caractérisée comme suit:

a) L'emploi de réactions thermonucléaires pour la production d'énergie n'est pas probable dans un proche avenir, aussi doit-on développer pour l'instant la fission de noyaux atomiques lourds. Vers la fin du siècle, il est probable que les usines atomiques fondées sur cette méthode seront nos plus importantes sources d'énergie.

b) Pour utiliser avec succès les réactions thermonucléaires, il sera nécessaire d'entreprendre encore de vastes recherches théoriques sur la structure des noyaux atomiques, d'où surgiront peut-être des idées absolument nouvelles pour la solution de ce problème.

c) Les savants et les techniciens sont convaincus que, malgré toutes les difficultés, les problèmes des réactions thermonucléaires peuvent être résolus. Si l'on parvient à mettre au point de tels réacteurs, l'un des rêves les plus hardis de l'humanité dans le domaine technique serait réalisé.

Adresse de l'auteur:

A. Kroms, 12 Brainerd Rd., Boston 34, Mass. (USA).