

# L'énergie atomique: applications actuelles et perspectives d'utilisation industrielle

Autor(en): **Rossel, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **77 (1951)**

Heft 18: **Comptoir Suisse, Lausanne, 8-23 septembre 1951**

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-58161>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

Comité de patronage — Président: R. Neeser, ingénieur, à Genève; Vice-président: G. Epitoux, architecte, à Lausanne; Secrétaire: J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg: MM. P. Joye, professeur; E. Latelin, architecte — Vaud: MM. F. Chenaux, ingénieur; E. d'Okolski, architecte; A. Paris, ingénieur; Ch. Thévenaz, architecte — Genève: MM. L. Archinard, ingénieur; Cl. Grosgrin, architecte; E. Martin, architecte; V. Rochat, ingénieur — Neuchâtel: MM. J. Béguin, architecte; G. Furter, ingénieur; R. Guye, ingénieur — Valais: MM. J. Dubuis, ingénieur; D. Burgener, architecte.

Rédaction: D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration de la Société anonyme du Bulletin Technique: A. Stucky, ingénieur, président; M. Bridel; G. Epitoux, architecte; R. Neeser, ingénieur.

## Tarif des annonces

Le millimètre  
(larg. 47 mm) 20 cts  
Réclames: 60 cts le mm  
(largeur 95 mm)

Rabais pour annonces  
répétées

Annonces Suisses S.A.



5, Rue Centrale Tél. 22 33 26  
Lausanne et succursales

## Abonnements:

Suisse: 1 an, 24 francs  
Etranger: 28 francs

Pour sociétaires:  
Suisse: 1 an, 20 francs  
Etranger: 25 francs

Pour les abonnements  
s'adresser à:

Administration  
du « Bulletin technique  
de la Suisse romande »,  
Case postale Riponne 21,  
Lausanne

Compte de chèques postaux  
II. 5775, à Lausanne

Prix du numéro: Fr. 1,40

**SOMMAIRE:** *L'énergie atomique. Applications actuelles et perspectives d'utilisation industrielle*, par J. ROSSEL, professeur à l'Université, Neuchâtel. — **DIVERS:** *Les lustres ont-ils une influence sur l'« acoustique » des salles de théâtre et de concerts?* — **BIBLIOGRAPHIE.** — **SERVICE DE PLACEMENT.** — **AVIS A NOS ABONNÉS.** — **NOUVEAUTÉS, INFORMATIONS DIVERSES.**

## L'ÉNERGIE ATOMIQUE

### Applications actuelles et perspectives d'utilisation industrielle

par J. ROSSEL, professeur à l'Université, Neuchâtel

#### 1. Introduction

L'énergie atomique — nucléaire plus exactement — représente-t-elle une source nouvelle d'énergie, capable d'abord de prendre place à côté des sources traditionnelles, pétrole, houilles noire et blanche, plus tard de les supplanter ou de les remplacer même?

Cette question dont la signification ne devrait échapper à personne se ramène avant tout à un problème de rendement, du double point de vue de la transformation de l'énergie libérée en puissance utilisable et, dans une perspective plus large, de la préparation sous forme de matière fissurable des réserves de « combustible » nucléaire contenues dans la croûte terrestre. Ce problème a davantage qu'un intérêt scientifique. Il présente, du moins pour les générations futures, une importance qu'il ne faut pas hésiter à qualifier de vitale. Au rythme avec lequel les réserves d'énergie exploitables sont mises à contribution — l'énorme consommation de houille et d'essence est caractéristique de notre époque et surtout de la période actuelle d'après guerre — il est probable que dans un avenir relativement proche l'humanité se verra privée de l'élément le plus essentiel à son existence matérielle. C'est pourquoi, en dépit de l'aspect tragique sous lequel la puissance de l'atome s'est d'abord manifestée, aspect qui en constituera malheureusement toujours un élément potentiel inséparable, il convient de saluer avec satisfaction et optimisme la libération en quantités industrielles de l'énergie nucléaire et les possibilités d'utilisation pratique qu'on en peut espérer.

Ces possibilités trouvent leur expression la plus frappante dans la nature même de cette nouvelle forme d'énergie qui résulte de l'équivalence fondamentale entre masse et énergie, la masse devant être considérée dans les phénomènes intimes de métamorphose auxquels elle participe comme de l'énergie sous une forme excessivement condensée. L'équivalence en question s'exprime par la relation bien connue, dérivant directement de la théorie de la relativité d'Einstein:

$$E = m \cdot c^2 \quad (c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec est la vitesse de la lumière dans le vide})$$

ou en chiffres:

$$25 \cdot 000 \cdot 000 \text{ kWh} = 1 \text{ gramme.}$$

Il nous suffit de considérer par comparaison l'énergie produite par le phénomène ordinaire de combustion — une des sources traditionnelles d'énergie — pour mesurer l'incroyable réserve que représente la matière, à condition qu'on arrive à la dématérialiser.



$$Q = 0,0091 \text{ kWh par gramme } C.$$

On peut bien prévoir que ce sera au niveau atomique, là où la matière se présente sous sa forme dernière et la plus dense, que la libération d'énergie par disparition de masse devra s'opérer si elle est en fait possible. Dans l'atome, la répartition de la masse se présente en effet de la façon suivante:

Le *noyau*, chargé positivement, contient pratiquement toute la masse de l'atome. Ses dimensions sont de l'ordre de  $10^{-12}$  cm et la densité y est par conséquent énorme atteignant  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> soit 100 000 tonnes/mm<sup>3</sup>, valeur qu'il est instructif de comparer à la densité de l'eau de 1 milligramme/mm<sup>3</sup>.

Autour du noyau, le nuage d'électrons négatifs ne porte qu'une fraction négligeable de la masse atomique totale. Ceci nous permet de comprendre pourquoi les sources traditionnelles d'énergie (chimique, électrique) qui ont leur origine dans les modifications de ces couches électroniques sont à tel point disproportionnées vis-à-vis de l'énergie nucléaire (improprement et vulgairement dénommée atomique).

Le noyau lui-même est constitué d'un assemblage excessivement compact de *nucléons*: *protons* portant une charge élémentaire positive et *neutrons* sans charge électrique mais de masse sensiblement égale.

Par le symbole  $Z^A$  on notera donc un noyau comportant  $Z$  protons — ayant ainsi une charge positive  $+Ze$  — et en tout  $A$  nucléons, c'est-à-dire  $N = A - Z$  neutrons. Comme les propriétés chimiques ne dépendent que de la charge, un même élément peut être représenté par plusieurs noyaux (ou atomes) de même  $Z$  mais de  $A$ , et par conséquent de  $N$ , différents. Ces noyaux ont reçu le nom maintenant bien connu d'*isotopes*. L'uranium, par exemple, possède les trois isotopes naturels  $^{92}_{234}\text{U}$ ,  $^{92}_{235}\text{U}$  et  $^{92}_{238}\text{U}$  qu'on désigne également par  $^{92}_{234}\text{U}$ ,  $^{92}_{235}\text{U}$  et  $^{92}_{238}\text{U}$  (fig. 1).

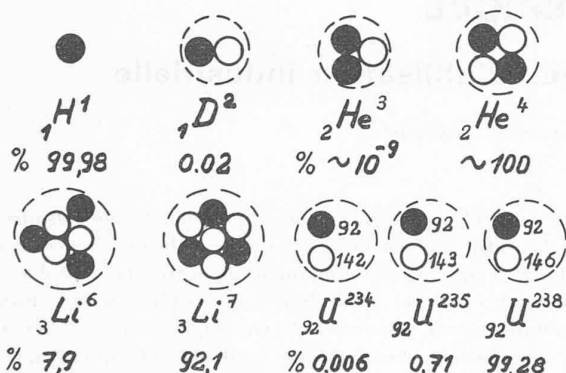


Fig. 1. — Les isotopes naturels des trois premiers et du dernier élément de la table périodique avec indication des abondances relatives.

La physique nucléaire démontre quotidiennement, dans les réactions entre noyaux, l'exactitude de la relation  $E = mc^2$  et ceci depuis plus de trente ans. Ces réactions nucléaires ou transformations des noyaux les uns dans les autres sont réalisées par bombardement de la matière au moyen d'atomes artificiellement accélérés à de très grandes vitesses par des machines infiniment ingénieuses et dont la plus célèbre est le cyclotron (fig. 2).

Cependant ces réactions ne sont en aucune manière des sources d'énergie. Au contraire, le rendement du bombardement est si faible par suite de l'énorme dispersion — la probabilité d'un touché ne dépasse guère 1 % pour une couche de 1 cm de matière — que l'énergie employée pour l'accélération dépasse d'un facteur 1000 à 10 000 l'énergie nucléaire libérée.

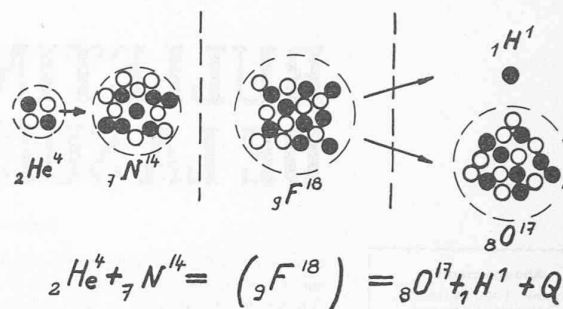


Fig. 2. — Exemple de réaction nucléaire. Un noyau d'hélium (particule  $\alpha$ ) accéléré entre en collision avec un atome d'azote. Le noyau intermédiaire formé (fluor) est très fortement excité et, après une durée de vie négligeable, expulse un noyau d'hydrogène (proton) et donne naissance à un noyau d'oxygène de masse 17.

**2. Phénomène de fission et réaction en chaîne**

Le phénomène de fission des noyaux lourds et en particulier de l'uranium, découvert en 1939, a ouvert la voie à la libération d'énergie atomique en quantités macroscopiques. Ce processus présente une caractéristique qui rend possible une *réaction en chaîne*, autrement dit une réaction qui, dans des conditions appropriées, s'étend d'elle-même à un nombre de noyaux arbitrairement grand. Le processus peut se décrire schématiquement de la façon suivante (fig. 3).

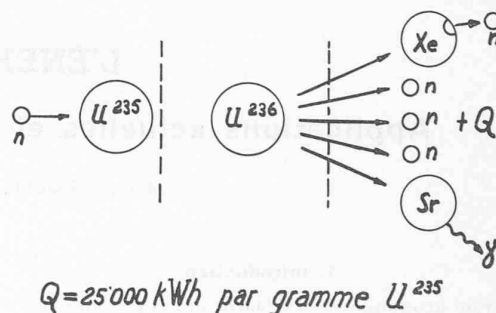


Fig. 3. — Représentation schématique du processus de fission de l'uranium.

Un neutron de faible énergie est capturé par un noyau d'uranium  $^{235}_{92}\text{U}$  et ceci avec une probabilité d'autant plus grande que la vitesse du neutron est plus faible. Le noyau résultant  $^{236}_{92}\text{U}$  se fissure spontanément en deux fragments, noyaux de masse moyenne dont la somme des  $Z$  doit être forcément égale à 92. Dans cette réaction, 1/1000 environ de la masse initiale disparaît, l'énergie ainsi libérée se manifestant dans la grande vitesse des fragments  $v \sim 1/30$  c. Ces fragments chargés positivement sont très fortement freinés dans la matière environnante; leur énergie de mouvement (forme élevée d'énergie) est ainsi, immédiatement après la fission, dégradée en *chaleur*. La grande énergie cinétique initiale des fragments indique cependant en principe la possibilité d'un niveau de température pouvant dépasser  $10^6$  °C, pratiquement donc aussi élevé qu'on le voudra.

Simultanément, lors de la fission, deux à trois *neutrons secondaires* sont produits; c'est là ce qui fait du processus la réaction-clé pour la libération d'énergie nucléaire. En effet, il est possible de réaliser des conditions extérieures telles qu'un au moins de ces neutrons soit à son tour capturé par un nouveau noyau  $^{235}_{92}\text{U}$ , ce qui assure de proche en proche une chaîne de réactions pouvant s'étendre à la masse entière

d'uranium. Lorsqu'un kilogramme d'uranium 235 a participé à la réaction, un milligramme de matière s'étant dématérialisé, on aura donc produit une quantité d'énergie de 25 000 kWh.

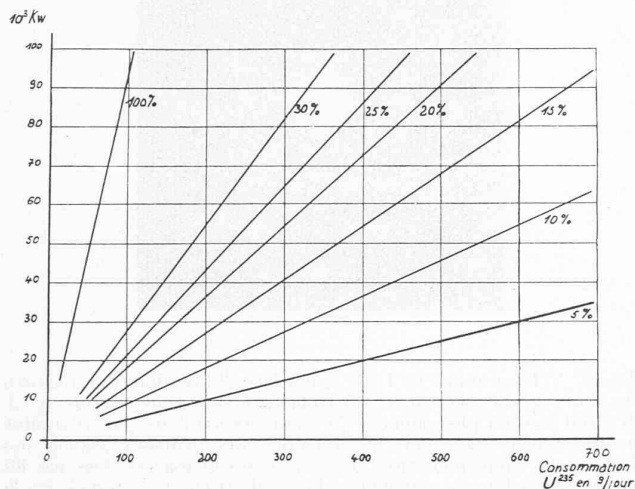


Fig. 4. — Courbes de production-consommation pour différents rendements de la transformation en énergie utile. (Puissance produite en milliers de kW en fonction de la quantité d'uranium 235 consommée, en grammes/jour.)

Les principaux avantages de l'énergie atomique que les considérations précédentes font apparaître immédiatement sont les suivants :

1. Petite quantité de combustible nucléaire par unité d'énergie produite.
2. Grande puissance possible par unité de poids.
3. Dispense de tout agent oxydant.

Ces trois points constituent des avantages déterminants dans les problèmes de propulsion sous-marine, aérienne et astronautique.

4. Possibilité d'un niveau de température très élevé, ce qui est susceptible de compenser dans une certaine mesure l'inévitable dégradation en chaleur de l'énergie nucléaire.

Les conditions de maintien de la réaction en chaîne se présentent sous des aspects différents suivant le combustible nucléaire utilisé,  $U^{235}$  isolé ou mélange naturel  $U^{238}$  plus  $U^{235}$ . Dans le premier cas, la réaction en chaîne a lieu sitôt rassemblée une quantité suffisante de matière (volume critique nécessaire). Elle est extrêmement rapide et si elle se poursuit sans être contrôlée se développe en explosion atomique. L'introduction d'une substance qui absorbe les neutrons, transforme la bombe en réacteur utilisable. Par suite de ses dimensions réduites, ce type présente un intérêt évident pour les problèmes de propulsion. Cependant, du point de vue économique, la séparation de  $U^{235}$  du composé isotopique complexe est une opération longue, difficile et onéreuse. C'est pourquoi l'attention s'est d'abord tournée vers les réacteurs consommant le mélange naturel d'uranium (99,2 %  $U^{238}$ , 0,7 %  $U^{235}$  et 0,006 %  $U^{234}$ ).

### 3. Les réacteurs nucléaires à modérateur

L'isotope  $U^{238}$  du mélange naturel d'uranium a la propriété d'absorber fortement les neutrons ; il est indispensable, par conséquent, pour maintenir la réaction en chaîne, d'éviter au maximum cet effet, en favorisant simultanément les fissions secondaires. On y arrive en ralentissant les neutrons

de fission dont l'énergie initiale est considérable au moyen d'un *modérateur*, substance dont les noyaux opèrent, par collision, un freinage efficace des neutrons mais sans les absorber.

Lorsqu'un noyau  $U^{238}$  a capturé un neutron, il se transforme, au cours d'un processus qui dure deux à trois jours, en un nouvel élément, le plutonium. Cette substance présente la propriété d'être fissurable au même titre que l'isotope d'uranium  $U^{235}$ . Ainsi donc, pendant le fonctionnement du réacteur, la substance initialement inactive  $U^{238}$  a tendance à se transformer lentement en nouveau combustible nucléaire. C'est là un point important sur lequel nous reviendrons.

Les seules substances utilisables comme modérateurs sont actuellement l'eau lourde et le graphite. On aura donc en principe, deux types principaux de réacteurs : les réacteurs à eau lourde et les réacteurs au graphite. Les dimensions critiques du dispositif sont ici beaucoup plus grandes que si l'on emploie  $U^{235}$  pur et l'ensemble se présente sous forme d'une structure approximativement cubique avec une arête de 2 à 3 mètres au minimum. Les réacteurs sont, par conséquent, volumineux, massifs et jusqu'ici appropriés uniquement à la production d'énergie sous forme de centrale de dimensions respectables.

Les seuls réacteurs nucléaires de quelque puissance actuellement en service (le premier réalisé date de fin 1942) fonctionnent tous avec le mélange naturel d'uranium. Il en existe probablement une dizaine aux U. S. A. (Oak-Ridge et Hanford en particulier), un au Canada, deux en Angleterre, un en France. Quelques nouveaux modèles sont en construction aux Etats-Unis, en Angleterre, France et Norvège. En Suisse, la Commission atomique, sur l'activité de laquelle nous reviendrons, s'applique à obtenir la matière première indispensable, l'uranium dont notre sol est malheureusement pratiquement dépourvu...

Le principe très schématique de réalisation d'un réacteur et ses différents produits sont donnés dans la figure suivante (fig. 5).

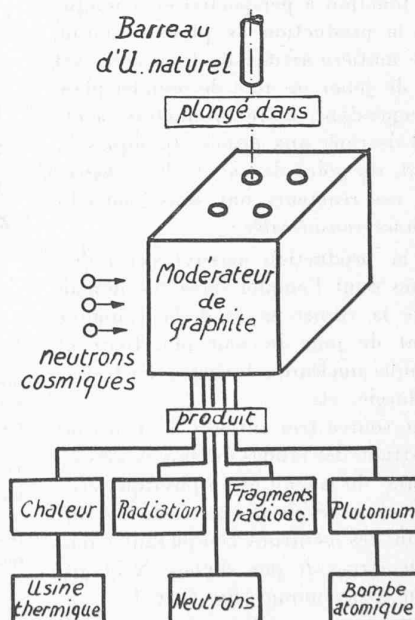


Fig. 5. — Principe d'un réacteur à modérateur de graphite. Les barreaux d'U. sont disposés en un réseau spécialement étudié dans la masse du graphite et sont protégés par une gaine spéciale d'aluminium permettant le passage du liquide réfrigérant. Les barreaux de matière absorbant les neutrons peuvent être déplacés à l'intérieur du réacteur et permettent de contrôler la réaction et le niveau de température.

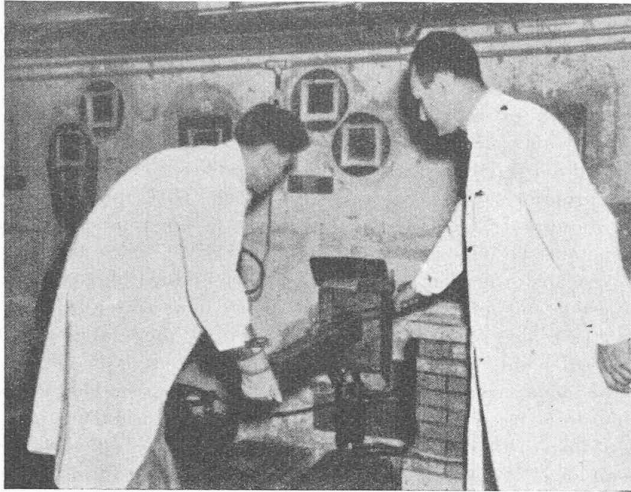


Fig. 6. — Vue d'une des faces du réacteur d'Oak-Ridge. On aperçoit les orifices des canaux ménagés dans le mur-écran de béton pour l'introduction des substances qui, soumises à l'irradiation des neutrons, fournissent les différents radio-isotopes utilisés dans les domaines les plus divers. D'autres canaux permettent aux neutrons de s'échapper sous forme de faisceaux d'intensité considérable (de l'ordre de  $10^7$  neutrons par  $\text{cm}^2$  et sec) utilisés pour les recherches nucléaires ou les études de structures moléculaires.



Fig. 7. — Diagramme de Laue obtenu par diffraction d'un faisceau de neutrons du réacteur d'Oak-Ridge sur un monocristal de NaCl. Il s'agit là d'un phénomène et d'une méthode d'analyse cristalline courants pour les rayons X. L'emploi des neutrons permet des indications supplémentaires très précieuses et inaccessibles par les autres procédés (en particulier la localisation des atomes H, la détermination d'anisotropies de nature magnétique et l'estimation de la force de certaines liaisons intermoléculaires) et tend à prendre une grande importance comme méthode d'étude de la structure des solides et des liquides.

Quel peut être le rôle « utile » des réacteurs actuellement en opération ?

Du point de vue économique de la production d'énergie, ce rôle est encore nul. Par exemple, dans les grands réacteurs de Hanford, dont la puissance dépasse  $10^6$  kW, la chaleur est produite à un niveau de température très bas, de 150 à 250° C et est simplement éliminée en pure perte.

La seule fonction à perspective économique réside dans la production de plutonium qui, en tant que matière artificielle fissurable, est susceptible de jouer un rôle de premier plan. Jusqu'ici cependant, cette production a été uniquement destinée aux armes atomiques.

Cependant, du point de vue de la recherche scientifique, ces réacteurs ont sans contredit une importance considérable :

- pour la production massive des radio-isotopes dont l'emploi dans les domaines de la recherche et de la technique devient de jour en jour plus fréquent (physique nucléaire, biologie, médecine, métallurgie, etc.);
- comme source très intense de neutrons permettant des études fondamentales en physique du noyau et en physique cristalline et moléculaire (méthode de diffraction des neutrons complétant l'analyse de structure par rayons X et diffraction électronique) (fig. 6 et 7).

L'aspect extérieur d'un réacteur actuel est assez banal puisqu'on ne peut guère en voir que les écrans de protection, murs de béton massifs dont il doit forcément être entouré pour protéger le personnel du rayonnement  $\gamma$  extrêmement nocif qu'il émet (équ-

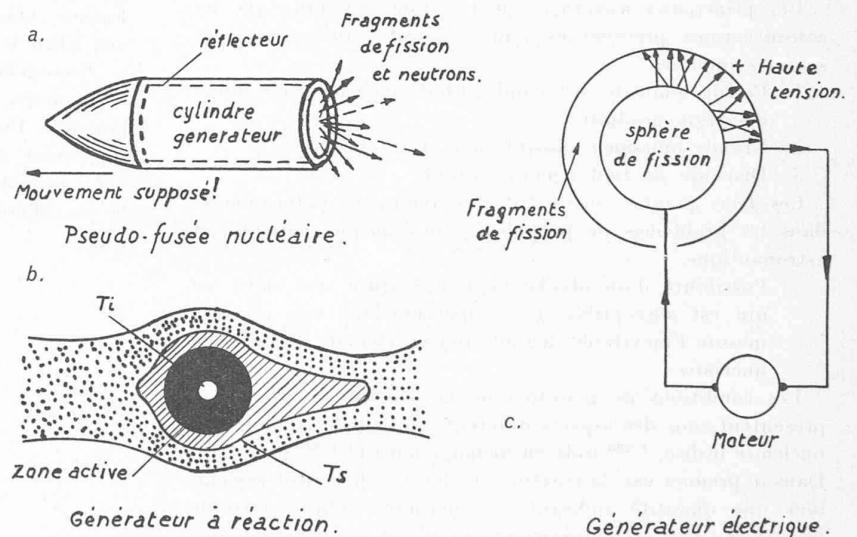


Fig. 8. — (Inspirée de Goodman<sup>1</sup>.)

a) Fusée sensée être propulsée par le recul de la matière éjectée sous forme de fragments de fission et de neutrons émis ou réfléchis vers l'arrière. Il est évident qu'il s'agit là d'une vision utopique; le parcours de fragments dans la matière est en effet si faible qu'ils ne peuvent émerger que d'une couche de quelques microns d'épaisseur en surface et le flux de matière est insignifiant.

b) Dispositif en turbine à réaction et prévu pour tirer parti au maximum du très haut niveau de température possible. Une transmission très efficace d'énergie thermique serait réalisable par rayonnement entre le réacteur nucléaire central (de température  $T_c$  de quelques milliers de degrés au minimum) et le gaz de particules matérielles introduit à l'avant et s'accélérait vers l'arrière. On se rend facilement compte des difficultés technologiques prohibitives de la méthode.

c) Méthode de conversion directe de l'énergie atomique en énergie électrique. Le principe consiste à charger une enveloppe métallique vide d'air au moyen des fragments émis par un réacteur sphérique intérieur. Il est possible ainsi d'obtenir des tensions dépassant le million de volts. Un tel potentiel a effectivement été produit expérimentalement. Cependant, pour les mêmes raisons que sous a), le nombre des fragments est trop faible pour permettre un courant appréciable et la puissance délivrable est par conséquent excessivement faible.

<sup>1</sup> C. Goodman, The Science and Engineering of Nuclear Power, Cambridge, Mass., 1947.

valent à plusieurs tonnes de radium) ainsi que du flux considérable des neutrons produits. Le maniement du réacteur se fait à distance ; c'est là une de ses caractéristiques essentielles et il est évident que cette exigence représente, en plus de grandes difficultés techniques, un lourd handicap économique par suite des frais considérables d'exploitation qui en résultent.

4. Quelques projets hypothétiques

Avant d'examiner plus attentivement l'utilisation industrielle des réacteurs conventionnels (centrale thermique), on peut se demander s'il ne serait pas possible de convertir en énergie utile, directement ou du moins sans dégradation trop prononcée, l'énergie de mouvement des fragments de fission. Il ne semble pas que ce soit chose physiquement réalisable, bien qu'on ait imaginé certains dispositifs plus ou moins hypothétiques dont la figure 8 donne trois exemples dans un ordre croissant de plausibilité.

5. Les problèmes à résoudre

Quels sont les problèmes d'ordre physique et plus spécialement de nature technique et technologique à résoudre, pour réaliser par des moyens physiquement possibles, une production rationnelle d'énergie nucléaire, industriellement utilisable et économiquement avantageuse ?

Ils sont essentiellement au nombre de quatre :

1. Le problème immédiat est celui de l'élévation du niveau de température techniquement possible, de façon à augmenter le rendement thermique de la transformation en énergie électrique. Actuellement ce rendement est très faible, puisque les réacteurs fonctionnent à des températures ne dépassant pas 200° C. Le rendement qu'il faudrait atteindre est en tout cas de 30 %. Ce problème n'est certes pas simple, par suite de la corrosion et des déformations très importantes des structures matérielles, consécutives aux hautes différences de température qui pourront atteindre 1000° C et davantage.

2. L'effet destructeur des radiations  $\gamma$  et des neutrons produit dans la fission et par les fragments eux-mêmes, sur les matériaux utilisés dans le réacteur, pose un problème fort difficile et dont la solution doit forcément dépendre des expériences réalisées et lentement accumulées avec les réacteurs actuellement en service.

3. La protection efficace contre les radiations est une question à la fois délicate et essentielle, tout particulièrement pour les applications éventuelles de l'énergie atomique à la propulsion des véhicules. Sera-t-il possible de réaliser des blindages suffisants ayant pourtant un poids et un encombrement réduits ? C'est là une question à laquelle il est encore difficile de répondre.

4. Enfin dernier problème, mais certes non le moindre pour les perspectives d'utilisation future à grande échelle, celui des combustibles nucléaires à disposition. Nous avons vu que le seul élément naturel capable d'être fissuré en chaîne est l'uranium 235. Nous avons parlé du plutonium, combustible nucléaire artificiel, produit dans le réacteur à partir de  $U^{238}$ , par capture de neutrons. Il existe en fait une autre possibilité encore : elle consiste à produire un nouvel isotope de l'uranium,  $U^{233}$ , à partir du thorium,  $Th^{232}$ . Cette nouvelle substance est également fissurable et représente avec  $U^{235}$  et Pu, le troisième type de combustible nucléaire connu actuellement. La réaction de transformation de  $U^{238}$  en plu-

tonium et celle conduisant du thorium à  $U^{233}$ , sont les suivantes (fig. 9) :

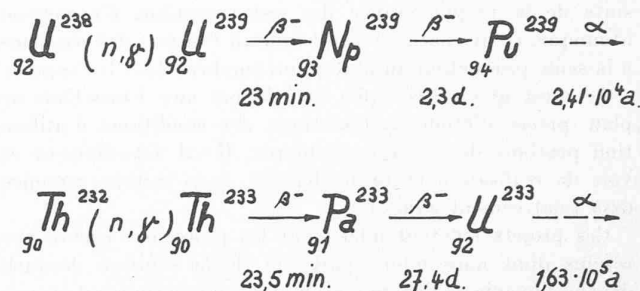


Fig. 9. — Dans le cas du thorium comme dans celui de l'uranium, la capture du neutron est suivie de deux désintégration  $\beta$  consécutives dont les périodes sont indiquées. Les noyaux fissurables résultant de la série de transformations,  $Pu^{239}$  et  $U^{233}$  sont des émetteurs  $\alpha$  qu'on peut considérer pratiquement comme stables.

Sera-t-il possible de produire en quantité importante ces combustibles nucléaires artificiels ? Cela dépend d'un processus que les Anglo-Saxons désignent du terme de *breeding* et que nous pouvons traduire par « génération ». Au cours de l'opération, l' $U^{238}$  et le thorium introduits dans le réacteur, en même temps qu'une faible quantité d' $U^{235}$  servant à amorcer la réaction, se transformeraient d'une part en plutonium et d'autre part en  $U^{233}$ . Ces substances, à leur tour, contribueraient au maintien de la réaction, tout en produisant davantage encore de matière fissurable nouvelle. On peut prévoir même, si l'opération est effectivement possible, que la quantité de matière active ainsi produite serait supérieure au combustible nucléaire consommé, d'où possibilité de transformer progressivement en substance utilisable la *totalité* des réserves naturelles d' $U^{238}$  et de thorium.

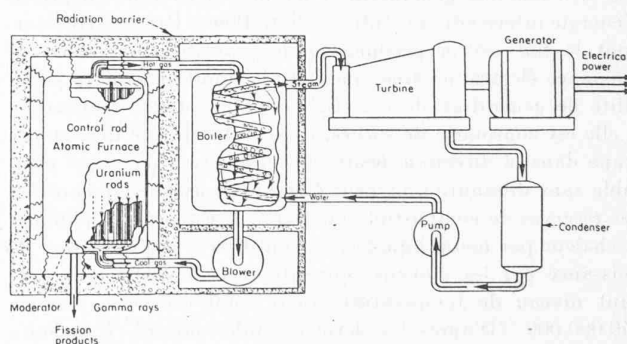


Fig. 10. — (D'après Goodman<sup>1</sup>). Diagramme schématique d'un des premiers projets américains de centrale thermique nucléaire. Le réfrigérant est prévu sous forme de gaz (hélium par exemple) circulant en circuit fermé dans les enveloppes de protection des barreaux d'uranium. La chaleur est transmise à un courant de vapeur dans un échangeur empêchant tout contact matériel et évitant au maximum la contamination radio-active du circuit thermique conventionnel. Ce dernier comprend une turbine à vapeur couplée au générateur électrique, un condenseur et une pompe de circulation. Un canal d'évacuation des produits de la fission (fragments) est disposé à la partie inférieure du réacteur ; un curage périodique est en effet nécessaire au maintien de la réaction en chaîne.

<sup>1</sup> C. Goodman, The Science and Engineering of Nuclear Power, Cambridge, Mass.,

### 6. Le programme américain<sup>1</sup>

L'étude des possibilités industrielles de l'énergie nucléaire a été fort malheureusement trop longtemps différée par suite de la prépondérance des préoccupations d'armement atomique, ce qui naturellement limitait l'intérêt des réacteurs à la seule production du plutonium employé dans les bombes.

Ce n'est qu'en 1949 qu'a été élaboré aux Etats-Unis un plan précis d'étude systématique des conditions d'utilisation pratique de l'énergie atomique. Il est actuellement en voie de réalisation et probablement, dans certains secteurs, déjà relativement avancé.

Ces projets reflètent fidèlement les problèmes encore non résolus dont nous avons parlé, et de la solution desquels dépend l'avenir de l'énergie atomique comme source d'énergie industriellement utilisable.

Il est prévu d'abord de construire quatre réacteurs expérimentaux à fonctions distinctes :

1. Un réacteur pour l'étude de l'action des radiations  $\gamma$  et des neutrons sur les matériaux devant servir à la construction des centrales atomiques (Materials Testing Reactor). Il s'agit des dispositifs de réfrigération des enveloppes de protection des barreaux d'uranium, ainsi que des procédés de refroidissement efficace des très hautes températures localement produites. Ce sont là des questions capitales du fait que les réacteurs de l'avenir devront fonctionner avec un flux de neutrons beaucoup plus intense encore qu'actuellement. Le coût total de ce réacteur est estimé à \$25 000 000.

2. Un réacteur-générateur (Experimental Breeder Reactor) dont les plans sont déjà terminés et devant servir à étudier la possibilité pratique de « génération » avec des neutrons rapides, ainsi que l'élimination de la chaleur par réfrigérant sous forme de métal liquide. Ce réacteur est projeté pour fonctionner avec  $U^{235}$  pur et des quantités variables de  $U^{238}$  et  $Th^{232}$ . Une certaine quantité de puissance utile est prévue comme sous-produit éventuel. Coût total présumé : \$3 500 000 environ.

3. Un réacteur-générateur fonctionnant avec des neutrons d'énergie intermédiaire (Intermediate Power Breeder Reactor) dont le but est la production en quantité appréciable de puissance électrique, ainsi que l'étude simultanée de la possibilité de génération de matériel fissurable. Cette réalisation, si elle est couronnée de succès, représenterait une importante étape dans la direction désirée de production d'énergie utilisable sans diminution et peut-être même avec augmentation des réserves de combustible nucléaire. Il est prévu d'éliminer la chaleur par métal liquide pour l'utiliser à la production de puissance par les moyens conventionnels à partir d'un très haut niveau de température. Coût total estimé à plus de \$40 000 000. (D'après les dernières informations, à la suite des événements de 1950, l'étude et la construction de ce réacteur ont malheureusement été suspendues...)

4. Enfin un réacteur de la marine (Ship Propulsion Reactor), prototype d'étude des méthodes et possibilités de propulsion atomique des navires de gros tonnage et des sous-marins. C'est là une étude difficile qui, pourtant, d'après les prévisions, devrait permettre la mise en chantier du dispositif dès 1952. Coût total supérieur à \$25 000 000.

Mentionnons, pour être complet, le projet NEPA (Nuclear Energy for Propulsion of Aircraft) à objectif assez lointain, et confié pour étude au M. I. T.

<sup>1</sup> R. F. Bacher, Bull. of Atomic Scientists, p. 80, mars 1949.

### 7. La situation en Suisse

La Commission Suisse d'étude pour l'énergie Atomique, (C.S.A.), créée en 1946, a, depuis cette époque, déployé une activité considérable. Cet organisme comprenant une douzaine de membres : physiciens, chimistes et ingénieurs d'une part, représentants de l'industrie et de l'économie ainsi que des services techniques militaires d'autre part, a, en plus du soin d'administrer et de répartir les crédits spéciaux votés par le Conseil fédéral, les trois principales tâches suivantes :

a) Organiser, soutenir et développer dans notre pays la recherche scientifique dans toutes ses activités en rapport avec la physique du noyau et des radiations, et les problèmes de l'énergie atomique.

C'est ainsi qu'une partie des crédits sont répartis annuellement entre les instituts universitaires qui s'occupent de telles recherches et il n'est pas douteux que cet appui leur a déjà donné une très puissante impulsion.

b) Etudier les méthodes et créer les moyens de protection contre les armes atomiques et leurs effets physiologiques. Un groupe spécial de la commission est plus particulièrement chargé de cette activité, en relation avec les services techniques de l'armée ;

c) examiner les possibilités de réalisation pratique de certains types de réacteurs expérimentaux. Il s'est agi d'abord de faire une prospection étendue du sol national du point de vue des ressources en uranium. Simultanément, des plans de réacteurs ont été établis en collaboration avec l'industrie.

Les progrès sont malheureusement ralentis par le fait qu'aucun terrain uranifère de teneur intéressante n'a été découvert en Suisse et que par conséquent la mise en chantier des constructions projetées dépend des possibilités de se procurer à l'étranger la matière première indispensable. La C. S. A. fait un effort soutenu pour arriver à un résultat positif et la production indigène des autres matériaux nécessaires à un premier réacteur d'essai pourrait faire progresser la question de façon substantielle.

Le haut niveau scientifique et technique en Suisse ainsi que l'industrie de précision dont notre pays dispose sont les garants du succès de l'entreprise, sitôt réunies les conditions préliminaires indispensables.

### 8. Considérations économiques

Il nous reste à examiner la question essentielle de l'importance économique de l'énergie atomique et des perspectives qu'elle offre comme source nouvelle d'énergie à grande échelle.

Il n'est pas nécessaire, je pense, d'insister sur les difficultés d'estimation en la matière. Les données actuelles sont évidemment trop limitées et approximatives pour que des évaluations exactes soient possibles. Il s'agira donc d'indications que je présente avec toutes réserves.

Remarquons d'abord que le problème économique général se situe davantage sur le plan mondial que sur le plan national, puisque aussi bien il dépend encore de nombreux facteurs qui échappent au contrôle exclusif d'une nation plus particulière.

La première question qui se pose est celle des gisements géologiques d'uranium et, dans le cas où le « breeding » serait réalisable, des dépôts de thorium également, à la fois du point de vue de leur étendue et de la concentration des minerais ; de ce dernier point dépendra la possibilité de l'extraction et de sa rentabilité.

L'uranium n'est pas à proprement parler un élément rare de la croûte terrestre. Il s'y trouve en quantité plus abon-

dante que l'or. Ce qui le caractérise, c'est le nombre très limité des gisements à haute teneur, tels ceux du Congo belge ou de Great Bear Lake. On peut estimer la réserve dans ces gisements à priori économiquement intéressants, à quelque 100 000 tonnes d'uranium naturel au maximum.

Le thorium, de son côté, est beaucoup plus abondant et il est probable que les gisements de cette matière pourraient subsister pendant des siècles au taux d'extraction d'avant guerre de 500 à 1000 tonnes par année.

On voit donc très clairement que la question de la possibilité du « breeding » est de la plus haute importance dans l'estimation du rôle que l'énergie atomique peut être appelée à jouer à l'avenir. Nous pouvons nous livrer au petit jeu suivant, inspiré de considérations présentées par M. H. L. Pryce :<sup>1</sup>

Nous supposons que l'énergie atomique est destinée à remplacer la totalité des sources d'énergie traditionnelle mises actuellement à contribution, et nous essayerons de traduire en années le temps que pourraient durer les réserves connues de combustible nucléaire, au rythme de consommation actuelle.

a) *Cas où l'opération du « breeding » serait impossible*

Pour l'uranium contenu dans les gisements de rendement certain, cette durée ne saurait guère dépasser vingt-cinq ans. L'importance de l'énergie atomique dépendrait donc directement de la possibilité d'utilisation des gisements à faible teneur, condition qui reste aléatoire.

b) *Cas où l'opération du « breeding » serait réalisable*

Si l'uranium 238 seul est transformable en matière fissurable, on pourrait s'attendre à une durée de cent ans environ.

Si le thorium se soumet également à l'opération du « breeding », la situation change totalement et les réserves apparaissent alors comme pratiquement inépuisables. Dans ces conditions, on peut prévoir que l'énergie atomique serait destinée à jouer dans les siècles futurs un rôle providentiel de source d'énergie et devrait être considérée comme une véritable sauvegarde pour l'humanité.

<sup>1</sup> M. H. L. Pryce, Bull. of Atomic Scientists, p. 245, février 1949.

En dépit des projets et des réalisations actuelles, il semble inévitable que le temps nécessaire à la mise en œuvre des moyens à grande échelle soit relativement long. En effet, les processus de transformation de U<sup>238</sup> en plutonium et de thorium en U<sup>233</sup> sont lents et, comme tout phénomène radioactif, ne sont pas influençables de l'extérieur. Dans le cas le plus favorable où serait possible l'utilisation de tous les gisements d'uranium et de thorium, la production d'énergie atomique sur une échelle industrielle de grande envergure ne pourrait guère atteindre un développement satisfaisant avant plusieurs décennies. Néanmoins, il est plus que probable qu'un certain nombre de centrales nucléo-thermo-électriques (si l'on admet ce néologisme) pourront être créées d'ici quelques années en tant que production d'appoint ou pour des buts plus particuliers (chauffage, alimentation en énergie de régions défavorisées du point de vue des ressources ordinaires, etc., etc.).

Si le rôle de l'énergie nucléaire comme production de complément, parallèle aux sources ordinaires, semble justifié pour un proche avenir, la question qui se pose naturellement est celle de son prix de revient. Bien qu'il soit difficile encore de fixer, dans les circonstances actuelles, un prix à l'uranium, matière soumise au contrôle le plus strict par les pays qui en disposent, des estimations raisonnables indiquent que le prix du kWh d'énergie électrique produite aujourd'hui dans les centrales thermiques et celui du kWh d'énergie électrique d'origine atomique, seraient sensiblement équivalents.

Ces quelques aspects économiques de l'énergie atomique se limitent naturellement au cas où les perspectives de production seraient liées au seul processus de fission (en chaîne). L'éventualité de la découverte d'un phénomène nouveau conduisant à un résultat analogue sinon plus favorable encore et étendant à d'autres éléments contenus dans la croûte terrestre les propriétés requises, n'est certes pas exclue. Une telle évolution ne laisserait pas d'être favorable aux pays comme le nôtre qui ne possèdent pas de réserves d'uranium.

Neuchâtel, 27 juillet 1951.

## DIVERS

### Les lustres ont-ils une influence sur l'« acoustique » des salles de théâtre et de concerts ?

L'incendie de la salle de spectacles du Grand-Théâtre de Genève soulève, d'ores et déjà, de nombreux problèmes d'ordre architectonique, technique ou financier ; cela en vue de sa reconstruction dans des conditions aussi favorables que possible de rénovation ou de modernisation.

Or, et pour ne retenir ici que ceux qui ont trait à l'éclairage et à l'acoustique, nous constatons que le grand lustre ayant été sauvé du désastre, d'aucuns s'inquiètent déjà de sa réutilisation possible, l'estimant démodé, encombrant, voire clinquant.

Certes, ce mode d'éclairage comporte de multiples inconvénients : il éblouit les spectateurs des galeries supérieures tout en leur masquant une partie du « plateau » et en leur imposant par surcroît les désagréments d'une atmosphère surchauffée.

Mais, avant de le condamner, ne serait-il pas prudent

d'examiner si, en compensation, des qualités tout aussi importantes n'existent pas, dont la suppression ne pourrait être que regrettable ?

Singulièrement, pour ce qui concerne l'acoustique de la salle de Neuve — considérée à juste titre comme excellente — est-on certain que le lustre n'y soit pour rien ?

Cette question est importante et mérite qu'on s'y arrête, d'autant plus qu'elle est d'ordre général et peut s'adresser aux constructeurs de n'importe quelle salle d'auditions.

Car une des premières conditions à réaliser dans une telle salle, qu'il s'agisse de concerts, de spectacles dramatiques ou lyriques, ou de conférences, sera qu'elle ait une bonne acoustique.

A cet effet, si nous examinons les salles les plus réputées pour leur excellente acoustique — Conservatoire de Paris, Gewandhaus Leipzig, La Scala, Milan, Théâtre du Festival de Bayreuth, Grand-Théâtre de Genève, Salle de la Réformation, la plupart des salles d'opéra anciennes, etc., etc., nous sommes bien forcés de constater que toutes sont éclairées par des lustres. Alors qu'au contraire, presque tous les auditoriums « modernes », privés de ces grands luminaires suspendus dans le vide des vaisseaux intérieurs, présentent trop souvent des défauts de résonance caractérisés.

Or, ces résultats sont trop fréquents pour qu'ils puissent