

<b>Zeitschrift:</b>	Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Naturforschende Gesellschaft
<b>Band:</b>	125 (1945)
<b>Artikel:</b>	La libération de l'énergie nucléaire
<b>Autor:</b>	Haenny, Charles
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-90446">https://doi.org/10.5169/seals-90446</a>

### 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:** 13.01.2026

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

# **La libération de l'énergie nucléaire**

Par

CHARLES HAENNY, Lausanne

Il est à peine utile de relever ici le rôle immense de l'énergie dans tous les phénomènes. C'est elle que nous apporte le soleil, c'est elle que nous donnent nos aliments. C'est à elle que nous faisons appel aussi bien pour nous chauffer que pour nous mouvoir ou que pour créer tout ce qui nous est utile.

Jusqu'à maintenant, nous nous sommes contentés d'exploiter sur Terre l'énergie moléculaire accumulée dans des produits précieux, tels que le charbon ou le pétrole. Seule la chaleur solaire, énergie précieuse entre toutes, ne paraît pas être d'origine moléculaire, mais plutôt d'origine nucléaire. Jusqu'à il y a quelques années encore, nous ignorions qu'en nous chauffant au soleil, nous bénéficions de l'énergie dégagée par des réactions qui s'accomplissent dans cet astre entre des noyaux atomiques ainsi que le professeur WEIGLE a eu l'occasion de le dire à l'Assemblée annuelle de Schaffhouse. Jusqu'à il y a quelques semaines encore, la plupart d'entre nous ne pouvaient concevoir qu'un jour, des réactions nucléaires pourraient fournir sur cette Terre de l'énergie en quantité utilisable.

Chacun sait que la première manifestation d'une énergie contenue dans le noyau de certains atomes est apparue, il y a cinquante ans, lors de la découverte de la radio-activité. L'énergie dégagée par la désintégration d'un seul gramme de radium a suffisamment frappé tous les esprits. Mais le radium est un produit rare et coûteux, et surtout le débit de l'énergie qu'il peut fournir est infime, inutilisable comme source d'énergie. Autant vaudrait actionner des turbines par la pluie qui tombe, de haut souvent, mais

en gouttes de trop faible masse. Et la désintégration du radium suit un cours qu'il est vain de vouloir accélérer. Il en va de même pour tous les corps radio-actifs, utiles à tant d'emplois, mais qui ne peuvent servir comme source d'énergie.

Un peu plus tard, soit depuis quelques dizaines d'années, la loi d'équivalence entre l'énergie et la matière a pu faire rêver sur la possibilité magnifique de transformer de la matière en énergie. D'après cette relation, peu de matière équivaut à beaucoup d'énergie. En effet, il est facile de calculer que la dématérialisation d'un seul gramme de matière engendrerait 25 millions de kW/h. ce qui représente la chaleur dégagée par la combustion de 2500 tonnes de charbon.

Si cette transformation de la masse en énergie apparaît expérimentalement dans les phénomènes de la radio-activité naturelle, elle est restée longtemps le seul exemple et nous avons vu que ces transformations radio-actives se font en dehors de tout contrôle et en ne livrant qu'une énergie inutilisable.

Il y a lieu de remarquer que toute variation de l'énergie contenue dans un système est accompagnée d'une variation de la masse de celui-ci. Dans les réactions chimiques les plus exothermiques, la quantité de chaleur dégagée est beaucoup trop faible pour que la perte de masse puisse être perceptible. Par exemple :



L'électronvolt (ev) est une unité d'énergie très utilisée dans la description des phénomènes nucléaires. C'est la raison pour laquelle nous l'employons ici déjà. Un *électronvolt* est l'énergie que prend un électron lancé dans le vide par une différence de potentiel de un volt.

Il est facile, à partir de l'équation chimique ci-dessus, qui concerne la formation d'une seule molécule de CO<sub>2</sub>, de calculer l'énergie dégagée par la combustion de 1 kg. de carbone. Cette énergie peut être calculée en unité de masse, qui exprimera la perte de masse du système, elle est égale à  $4,3 \times 10^{-4}$  mgr. Chacun sait que cette perte de masse est imperceptible à l'aide des moyens dont on dispose. C'est ainsi que l'on peut considérer à juste titre que le poids moléculaire d'un corps est toujours égal à la somme des poids des atomes constituants.

Par contre, les réactions entre les noyaux des atomes ou réactions nucléaires sont accompagnées d'une libération ou d'une absorption d'énergie beaucoup plus considérable que ce n'est le cas pour les réactions moléculaires. Les variations de masse sont alors mesurables avec une grande précision. Considérons, par exemple, la réaction nucléaire suivante:



Dans cette équation, le symbole chimique représente ici le noyau de l'atome de l'élément considéré, et le nombre qui suit le symbole représente le *nombre de masse* ou, si l'on veut, le poids atomique arrondi. Le Li6 est une des deux espèces de Li stables. C'est ce qu'on appelle un *isotope*. De même, par exemple, pour l'hydrogène, on connaît en plus des atomes les plus courants, dont le nombre de masse atomique est 1, des atomes plus lourds qui sont plus rares aussi, dont le nombre de masse est 2 : hydrogène lourd ou deutérium.

En comparant les énergies libérées dans les deux réactions ci-dessus, on constate que la réaction nucléaire dégage 5,5 millions de fois plus d'énergie que la réaction moléculaire. L'énergie produite par la réaction nucléaire correspond à une perte de masse ou dématérialisation égale à 0,0236 unité de poids atomique, ainsi qu'on le constate dans le bilan des masses établi ci-dessous:

Poids atomiques exacts :	$\text{Li6} + \text{H2} \rightarrow \text{He4} + \text{He4} + 22 \text{ millions ev}$	(22 Mev)
	$\underbrace{6,0167 + 2,0147}_{8,0314}$	$= \underbrace{4,0039 + 4,0039}_{8,0078} + 0,0236 \text{ unité de poids at.}$

Perte de masse.

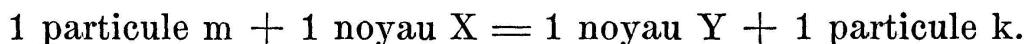
Il est facile de calculer à partir de ces valeurs la perte de masse qui correspondrait à la réaction se produisant avec 1 kg. de l'isotope Li6, on aboutit alors à une perte de masse de 4 g. Cette dématérialisation, toute théorique, donne une énergie qui équivaut à la chaleur dégagée par la combustion de 10.000 tonnes de C. Mais une semblable réaction est irréalisable sur des masses aussi grandes.

En effet, il est nécessaire d'utiliser 300 millions de noyaux de deutons rapides, ayant chacun une énergie cinétique de 0,2 million d'électronvolts, pour atteindre un seul noyau de Li et le faire réagir.

L'énergie dépensée excède tant l'énergie libérée par la réaction que celle-ci en devient négligeable; autrement dit, l'opération est lourdement déficitaire. Ce rendement déplorable s'explique essentiellement par la répulsion qui existe entre des noyaux chargés d'électricité de même signe. C'est ainsi qu'il est toujours impossible de faire réagir entre eux des noyaux en masse pondérable dans les conditions que nous avons pu réaliser jusqu'à maintenant.

Il existe bien d'autres réactions nucléaires qui ne se produisent pas entre noyaux, mais, par exemple, à l'aide de particules neutres que l'on appelle *neutrons*. Pour eux, il n'y a plus de répulsion électrique, et le rendement de ces réactions peut être excellent, c'est-à-dire qu'il n'est pas difficile de faire réagir tous les neutrons dont on dispose, et l'on pourrait provoquer des réactions nucléaires sur des quantités pondérables de matière si les neutrons étaient abondants. Mais les neutrons ne sont produits que par des réactions nucléaires entre noyaux chargés, ou tout au moins dans des opérations nucléaires dont le rendement est toujours extrêmement bas. Ces neutrons constituent ainsi un réactif rare et très coûteux. La difficulté signalée plus haut, loin d'être résolue, ne se trouve ainsi que déplacée. Dans l'impossibilité de faire réagir des masses pondérables de noyaux dans des conditions avantageuses, toute utilisation de l'énergie nucléaire est longtemps restée exclue.

Jusqu'en 1939, les centaines de réactions nucléaires réalisées étaient du type suivant :



Aucune d'elles n'a pu donner l'espoir de réaliser des réactions en chaîne telles que celles qui permettent la combustion d'hydrogène dans l'oxygène ou la combinaison de l'hydrogène et du chlore. Il a fallu à cette époque la découverte d'un type tout nouveau de réaction, que l'on appelle la réaction de rupture (scission, partition, Spaltung en allemand, fission en anglais), pour que l'on puisse entrevoir la possibilité d'une réaction en chaîne susceptible de rendre utilisable l'énergie nucléaire.

La réaction de rupture se produit avec les noyaux les plus lourds que l'on connaisse et qui sont ceux des derniers éléments du système périodique de Mendéléieff, noyaux tels que celui de l'uranium. Cette réaction de rupture, dont la découverte est essentiellement due aux travaux de HAHN et STRASSMANN, ainsi qu'à ceux d'IRÈNE JOLIOT-CURIE et SAVITCH, peut se schématiser de la manière suivante :

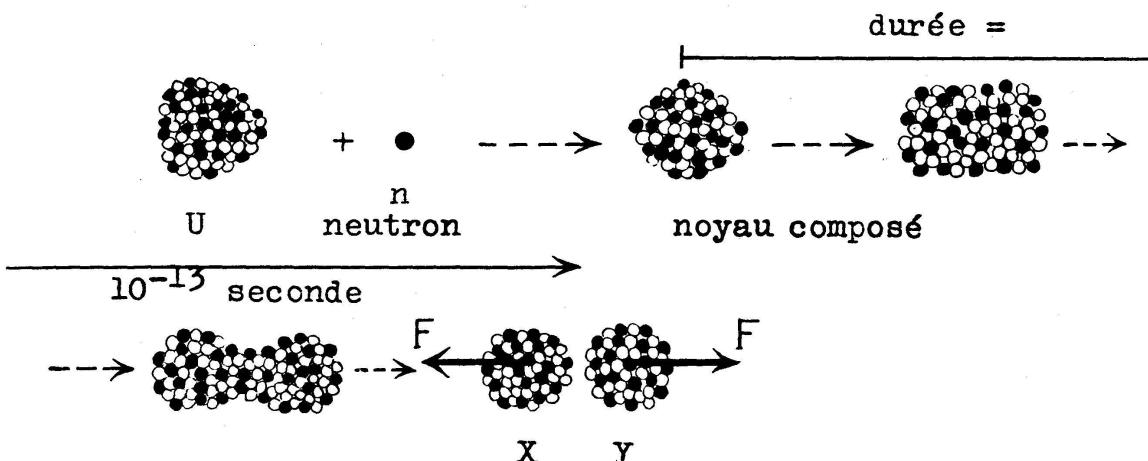


Schéma de la rupture d'un noyau d'uranium par l'action d'un neutron  
Fig. 1

Le noyau est constitué de deux espèces de particules :

- 1<sup>o</sup> de protons ou noyaux d'hydrogène dont la masse dans l'échelle des poids atomiques est égale à 1 et porteurs d'une charge positive;
- 2<sup>o</sup> de neutrons, de masse à peu près égale à celle des protons, mais sans charge électrique, ainsi que nous l'avons dit précédemment.

Les particules sont animées de mouvements incessants à l'intérieur du noyau. Elles sont liées les unes aux autres par des forces de valence qui peuvent être saturées, comme c'est le cas dans les molécules. Ces forces de valence unissent protons et neutrons, mais leur effet d'attraction diminue rapidement par l'éloignement. On dit que leur effet est de courte portée par rapport aux dimensions nucléaires.

A part ces forces attractives entre neutrons et protons, il existe dans le sein du noyau des forces répulsives qui s'exercent suivant la loi de Coulomb entre les protons, forces qui tendent à disloquer le noyau. Ces forces de Coulomb ne varient pas aussi rapidement avec l'éloignement que les forces de valence.

Tandis que les noyaux légers sont sphériques et peu déformables, les noyaux lourds sont facilement déformés par l'agitation interne des particules moins fortement liées entre elles que dans les noyaux légers. Cette déformation peut devenir critique, lorsque par elles les forces attractives ont trop perdu de leur pouvoir, le noyau, comme une goutte liquide, peut se séparer en deux morceaux de grosseur variable mais voisine. Ces fragments nucléaires sont beaucoup plus lourds que les particules émises dans toutes les réactions nucléaires connues avant la découverte de la réaction de rupture.

Cette rupture peut se produire spontanément, mais le phénomène est rare. Il se fait suivant la même loi de hasard qui régit les transformations radio-actives. C'est ainsi que l'on a pu établir récemment que l'uranium se rompait spontanément avec une période qui est de l'ordre de  $10^{15}$  années.

Cette rupture peut aussi être provoquée par l'accroissement de l'agitation au sein du noyau. C'est ce que l'on réalise en fournissant à celui-ci une énergie suffisante à l'aide de la lumière nucléaire ou radiation gamma qu'il peut absorber, ou en le bombardant par des projectiles chargés, tels que hélions ou particules alpha, deutérons ou protons. On peut le rompre également en faisant réagir le noyau lourd avec des neutrons. C'est ce dernier cas qui nous intéresse plus particulièrement.

En réagissant avec un noyau lourd, celui d'uranium par exemple, le neutron lui apporte tout d'abord l'énergie dégagée par sa combinaison au noyau, qui est de l'ordre de 6 millions d'électronvolts, puis l'énergie cinétique correspondant à sa vitesse au moment de son entrée dans le noyau. Cette seconde énergie est négligeable toutes les fois où les neutrons sont suffisamment ralentis ou lorsqu'ils sont thermiques, c'est-à-dire lorsqu'ils ne possèdent que l'énergie correspondant à l'agitation thermique des molécules qui les entourent.

NIELS BOHR et WHEELER ont calculé l'énergie critique de rupture, qui joue le rôle d'une énergie d'activation, et l'on voit dans le tableau suivant qu'elle grandit si le nombre de masse ou poids atomique du noyau lourd diminue. Ces noyaux sont ainsi d'autant plus difficiles à rompre qu'ils sont plus légers.

Noyau initial		Energie d'activation ou énergie critique de rupture
W 183	.	14,6 Mev
Pt 195	.	12,5 Mev
Hg 201	.	11,3 Mev
Pb 207	.	10,4 Mev
Th 232	.	7,6 Mev
U 238	.	6,8 Mev

Le noyau lourd qui capte un neutron forme un noyau que l'on dit composé (Zwischenkern), qui est un produit intermédiaire très instable qui ne dure qu'une fraction de seconde ( $10^{-13}$  seconde). On peut comparer dans le tableau ci-dessous l'énergie nécessaire à rompre les noyaux composés formés à partir des noyaux les plus lourds à l'énergie libérée par la fixation des neutrons ou énergie de liaison.

## Ruptures par neutrons

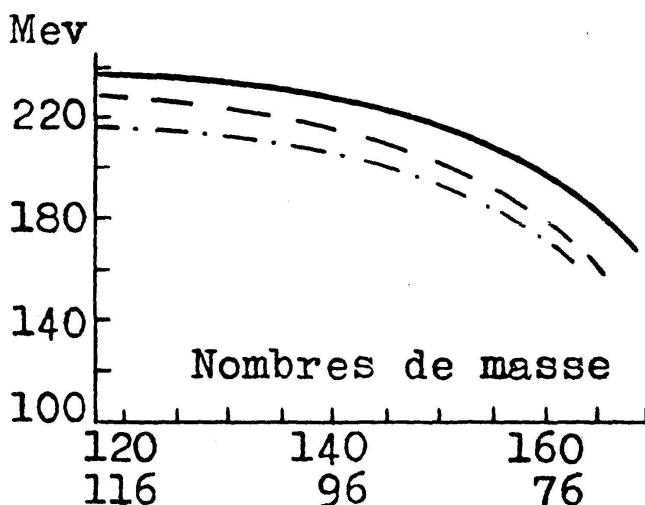
E n e r g i e			
Noyau composé	d'activation E	de liaison du neutron W	E-W
U 235	5,0 Mev	5,4 Mev	-0,4 Mev
U 236	5,3 Mev	6,4 Mev	-1,1 Mev
Pa 232	5,5 Mev	5,4 Mev	+0,1 Mev
U 239	5,9 Mev	5,2 Mev	+0,7 Mev
Th 233	6,9 Mev	5,2 Mev	+1,7 Mev
Io 231	6,5 Mev	5,3 Mev	+1,2 Mev

Si l'énergie de liaison est plus grande que celle nécessaire à déclencher la rupture, la seule fixation d'un neutron thermique, dont l'énergie cinétique est négligeable, suffira à rompre le noyau. C'est effectivement ce qui a lieu pour les noyaux composés U 235, U 236, soit les noyaux composés d'un noyau d'U II 234 et d'un neutron ou d'un noyau AcU 235 et d'un neutron. Par contre, si l'énergie de rupture est plus grande que celle libérée par la liaison du neutron, seuls les neutrons rapides apportant avec eux de l'énergie cinétique pourront produire la rupture. Dans ces cas seulement, il sera nécessaire de bombarder le noyau par un neutron rapide qui sert de projectile. C'est ainsi que l'U I 238 ne se rompt pas sous l'action de neutrons thermiques, mais bien sous l'action de neutrons rapides. Si une énergie d'activation est nécessaire pour provoquer la rupture, celle-ci libère une énergie considérable, beaucoup plus grande que l'énergie d'activation.

Les deux morceaux du noyau lourd constituent eux-mêmes deux nouveaux noyaux chargés de beaucoup d'électricité positive. Une répulsion coulombienne violente leur communique une vitesse voisine de celle de la lumière, vitesse freinée par la matière environnante tout au long d'un parcours qui est d'environ deux centimètres dans l'air aux conditions normales. Par le ralentissement, ces noyaux deviennent des atomes qui appartiennent à des éléments chimiques de poids atomiques moyens, intermédiaires entre le brome et le cérium.

Ce sont les premiers projectiles que l'on connaisse, à la fois si rapides et si lourds. Ils ont donné lieu à des phénomènes inconnus jusqu'alors. Leur trajectoire, rendue visible par condensation de brouillard dans la chambre de WILSON, a naturellement été photographiée et étudiée.

On peut calculer que l'énergie totale libérée par la rupture est la plus grande lorsque les deux fragments sont de masse égale. Cette énergie diminue, ainsi que le montrent les courbes ci-dessous, à mesure que les deux fragments deviennent plus inégaux.

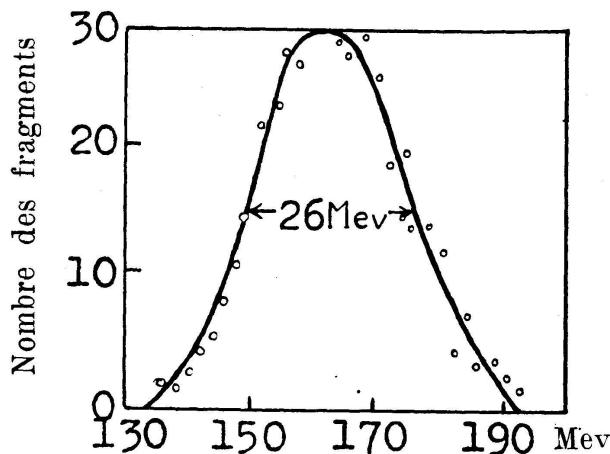


Energie totale libérée par  
rupture du noyau composé U 236  
(calculée d'après différentes  
données)  
W. Jentschke et F. Prankl

Fig. 2

Par ailleurs, l'énergie dégagée par chaque rupture n'est pas constante. Elle varie d'une rupture à l'autre, ce qui permet de tracer une courbe de répartition du nombre des ruptures, en fonction des énergies dégagées par chacune d'elles. La figure ci-après

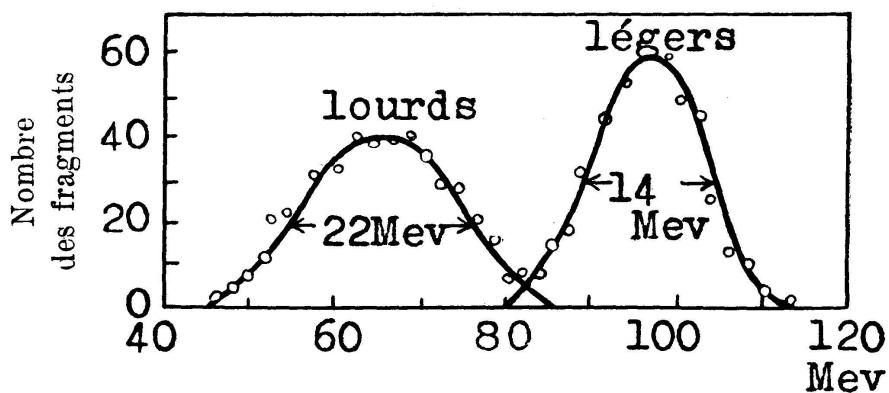
montre que cette courbe présente une forme en cloche qui rappelle les courbes de répartition classiques de MAXWELL-BOLTZMANN.



Somme des énergies cinétiques  
des 2 fragments de U composé  
239 (W. Jentschke)

Fig. 3

Les travaux expérimentaux ont permis de constater que les deux fragments de chaque rupture appartiennent à deux groupes. L'un est constitué par des noyaux dont le nombre de masse est compris entre 83 et 95. Ce sont les fragments qui auront la plus grande énergie cinétique, tandis que l'autre groupe est formé de noyaux plus lourds, de nombre de masse compris entre 99 et 140. Ce sont eux qui, lors de la rupture, prennent le moins d'énergie. On peut tracer des courbes de répartition pour chacun de ces groupes, qui ont toutes deux des formes identiques, mais qui diffèrent par leur hauteur et leur étalement.



Répartition de l'énergie cinétique des fragments  
de l'U composé 239

Fig. 4

C'est ainsi que la rupture des noyaux lourds en général, et de l'uranium en particulier, s'effectue en donnant des fragments inégaux.

La répartition du nombre des ruptures en fonction de leur dissymétrie est illustrée dans la figure suivante, où l'abscisse indique les nombres de masse des deux fragments produits à chaque rupture, leur somme étant constamment égale au nombre de masse du noyau composé, qui est ici de 236. On constate que la rupture se fait le plus souvent en donnant des fragments dont les nombres de masse sont de 90 pour le plus léger et de 146 pour le plus lourd.

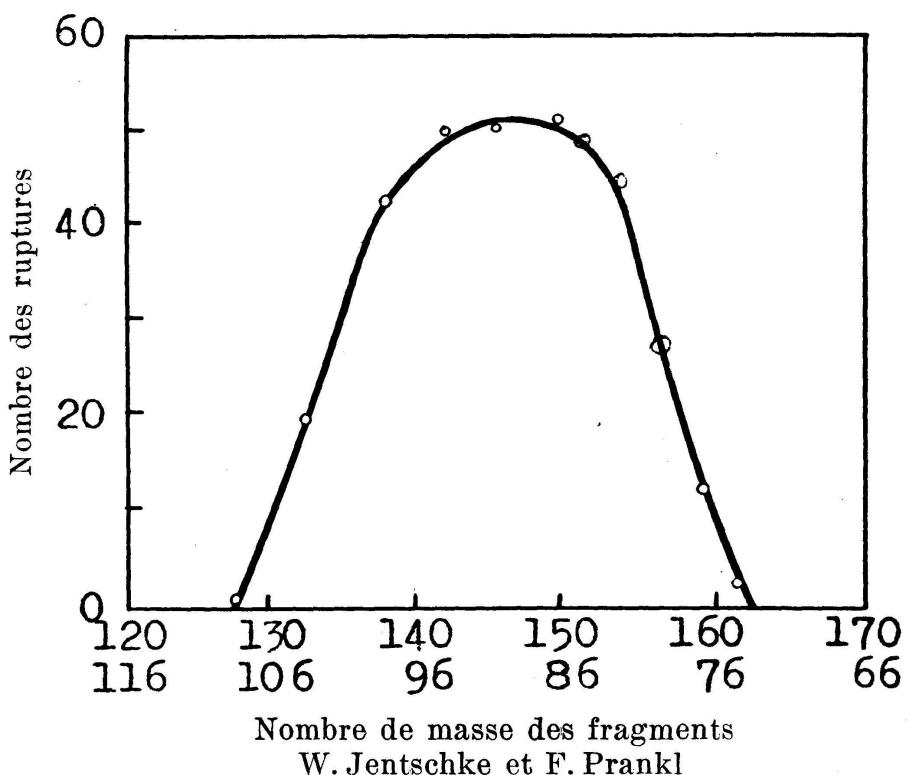


Fig. 5

Les fragments formés par la rupture sont des noyaux profondément instables. En effet, si l'on examine la figure suivante, où l'ensemble des points noirs représente les noyaux stables, on constate que le rapport des neutrons aux protons nucléaires grandit à mesure que l'on considère des noyaux plus lourds. La pente de la courbe tracée par les points noirs s'accentue de plus en plus du côté droit. La rupture donne des noyaux où ce rapport des neutrons aux protons est celui de l'uranium, c'est-à-dire qu'il est

trop élevé pour que ces noyaux puissent être stables, ainsi que le montre sur la figure le trait X—Y, qui indique la composition moyenne des fragments.

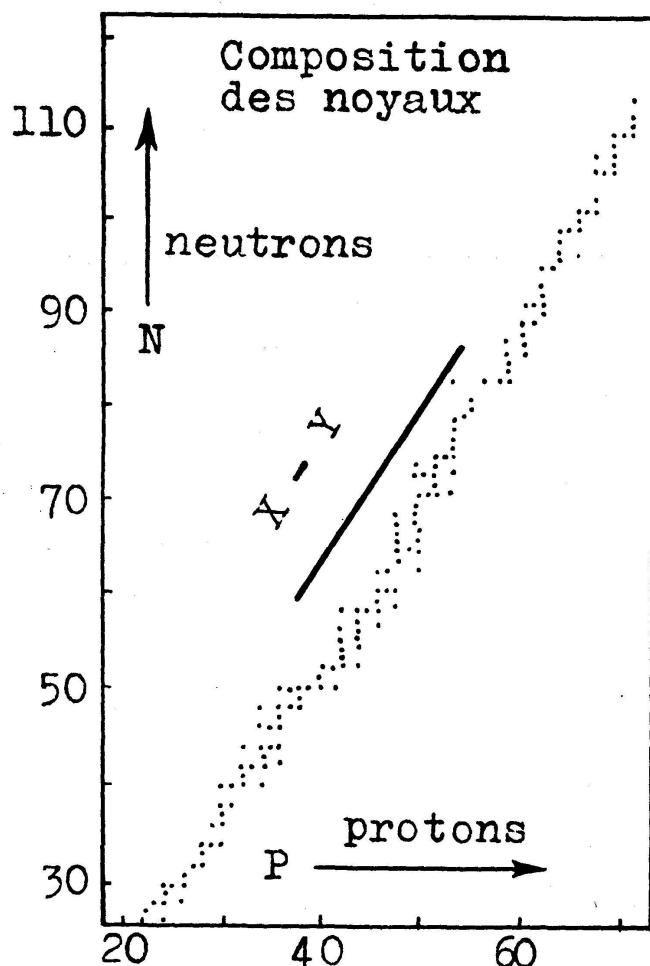


Fig. 6

Noyaux stables	N/P
P	1,56
92 (U)	1,56
46	1,33

Le retour à la stabilité s'effectue de deux manières :

- 1° par l'émission instantanée ou différée de quelques secondes de un ou plusieurs des neutrons en excès;
- 2° par des transformations radio-actives qui correspondent toujours à une émission de rayonnement bêta négatif.

C'est ainsi que pour chaque électron négatif émis, un neutron nucléaire se transforme en un proton, ce qui rétablit totalement ou en partie l'équilibre entre les neutrons et les protons.

Chaque rupture donne donc, d'une part, des neutrons, et d'autre part, des corps radio-actifs dont les périodes peuvent avoir des valeurs très diverses qui s'échelonnent entre les temps les plus courts que l'on puisse observer, et des valeurs qui vont jusqu'à des milliards d'années.

L'énergie libérée instantanément par la rupture est égale à la somme de l'énergie cinétique des fragments (en moyenne, égale à 160 Mev) et de l'énergie des neutrons émis, à laquelle il convient encore d'ajouter l'énergie des transformations radio-actives de très courtes périodes. La totalité de cette énergie a été mesurée par calorimétrie et s'élève à 175 Mev par rupture. Le reste de l'énergie disponible à la suite de cette réaction est libérée lentement au cours des transformations radio-actives de période plus ou moins longue.

La rupture que j'ai décrite ici dans le cas de l'uranium s'effectue de la même manière, quel que soit l'isotope, et l'on peut dire de plus que ces mêmes conclusions restent qualitativement valables pour d'autres noyaux lourds, tels que celui du thorium, qui ont été étudiés à ce point de vue. Si les noyaux les plus lourds sont les plus faciles à rompre, ce ne sont toutefois pas les seuls qui puissent fournir de l'énergie par rupture. Un calcul effectué par BOHR et WHEELER montre que la rupture reste une opération exothermique pour un très grand nombre d'espèces nucléaires, ainsi qu'on peut le constater dans le tableau suivant:

Noyaux initiaux	Noyaux produits	Energie libérée par division	Energie libérée plus tard
Ni 61	Si 30 et 31	— 11 Mev	2 Mev
Sn 117	Mn 58 et 59	+ 10 Mev	12 Mev
Er 167	Se 83 et 84	+ 94 Mev	13 Mev
Pb 206	Nb 103 et 103	+ 120 Mev	32 Mev
U 239	Pd 119 et 120	+ 200 Mev	31 Mev

La rupture du noyau d'uranium libère donc chaque fois un ou plusieurs neutrons, et s'ils rencontrent sur leur chemin de nouveaux noyaux d'uranium, ils pourront provoquer à leur tour de nouvelles ruptures, lorsque les conditions nécessaires se trouvent réalisées. La présence de l'uranium n'est en effet pas toujours suffisante, car le noyau composé par l'uranium et le neutron ne donne pas lieu inévitablement à la rupture. Le neutron, provisoirement absorbé, peut être réémis, auquel cas il reste disponible. Le noyau composé peut également garder définitivement le neutron après avoir émis un rayonnement gamma. On dit alors qu'il y a capture simple du neutron, qui est ainsi perdu pour toute autre rupture.

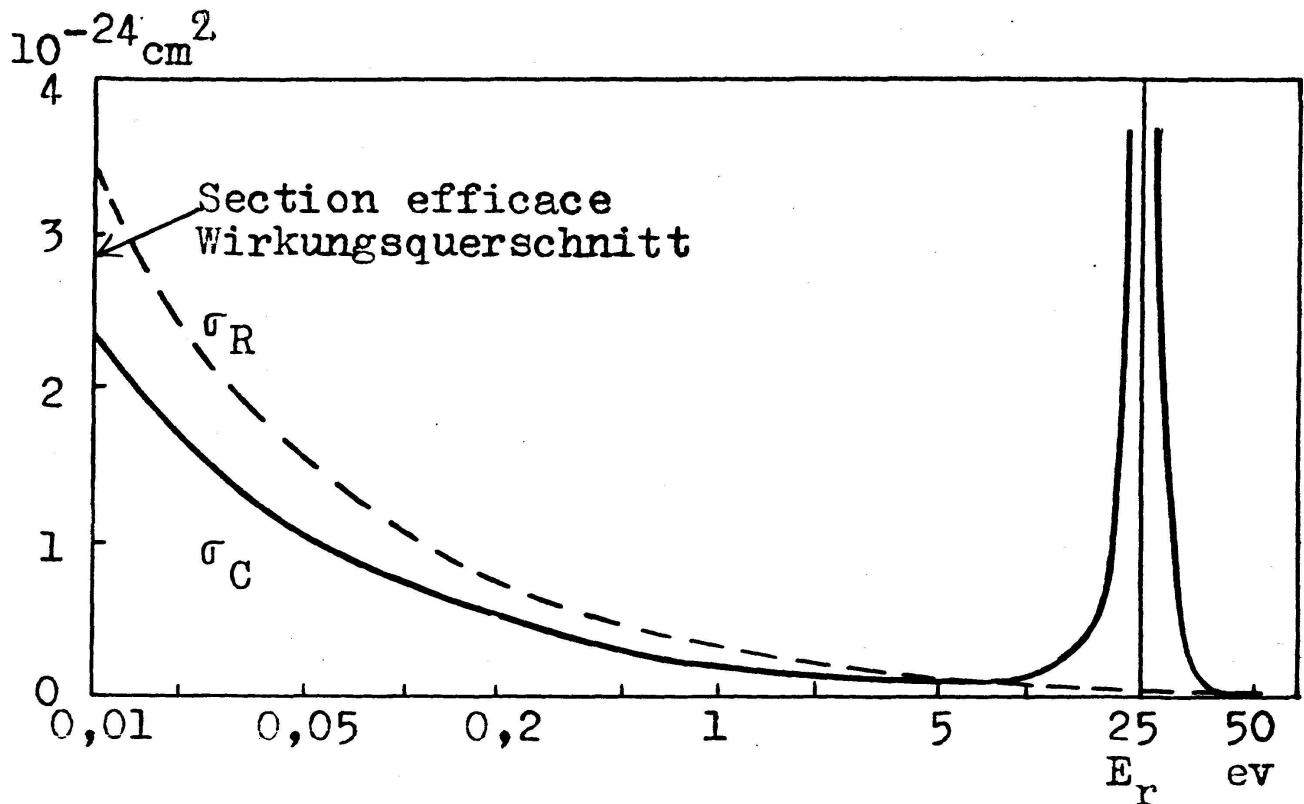
Ce nouveau noyau d'uranium formé a un nombre de masse

de 239. Il est radio-actif en émettant une radiation bêta avec une période de 23 minutes. Il se transforme par cette désintégration radio-active en un élément nouveau, qui est au delà de l'uranium dans la classification périodique, et que l'on appelle l'élément 93 (neptunium), à cause du nombre des protons qu'il contient. Cet élément 93 est encore radio-actif et se transforme par émission d'électrons négatifs en l'élément 94 (plutonium). Cette capture est le seul phénomène qu'il faille envisager entre l'isotope 238 et les neutrons lents, dont l'énergie cinétique est de 25 electronvolts. C'est l'effet d'une résonance réalisée par ces conditions qui exclut tout autre phénomène de réémission, la rupture étant elle-même exclue, ainsi qu'on l'a vu, puisque l'énergie du neutron n'est pas suffisante. La rupture du noyau 238 ne peut intervenir qu'avec des neutrons rapides, dont l'énergie cinétique s'ajoute à celle libérée par sa fixation.

La rupture du noyau 235 peut, du point de vue énergétique, être réalisée aussi bien pour les neutrons lents que pour les neutrons rapides, mais d'autres considérations intervenant, il résulte que seuls les neutrons lents ont beaucoup de chance de provoquer la rupture de l'isotope 235.

On traduit la probabilité globale d'une réaction nucléaire, que ce soit réémission, capture ou rupture, par une grandeur calculée en tenant compte de tous les facteurs, grandeur que l'on dénomme la *section efficace*. Sa valeur est d'autant plus élevée que le phénomène auquel elle se rapporte a davantage de chance de se produire. On dira que les probabilités de rupture sont définies pour une espèce nucléaire et pour un neutron d'une vitesse déterminée par la grandeur de la section efficace, qui s'exprime comme une surface plus ou moins grande. La section efficace de capture ( $\sigma_C$ ) est différente pour le même noyau et pour un neutron de même vitesse, de la section efficace de rupture ( $\sigma_R$ ), différente encore de la section efficace de réémission. Chacune de ces sections efficaces varie d'une part avec la vitesse des neutrons et, d'autre part, avec l'espèce de noyau envisagée. Le graphique suivant indique les variations des sections efficaces de capture et de rupture relatives à l'uranium naturel, constitué par un mélange d'isotope contenant 99,3 % de 238 et 0,7 % de 235. Nous pouvons négliger ici l'uranium 234 dont l'abondance n'est que de 0,006 %.

On retrouve dans ce graphique une section efficace de capture considérable pour les neutrons de 25 électronvolts, propriété qu'il faut attribuer à l'uranium 238 ainsi qu'on l'a vu. Dans l'uranium naturel, constitué des trois isotopes 238, 235 et 234, la section efficace de rupture est petite, à l'exception de celle relative aux électrons lents qui grandit si la vitesse des neutrons diminue, phénomène qui est attribué à l'isotope 235.



Sections efficaces de rupture et de capture simple des neutrons par l'U naturel (Flügge)

$E_r$  = énergie des neutrons  
 $\sigma_R$  = section efficace de rupture  
 $\sigma_C$  = section efficace de capture

Fig. 7

Lorsque la section efficace est grande, les neutrons ne parcourront que de petites distances (quelques millimètres ou centimètres) dans la matière avant de réagir, tandis que lorsque les sections efficaces sont petites, le libre parcours des neutrons avant de réagir est beaucoup plus long. La réaction par chaîne se produira d'autant plus rapidement que la section efficace est grande, c'est-à-dire que le libre parcours sera petit. De petites masses pourront déjà permettre à la réaction de s'amplifier. Dans le mélange naturel des isotopes, les neutrons rapides peuvent agir sur

l'uranium 238, la section efficace étant petite dans ce cas, la réaction en chaîne ne pourra libérer des énergies importantes que dans des masses relativement grandes.

C'est sur cette base que M. NOETZLIN a formulé l'hypothèse que de grandes masses de noyaux lourds accumulées en certains points de la croûte terrestre pouvaient donner lieu à des réactions nucléaires en chaînes amorcées spontanément, qui seraient à l'origine des volcans.

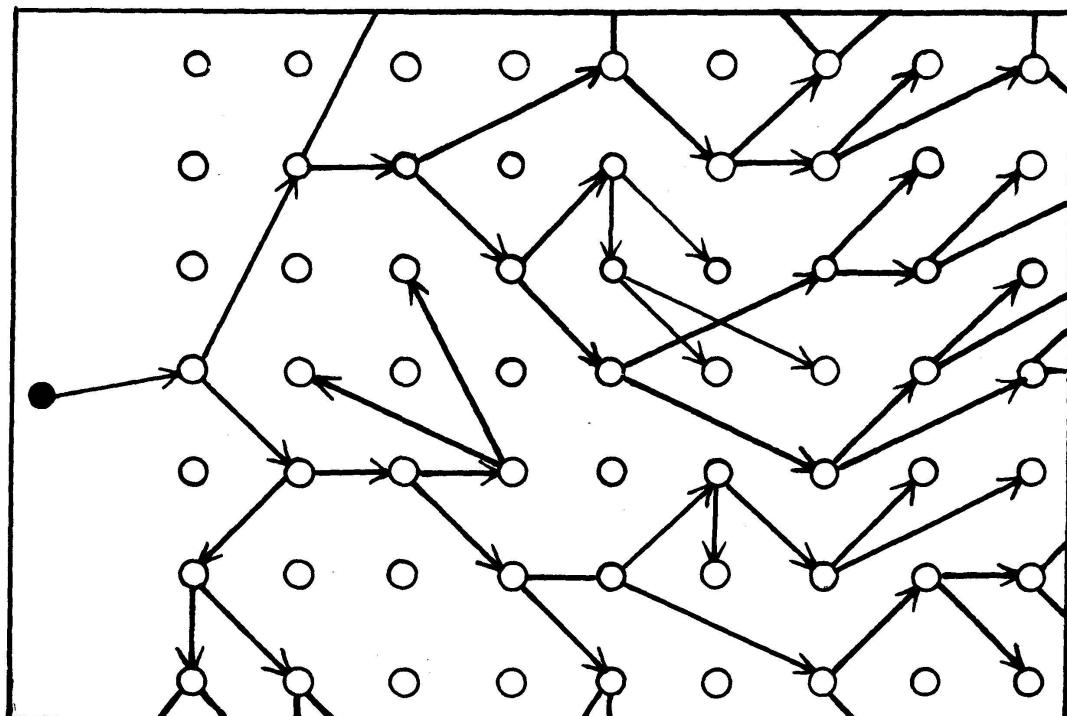


Schéma d'une *réaction en chaînes*  
Chaque noyau qui réagit en fait réagir deux autres  
● neutron initial      ○ noyau d'uranium

Fig. 8

Pour les besoins pratiques, il est difficile d'envisager toujours l'emploi de quantités aussi grandes d'uranium. Par contre, on réalise facilement que la réaction nucléaire pourra se développer rapidement dans une masse d'uranium qui ne serait constituée que de l'isotope 235. Pour cela, il est nécessaire de ralentir aussi efficacement que possible les neutrons émis par la rupture pour qu'ils puissent avoir de grandes chances de réagir avec des noyaux d'uranium proches. C'est la raison pour laquelle on incorpore à l'uranium 235 des éléments tels que l'hydrogène lourd, le carbone, dont les noyaux légers n'absorbent pas les neutrons, mais les ralen-

tissent rapidement. Des masses relativement petites d'uranium (ou d'un composé de cet élément) sont susceptibles de se désintégrer ainsi entièrement sous l'effet de neutrons initiaux qui amorcent la réaction, comme une étincelle suffit à faire exploser un mélange d'hydrogène et d'oxygène. Ces neutrons initiaux peuvent provenir du rayonnement cosmique ou sont faciles à produire par un peu de corps radio-actif naturel, radium, polonium, radon, intimement mêlés à du glucinium ou beryllium ou à d'autres substances.

La réaction par chaîne peut être schématisée de la manière suivante, si l'on admet que chaque noyau qui réagit en fait réagir deux (voir fig. 8, p. 41).

Les maillons de la chaîne seront naturellement d'autant plus grands que la section efficace sera plus petite, et la masse devra être assez considérable pour que la réaction puisse se développer et produire la désintégration totale. Si la masse est insuffisante, trop de neutrons s'échappent avant d'avoir réagi; la réaction ne peut pas s'amplifier suffisamment pour provoquer la désintégration totale.

Il est facile de calculer que si la rupture d'un noyau d'uranium libère en moyenne 175 millions d'électronvolts, chaque kilo d'uranium détruit par cette désintégration en chaîne provoquée, libérera 20 millions de kW/h., ce qui équivaut à la chaleur dégagée par la combustion de 2000 tonnes de charbon. Cette réaction produit la première transmutation totale que l'on ait réalisée, transmutation qui est accompagnée d'une perte de masse de 8 décigrammes. Il suffirait de 500 kg. d'uranium pour donner autant d'énergie qu'en fournit l'ensemble de nos centrales hydroélectriques pendant un an, énergie qui équivaut à une perte de masse de quelque 400 g.

Si la masse peut être équivalente à de l'énergie et inversement, il n'est guère utile d'attirer ici l'attention sur le fait que la dématérialisation<sup>1</sup> reste une opération exceptionnelle. Elle ne peut se produire en dehors de conditions toujours difficiles à réaliser. Il est évident que la désintégration par chaîne amorcée dans l'uranium ne peut se prolonger en dehors de l'existence de noyaux lourds et l'on ne saurait craindre une contagion qui gagnerait sans distinction tout ce qui nous entoure.

---

<sup>1</sup> Transformation de la totalité de la masse d'une particule (l'électron) en énergie.

Si l'uranium peut exploser par suite du développement instantané de l'effet de chaîne, il est facile de contrôler la réaction par l'usage d'un corps absorbant les neutrons ou neutrophage (bore, cadmium), celui-ci pouvant lui-même dégager de l'énergie par suite de cette absorption. La réaction à laquelle ils donnent lieu peut être désignée du nom de réaction d'arrêt de la chaîne. On peut, par ailleurs, accroître encore la puissance explosive par l'adjonction à l'uranium de corps dont les noyaux atomiques engendrent facilement des neutrons en ralentissant les neutrons rapides émis par la rupture.

La désintégration contrôlée peut se faire sans une émission intense de neutrons et les produits radio-actifs qui prennent naissance ne constituent pas un danger. Par contre, l'explosion de l'uranium laisse après elle une très grande radio-activité. Cette radio-activité des produits de transmutation est probablement moins à craindre que celle qui est engendrée par les neutrons que dégage l'explosif, si l'on a présent à l'esprit que chaque neutron disparaît généralement en créant un noyau radio-actif.

Les réactions de rupture ont donné naissance à des réactions par chaîne qui permettent :

- 1<sup>o</sup> de libérer une énergie considérable du noyau de l'atome;
- 2<sup>o</sup> de créer des quantités importantes de corps radio-actifs;
- 3<sup>o</sup> d'opérer la transmutation massive d'éléments lourds en d'autres de poids atomiques moyens;
- 4<sup>o</sup> de réaliser des sources de neutrons de grande intensité.

De tous ces résultats, la libération de l'énergie nucléaire est sans doute le plus important.

Les éléments lourds dont la radio-activité naturelle a fourni les moyens extraordinaires, nécessaires à l'étude des phénomènes nucléaires, apparaissent maintenant comme une source d'énergie inestimable, héritage plus dangereux que tout autre, dont l'origine n'est pas géologique, mais cosmique. Peut-être sera-t-il un jour possible d'utiliser d'autres réactions nucléaires qui rappelleront celles qui doivent se produire dans les étoiles. Il suffit en tous cas de se souvenir qu'il est des lois inéluctables interdisant à jamais une partie de nos espoirs et de nos craintes, malgré la richesse certaine des possibilités inconnues.