Article paru dans le Bulletin du G.E.S.T., N° 130, de mars 2005

NUCLÉAIRE XII

FISSION ET REACTION EN CHAINE

Robert SIX

I. INTRODUCTION

Dans la partie précédente, j'ai évoqué le cheminement intellectuel qui avait amené Otto HAHN et Fritz STRASSMANN à soupçonner la fission du noyau d'uranium sous l'effet d'un bombardement neutronique. Je voudrais reprendre plus en détail l'histoire de cette découverte d'une importance capitale, car elle déboucha sur la production de l'énergie nucléaire, et des conséquences qu'elle implique.

II. OTTO HAHN, INVENTEUR DE LA FISSION NUCLEAIRE

Otto HAHN est le chimiste à qui on attribue la découverte de la fission nucléaire pour laquelle il reçut le prix Nobel de chimie en 1944. Nous avons vu, dans le chapitre précédent, que celle-ci est le fruit d'une intuition géniale et qu'elle était déjà, depuis quelque temps, dans l'air.

Otto HAHN vit le jour le 8 mars 1879 à Francfort. Il étudie à l'Université de Marburg puis à celle de Munich, où il obtient son doctorat de chimie en 1879. Après une thèse de chimie organique, HAHN entreprend une série de recherches, d'abord avec RAMSAY à Londres, où il découvre le radiothorium, puis avec RUTHERFORD à Montréal, où il isole le thorium et le radioactinium en 1905. L'année suivante, il obtient un poste à l'Institut de l'Université de Berlin, où il est nommé professeur en 1910. En 1912, il prend la direction de la section radioactivité. Enrôlé dans l'armée durant la Première Guerre mondiale (1914-1918), notre scientifique interrompt ses recherches. Il les reprendra après le conflit avec Lise MEITNER comme collaboratrice. Ils identifient le protactinium. Lors de la fuite de Lise vers la Suède, elle sera remplacée par Fritz STRASSMANN qui incite Otto HAHN à reprendre les expériences d'Irène JOLIOT-CURIE et de Paul SAVITCH. Le 25 octobre 1938, O. HAHN écrit à Lise MEITNER :

> « *Nous sommes en train de les reproduire* [les résultats des Français] *et nous croyons maintenant à leur réalité* ».

Les deux Allemands espèrent mettre en évidence plusieurs isomères du radium qui par radioactivité β, donnent des isotopes de l'actinium. Leurs résultats sont publiés au début de novembre. Le 13 novembre, HAHN rencontre secrètement son ancienne collaboratrice à Copenhague. Celle-ci n'est pas satisfaite des conclusions : trop d'isomères et réaction de production du radium peu crédible !

L'équipe allemande reprend ses séparations chimiques avec plus de rigueur. Malgré leur obstination à vouloir trouver dans les précipitations fractionnées du radium, c'est la radioactivité du baryum qui demeure. Le 19 décembre au soir, HAHN écrit à nouveau à MEITNER :

> « *Toujours davantage nous arrivons à la terrible conclusion : nos isotopes du radium se comportent non pas comme du radium, mais comme du baryum* […] *Peut-être peux-tu proposer quelque explication fantastique. Nous savons bien nous-même qu'en principe il ne peut pas éclater en baryum* […] ».

Le 22 décembre, ils envoient une publication à la revue *Naturwissenschaften*, dans laquelle ils disent qu'en tant que chimistes ils étaient conduits à conclure qu'ils avaient affaire à des radiobaryum et des radiolanthane, éléments beaucoup plus légers que l'uranium :

> « *Il ne s'agit pas de radium, mais de baryum* […]. *Si nos isotopes du radium ne sont pas du radium, alors les isotopes de l'actinium ne sont pas non plus de l'actinium, mais devraient être du lanthane* […] ».

La masse du baryum est pratiquement la moitié de celle de l'uranium. **Seule la fission de ce dernier pouvait expliquer le phénomène**. HAHN et STRASSMANN publient leurs résultats qui paraîtront le 6 janvier 1939, mais hésitent encore à faire le pas décisif :

> « *Comme chimistes nucléaires relativement proches des physiciens, nous ne pouvons encore franchir ce grand pas qui va à l'encontre* de *toute l'expérience passée de la physique nucléaire* ».

Ils envoient immédiatement une copie de leur article à Lise MEITNER qui la recevra le 19 décembre. Le 10 janvier, HAHN et STRASSMANN observent que le thorium subit également la fission ; les résultats sont envoyés à *Naturwissenschaften* le 28 janvier.

III. INTERPRETATION CORRECTE DU PHENOMENE

Lise MEITNER rencontre son neveu Otto Robert FRISCH en décembre 1938 à Kungälv en Suède. Lors de leurs discussions, en réfléchissant à la lettre d'Otto HAHN, et reprenant le modèle de la goutte de liquide (fig. 108), ils imaginent que le noyau d'uranium se comporte comme tel. Lorsqu'on lui donne un surcroît d'énergie, par capture d'un neutron lent par exemple, le noyau entre en vibration et se déforme. Les forces coulombiennes répulsives entre les 92 protons l'emportent au détriment des forces nucléaires attractives.

La déformation s'accentue et le noyau présente une striction en son milieu avant de se scinder en deux fragments plus petits (fig. 108). Se rappelant le calcul de la

masse des noyaux, ils se rendent compte de l'énergie dissipée lors de cette fission (de l'ordre de 200 MeV). Les deux savants font parvenir leur explication à la revue *Nature* qui sera publiée le 11 février.

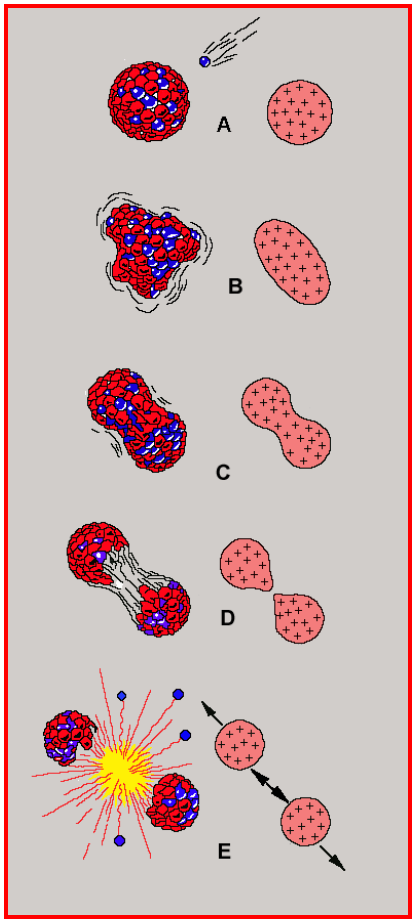

Fig. 108 - Une goutte d'eau sphérique électriquement chargée conserve sa forme par suite d'une interaction complexe de la tension superficielle de l'eau, des forces de cohésion moléculaire de ses particules et des charges électriques qui y sont réparties. Une perturbation de ces conditions entraîne la scission de la goutte. Le comportement du noyau d'uranium est en quelque sorte semblable à celui de la goutte. A la suite de l'impact d'un neutron (A) le noyau devient instable (B), il s'étire (C) et se scinde en deux parties (D) qui s'écartent l'une de l'autre avec une immense énergie (E) (d'après GLADKOV K.).

Otto Robert FRISCH (* 1.10.1904, Vienne - † 22.09.1979). Obtient son doctorat en Sciences physiques à l'Université de Vienne, en 1926. Se consacre à la recherche scientifique à Berlin et à Hambourg, où de 1930 à 1933, il collabore aux travaux d'Otto STERN. De 1933 à 1934, il travaille à Londres chez P. BLACKETT. Ensuite, il va à l'Institut Niels Bohr de Copenhague où il élabore avec Lise MEITNER, sa tante, la théorie de la fission nucléaire. En 1939, il émigre en Angleterre. On le retrouve en 1943 dans le groupe des savants anglais au Los Alamos Laboratory, où il participe à la mise au point de la bombe atomique.

IV. CONFRONTATION DE DEUX TRADITIONS SCIENTIFIQUES

Si l'on veut comprendre comment il a été possible à Lise MEITNER et à son neveu Otto Robert FRISCH d'interpréter correctement la découverte par Otto HAHN et Fritz STRASSMAN de la fission nucléaire en décembre 1938, il faut se reporter au modèle de la goutte liquide du noyau. Cela s'est fait en deux étapes : la première, entre 1928 et 1935, aboutissant au résultat des travaux de George GAMOV, Werner HEISENBERG et C.F. von WEIZSÄCHER ; la deuxième de 1936 à 1938, donnant lieu aux résultats du travail de Niels BOHR et de ses collaborateurs. L'école de Berlin s'était centrée sur l'application du modèle de la goutte à des calculs du défaut de masse, c'est-à-dire, les aspects statistiques du modèle. L'école de Copenhague, quant à elle, s'était polarisée sur son application aux excitations nucléaires, soit aux aspects

dynamiques du modèle. Lise MEITNER, obligée de fuir Berlin en juillet 1938, partageait la tradition de l'école allemande, tandis que son neveu FRISCH se raccrochait à celle de Copenhague. Lors de leur rencontre, ils allieront les deux traditions et élaboreront une nouvelle application du modèle de la goutte liquide qui permettra une interprétation correcte de la fission nucléaire.

Les enseignements que l'on peut tirer de cette histoire sont à divers niveaux :

- D'abord, on peut se pencher sur la **nature de la créativité scientifique** et renvoyer le lecteur à l'analyse de l'acte créateur d'Arthur KOESTLER (1905-1983), dans laquelle il indique qu'il s'appuie sur la fusion de ce qu'il nomme les différentes « matrices » de pensée (KOESTLER Arthur (1965) – *Le cri d'Archimède*. Calmann-Levy). Je pense que quelque chose d'analogue s'est produite dans ce cas. MEITNER et FRISCH, lors de leur rencontre, s'appuyaient sur des concepts très différents d'un modèle nucléaire particulier, et ils comprirent qu'ils pouvaient les combiner d'une manière totalement nouvelle.

- Deuxièmement, nous pouvons apprendre quelque chose sur la **vie extraordinaire** de ces différents scientifiques.

- Enfin, les **événements ou la situation politique** peuvent influencer fortement le développement de la science. L'exil forcé de FRISCH, juste après la promulgation de la loi sur le service civil nazi en avril 1933, et celui de MEITNER après l'*Anschluss* de l'Autriche en 1938, ont permis cette rencontre historique.

V. DEMONSTRATION DE LA REALITE DE LA FISSION

Nous avons vu précédemment qu'à l'annonce des résultats de HAHN et STRASSMANN, Frédéric JOLIOT, abandonnant ses divers travaux, voulait démontrer la réalité de la fission, sans connaître les conclusions de Lize MEITNER et de son neveu. Entre le 26 et le 28 janvier 1939, il entreprend une de ses plus belles expériences. Il comprend que la **fission du noyau d'uranium doit libérer énormément d'énergie** se retrouvant pour l'essentiel sous forme d'énergie cinétique des deux fragments plus légers. Dans un cylindre de laiton de 2 cm de diamètre sur 5 cm de longueur, et dont la paroi extérieure est recouverte d'une couche d'oxyde d'urane, il place une forte source de neutrons (radon-béryllium). L'ensemble est entouré d'un cylindre de bakélite distant de 3 mm de la couche d'oxyde d'urane. Il observe que la paroi interne du tube de bakélite reçoit un mélange d'atomes radioactifs correspondant aux fragments de fission. Remplaçant la source et le cylindre de laiton par un compteur Geiger-Muller, il peut en suivre l'évolution au cours du temps. C'est bien la preuve de la réalité de la fission (fig. 109). Ses résultats sont publiés le 30 janvier 1939 dans une note aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*.

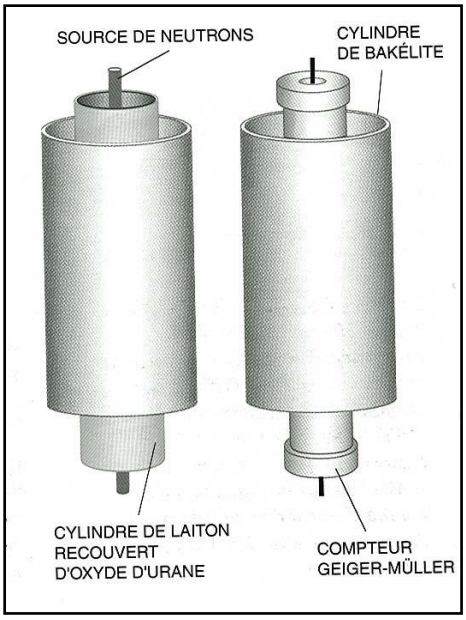

Fig. 109 - Fin janvier 1939, Frédéric JOLIOT obtient une preuve physique de la fission : dans un cylindre de bakélite, il bombarde de neutrons un cylindre en laiton recouvert d'une couche d'oxyde d'uranium. Les fragments issus de la fission de l'uranium se déposent sur l'intérieur du cylindre de bakélite et se désintègrent. Frédéric suit les périodes radioactives de ces radioéléments en remplaçant le cylindre de laiton et la source de neutrons par un compteur Geiger-Muller. Il obtient ainsi la preuve que ces radioéléments sont des fragments de fission.

VI. REACTION EN CHAINE

Le noyau d'uranium ayant proportionnellement plus de neutrons que les éléments plus légers, il vient rapidement à l'esprit de Frédéric JOLIOT qu'une réaction en chaîne est possible. En effet chaque fission doit libérer, en plus des deux nouveaux noyaux, des neutrons excédentaires, susceptibles de provoquer de nouvelles fissions. Il constitue une équipe avec le jeune Autrichien Hans von HALBAN (1908-1964) et le Russe émigré Lew KOWARSKI (1907-1979) afin d'examiner expérimentalement la possibilité d'une réaction en chaîne. Dès le 7 mars 1939, l'équipe du Collège de France met en évidence l'émission de ces neutrons supplémentaires. S'adjoignant les services du chimiste Maurice DOLE, nos chercheurs déterminent leur énergie qui s'avère élevée pour la plupart. Le nombre de particules émises est fonction du type de réaction (voir plus loin). Ils évaluent le nombre de neutrons secondaires émis par chaque fission d'un noyau d'atome d'uranium aux alentours de 3,2 ± 0,7 par fission. Ce nombre est en fait trop élevé, par suite d'une erreur d'interprétation des mesures. En réalité, il se situe en moyenne à 2,5 neutrons secondaires par fission. Une note adressée à la revue londonienne « *Nature* » paraît le 22 avril 1939.

Dès l'annonce, aux Etats-Unis, par Niels BOHR de la découverte de la fission, de nombreux chercheurs se lancent dans une véritable course aux résultats. Ainsi, FERMI qui a fuit l'Italie fasciste pour l'Amérique, travaille à l'université de Columbia à New York avec une équipe américaine. Il démontre l'efficacité supérieure des neutrons thermiques par rapport aux neutrons rapides pour obtenir la fission.

L'équipe française imagine d'utiliser un modérateur hydrogéné pour ralentir les neutrons rapides. Parallèlement, les Américains (H. ANDERSON, E. FERMI et H. HANSTEIN d'une part, et L. SZILARD et W. ZINN d'autre part) arrivent aux mêmes conclusions. N'oublions pas le contexte politique dans lequel se trouve le monde à l'époque. L'idée de la possibilité de construire une arme de grande puissance fait son chemin parmi les différents groupes de savants. Le physicien hongrois, Leo SZILARD, qui a fui l'Allemagne nazie pour rejoindre New York après un séjour en Autriche puis en Grande-Bretagne, écrit le 2 février 1939 à JOLIOT pour que celui-ci ne publie plus les résultats de ses recherches sur la fission. Dans sa lettre, il précise :

« *Si plus d'un neutron est libéré, une sorte de réaction en chaîne sera évidemment possible. Ceci, dans certaines circonstances, pourrait permettre la réalisation de bombes sûrement extrêmement dangereuses, mais plus particulièrement entre les mains de certains gouvernements* ».

L'intervention de SZILARD ne fut pas comprise au Collège de France. Il n'était pas dans les habitudes des scientifiques de garder secret leurs travaux et découvertes. La publication de ceux-ci provoquait une certaine émulation dans le landerneau des chercheurs et faisait avancer les connaissances dans ce nouveau domaine qu'était la physique nucléaire. Le 12 avril 1940, SZILARD perçoit davantage le danger de communiquer les découvertes récentes en matière atomique. Il met à nouveau JOLIOT en garde :

« *J'aimerais soulever une fois de plus la question de savoir si les résultats concernant les réactions en chaîne doivent être publiés. On dit que de telles publications sont étudiées en Allemagne et que le travail sur l'uranium est conduit là-bas dans le secret* ».

« *Votre proposition est très raisonnable, mais vient trop tard* »

répond le Français.

De plus, certains physiciens américains ne respectent pas cette recommandation. Cela débouchera sur l'intervention d'Albert EINSTEIN qui écrivit au président ROOSEVELT.

Finalement, JOLIOT et son équipe ne tiennent pas compte des mises en garde de leurs collègues américains. Non seulement, ils publient leurs résultats dans des revues anglo-saxonnes, mais, fait peu habituel en France, les physiciens français, auxquels s'est joint le théoricien Francis PERIN (1901-1992), déposent, les 1er, 2 et 4 mai 1939, trois brevets d'invention au nom de la Caisse nationale de la Recherche scientifique : « *Dispositif de production d'énergie* », « *Procédé de stabilisation d'un dispositif producteur d'énergie* » et « *Perfectionnement aux charges explosives* ». En effet, jusque-là, l'usage était de ne pas considérer la science comme une source de profit.

VII. LA FISSION DES NOYAUX LOURDS

A. Définition

La fission est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd se scinde généralement en deux noyaux moyens, sous l'impact d'un neutron. La réaction se fait avec perte de masse et dégagement d'énergie (fig. 110).

B. La réaction de fission

La probabilité qu'un noyau se scinde par fission dépend essentiellement de deux paramètres :

1. Sa section efficace

J'ai décrit celle-ci dans le chapitre « *La loi de capture neutronique* » de l'article « Découverte de la fission nucléaire ». Je n'y reviens donc pas.

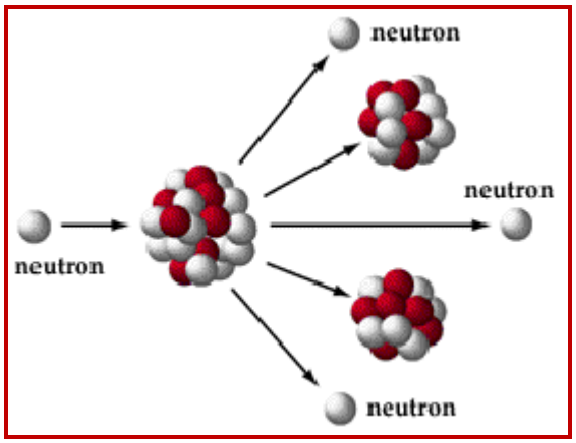

Fig. 110 – Réaction de fission d'un noyau lourd. Un neutron entre en collision avec un noyau lourd. Ce noyau capture le neutron. Il est alors sous un état excité, ce qui le conduit à se scinder en deux noyaux plus légers avec émission d'un ou de plusieurs neutrons, de chaleur et de rayonnements.

2. Son énergie potentielle

Reprenons le diagramme donnant l'énergie de liaison moyenne par nucléon des noyaux (voir l'article « *Au cœur du noyau atomique* »). Son observation permet d'envisager deux types de réactions nucléaires permettant de récupérer de l'énergie. (Fig. 111).

L'une d'elle concerne les noyaux lourds, de numéro atomique supérieur à celui du fer ($Z = 26$, $A = 56$). C'est la réaction de fission, qui nous occupe ici et qui est représentée comme suit (fig. 111).

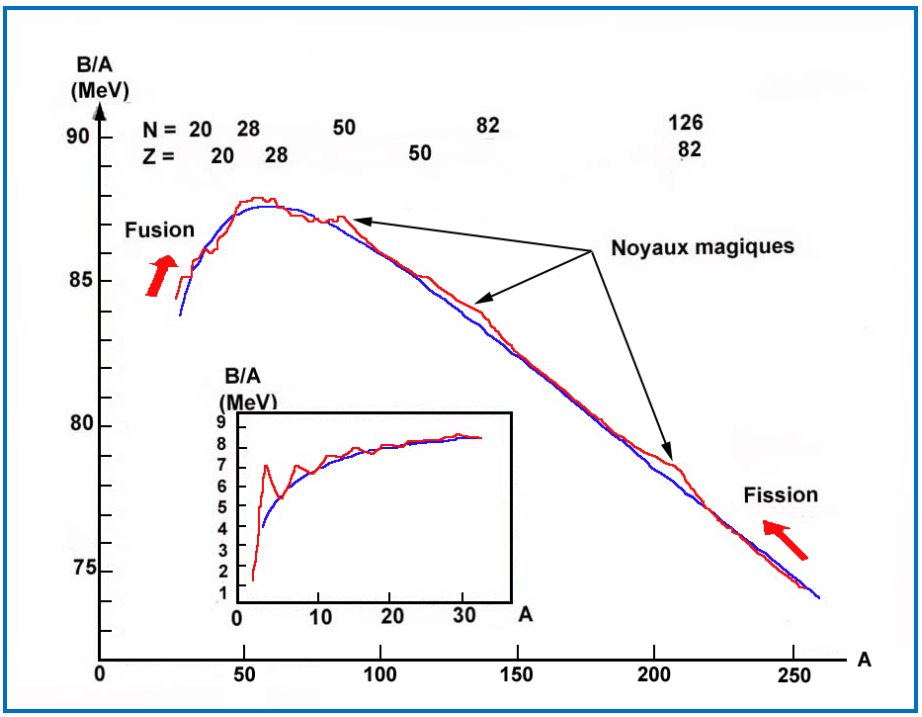

Fig. 111 – Energie de liaison moyenne par nucléon des noyaux

Utilisant l'analogie de la goutte liquide, les interactions mises en jeu entre les différents nucléons sont :

- les interactions attractives liées à la force nucléaire forte ;
- les interactions répulsives dues à la charge des protons ;
- les tensions superficielles qui assurent la cohésion du noyau.

L'énergie potentielle du noyau est la somme de l'énergie potentielle électrique et de l'énergie potentielle nucléaire (Ces notions ont été décrites dans la partie « *Au cœur du noyau atomique* »). Lors d'une réaction de fission décrite plus haut (chapitre II), la cohésion assurée par la tension superficielle diminue, ce qui peut entraîner la rupture du noyau : la valeur limite de fission s'appelle « **barrière de fission** » (fig. 112).

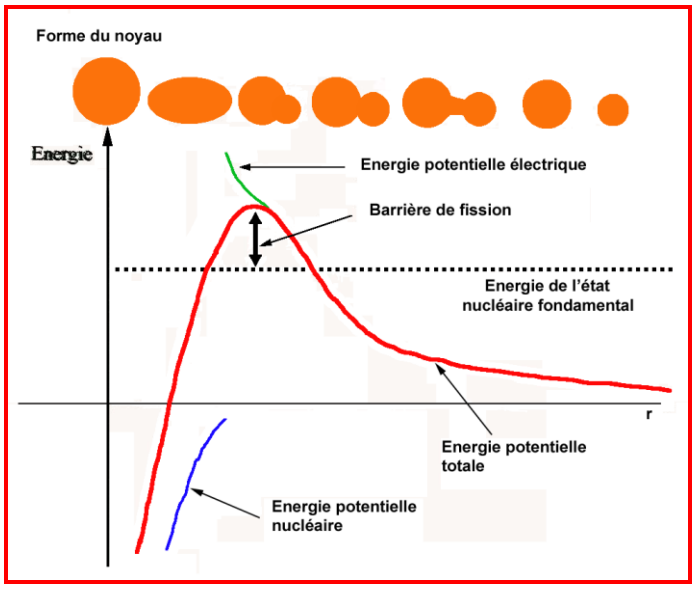

Fig. 112 – Barrière de fission. Energie potentielle d'un noyau fissile en fonction de la distance "r" entre les deux parties du noyau. La forme correspondante du noyau est montrée au-dessus du graphe.

C. Une réaction exoénergétique

Cette réaction est exoénergétique. On constate, pour les noyaux lourds, que la somme des masses des deux atomesobtenus est inférieure à celle du noyau initial. Selon le principe d'équivalence masse – énergie d'Einstein, **E = mc²**, la masse perdue est émise sous forme d'énergie récupérable.

D. Fission du noyau d'uranium

Prenons comme exemple le noyau d'^{235}U, car il peut subir la fission et, de plus, il fut utilisé lors des premières expériences (fig. 113).

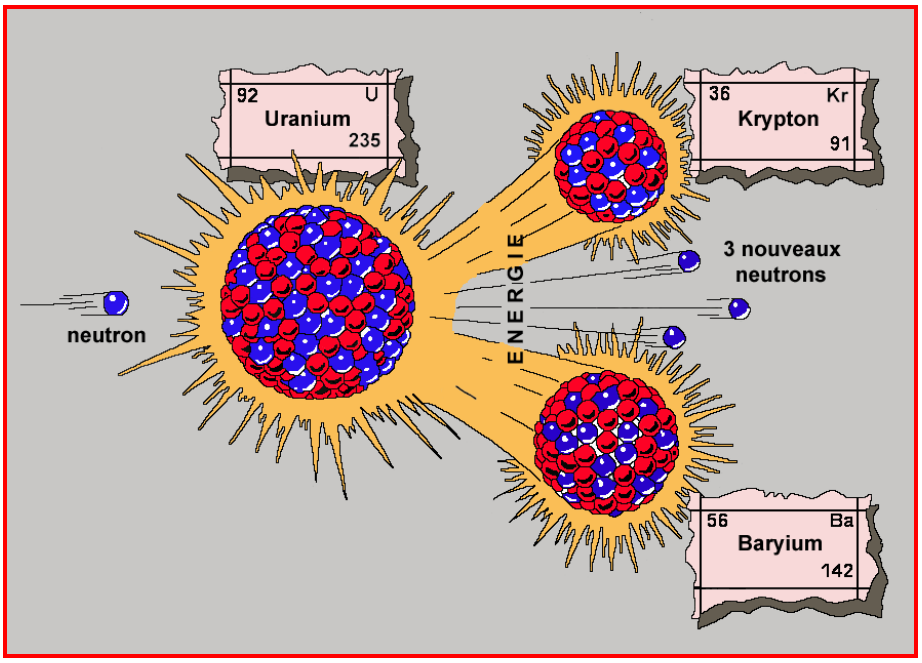

Fig. 113 – La fission du noyau d'uranium donne naissance à deux noyaux d'atomes d'éléments tout différents, le krypton et le baryum, par exemple (d'après GLADKOV K.)

Un calcul simplifié permet d'obtenir un ordre de grandeur de l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'^{235}U. L'énergie de liaison d'un nucléon dans un noyau d'^{235}U est de 7,6MeV alors qu'elle est de 8,4MeV dans ses fragments. Cette différence équivaut à une libération d'énergie de 0,8MeV par nucléon qui est multipliée, dans le cas de l'^{235}U, par 235 le nombre de nucléons présents au départ. On libère ainsi environ 200MeV, 50 fois plus que la désintégration α du même noyau.

A titre de comparaison, la combustion d'1 Kg de charbon libère une énergie de $33{,}24.10^{7}$ J, alors que celle d'1 Kg d'uranium libère une énergie de $8\ ,64.10^{13}$ J.

Dans le cas de l'^{235}U, la barrière de fission est de 6,8 MeV. Elle correspond également à peu près à la différence d'énergie potentielle entre son état fondamental et l'énergie à l'état excité lors de la collision d'un neutron

thermique ayant une énergie de l'ordre de 1/40 eV. La fission a donc lieu.

Pour l'isotope 238, la valeur de la barrière de fission est supérieure de 7,1 MeV à celle de son énergie à l'état fondamental. Lors de l'absorption d'un neutron thermique, la différence d'énergie entre les deux états n'est que de 4,9 MeV. La fission ne peut se réaliser. Pour ce faire, il faut bombarder le noyau ^{238}U au moyen de neutrons rapides d'énergie proche de 1,8 MeV.

Une des réactions possibles de fission de ^{235}U s'écrit :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{91}_{36}Kr + ^{142}_{56}Ba + \ldots ^{1}_{0}n$$

En écrivant la loi de conservation du nombre de nucléons, on peut aisément déterminer le nombre de neutrons rapides formés.

$$235 + 1 = 91 + 142 + y$$

y = 3, donc l'équation devient :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{91}_{36}Kr + ^{142}_{56}Ba + 3\,^{1}_{0}n$$

D'autres réactions peuvent se produire :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{94}_{37}Rb + ^{141}_{55}Cs + ^{1}_{0}n$$

E. Les noyaux fissiles

Les noyaux qui peuvent subir la fission sont dits **fissiles**. Ils possèdent un nombre impair de neutrons et ont, pour la plupart, une masse atomique supérieure à 220. Au-delà de A = 220, les éléments seraient, sans doute, tous instantanément fissibles, ce qui explique leur absence dans la nature.

Lorsqu'un neutron supplémentaire est capturé par le noyau d'un élément lourd, il s'apparie avec le neutron célibataire et lui confère un niveau d'excitation très élevé. La probabilité de fission du noyau augmente, bien qu'il puisse rester en l'état ou même capturer un autre neutron.

Dans le tableau périodique, seuls les éléments suivants, fissiles en particulier sous l'effet de neutrons lents, nous intéressent car nous les retrouverons dans les applications industrielles et militaires :

- l'uranium-233 $^{233}_{92}U$
- l'uranium-235 $^{235}_{92}U$
- le plutonium-239 $^{239}_{94}Pu$
- le plutonium-241 $^{241}_{94}Pu$

Seul l'^{235}U est encore présent dans les roches terrestres, à raison de 7‰

dans l'uranium naturel. Sa très grande période ou demi-vie qui est de $8{,}8.10^8$ ans, lui a permis de subsister en quantité encore relativement grande pour être exploité. L'^{233}U a une demi-vie de $1{,}6.10^5$ ans, le ^{239}Pu, de 24.000 ans et le ^{241}Pu, de 12,9 ans seulement ce qui explique qu'ils n'existent plus à l'état naturel.

F. Réaction en chaîne (fig. 114)

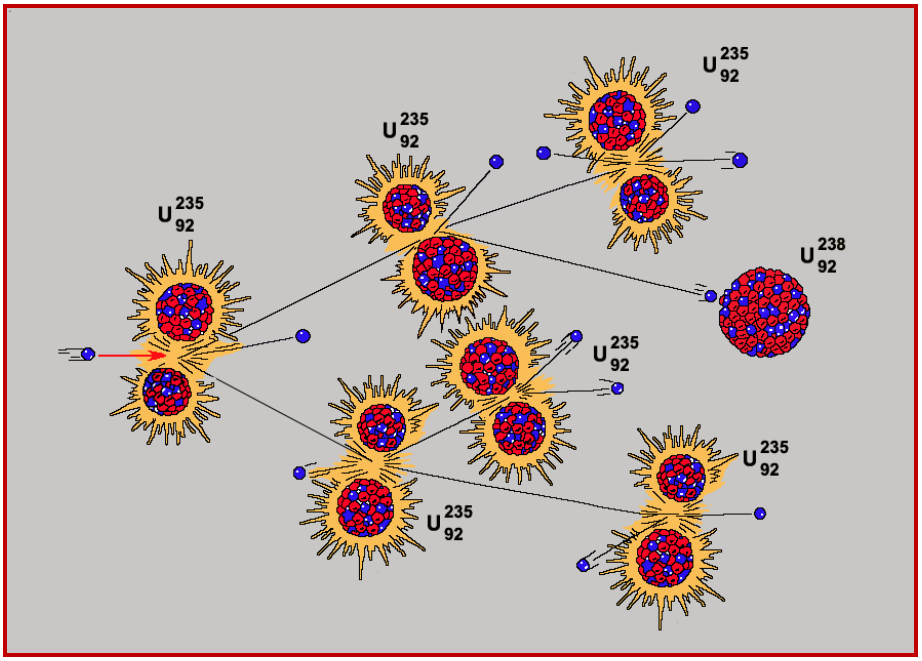

Fig. 114 – Réaction en chaîne (d'après GLADKOV K.)

Dans les différentes réactions qui mènent à la fission du noyau d'^{235}U, nous constatons qu'il y a des neutrons excédentaires (de 1 à 3). Ces neutrons, s'ils ont une énergie adéquate peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, il peut se produire une réaction en chaîne qui devient rapidement incontrôlable (principe de la bombe à fission) (fig. 85). Dans les centrales nucléaires, la réaction en chaîne est contrôlée au moyen de barres qui absorbent une partie du flux neutronique.

(à suivre : « *Les atomistes français, une équipe de pointe* »)