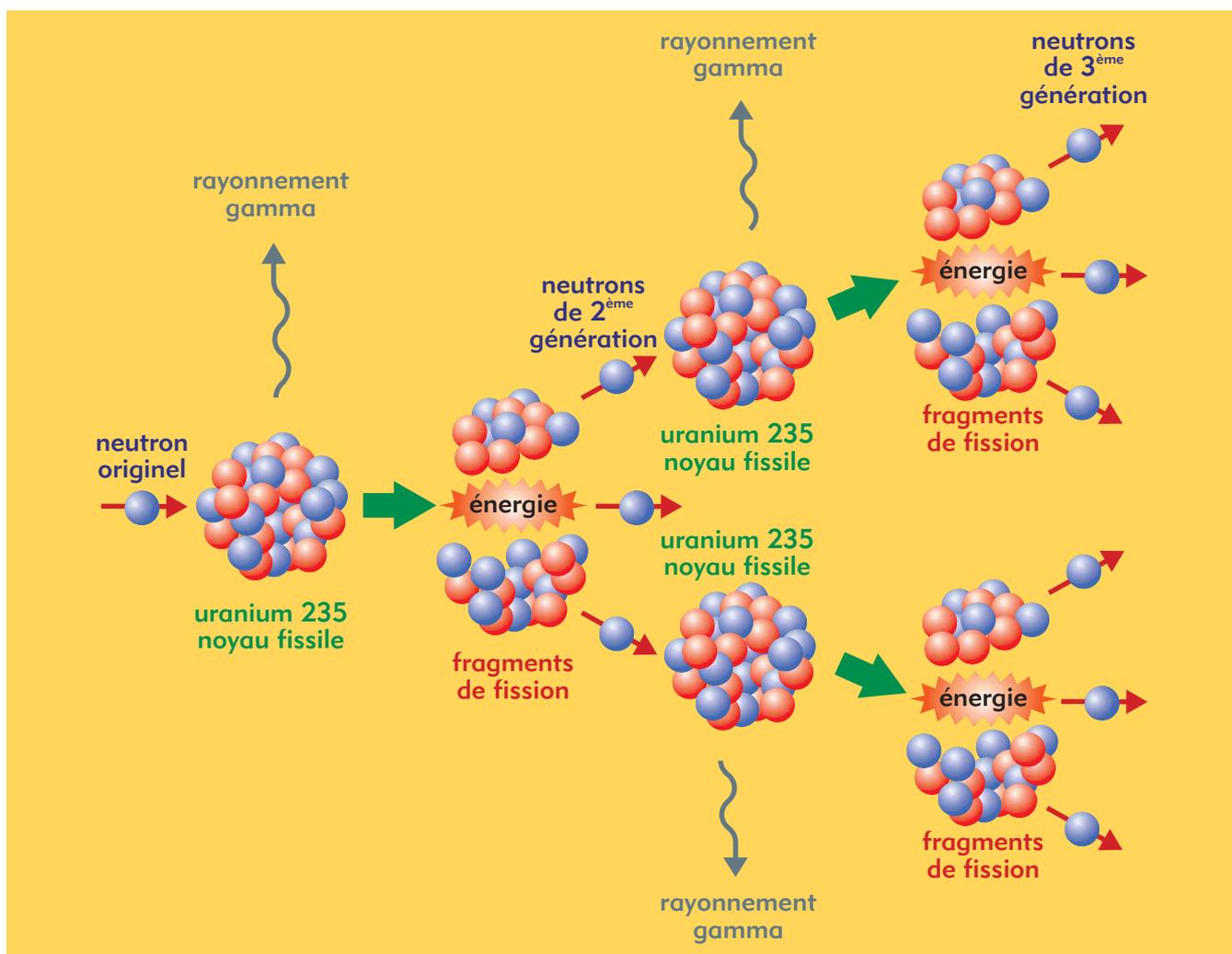


I. LES BASES NEUTRONIQUES DE LA FISSION

le neutron au cœur du réacteur

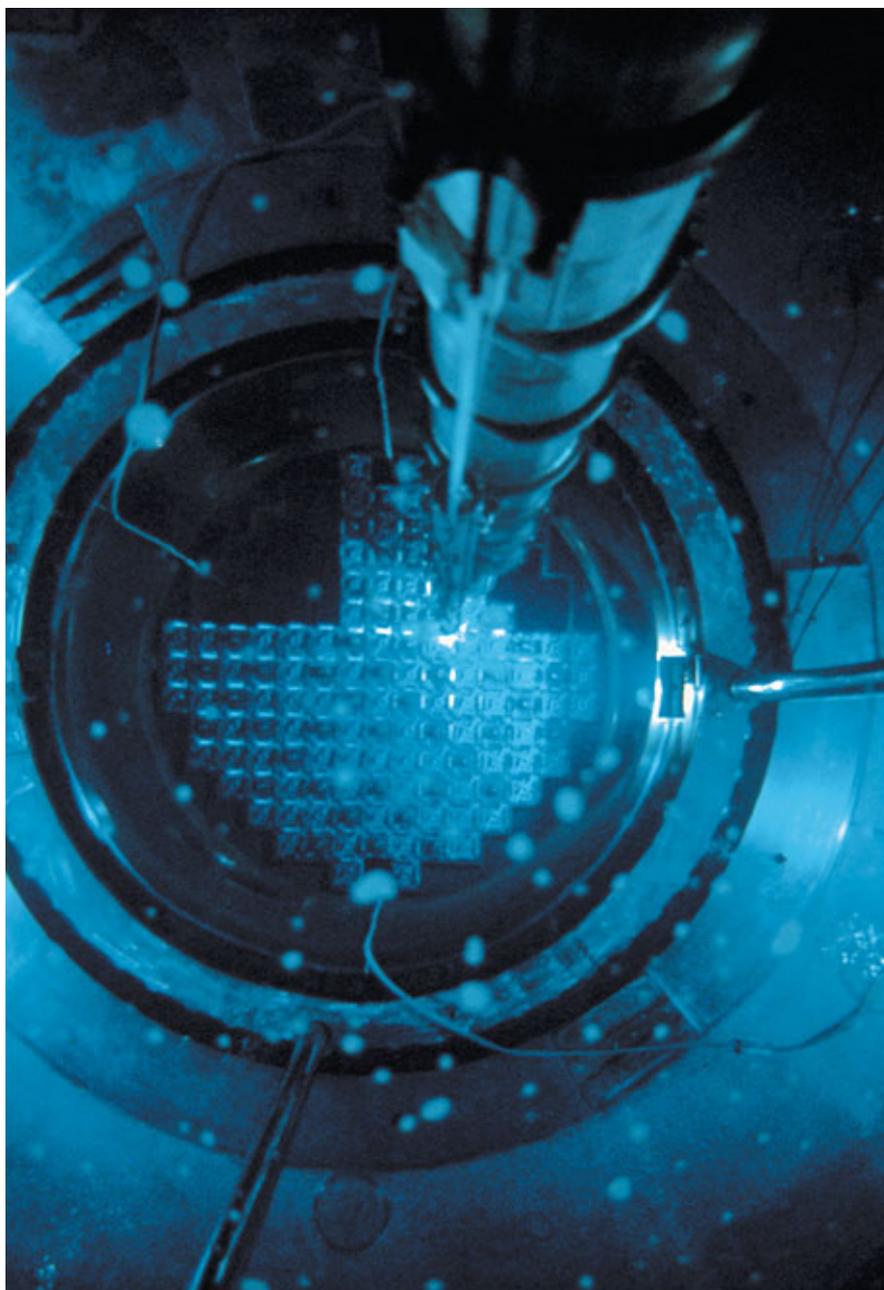
Le fonctionnement des réacteurs nucléaires et donc leur sûreté sont avant tout une affaire de neutronique. Au sens étroit du terme, la physique des réacteurs nucléaires est synonyme de neutronique. Cette discipline étudie le cheminement des neutrons à l'état libre entre leur émission par une réaction nucléaire et leur absorption par la matière et, plus spécialement, les conditions d'une réaction en chaîne de fissions dans les réacteurs nucléaires et de la production de puissance qui en résulte. Au sens plus large du terme, la physique des réacteurs englobe la physique nucléaire, qui s'intéresse aux réactions induites par les neutrons et fournit les données nucléaires de base nécessaires aux neutroniciens, la radioprotection, voire même la thermohydraulique. Compte tenu de l'orientation actuelle du nucléaire pour une gestion optimisée tant des matières premières que des déchets (concepts de réacteurs innovants), des données nucléaires nouvelles, en particulier pour la transmutation, et plus précises sont exigées. Pour établir les données nucléaires indispensables aux calculs de neutronique des différents réacteurs et aux calculs des paramètres physiques des cycles associés du combustible nucléaire, des procédures basées à la fois sur l'expérience et la théorie sont mises en œuvre.



Principe de la réaction en chaîne de fissions. Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne est contrôlée pour maintenir un rythme de fissions constant.

LES PHÉNOMÈNES NEUTRONIQUES

Cette présentation est destinée à rappeler quelques éléments de base de la neutronique, indispensables pour comprendre les articles qui vont suivre et saisir le concept d'une sûreté intrinsèque des cœurs des réacteurs nucléaires. Après de rapides généralités sur les réactions nucléaires sont décrits le mécanisme de la fission et le principe de la réaction en chaîne, introduisant ainsi la physique neutronique. Ensuite, plusieurs aspects importants de cette branche de la physique sont abordés : les voies des réacteurs à neutrons rapides et à neutrons thermiques, la cinétique de la réaction en chaîne, la notion de section efficace, et notamment de résonance, puis, enfin, l'analyse des composantes essentielles d'un bilan neutronique.



Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne, au cours de laquelle les neutrons engendrés par fission induisent à leur tour de nouvelles fissions, doit être très exactement équilibrée pour que le nombre de fissions par seconde, donc la puissance délivrée par le système, soit constant. Ici, mise en place du combustible dans la cuve du réacteur à eau sous pression du Bugey (Ain).

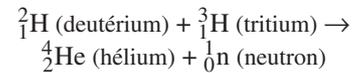




Des réactions nucléaires qui libèrent de l'énergie

Les **réactions nucléaires** (encadré A, **Atomes, noyaux et réactions nucléaires**) particulièrement recherchées sont celles libérant de l'énergie (exo-énergétiques). En règle générale, ce sont les réactions conduisant à des **noyaux** de taille intermédiaire. En effet, ces derniers ni trop petits ni trop gros s'avèrent être les plus liés... et qui dit liaison implique libération d'énergie. Pour comprendre cela, il suffit de se souvenir qu'à l'inverse il faut, pour briser une liaison, "tirer dessus",

c'est-à-dire apporter de l'énergie. Il y a ainsi deux grandes classes de réactions envisageables : les réactions de **fusion** consistant à réunir deux petits noyaux pour en fabriquer un plus gros comme, par exemple, les noyaux de deutérium et de tritium, **isotopes** de l'hydrogène :



et les réactions de **fission** consistant à casser un gros noyau pour en former deux plus petits. Dans les deux cas, outre les noyaux produits, un ou quelques **neutrons** sont également émis. Comparées

Atomes, noyaux et réactions nucléaires

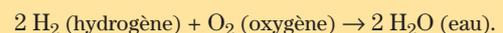
A

Les constituants de base de la matière, les **atomes**, sont de petits édifices qui sont composés d'un nuage d'**électrons** très légers, porteurs chacun d'une charge électrique élémentaire négative et gravitant autour d'un **noyau** très dense. Ce dernier rassemble deux sortes de **nucléons**, particules de masses voisines, à savoir les **protons**, porteurs chacun d'une charge électrique élémentaire positive, et les **neutrons**, sans charge électrique. Dans son état normal, l'atome est **neutre** et contient par conséquent autant d'électrons autour du noyau que de protons dans le noyau. Noté Z , ce nombre appelé **numéro atomique** caractérise l'élément chimique, puisque les propriétés chimiques des atomes ne dépendent que du nuage électronique. Aux Z protons du noyau s'ajoutent N neutrons, soit au total $A = Z + N$ nucléons. Ce nombre dit **nombre de masse** définit en gros la masse de l'atome. Pour une valeur de Z donnée, donc pour un élément chimique donné, il arrive assez souvent que plusieurs valeurs de N , et par conséquent de A , existent : à chaque valeur de N correspond un **isotope** de l'élément chimique. Les isotopes d'un même élément sont indiscernables par la chimie mais possèdent des propriétés **nucléaires** différentes, parfois même *très* différentes. Par exemple, l'uranium naturel est essentiellement composé de deux isotopes : 0,7 % d'uranium 235 (92 protons et 143 neutrons) symbolisé par ${}^{235}_{92}\text{U}$ ou plus simplement par ${}^{235}\text{U}$ et 99,3 % d'uranium 238 (92 protons et 146 neutrons) symbolisé par ${}^{238}_{92}\text{U}$ ou plus simplement par ${}^{238}\text{U}$.

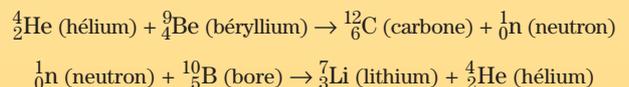
Les éléments **naturels** s'échelonnent de $Z = 1$ (hydrogène) à $Z = 92$ (uranium). Aujourd'hui, cette table a été prolongée au-delà de 100 par des éléments **transuraniens artificiels**. Les isotopes des divers éléments peuvent être **stables** ou **instables**. Dans ce dernier cas, ils se désintègrent par **radioactivité** pour aboutir, en une ou plusieurs étapes, à un noyau stable⁽¹⁾. Il existe un certain nombre d'isotopes radioactifs naturels ; *tous* les isotopes **artificiels** sont radioactifs. Il faut rappeler que la radioactivité artificielle est un phénomène de même nature que la radioacti-

vitée naturelle. La **décroissance** radioactive se caractérise par sa **période** (ou **demi-vie**) qui est le laps de temps nécessaire, en moyenne, pour que la moitié des noyaux instables considérés se soit désintégrée. Une "espèce nucléaire" définie par Z et A est aussi appelée **nucléide**.

Le chimiste manipule des groupements d'atomes appelés **molécules** et est capable de les assembler de manière différente. Par exemple, la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène donnant de l'eau est la recombinaison des atomes de deux molécules d'hydrogène (chacune formée de deux atomes d'hydrogène) et d'une molécule d'oxygène (composée de deux atomes d'oxygène) pour produire deux molécules d'eau (chacune constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène), ce qui s'écrit :



De façon similaire, le physicien nucléaire réalise des **réactions nucléaires** recombinaison différemment les protons et les neutrons. Dans ce cas, il ne s'intéresse pas trop à ce qui se passe pour les électrons, mais en fait les choses s'équilibrent aussi à ce niveau-là. Les réactions nucléaires s'écrivent, par exemple :



la première peut être utilisée comme source de neutrons et la deuxième est employée par les opérateurs des **réacteurs à eau sous pression** pour réguler la réaction se produisant dans le combustible. En pratique, ces réactions se font en "lançant" un "projectile" (le premier noyau cité dans ces réactions) sur une "cible" (le deuxième). Il est à noter qu'une réaction nucléaire met en jeu une quantité d'énergie environ *un million de fois plus élevée* qu'une réaction chimique.

(1) À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 34 (hiver 1996-1997) p. 10.

à des réactions chimiques, ces réactions fournissent, par unité de masse des éléments de la réaction, une quantité fantastique d'énergie. D'où l'intérêt que les ingénieurs militaires puis civils ont d'emblée manifesté pour ce type de réactions.

La fission nucléaire

Bien qu'exo-énergétique, la fission des noyaux lourds, tels ceux d'uranium, ne se fait presque jamais spontanément, tout simplement parce qu'avant la fission, le noyau, initialement à peu près sphérique, doit être déformé jusqu'à ce qu'un étranglement se produise, permettant la séparation en deux fragments (figure 1). Cette déformation ne s'opère que si un peu d'énergie est communiquée au noyau. Comme dans une loterie, espérer gagner une grosse somme n'est possible que si quelques francs sont investis pour acheter un billet !

Dans la loterie en question, les coups sont pratiquement tous gagnants pour quelques **nucléides** : un **naturel**, l'uranium 235 (^{235}U), et des **artificiels**, le plutonium 239 (^{239}Pu), le ^{241}Pu , le ^{233}U ... Dans les autres cas, en revanche, avec par exemple le ^{238}U , le thorium 232 (^{232}Th)..., les coups sont rarement gagnants.

Avant de voir comment "acheter le billet de loterie", c'est-à-dire provoquer une fission, examinons ce que donne une fission.

Tout d'abord, les **fragments de fission** sont extrêmement variés car la répartition des **nucléons** disponibles peut se faire selon de très nombreuses façons. Pour connaître ces fragments et leurs **rendements** (probabilité d'obtention), des mesures doivent être effectuées. La figure 2 montre la diversité des fragments de fission pour le ^{235}U des réacteurs. Il faut remarquer d'une part, que la fission est le plus souvent légèrement *dissymétrique* (avec un fragment dans la tache du bas et un dans celle du haut) et d'autre part, que pratiquement tous les fragments de fission sont situés en dehors de la **vallée de stabilité**, donc **radioactifs**. En moyenne, un fragment de fission subit quatre **décroissances radioactives** avant de se transformer en un nucléide stable. Les **périodes** de ces décroissances sont la plupart du temps courtes et n'excèdent pas, sauf exceptions, quelques années.

Ensuite, outre ces deux fragments, quelques *neutrons secondaires*, en moyenne 2,5 dans le cas du ^{235}U , sont émis à l'état libre. Leur vitesse à l'émission est élevée, de l'ordre de 20 000 km/s.

Enfin, l'*énergie* libérée par la fission est l'objectif recherché. Plus de 80 % correspondent à l'énergie cinétique des deux fragments. Se repoussant violemment à cause de la répulsion électrique, ceux-ci sont éjectés à une vitesse de près de 10 000 km/s. Cependant, ils ne parcourent qu'environ un centième de millimètre car ils sont très fortement freinés par la matière. Cette énergie apparaîtra sous forme de chaleur dans le combustible nucléaire. Le reste de l'énergie est emporté par des particules légères, neutrons, électrons, photons, émises immédiatement lors de la fission ou plus tard au cours des décroissances radioactives. Cette énergie apparaîtra également sous forme de chaleur.

La fission induite

Il est rare que la fission se produise spontanément. Pour la provoquer, il faut "taper" sur le noyau pour le faire osciller et se déformer suffisamment. Le meilleur projectile est, pour deux raisons, le neu-

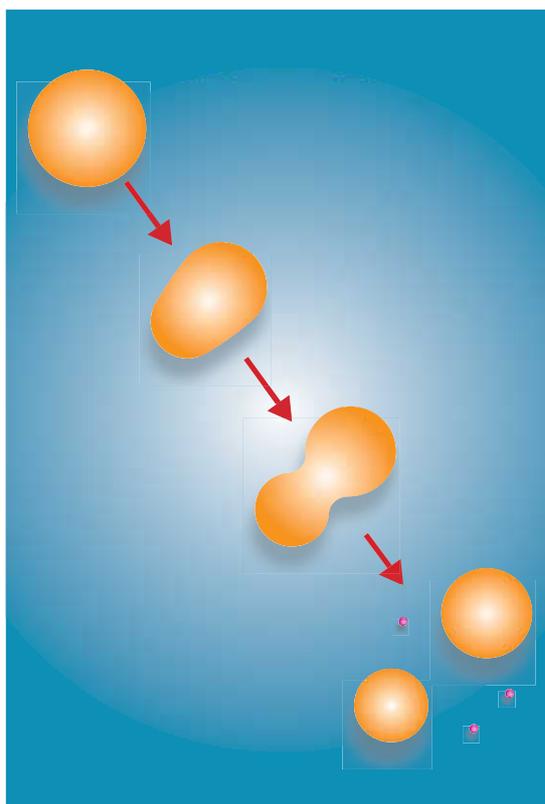
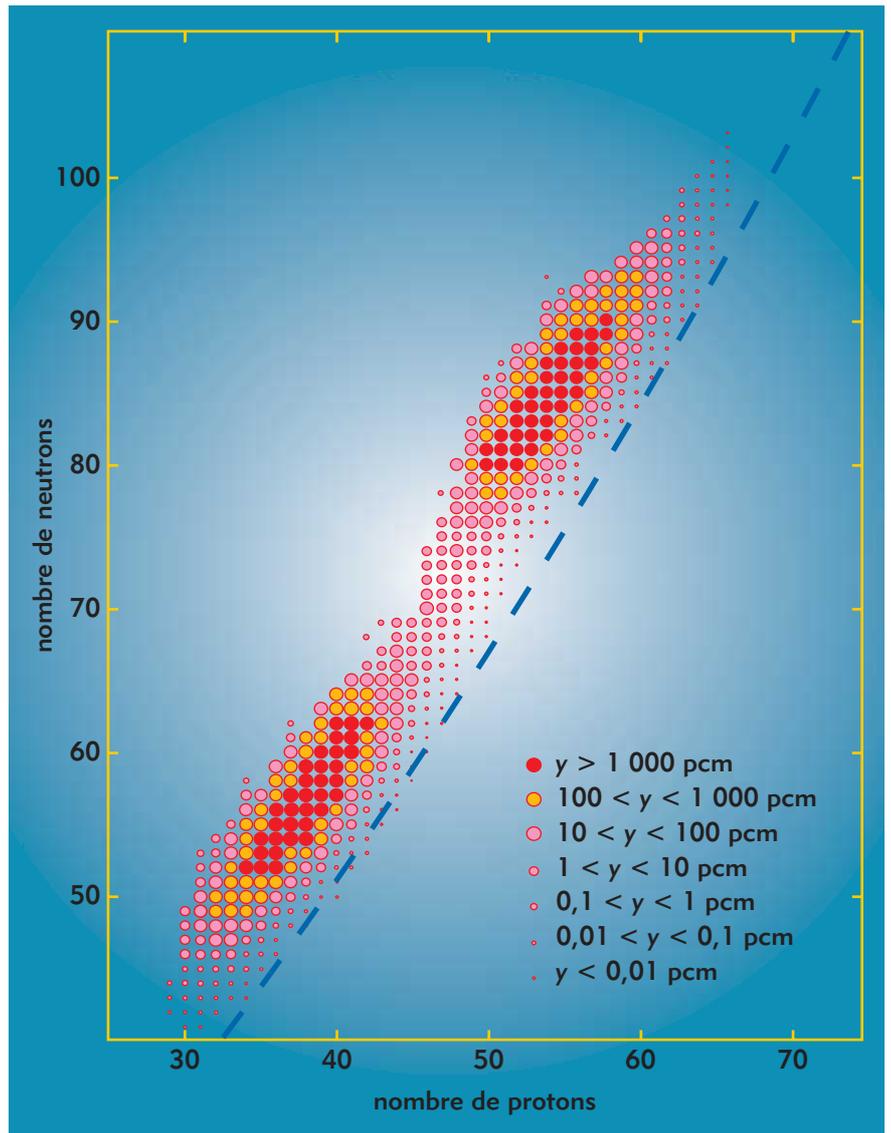


Figure 1. Les étapes de déformation d'un noyau lourd amenant à la fission.

Figure 2. Répartition des fragments de la fission de ^{235}U induite par neutron thermique dans un diagramme représentant le nombre de protons par rapport au nombre de neutrons. γ désigne la probabilité d'obtention par fission (rendement) de chacun des nucléides ; pcm signifie pour cent mille. La courbe en tirets correspond à la vallée de stabilité, c'est-à-dire la ligne où se trouvent approximativement les noyaux stables.



tron (encadré B, *Les différents types d'interaction entre un neutron et un noyau*). Premièrement, le neutron ne possédant pas de charge électrique n'est pas repoussé par les noyaux et s'en approche ainsi sans difficulté. Deuxièmement, il est sensible aux forces nucléaires très intenses qui, comme une sorte de colle, assurent la cohésion des noyaux atomiques. S'approchant du noyau, le neutron est "happé" par cette force qui travaille donc pour le "saisir". L'énergie fournie par ce travail s'ajoute à l'énergie cinétique apportée par le neutron et si la "pichenette" correspondante est suffisante, la fission pourra avoir lieu (encadré C, *La désintégration des noyaux lourds et le cheminement des rayonnements*).

Pour les noyaux du type ^{238}U , il est nécessaire que le neutron soit très rapide

et apporte un complément important en énergie cinétique pour que la fission se produise. Comme cette circonstance est très exceptionnelle, la fission est rarement observée dans ce cas. En revanche, pour les noyaux du genre ^{235}U , l'énergie due à la liaison suffit à elle seule. Un neutron même très lent peut provoquer la fission ; paradoxalement d'ailleurs, la fission est induite plus facilement par un neutron lent. C'est la raison pour laquelle les noyaux de ce type, généralement les noyaux lourds possédant un nombre *impair* de neutrons⁽¹⁾, ont été adoptés pour constituer le combustible des réacteurs.

(1) Lorsqu'un neutron est **absorbé**, il s'apparie avec le neutron célibataire, ce qui conduit à une énergie d'excitation du **noyau composé** plus élevée et, par conséquent, à une fission probable.

Les différents types d'interaction entre un neutron et un noyau

Parmi les interactions entre un **neutron** et un noyau-cible, il convient de distinguer les **diffusions** et les **absorptions**.

Dans une **diffusion élastique**, le neutron incident qui percute le noyau est réémis avec une énergie inférieure à son énergie cinétique initiale et poursuit donc son cheminement. Il a en quelque sorte rebondi contre la surface du noyau sans réellement y pénétrer. La différence d'énergie est transformée en énergie de recul pour le noyau-cible. La réaction s'écrit **(n,n)**.

Par opposition, toute réaction au cours de laquelle le neutron est happé par le noyau qu'il a rencontré est qualifiée d'**absorption**. Le **noyau composé** ainsi formé est fortement excité car, outre l'énergie cinétique du neutron incident, il a également absorbé l'énergie de liaison (quelques millions d'**électronvolts**) provenant du travail des forces nucléaires pour le saisir. Cet état très instable, qui ne va durer qu'un très court instant (environ 10^{-14} s), peut se désexciter selon plusieurs modes :

- par **émission de rayonnement** (ou photons) **gamma** (**capture radiative**, réaction **(n,γ)**) ;
- par **émission d'une particule chargée** telle qu'un

proton (réaction **(n,p)**), un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}^{++}$ (réaction **(n,α)**)...

- par **émission de plusieurs neutrons** (réaction **(n,xn)**) ;
- pour un noyau lourd composé, par **cassure en deux noyaux plus légers** (**fission**), s'accompagnant de l'émission de quelques neutrons secondaires éjectés par les deux fragments de fission (réaction **(n,f)**).

Le noyau composé peut aussi réémettre un neutron. Si une partie de l'énergie cinétique du neutron incident est conservée par le noyau-cible sous forme d'énergie d'excitation, la **diffusion** sera **inélastique**. Le noyau-cible libérera cet excédent d'énergie par émission de rayonnement gamma. La réaction est notée **(n,n'γ)**.

En physique des réacteurs, toute absorption ne conduisant pas à la fission est appelée **capture neutronique**.

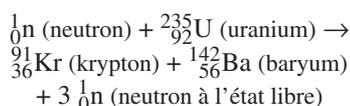
La probabilité d'interaction d'un neutron avec la matière qu'il traverse, exprimée par la **section efficace totale** σ , est la somme des probabilités des différents types d'événements susceptibles de se produire, définies par des **sections efficaces partielles** :

$$\sigma = \sigma(\text{absorption}) + \sigma(\text{diffusion}) ;$$

$$\sigma(\text{absorption}) = \sigma(\text{capture}) + \sigma(\text{fission}).$$

La réaction en chaîne de fissions

Le troisième intérêt du choix du neutron réside dans le fait que non seulement il est susceptible d'induire des fissions avec une relative facilité mais, en plus, les fissions fournissent des neutrons à l'état libre, inexistant dans la nature, par des réactions telles que :



consommant un neutron mais en redonnant plus qu'un. Il est donc concevable qu'une fois amorcée, une **réaction en chaîne** puisse s'auto-entretenir et se poursuivre spontanément selon le principe suivant :

neutrons \rightarrow fissions \rightarrow neutrons \rightarrow
fissions \rightarrow neutrons \rightarrow fissions \rightarrow ...

L'auto-entretien de la réaction dépend de la valeur du **facteur de multiplication** $k^{(2)}$, nombre moyen de fissions observées à partir d'une fission initiale. Ce nombre est plus petit que le nombre moyen de neutrons émis par fission (2,5 pour le ${}^{235}\text{U}$) car certains neutrons

sont perdus, soit parce qu'ils sont **capturés** (sans fission) par un noyau quelconque, soit parce qu'ils s'échappent du système. En raisonnant sur N fissions initiales, on obtient en moyenne, au fur et à mesure des générations :

$$N \rightarrow Nk \rightarrow Nk^2 \rightarrow Nk^3 \rightarrow Nk^4 \rightarrow Nk^5 \rightarrow \dots$$

Il apparaît que :

- si k est nettement plus grand que 1, la réaction s'emballe. C'est ce qui est recherché dans une arme nucléaire où l'emballement conduit à une explosion ;
- si k n'est que très légèrement supérieur à 1, la réaction s'enclenche mais reste sous contrôle. C'est le cas recherché – de manière transitoire – au cours du démarrage d'un réacteur avec une valeur de k qui revient très vite à une valeur de 1 ;
- si k est plus petit que 1, la réaction s'amenuise rapidement. Cette situation est recherchée lorsque l'opérateur veut arrêter un réacteur ;

(2) Au lieu du facteur de multiplication k , la **réactivité** $\rho = (k - 1)/k$ est souvent utilisée. Elle s'exprime en pcm (pour cent mille).



La désintégration des noyaux lourds et le cheminement des rayonnements

Le processus de **fission** donne naissance à des **fragments de fission** très généralement **radioactifs**. Par **décroissances** successives, les **noyaux instables** regagneront la zone de stabilité avec des **périodes** corrélées à leur excitation initiale. La période d'un noyau est d'autant plus courte que son excitation est grande, et inversement. Des énergies de désexcitation élevées seront donc préférentiellement trouvées pour des noyaux de période courte.

Les principaux **modes de désintégration** pouvant conduire à l'apparition d'un **nucléide** de numéro atomique Z et de masse A sont au nombre de six. Ces réactions sont le plus souvent accompagnées d'émission de **rayonnement** (ou photons) **gamma** (γ).

L'**émission bêta** (β) est le mode de désintégration radioactive le plus commun car tous les noyaux situés hors de la **vallée de stabilité** ont une **activité** β . Ce phénomène consiste en l'éjection d'un électron de charge négative (**désintégration bêta moins** β^-) ou positive (**désintégration bêta plus** β^+) à partir du noyau. Par émission β^- le numéro atomique *augmente* d'une unité, alors que par émission β^+ il *diminue* d'une unité :



au sein du noyau, un neutron n se transforme en proton p avec émission d'un électron e^- et d'un **antineutrino** $\bar{\nu}$:
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$;



au sein du noyau, un proton se transforme en neutron avec éjection d'un électron positif (positon) et d'un **neutrino** ν :
 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$.

La **capture électronique** se traduit par la capture d'un électron par un proton du noyau. Ce mode de désintégration radioactive est généralement en compétition avec la désintégration β^+ . Il s'agit la plupart du temps d'un électron de la couche la plus interne et le réarrangement du cortège électronique se fait alors avec émission de **rayonnements** (ou photons) X :



dans le noyau, le proton et l'électron donnent un neutron avec éjection d'un neutrino : $p + e^- \rightarrow n + \nu$.

La **conversion interne** est un autre mode de désexcitation qui est toujours en compétition avec l'émission γ . L'énergie d'excitation est directement transmise du noyau

à un électron de la couche interne qui s'échappe de l'atome. Le réarrangement du cortège électronique provoque l'émission de rayonnements X .

Certains nucléides peuvent coexister sous la forme de deux états. Par exemple, le césium 135, émetteur β^- de période $2,3 \cdot 10^6$ années, possède un **état métastable (isomère)** de **demi-vie** 53 minutes. Le césium métastable retourne à son état fondamental par **transition isomérique** en émettant un rayonnement γ :

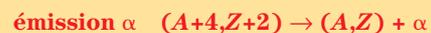


ni la conversion interne ni la transition isomérique n'ont lieu avec un changement de numéro atomique.

L'**émission de neutrons retardés** se déroule en deux temps. Un précurseur fortement radioactif émet un rayonnement β^- et le noyau résultant, appelé *noyau émetteur*, émet à son tour un neutron dit retardé lorsque l'énergie résiduelle d'excitation de ce noyau émetteur est supérieure à l'énergie de liaison d'un neutron :



Dans la **désintégration alpha** (α), deux protons et deux neutrons se séparent de l'ensemble du noyau pour former un noyau d'hélium (${}^4_2\text{He}^{++}$), ou particule α , qui est éjecté :



ces phénomènes se produisent essentiellement avec des éléments très lourds ($A > 150$) et aboutissent à des chaînes successives de décroissances α .

Les rayonnements β ont un **parcours** relativement faible dans la matière présente dans un **réacteur nucléaire** telle que l'oxyde d'uranium (UO_2), l'acier ou le béton. L'énergie est donc déposée sur place à proximité du lieu de naissance. Par contre, dans un gaz, ces rayonnements β peuvent parcourir des distances plus élevées dépassant la dizaine de mètres. Ce phénomène serait par exemple rencontré lors d'un accident de dispersion de produits de fission dans l'enceinte du réacteur.

Les rayonnements γ ont des parcours plus grands et s'atténuent de façon exponentielle dans la matière par opposition aux rayonnements β dont le parcours est figé une fois l'énergie initiale et le matériau traversé connus. Pour les γ émis par les fragments de fission, leur parcours moyen dans la matière varie du millimètre à 50 cm selon les matériaux, uranium et eau étant les extrêmes comme le montre le tableau ci-dessous.

	0,5 MeV	1,0 MeV	4,0 MeV	8,0 MeV
eau	10,4	14,2	29,5	41,7
UO ₂	0,55	1,23	2,16	2,04

Parcours moyens, exprimés en centimètres, des rayonnements γ dans l'eau et dans l'oxyde d'uranium pour quatre énergies.

• si k est juste égal à 1, la réaction se maintient à un niveau stable. Cet état, la **criticité**, est réalisé dans un réacteur en fonctionnement normal.

Il peut être judicieux que les neutrons excédentaires ne servant pas à la réaction en chaîne soient, dans la mesure du possible, capturés pour former des produits utiles. Par exemple, des captures par le ^{238}U (noyau **fertile**) conduisent, après deux courtes décroissances radioactives, au ^{239}Pu (noyau **fissile**), nucléide intéressant puisque doté de propriétés voisines de celles du ^{235}U et susceptible de constituer une matière combustible artificielle : c'est la **conversion**. Les physiciens nucléaires explorent également la possibilité d'**incinérer** des déchets nucléaires par irradiation neutronique : c'est la **transmutation**.

Les réacteurs à neutrons thermiques et à neutrons rapides

Les neutrons émis par les fissions sont très rapides. Leur énergie est d'environ 2 millions d'**électronvolts** (2 MeV). Passant près des noyaux d'uranium, ils sont, certes, capables de provoquer leur fission mais avec une relative difficulté car ils se déplacent trop vite ! En outre, l'**absorption** est le plus souvent une simple capture sans fission si elle est due au ^{238}U . C'est dire que pour réaliser une réaction en chaîne avec les **neutrons rapides**, il faut absolument utiliser une matière riche en nucléides fissiles : un uranium très **enrichi** en isotope 235 (au moins 20 à 30 % pour un réacteur et de l'ordre de 90 % ou plus pour une arme) ou du ^{239}Pu (le plus pur possible pour une arme et,



Quelques neutrons sont nécessaires pour initialiser une réaction en chaîne de fissions. Pour cela, c'est généralement une source de neutrons basée sur un processus radioactif qui est utilisée. Ici, grappe source (le long tube fin). Les particules α émises par du californium 252 interagissent avec du béryllium qui se transforme en carbone en émettant un neutron.



G. Liesse/Framatome



de préférence, mélangé à du ^{238}U s'il s'agit d'un réacteur, de façon à régénérer du ^{239}Pu par conversion). Cette voie des neutrons rapides est très séduisante pour un réacteur du fait de l'excellent **bilan neutronique** qui la caractérise. Il est par exemple possible de rendre un **réacteur à neutrons rapides "surgénérateur"**, c'est-à-dire lui faire produire plus de plutonium qu'il n'en consomme.

L'autre voie pour les réacteurs est celle des **neutrons thermiques**. Les neutrons sont ralentis par **diffusions** successives (chocs analogues à ceux des boules de billard) sur des matériaux bien choisis appelés **modérateurs**, constitués d'atomes légers et peu capturants, tels l'eau ordinaire, l'eau lourde⁽³⁾, le graphite... Dans un bon modérateur, les neutrons se ralentissent jusqu'à atteindre approximativement un équilibre thermique avec la matière. Leur vitesse n'est plus alors que de l'ordre de quelques kilomètres par seconde. Par exemple, pour 20 °C la vitesse moyenne des neutrons est de 2,2 km/s et leur énergie est de 0,025 eV. Il se trouve que le ^{235}U ainsi que le ^{239}Pu et les autres noyaux fissiles sont extrêmement avides de neutrons thermiques, en comparaison des noyaux non fissiles comme le ^{238}U . Dans ces conditions, de l'uranium à faible teneur (quelques pour-cent, voire même l'uranium naturel à 0,7 %) peut permettre une réaction en chaîne auto-entretenu. La voie des réacteurs à neutrons thermiques est celle qui a été la plus développée – avec différentes "filières" (variantes) –. Par exemple, la France s'est équipée de près d'une soixantaine de **réacteurs à eau sous pression** alimentés par de l'uranium faiblement enrichi ou par un combustible **MOX** (mélange d'uranium et de plutonium, ce dernier étant rajouté pour être recyclé).

La cinétique des réacteurs

La **cinétique** d'un réacteur, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle se produiront les changements de puissance, est liée d'une part à la valeur du facteur de

multiplication k et d'autre part au laps de temps entre deux générations. À première vue, la cinétique semble être très élevée. Dans un réacteur à eau sous pression, 25 μs ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{s}$) environ séparent une fission de la suivante. En prenant par exemple $k = 1,000 1$, une valeur très proche pourtant de la criticité, au bout d'une seconde, soit 40 000 générations, le calcul montre que la puissance est multipliée par $1,000 1^{40\,000} = 55$.

La réalité, heureusement pour les opérateurs de réacteurs, est tout autre, du moins pour les valeurs de k proches de la criticité. Il faut en effet tenir compte dans l'évaluation du **temps de génération** d'une petite proportion de neutrons émis non pas de façon **prompte** au moment même de la fission mais de façon **retardée** de quelques secondes par une décroissance radioactive préliminaire (encadré C, **La désintégration des noyaux lourds et le cheminement des rayonnements**). Par exemple, pour un combustible à uranium, 0,65 % des neutrons sont émis une dizaine de secondes en moyenne après la fission. La prise en compte des neutrons retardés pour calculer, en faisant la moyenne, un temps de génération *effectif*, donne non plus 25 μs mais environ 0,1 s, les neutrons retardés jouant un rôle prépondérant dans ce calcul. Aussi, l'évaluation ne doit pas être réalisée avec 40 000 générations par seconde mais avec de l'ordre de 10. Dans ces conditions, k^n vaut 1,001 au lieu de 55. Ainsi, la puissance variera de un dixième de pour-cent par seconde seulement !

Ces considérations très importantes pour la conduite des cœurs de réacteurs et donc pour la sûreté doivent être complétées par quelques remarques. Tout d'abord, la proportion des neutrons retardés est plus faible pour le plutonium que pour l'uranium. Un réacteur chargé en MOX est un peu plus "nerveux" qu'un réacteur chargé à l'uranium, ce qui n'entraîne cependant pas de difficultés rédhibitoires. Ensuite, le raisonnement simple effectué précédemment ne s'applique pas si le réacteur est **surcritique** avec les seuls neutrons prompts. Pour le cas de l'uranium par exemple, si k dépasse 1,006 5, alors la **divergence**, c'est-à-dire l'emballement de la réaction, devient extrêmement rapide. Il sera montré dans le cha-

(3) Molécule constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes de deutérium, un isotope de l'hydrogène comportant un proton et un neutron.

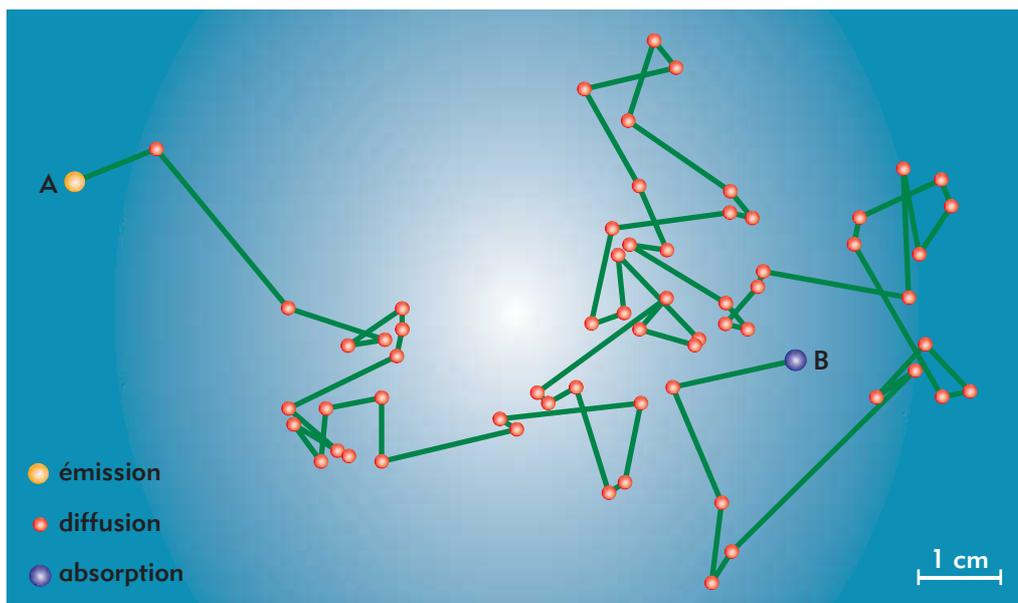


Figure 3. Cheminement typique d'un neutron dans un réacteur. Entre son émission et son absorption, le neutron fait souvent un "jeu de billard" relativement long. Chaque parcours élémentaire du neutron entre deux collisions est de l'ordre du centimètre... ce qui est absolument gigantesque. Cela correspond à la traversée de cent millions d'atomes ! La raison de cette longue migration est que les neutrons ignorent totalement les électrons et ne sont susceptibles de percuter que les noyaux des atomes, qui occupent une fraction infinitésimale du volume total, comme le Soleil dans l'immense espace du système solaire.

pitre II que dans un réacteur elle est toutefois vite contrecarrée par des contre-réactions intrinsèques au système. En revanche, dans une arme nucléaire, il faut faire en sorte que k dépasse très nettement cette valeur pour que même les contre-réactions ne parviennent pas à stopper l'explosion.

Les sections efficaces et le bilan neutronique

Pour effectuer des calculs de **neutronique** (évaluer le facteur de multiplication k , prévoir la distribution de puissance dans le cœur...), le physicien doit quantifier les probabilités d'interaction entre un neutron et la matière : nombre d'atomes traversés, en moyenne, avant la collision (figure 3) et type de cette collision (encadré B, *Les différents types d'interaction entre un neutron et un noyau*). Ce sont les **sections efficaces** qui le permettent.

Pour avoir une idée intuitive de ce que représente une section efficace, il faut imaginer la section droite d'une cible que figure un noyau sur la trajectoire d'un neutron (figure 4). Cette image est utile pour comprendre qu'une section efficace est une surface et que celle-ci est petite, de l'ordre de grandeur de celle d'un noyau. Les sections efficaces sont exprimées en **barn** ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$). En fait, la physique quantique révèle, d'une part que les sections efficaces sont d'un ordre de grandeur très variable selon les

noyaux et les réactions et, d'autre part qu'elles dépendent, et parfois de façon compliquée (figure 5a), de la vitesse du neutron. Les pics successifs observés sur la courbe s'appellent des **résonances**. Elles sont liées à des "paliers" sur lesquels les noyaux, comme d'ailleurs les atomes, aiment bien se placer. Si l'énergie apportée par le neutron correspond juste à ce qui est nécessaire pour sauter sur un palier, le noyau-cible est "tout content" et s'empresse d'absorber le neutron en lui "proposant" une grande section efficace ; et inversement si l'énergie ne correspond pas à un palier. La forme des résonances est affectée par la température (figure 5b) : c'est l'effet Doppler de la neutronique, qui induit une contre-réaction extrêmement utile en

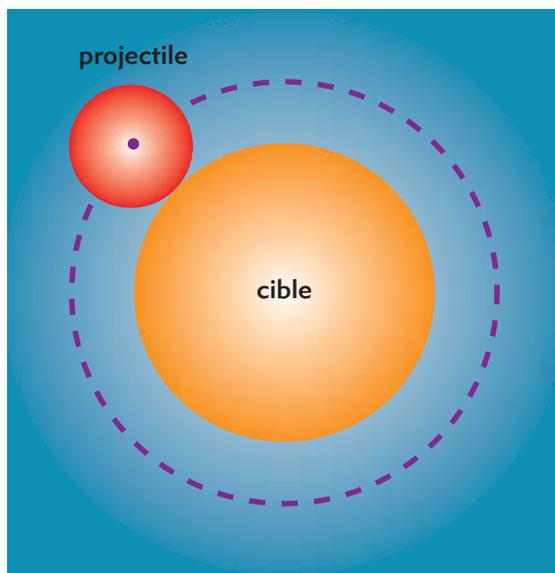


Figure 4. Définition classique de la section efficace. La collision a lieu si la trajectoire du centre du projectile traverse le cercle en tirets. La section efficace est l'aire de ce cercle.

Usine de traitement des combustibles usés de la Hague (Manche). Si dans un réacteur la réaction en chaîne doit être très exactement équilibrée (facteur de multiplication $k = 1$), dans des installations où sont traitées des matières nucléaires le facteur de multiplication doit rester inférieur à 1.



Harry Gruyaert/Magnum - Cogema

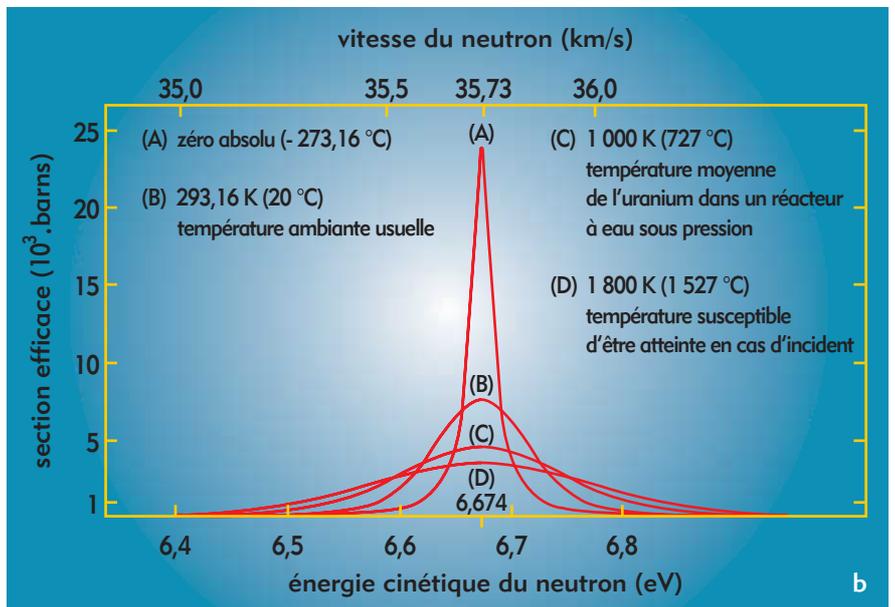
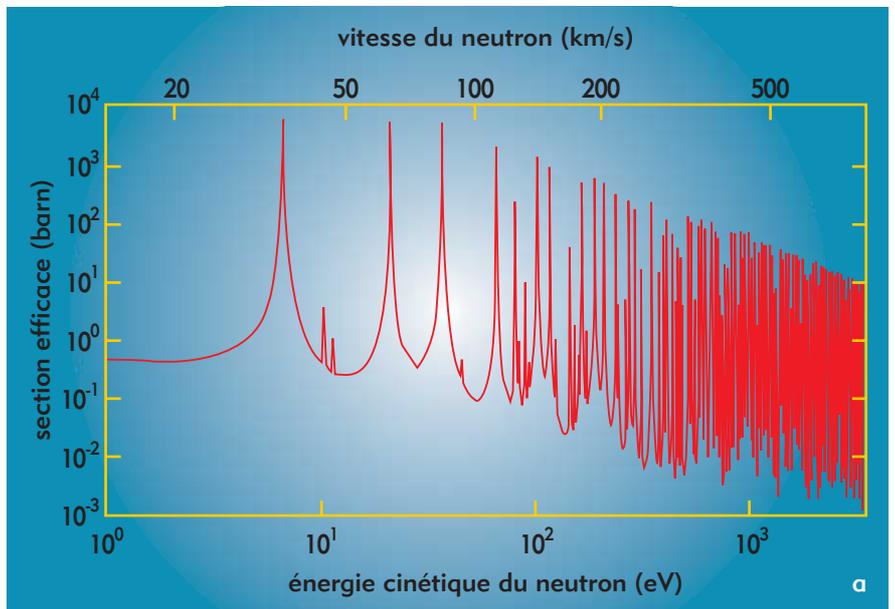


Figure 5. En a, section efficace de capture neutronique par le ^{238}U . En b, exemple de déformation par effet Doppler de la résonance principale. L'élargissement des résonances et l'abaissement des pics proviennent, pour une vitesse de neutrons fixée, de la dispersion des vitesses relatives entre les neutrons et les noyaux due à l'agitation thermique de ces derniers.

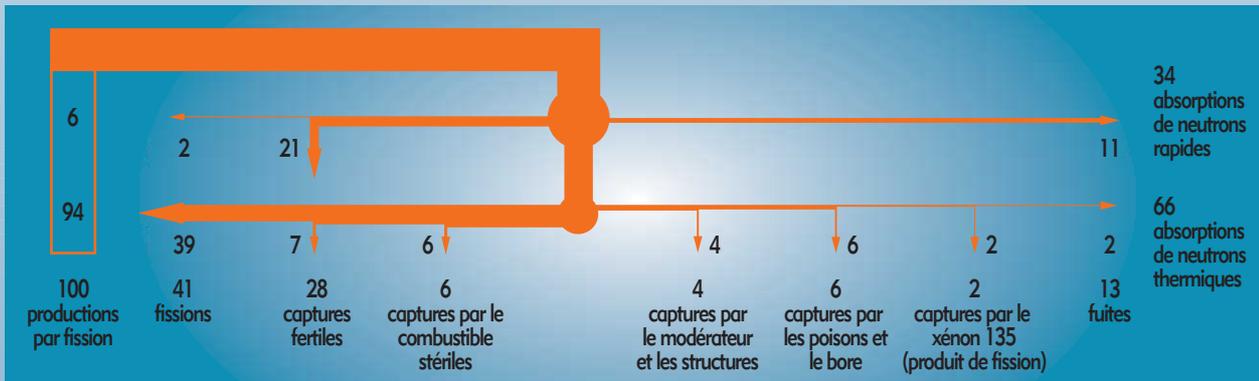
Un exemple de bilan neutronique

Dans un souci de simplification, le **bilan neutronique**, qui est la résultante des productions et des pertes de **neutrons** dans le cœur du réacteur, est souvent établi sans prendre en compte les neutrons qui sortent du cœur, autrement dit les fuites. Le **facteur de multiplication** est alors qualifié “d’infini” et noté k_{∞} . Inversement, si les fuites sont prises en compte, le facteur de multiplication est qualifié “d’effectif” et noté k_{eff} . Dans un réacteur à **neutrons thermiques**, le bilan neutronique est caractérisé par une décomposition du facteur de multiplication k_{∞} en quatre facteurs : le **facteur de fission rapide** résultant des **fissions** du ^{238}U induites par les neutrons très énergétiques, donc rapides, le **facteur antitrappe** correspondant à la pro-

babilité qu’un neutron échappe aux **captures** pendant son ralentissement, le **facteur d’utilisation thermique** se rapportant à la probabilité qu’un neutron thermique soit **absorbé** dans le combustible et le **facteur de reproduction** relatif au nombre de neutrons produits lorsqu’un neutron thermique est absorbé dans le combustible.

Les neutroniciens ont imaginé de nombreuses façons de présenter un bilan neutronique. Celui proposé ci-dessous correspond à un assemblage standard (combustible constitué d’oxyde d’uranium **enrichi** en ^{235}U) non irradié de **réacteur à eau sous pression**. Les “tuyaux” et les flèches donnent la mesure des flux, également reportés sous forme numérique (ici pour 100 neutrons et avec des

valeurs arrondies). Le cycle, schématisé par le gros “tuyau”, va d’une fission à la suivante dans le combustible symbolisé par le rectangle à gauche. Les petits “tuyaux” représentent les pertes de neutrons. Les totaux sont faits, à droite, selon deux grands domaines d’énergie des neutrons et, en bas, par types de **réactions nucléaires**. Pour simplifier, il a été admis que toutes les absorptions par le ^{235}U , les structures et les **poisons** étaient des absorptions de neutrons thermiques... ce qui n’est pas vraiment correct dans ce cas. Seules les fissions du ^{238}U , les captures **résonnantes** de cet **isotope** et la majeure partie des fuites vers les assemblages voisins, voire hors du cœur, concernent les **neutrons rapides** et **épi-thermiques**.



cas d’accident sur un réacteur conduisant à un échauffement très important du combustible (voir *Contrôle et pilotage des réacteurs à eau sous pression*).

Si l’intérêt en termes d’effet de contre-réaction (on parle de **coefficient de réactivité**) stabilisateur est visible, les résonances de capture neutronique par le ^{238}U ont dans un premier temps sérieusement préoccupé les concepteurs des réacteurs ; ce fut le cas du physicien italien Enrico Fermi qui, en 1942, travaillait à Chicago sur l’expérience qui déboucha sur la première pile atomique. Pour s’accommoder de l’uranium naturel, il faut absolument ralentir et **thermaliser** les neutrons (les rendre thermiques), donc

les amener de quelques milliers de kilomètres par seconde à quelques kilomètres par seconde. Cependant, entre ces deux domaines, le ^{238}U présente une véritable “forêt” de résonances (figure 5a) où risque de disparaître la majorité des neutrons sans provoquer de fissions. La difficulté est réelle, certes, mais la situation n’est pas totalement désespérée, comme Enrico Fermi le comprit. Il démontra que tels des kangourous capables de sauter par dessus des trappes sans tomber dedans, les neutrons ralentis par chocs successifs peuvent “sauter” par dessus les énergies de résonance à éviter. De plus, une structure hétérogène dans laquelle la zone où les neutrons se ralentissent

(le modérateur) est séparée de celle contenant les noyaux résonnants (le combustible) est favorable. Voilà un exemple de problème concernant le bilan neutronique, c’est-à-dire l’évaluation du facteur de multiplication k (encadré). Dans le chapitre III sera montrée l’importance de moduler les termes du bilan neutronique : productions par fission, captures et fuites. ●

Paul Reuss

Unité d’enseignement réacteurs et techniques de l’ingénieur
Institut national des sciences et techniques nucléaires
CEA/Saclay