

# LA MESURE DES SECTIONS EFFICACES :

## les techniques expérimentales et l'analyse des données

*Les sections efficaces des réactions induites par neutrons dans le domaine des résonances sont des données d'une grande importance pour les réacteurs nucléaires et, à l'heure actuelle, pour la transmutation des déchets nucléaires. En effet, la connaissance des sections efficaces de certains produits de fission et actinides mineurs générés dans les réacteurs est parfois insuffisante pour savoir si leur transformation par irradiation neutronique en un nucléide à vie plus courte ou de radiotoxicité moindre selon une chaîne de transmutation sera réalisable. Aussi, pour déterminer ces paramètres indispensables, des mesures sont effectuées dans un réacteur ou à l'aide d'un accélérateur dans le domaine des résonances qui s'étend d'une fraction d'électronvolt à quelques millions d'électronvolts (MeV).*



• • • • •  
*Vue aérienne de l'accélérateur linéaire d'électrons Gelina (Geel Electron Linear Accelerator) et de ses bases de vol qui s'étendent jusqu'à 400 m. Ce dispositif expérimental fournit une source pulsée de neutrons dont la résolution en énergie est la meilleure parmi les installations actuelles.*

## Des mesures nécessaires

La probabilité qu'un **neutron** interagisse avec un **noyau** peut varier de manière importante si son énergie cinétique varie, même d'une faible quantité, de l'ordre de l'**électronvolt**, voire moins. Les **résonances** observées dans les **réactions** correspondent à des états dans le **noyau composé**. Les propriétés de ces états, comme l'énergie d'excitation et les temps de demi-vie, sont appelées les *paramètres de résonance*. Plusieurs modèles permettent, à partir des paramètres de résonance, de calculer les **sections efficaces** de ces réactions pour une température donnée. La configuration du noyau composé est tellement complexe qu'il est cependant impossible de calculer à l'aide des modèles nucléaires la position des états excités et les probabilités de désexcitation selon les différents modes de décroissance (encadré B, *Les différents types d'interaction entre un neutron et un noyau*). La seule façon de les connaître est par conséquent de les mesurer.

À des énergies plus élevées, les résonances isolées ne sont plus visibles. En fait, avec des neutrons de forte énergie, les résonances s'élargissent. La structure observée alors dans les sections efficaces ne représente plus les états individuels du noyau mais une moyenne lisse de plusieurs résonances qui se recouvrent. La section efficace n'est plus dominée par les propriétés microscopiques à caractère aléatoire, donc imprévisible, mais par quelques paramètres statistiques qui peuvent être ajustés et parfois même calculés grâce à des modèles adaptés.

## Différentes techniques expérimentales

Pour étudier les réactions induites par des neutrons, une source de neutrons est évidemment indispensable. Les neutrons servant aux mesures de sections efficaces sont issus des réacteurs nucléaires ou sont produits par des accélérateurs de particules. Les réacteurs fournissent des neutrons de grande intensité et avec une distribution en énergie cinétique connue. En irradiant de la matière avec ces neutrons, le **taux de réaction** dépend



Hall dans lequel se trouve la cible où sont créés les neutrons et vue des entrées des tubes de temps de vol.

IRMM-Geel

de la section efficace dite **intégrale**, puisqu'elle est valable non pour une énergie de neutron bien précise mais pour une certaine distribution en énergie. Avec les accélérateurs de particules, des neutrons sont émis en utilisant certaines réactions nucléaires. Selon la réaction choisie, ces neutrons sont presque mono-énergétiques (avec généralement une énergie de plusieurs MeV) ou sont créés avec une distribution en énergie plus large. Si le faisceau de particules est pulsé, la méthode de mesure du temps de vol, dont le principe repose sur la différence de temps mis pour parcourir une distance donnée, peut être mise en œuvre pour déterminer l'énergie des neutrons. Les sections efficaces en fonction de l'énergie cinétique du neutron sont dites **différentielles** (en énergie). Si la distribution angulaire d'un produit de réaction, par exemple un neutron **diffusé**, est en outre mesurée, il s'agit alors de mesures **doublement différentielles**.

## Dans un réacteur

Les réacteurs nucléaires fournissent des neutrons provenant des réactions de **fission** dans le cœur. Ces neutrons ont une distribution en énergie cinétique avec un maximum autour de 1 à 2 MeV. Un **modérateur** constitué de noyaux de

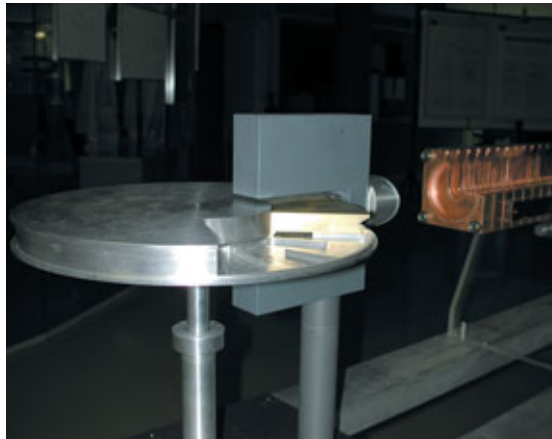
faible masse, comme le graphite ou l'eau, ralentit dans le réacteur ces **neutrons rapides** pour entretenir la **réaction en chaîne** de fissions. Après un certain nombre de collisions avec les noyaux du modérateur, les neutrons ont perdu beaucoup de leur vitesse initiale et se trouvent en équilibre thermique. La distribution de leurs énergies cinétiques est décrite par une fonction qui dépend de la température du modérateur. En se rapprochant du cœur du réacteur, les spectres de neutrons obtenus contiennent plus de neutrons rapides ou seulement partiellement **thermalisés**.

Il est également possible d'irradier un échantillon dans un réacteur dans un flux de neutrons donné et, après un certain temps d'irradiation, de définir les produits de réaction. Cela peut être fait à l'aide d'une analyse spectroscopique des produits de réaction ou par une analyse chimique ou **isotopique** de l'échantillon irradié. La détermination de la composition exacte de l'échantillon, avant et après irradiation par les neutrons, permet, en connaissant la dépendance en énergie du flux de neutrons et sa variation dans le temps, de remonter à des sections efficaces intégrées sur l'énergie.

L'avantage de cette méthode est que, grâce à la grande intensité des flux de neutrons disponibles dans les réacteurs



*Maquette de la cible d'uranium rotative de Gelina avec les conteneurs d'eau (le modérateur) en béryllium placés en dessous et au-dessus. La coupe montre la structure interne de la cible qui est en fait un disque fermé, l'uranium étant entouré d'acier. Le guide d'électrons est visible à droite.*



CEA

de recherche, les irradiations peuvent être effectuées avec très peu de matière. Cela permet entre autres l'étude de noyaux disponibles en faible quantité ou encore de noyaux de très courte **période** formés dans le réacteur. D'ailleurs, outre de petits échantillons, le combustible du réacteur lui-même peut être étudié de cette façon. Par contre, l'expérimentateur n'a pas directement accès aux sections efficaces en fonction de l'énergie. Ces mesures sont menées dans des réacteurs de recherche comme celui de l'Institut Laue-Langevin (ILL) de Grenoble.

### Avec un accélérateur

Il est pratiquement impossible de déterminer l'énergie cinétique d'un neutron incident sans information supplémentaire. La méthode de temps de vol (figure 1) est couramment employée pour effectuer des mesures en fonction

de l'énergie. Les neutrons sont émis à un instant donné par une réaction nucléaire initiée par un faisceau de particules chargées envoyées sur une cible. Il peut s'agir d'électrons sur une cible lourde constituée par exemple d'uranium ou de tungstène. Les électrons sont freinés dans la cible et des neutrons sont créés par des réactions induites par les photons du rayonnement de freinage. Au lieu d'électrons, il est aussi possible d'utiliser des protons sur une cible lourde. Dans ce cas, les neutrons sont engendrés par des réactions de **spallation**, où les noyaux dans la cible sont véritablement cassés en morceaux par les protons en émettant des neutrons.

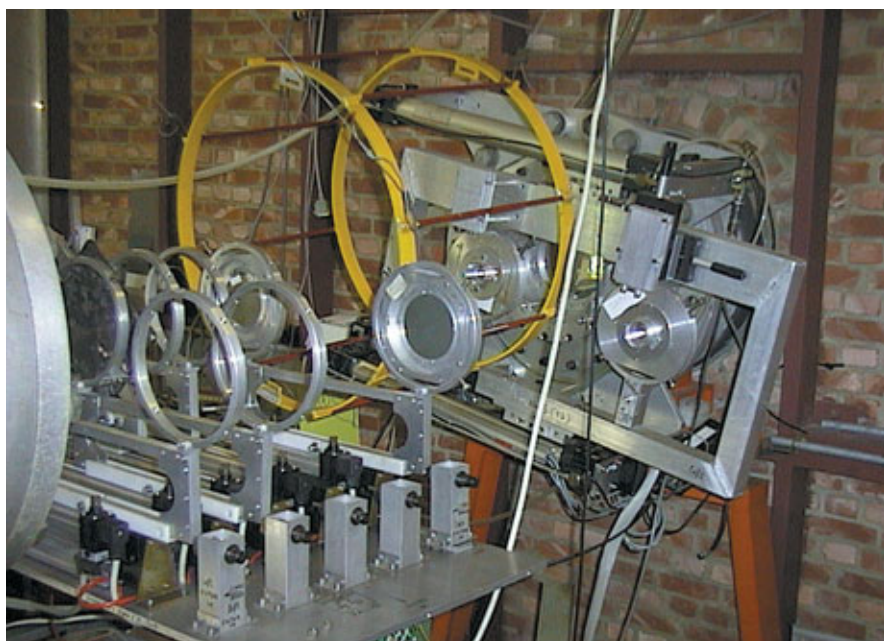
À l'instant où le faisceau de particules chargées frappe la cible et où des neutrons de toutes énergies sont créés, un chronomètre commence à compter le temps. Les neutrons obtenus partent dans toutes les directions : il faut les colli-

mater dans des guides. Un échantillon de la matière à étudier est placé à une distance de quelques mètres, voire quelques dizaines ou centaines de mètres. Les neutrons les plus rapides y parviennent en premier et, si une réaction avec l'échantillon a lieu, le temps du chronomètre est enregistré avec l'information de la réaction. Le temps que le neutron a mis pour parcourir la distance entre la cible et l'échantillon est le *temps de vol*, qui varie typiquement de la nanoseconde ( $10^{-9}$  s) jusqu'à quelques millisecondes ( $10^{-3}$  s). La distance étant connue, la vitesse du neutron et son énergie cinétique s'en déduisent. Les neutrons les plus lents arrivent ultérieurement et leurs réactions sont enregistrées avec un temps de vol plus élevé, donc une énergie plus faible. Une autre impulsion de l'accélérateur engendre à nouveau des neutrons et le cycle recommence.

Le spectre en énergie des neutrons produits par les accélérateurs contient beaucoup de neutrons rapides. Afin d'obtenir un plus grand nombre de neutrons de basse énergie, un conteneur d'eau peut être placé près de la source de neutrons. L'eau modère la vitesse des neutrons rapides et les neutrons émis de ce modérateur présentent une distribution en énergie avec davantage de neutrons lents. Par analogie avec la lumière, le terme de "source blanche" de neutrons est employé pour dire que des neutrons de toutes énergies sont présents.



*Passeur d'écrans servant à disposer une cible de transmission dans le faisceau de neutrons afin d'en mesurer l'atténuation ainsi que plusieurs filtres pour la détermination du bruit de fond.*



CEA



IRMM-Geel

Dispositif de quatre détecteurs de rayonnements gamma à base de  $C_6D_6$  (benzène deutéré) couplés à des photomultiplicateurs, situés autour d'une cible placée dans le faisceau de neutrons dans un tube à vide pour mesurer les réactions  $(n,\gamma)$ .



Un temps de vol mesuré ne correspond pas, à chaque fois, à exactement la même énergie. Il y a une certaine variation dans la création et la détection des neutrons qui a tendance à élargir les résonances. C'est ce qui est appelé la **résolution**. Cette notion est très importante dans l'interprétation des mesures des **résonances résolues**.

### Une analyse fine des données

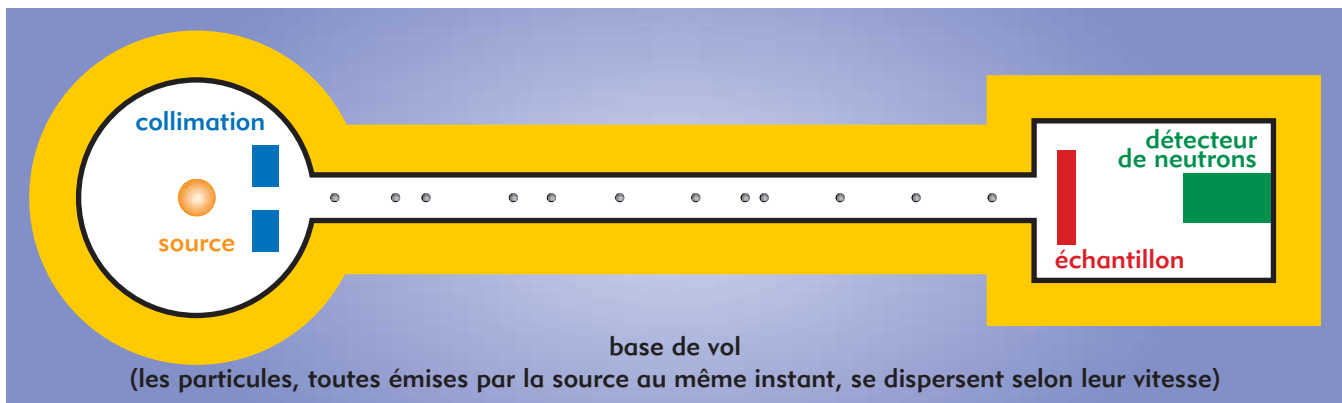
Plusieurs expériences peuvent être envisagées pour établir la structure des résonances et en extraire les paramètres. Les mêmes paramètres de résonance permettent de calculer aussi bien la section efficace de **diffusion**, de **capture**, de fission ou la somme de toutes, la **section efficace totale**.

Pendant, toutes les mesures ne sont pas sensibles aux mêmes paramètres de manière identique. Pour cette raison, plusieurs types d'expériences sont souvent nécessaires pour disposer d'un ensemble complet de paramètres de résonance.

La **section efficace totale** correspond à la probabilité qu'une réaction, quelle qu'elle soit, ait lieu. C'est la seule section efficace susceptible d'être mesurée de façon absolue, dans la mesure où elle n'est pas relative à une section efficace standard servant d'étalon. Elle est mesurée par la méthode de transmission (figure 1) qui consiste à déterminer l'atténuation d'un faisceau de neutrons à travers un échantillon de matière. Un détecteur de neutrons est disposé dans le faisceau et



**Figure 1. Principe de mesure par temps de vol en transmission.** Le rapport entre le nombre de particules de vitesse donnée détectées avec et sans l'échantillon (coefficient de transmission  $\tau$ ) est directement lié à la section efficace totale  $\sigma$  à cette vitesse par la relation  $\tau = \exp(-N\sigma e)$ , où  $N$  représente le nombre d'atomes par unité de volume dans l'échantillon et  $e$  l'épaisseur de l'échantillon. Les dimensions de ce dernier sont de l'ordre du centimètre, alors que la base de vol peut atteindre plusieurs dizaines de mètres.



l'expérimentateur mesure le flux avec l'échantillon placé dans le faisceau et en dehors. Si une réaction entre un neutron et un noyau se produit dans l'échantillon, le neutron n'atteint plus le détecteur. C'est pourquoi le détecteur doit se trouver loin de l'échantillon afin de ne pas détecter les neutrons diffusés à angle faible par celui-ci. Le rapport entre ces deux flux est le coefficient de transmission, lié directement à la section efficace totale.

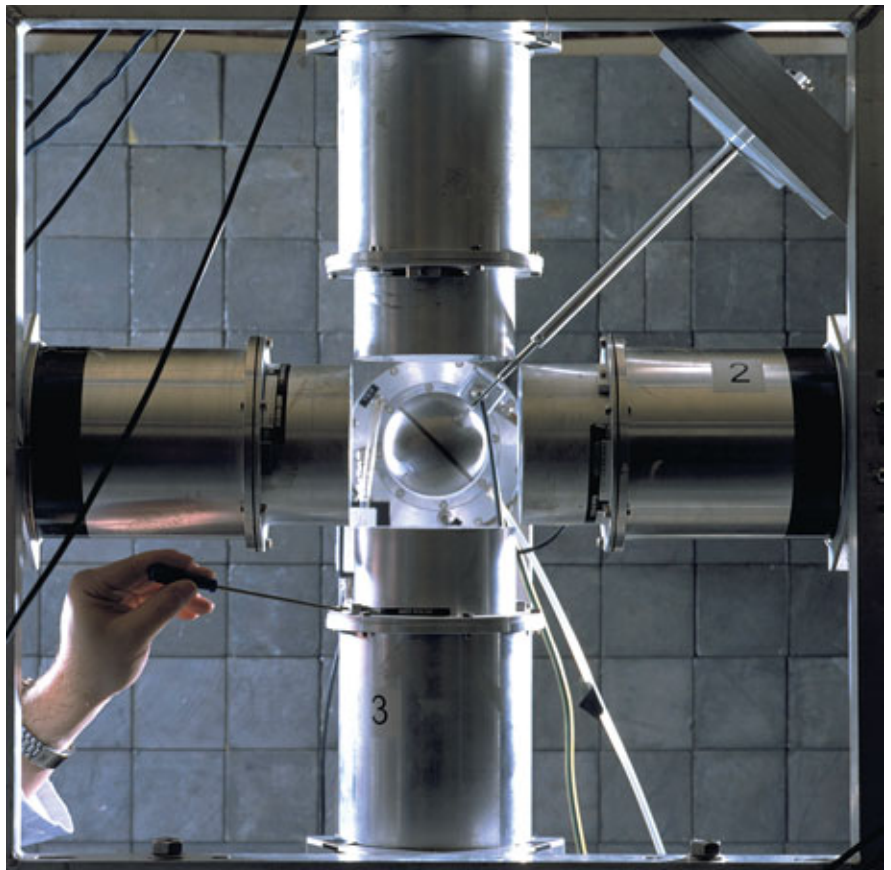
Les **sections efficaces d'absorption**, c'est-à-dire de **capture radiative** et de fission, sont mesurées par détection de leurs produits de réaction, donc le rayonnement gamma ( $\gamma$ ) ou les fragments de fission. Le détecteur de rayonnements  $\gamma$  est disposé en dehors du faisceau de neutrons et détecte les rayonnements  $\gamma$  de capture de neutrons émis par l'échantillon. Le détecteur de fission incorpore souvent l'échantillon et est placé directement dans le faisceau de neutrons.

Les **mesures de diffusion élastique neutronique** servent à caractériser les neutrons diffusés par l'échantillon. La diffusion a une distribution angulaire et les détecteurs de neutrons sont installés à différents angles, judicieusement choisis par rapport au faisceau incident. Dans le cas

de la **diffusion inélastique** ainsi que des réactions (**n,xn**), le noyau-cible est laissé dans un état excité qui ensuite décroît par émission de rayonnement  $\gamma$ . Ces réactions peuvent par conséquent aussi être mesurées par un détecteur de rayonnements  $\gamma$ .

Les **mesures de capture, fission et diffusion** sont relatives à une section efficace standard qui doit également être mesurée pour normaliser les résultats. En plus, il est nécessaire de déterminer la forme du flux de neutrons. Pour cela, l'expérimentateur utilise des détecteurs de flux basés sur des réactions avec les neutrons caractérisées par une section efficace standard et bien connue dans la plage d'énergie étudiée.

Les spectres bruts issus du traitement des signaux des détecteurs par le système d'acquisition ne sont pas encore des sections efficaces. Il convient de les normaliser et de les corriger de plusieurs effets, comme le bruit de fond. Des corrections dues aux temps morts, temps pendant lequel le système d'acquisition des données est en train de traiter un événement et est dans l'incapacité d'en prendre un autre en compte, sont également à apporter. Après ces corrections, des spectres avec lesquels les paramètres



● ● ● ● ●  
*Cible de krypton 84 gazeux contenu dans une sphère. Entourée de quatre détecteurs de rayonnements gamma, elle est destinée aux mesures de capture neutronique.*

IRMM-Geel





*Dispositif de huit détecteurs servant à mesurer des sections efficaces de diffusion élastique et inélastique.*



IRMM-Geel

de résonance peuvent être ajustés avec des logiciels informatiques sont obtenus. D'autres effets, souvent pris en considération pendant cet ajustement sont, par exemple, l'autoprotection qui correspond à l'affaiblissement de l'intensité du flux des neutrons à travers l'échantillon.

Les spectres de **rendement** de la réaction ou le coefficient de transmission en fonction du temps de vol sont liés à la section efficace recherchée mais sont encore brouillés par les phénomènes d'élargissement dus à l'effet Doppler (voir *Contrôle et pilotage des réacteurs à eau sous pression*, encadré 1) et à la résolution limitée. Dans la phase d'analyse, l'expérimentateur essaie d'extraire l'information qui caractérise la section efficace, c'est-à-dire les paramètres de résonance. Cela peut se faire pour une seule mesure, toutefois une analyse simultanée de plusieurs mesures, même de types différents, est aussi possible. Il faut que le résultat soit un jeu unique de paramètres de résonance avec lequel les sections efficaces de toutes les réactions sont susceptibles d'être décrites.

L'expérimentateur effectue les mesures d'une section efficace pour une réaction recherchée et dans un domaine d'énergie

limité par les contraintes des conditions expérimentales. Il essaie de trouver une modélisation qui décrit bien ces données et compare ses conclusions aux données déjà existantes. Par contre, les résultats des expériences ne sont pas employés tels quels dans des applications industrielles et notamment pour le calcul des réacteurs. Pour les utilisateurs, les données nucléaires sont compilées dans des bibliothèques spécifiques par des "évaluateurs" (voir *Améliorer et compléter les données nucléaires indispensables aux neutroniciens*). Une évaluation des données pour un isotope consiste à réaliser un fichier unique avec toutes les données concernant les réactions dans la gamme d'énergie allant d'une fraction d'électronvolt jusqu'à 20 MeV, voire plus. "L'évaluateur" trie les données existantes et surtout complète les parties inconnues par des choix basés sur des considérations théoriques ou de bon sens. ●

**Frank Gunsing**

Département d'astrophysique,  
de physique des particules,  
de physique nucléaire  
et d'instrumentation associée  
Direction des sciences de la matière  
CEA/Saclay