



**QuinteSciences**

# **Du noyau atomique au réacteur nucléaire**

*La saga de la neutronique*

**Paul Reuss**

# Du noyau atomique au réacteur nucléaire

La saga de la neutronique française

Paul Reuss

Illustration de couverture : visualisation des trajectoires de 144 neutrons émis par 9 sources ponctuelles dans un milieu « noir », c'est-à-dire purement capturant. Dessin réalisé par la méthode de Monte-Carlo et inspiré du *wall drawing* (dessin mural) # 289 (1976) de l'artiste américain Sol LeWitt (1928-2007), exposé en 2012 au centre Pompidou de Metz.

Imprimé en France  
ISBN : 978-2-7598-0739-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2013

*Pour les quatre-vingts ans de la neutronique, je dédie cette « saga » aux nombreuses personnes,  
jeunes et moins jeunes, qui ont découvert cette science au travers de mes cours,  
conférences et livres.*

*J'espère qu'elles prendront plaisir à la revisiter d'une façon un peu différente.*

*Un chaleureux merci à mes amis Michel, Mireille et Serge pour leur lecture attentive du manuscrit et  
leurs nombreuses suggestions.*

*P. R.*

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'igh'dicpm

# Table des matières

Avant-propos .....	1
--------------------	---

<b>Partie 1</b> Les bases physiques de la neutronique .....	3
---	---

<b>Chapitre 1</b> • Qu'est-ce que la neutronique ?.....	5
---	---

*Une approche intuitive de la neutronique. Quelques ordres de grandeur concernant les réacteurs électronucléaires et la population de neutrons qui assurent la réaction en chaîne de fissions. Comment traiter cette population neutronique ? L'équation de Boltzmann. Résoudre cette équation est difficile du fait de la complexité à la fois des probabilités d'interaction neutron-matière et des géométries adoptées dans les réacteurs.*

<b>Chapitre 2</b> • La découverte du neutron nécessitera vingt ans d'efforts ...	13
--	----

*À l'origine, la neutronique ne fut qu'une branche de la physique nucléaire qui elle-même ne fut qu'une branche de la physique atomique : ainsi cette saga se doit de commencer en évoquant Démocrite et les controverses, durant deux millénaires, autour de la théorie atomique. La découverte de la radioactivité par Becquerel (1896) est l'acte de naissance de la physique nucléaire. Mais il sera*

*difficile ensuite de départager les deux hypothèses possibles sur la structure des noyaux. La découverte du neutron par Chadwick (1932) marquera la véritable naissance de la neutronique.*

**Chapitre 3** • La diffusion, le ralentissement et l'absorption des neutrons 25

*Dès la découverte du neutron, les physiciens, notamment Fermi à Rome, s'intéressèrent aux interactions entre cette particule et la matière. Ils découvrirent rapidement que l'absorption neutronique par les noyaux se fait aisément, et d'autant mieux que la vitesse du neutron est faible. Ils découvrirent aussi qu'il est facile de ralentir un neutron en le laissant diffuser dans un matériau peu absorbant et constitué de noyaux légers.*

**Chapitre 4** • La découverte de la fission..... 33

*L'énigme de l'absorption neutronique par l'uranium... et sa solution, la fission. L'énergie de liaison des noyaux, variable selon leur masse, explique la libération d'énergie par la fission... et indique une autre voie, celle de la fusion. Cette dernière semble difficile. Mais l'émission de neutrons secondaires lors de la fission suggère l'idée d'une réaction en chaîne.*

**Chapitre 5** • Le concept de réaction en chaîne ..... 41

*Les neutrons secondaires et le principe de la réaction en chaîne. Les brevets de Joliot et ses collaborateurs. La découverte des neutrons retardés : les réacteurs seront des machines faciles à piloter.*

**Chapitre 6** • CP1, la première pile atomique ..... 49

*Le réglage de la réactivité. Les deux voies possibles pour une réaction en chaîne. Le choix d'un modérateur. La formule des quatre facteurs. L'équation de la diffusion. L'approche sous-critique et la divergence, le 2 décembre 1942, de la première pile de Chicago.*

**Chapitre 7** • Le plutonium, les produits de fission ..... 61

*Les premiers réacteurs de grande puissance, producteurs de plutonium. La découverte de l'effet xénon. Les produits de fission. Le samarium 149.*

**Chapitre 8** • La génération « zéro » de réacteurs ..... 71

*Dès la fin de la guerre, les grandes puissances s'intéressèrent à l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité. Mais quelle filière choisir ? La génération « zéro » montre quelques hésitations. C'est aussi à cette époque que paraissent les premiers ouvrages de neutronique.*

**Chapitre 9** • Le Commissariat à l'énergie atomique, la pile Zoé ..... 79

*La création du Commissariat à l'énergie atomique. La pile Zoé. Les réacteurs expérimentaux. Les premiers pas de la neutronique française.*

<b>Chapitre 10</b>	• Le paradigme de la neutronique, le réseau infini et régulier.....	87
	<i>Cellules et réseaux, la structure caractéristique des cœurs de réacteurs. Le mode fondamental. Les premiers enseignements de neutronique en France.</i>	
<b>Chapitre 11</b>	• Du calcul de réseau au calcul de cœur.....	93
	<i>Éléments de la théorie des facteurs <math>p</math>, <math>f</math> et <math>\eta</math>. Les calculs de cœur. Les principaux effets de température. Les piles Marius et César.</i>	
<b>Chapitre 12</b>	• L'évolution des noyaux lourds et la problématique du plutonium.....	103
	<i>Les propriétés du milieu multiplicateur de neutrons constituant le cœur d'un réacteur évoluent au cours du temps, en particulier avec l'apparition du plutonium. Pour conserver une réactivité suffisante, on ne peut pas épuiser totalement les matières fissiles des combustibles nucléaires. La question se pose donc de retraiter le combustible irradié pour y récupérer ces matières, et plus spécialement le plutonium. La perspective séduisante de la surgénération.</i>	
<b>Chapitre 13</b>	• La première génération de réacteurs.....	111
	<i>Les réacteurs de la filière uranium naturel - graphite - gaz. Une neutronique ambitieuse mais une capacité des ordinateurs encore limitée nécessiteront une grande ingéniosité dans les modèles de calcul.</i>	
<b>Interlude</b>	.....	121
<b>Chapitre 14</b>	• Les réacteurs d'Oklo.....	123
	<i>On découvre en 1972 que l'Homme n'avait pas inventé le réacteur nucléaire : la Nature l'avait fait deux milliards d'années avant lui !</i>	
<b>Partie 2</b>	<b>L'ère industrielle de la neutronique.....</b>	<b>127</b>
<b>Chapitre 15</b>	• La neutronique expérimentale .....	129
	<i>Comme dans toutes les sciences physiques, les théories de la neutronique doivent en permanence être confrontées et validées par des résultats expérimentaux. La particularité de la neutronique est qu'outre les modèles mathématiques, elle fait appel à de très nombreuses données nucléaires issues pour l'essentiel de mesures. On sera ainsi amené à distinguer les « mesures différentielles » concernant les données nucléaires et les « mesures intégrales » concernant des grandeurs neutroniques (taux de réaction, facteur de multiplication...) qui, en pratique, s'expriment avec des intégrales portant sur des données nucléaires.</i>	



**Chapitre 16** • La deuxième génération de réacteurs..... 137

*On a pu assister à fin des années 1960, en France, à une « guerre » entre la filière française uranium naturel - graphite - gaz et la filière américaine des réacteurs à eau : c'est finalement cette dernière qui l'emportera. Cela entraînera des réorientations des spécialistes et des codes de calcul. En parallèle, l'intérêt pour les réacteurs à neutrons rapides se maintient.*

**Chapitre 17** • ... et la deuxième génération des codes de neutronique .. 143

*Impulsée par le lancement de la deuxième génération de réacteurs et accompagnée des développements de l'informatique et de l'analyse numérique, la neutronique va voir de profonds changements dans sa façon d'aborder les problèmes et dans sa pratique quotidienne. Les premiers ouvrages de référence en français sur la neutronique.*

**Chapitre 18** • La préparation de la troisième génération de réacteurs... 153

*Pendant la vingtaine d'années de mise en place, en France, du parc de réacteurs à eau sous pression, puis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, les neutroniciens durent faire face à de nouveaux défis lancés par les concepteurs et ingénieurs du parc : allongement des durées d'irradiation, utilisation de poisons consommables, introduction du « mox » (combustible à plutonium)... La troisième génération de réacteurs se prépare.*

**Chapitre 19** • ... et la troisième génération de codes de neutronique .... 161

*Les nouveaux défis lancés par les ingénieurs aux neutroniciens obligèrent ces derniers à perfectionner leurs codes de calcul. Cependant une dynamique propre entraînée par les progrès de l'informatique et de l'analyse numérique s'est poursuivie. Validation et qualification.*

**Chapitre 20** • La quatrième génération de réacteurs... et les suivantes... 171

*Si l'on a pu parler, au début de notre siècle, de « renaissance du nucléaire » avec le Forum international génération 4 et un intérêt renouvelé de nombreux pays pour cette énergie, l'accident de Fukushima a marqué un coup d'arrêt. Il est trop tôt à l'heure où sont écrites ces lignes pour dire si l'élan est définitivement brisé. Il est clair en tout cas que l'enthousiasme des neutroniciens ne l'est pas comme peuvent en témoigner les travaux sur les six concepts retenus par le Forum et le projet Astrid, la spallation avec notamment le projet Myrrha et la fusion avec la machine Iter.*

**Chapitre 21** • Les études de protection contre les rayonnements et le risque de criticité..... 179

*Le risque principal et spécifique du nucléaire est celui de l'exposition aux rayonnements émis par les produits radioactifs. C'est la raison pour laquelle il faut que les ingénieurs soient capables de calculer correctement la propagation des rayonnements et de concevoir les écrans susceptibles de les arrêter. Ils doivent*

*par ailleurs s'appliquer à prévoir les accidents susceptibles de se produire dans une installation nucléaire — réacteur ou autre — et risquant de laisser s'échapper des produits radioactifs. Ces problèmes interpellent aussi la neutronique et les sciences connexes.*

**Chapitre 22** • Les neutrons comme outils d'exploration..... 189

*En termes d'investissement industriel, c'est dans la physique des réacteurs que la neutronique a trouvé son application principale et c'est celle qui a essentiellement été développée dans les chapitres précédents. Elle ne doit toutefois pas faire oublier les applications dans la recherche et le contrôle de composants, où les faisceaux de neutrons constituent un outil absolument irremplaçable d'exploration de la matière. Ce chapitre donnera un aperçu des nombreuses techniques qui ont été développées.*

**Chapitre 23** • La neutronique des armes nucléaires ..... 199

*La neutronique des armes est, pour des raisons évidentes, peu divulguée. Ce chapitre se limitera donc à quelques généralités sur ses spécificités : une équation de Boltzmann évolutive, un fort facteur de multiplication, une cinétique très rapide, un démarrage aléatoire de la réaction en chaîne nécessitant un réglage précis de l'instant d'injection des neutrons. Variantes pour l'obtention d'une situation surcritique.*

**Chapitre 24** • Les perspectives de la neutronique ..... 207

*La neutronique adoptera-t-elle le système international d'unité et corrigera-t-elle son jargon ? Il sera difficile de revenir sur ces habitudes. Verra-t-on disparaître le calcul déterministe ? L'auteur ne le pense pas... et ne le souhaite pas. Mais il est clair que le calcul « HPC » prendra de plus en plus d'importance en neutronique... Il faut toutefois rester conscient du danger que cela présente et ne jamais perdre de vue la physique.*

**Annexes** ..... 215

**Bibliographie** ..... 217

**Index des personnes citées** ..... 223

**Index des réalisations (installations, projets, sites nucléaires, organismes, sociétés, associations, enseignements, livres [italiques] et codes de calcul [petites capitales])** ..... 233

**Index des thèmes et notions physiques** ..... 241

Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'igh'dicpm

# Avant-propos

*Ceci n'est pas l'œuvre d'un historien mais le vécu d'un physicien qui a traversé les principales étapes des développements de la neutronique. C'est la raison du choix du terme « saga ». Cette saga ne prétend ni à l'objectivité — en particulier, « l'École française de neutronique » sera sans doute privilégiée — ni à l'exhaustivité — en particulier dans les noms cités.*

Le développement des réacteurs nucléaires a commencé dans les années qui ont suivi la deuxième guerre mondiale. Leur fonctionnement est fondé sur une réaction en chaîne de fissions : outre la libération d'énergie, deux ou trois neutrons sont émis lors de chaque fission ; après un cheminement plus ou moins compliqué dans le système, quelques-uns d'entre eux provoqueront de nouvelles fissions, émettant de nouveaux neutrons... et ainsi de suite : c'est la réaction en chaîne. La *neutronique* — néologisme bâti sur le modèle d'*électronique* — est la branche de la physique qui étudie ces phénomènes et permet d'en calculer les caractéristiques.

Contrairement à l'électronique qui est bien connue grâce à ses nombreuses applications grand public, la neutronique est restée assez confidentielle car elle n'a guère d'autre application que celle des réacteurs nucléaires ; ces machines sont souvent perçues comme mystérieuses et incompréhensibles en dehors d'un petit cercle de spécialistes.

Cette perception est évidemment inexacte. Comme toutes les autres sciences, la neutronique suppose quelques efforts pour être appréhendée. Mais comme toutes les autres sciences, elle a ses beautés qui méritent un tel effort.

Hormis quelques paragraphes dans les livres de vulgarisation sur l'énergie nucléaire, et un titre, aujourd'hui épuisé, de la collection *Que sais-je ?* des Presses universitaires de France, il n'existe pas, en français, d'ouvrage présentant la neutronique à un large public. C'est ce manque que je cherche à combler ici.

J'ai choisi une approche historique présentant les différentes facettes de la neutronique à peu près dans le même ordre que celui des découvertes et développements successifs des scientifiques. Mais je précise qu'il ne s'agit pas à proprement parler d'une histoire de la neutronique. C'est pourquoi j'ai préféré parler de *saga*. Je n'ai pas, en effet, la compétence d'un historien ; en revanche, je peux me targuer de bien connaître la neutronique, puisque je la pratique depuis une cinquantaine d'années au travers des développements auxquels j'ai participé au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) — aujourd'hui, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives — et des nombreux enseignements que j'ai animés, notamment au sein de l'unité du CEA dont c'est la mission, l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN).

Ayant travaillé en France, je privilégierai dans cette *saga* « l'École française de neutronique ». Mais la neutronique n'a pas de patrie et ce qui se fait ailleurs n'est guère différent de ce qui se pratique en France.

Mes diverses activités m'ont amené à cotoyer de très nombreux neutroniciens. J'en évoque quelques-uns dans ces pages, mais il clair qu'il n'était pas possible de tous les citer et j'ai décidé de me limiter, pour illustrer mes propos, à ceux que j'ai le mieux connus. Que ceux qui ne trouveront pas leur nom dans les pages qui suivent sachent que cela n'est pas un manque de reconnaissance mais seulement la conséquence d'une contrainte pratique : celle de ne pas lasser le lecteur. J'ai indiqué dans l'index non seulement les numéros de page où sont citées les personnes, mais aussi leurs dates, dans la mesure où j'ai pu les trouver.

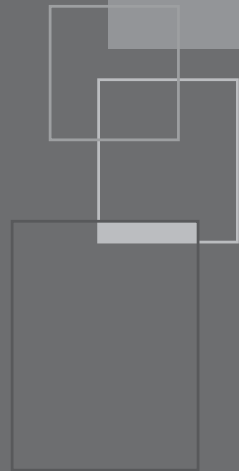
La lecture de cette *Saga de la neutronique* peut se faire à deux niveaux. Le lecteur ne recherchant qu'un aperçu pourra se limiter sans inconvénient aux seuls passages transcrits en blanc. Le lecteur plus exigeant sur les détails et pas trop rebuté par le formalisme mathématique pourra aussi se plonger dans les encadrés présentés en grisé.

Le premier chapitre donne un aperçu de ce qu'est la neutronique et comment elle intervient dans la physique des réacteurs nucléaires. Les chapitres qui suivent reprennent l'affaire à ses origines et présentent les acquis successifs. La première partie parle des découvertes, la seconde des développements ; entre les deux, l'interlude évoque les réacteurs fossiles d'Oklo. Le chapitre sur la neutronique expérimentale faite en soutien à tous les développements sera placé en charnière entre ces deux parties, juste après l'interlude. Les trois chapitres présentant des aspects connexes à l'électronucléaire — les études de protection et criticité, l'utilisation des neutrons dans la recherche et la neutronique des armes — termineront l'ouvrage avant sa conclusion.

# Partie

1

Les bases physiques  
de la neutronique



Vj ku'r ci g'kpvgpvkqpcmf 'igh'dicpm

# Qu'est-ce que la neutronique ?

*Une approche intuitive de la neutronique. Quelques ordres de grandeur concernant les réacteurs électronucléaires et la population de neutrons qui assurent la réaction en chaîne de fissions. Comment traiter cette population neutronique ? L'équation de Boltzmann. Résoudre cette équation est difficile du fait de la complexité à la fois des probabilités d'interaction neutron-matière et des géométries adoptées dans les réacteurs.*

Il y a en France quelques milliers de personnes qui connaissent la neutronique, quelques centaines qui la pratiquent, quelques dizaines qui la développent et aussi quelques dizaines qui l'enseignent (souvent les mêmes). Pour le monde entier, il faudrait à peu près multiplier par dix ces ordres de grandeur.

Comme cela a été évoqué dans l'avant-propos, la neutronique est l'étude et le calcul des phénomènes gouvernant le cheminement des neutrons et, plus particulièrement, la réaction en chaîne et la génération de puissance dans un réacteur nucléaire.

La figure 1.1 donne une idée intuitive du cheminement chaotique d'un neutron dans la matière : le neutron voyage en ligne droite tant qu'il ne percute pas un noyau d'atome ; alors, c'est soit une diffusion, soit une absorption ; si c'est une diffusion, le neutron poursuit sa route dans une autre direction ; si c'est une absorption, elle met fin à l'histoire du neutron. En somme, la neutronique n'est autre qu'un jeu de billard



à trois dimensions dans lequel des myriades de boules (les neutrons) sont lancées dans un espace plein d'obstacles (les noyaux atomiques).

Le neutron — l'un des constituants des noyaux atomiques — a une taille de l'ordre de  $10^{-15}$  m. Il n'interagit qu'avec les noyaux des atomes, d'une taille similaire, c'est-à-dire des objets qui auraient la dimension d'une framboise si l'on grossissait l'atome à la taille d'un terrain de football. C'est dire qu'un neutron a peu de chances d'interagir avec un noyau lorsqu'il traverse la matière. Effectivement, il doit traverser quelque cent millions d'atomes, soit un centimètre de matière solide ou liquide, avant de percuter un noyau. En d'autres termes, la figure du cheminement d'un neutron est à peu près à l'échelle 1.

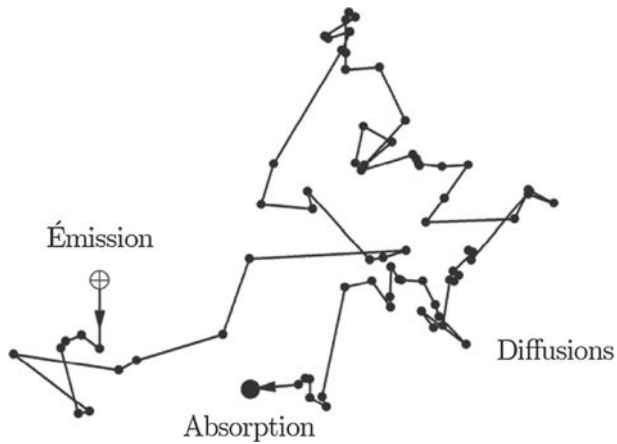


Figure 1.1 Cheminement typique de neutron dans la matière, projeté sur un plan (ici avec 77 diffusions entre l'émission et l'absorption).

On peut dire à la fois qu'il y a beaucoup et pas beaucoup de neutrons dans un réacteur nucléaire.

Sur l'exemple d'un réacteur à eau sous pression de 1 450 MW électriques (schématisé à la fin de ce chapitre), soit 4 350 MW thermiques, et sachant qu'il faut  $3,1 \cdot 10^{10}$  fissions pour obtenir un joule, on calcule que  $1,3 \cdot 10^{20}$  fissions se produisent par seconde. Chaque fission émettant en moyenne 2,4 neutrons, cela fait  $3,2 \cdot 10^{20}$  neutrons émis chaque seconde, et autant de figures de migration similaires à celle qui vient d'être présentée !

Ces neutrons effectuent ce parcours en  $1,5 \cdot 10^{-5}$  s en moyenne et se dispersent dans la quarantaine de mètres cubes qu'occupe le cœur du réacteur. Il y en a ainsi en permanence de l'ordre de  $10^5$  neutrons par  $\text{mm}^3$ . On peut ainsi dire qu'il y a beaucoup de neutrons.

Toutefois, si l'on compare au nombre d'atomes, les neutrons sont très peu nombreux, puisque dans la matière solide ou liquide usuelle se trouvent quelque  $10^{19}$  atomes par  $\text{mm}^3$ , soit  $10^{14}$  fois plus que de neutrons.

La population des neutrons apparaît ainsi comme un gaz extrêmement dilué qui se répand au sein de la matière... un peu comme le sucre dans une tasse de café.

Comment traiter la population neutronique ? Le problème essentiel de la neutronique sera, en effet, de mettre en équation ce « gaz » et, si possible, de résoudre ensuite l'équation.

Deux approches diamétralement opposées dans leur principe sont envisageables et sont effectivement utilisées en pratique.

L'approche dite *déterministe* consiste à supposer infini l'effectif des neutrons, c'est-à-dire à négliger les fluctuations de caractère statistique, qui sont effectivement certainement faibles si l'on se réfère aux ordres de grandeur qui viennent d'être donnés. Cette approche est similaire à celle qu'on utilise dans les équations de l'hydraulique où les molécules d'eau ne sont pas individualisées. C'est aussi l'approche qu'a développée Ludwig Boltzmann dans une équation relative aux gaz écrite en 1879 et restée fameuse. Comme les neutrons se comportent comme un gaz dilué, les neutroniciens n'ont eu qu'à la reprendre en adaptant les termes à leur problème (voir l'encadré 1). Même si sa résolution pose de nombreuses et importantes difficultés, l'intérêt de cette équation est qu'elle est rigoureuse. Peu de physiciens jouissent d'un tel privilège !

L'approche dite *probabiliste*, plus connue sous la dénomination de méthode de Monte-Carlo, s'apparente à des sondages d'opinion. L'idée d'un sondage d'opinion est d'interroger un « échantillon représentatif » par exemple 1 000 personnes bien choisies, ce qui est moins coûteux que d'interroger la population complète. De même, l'application de la méthode de Monte-Carlo en neutronique consiste, à l'aide d'un ordinateur, à simuler le plus précisément possible le cheminement d'un certain nombre de neutrons. Ensuite, on fait des statistiques sur les « réponses ». Comme pour les sondages, l'information ainsi obtenue est d'autant plus précise que l'effectif des neutrons simulés est important. Mais, comme en tout état de cause il sera nécessairement fini, les informations sont toujours entachées d'une incertitude statistique. (Il en est de même pour les sondages d'opinion, mais généralement les médias oublient de le préciser !) Le gros intérêt de la méthode de Monte-Carlo en neutronique est que l'on peut simuler presque exactement le cheminement des neutrons en décrivant précisément la géométrie et les interactions nucléaires (qui se font au hasard, d'où le nom de la méthode). L'inconvénient de cette approche est sa lourdeur, puisqu'elle nécessite de traiter beaucoup d'histoires de neutrons. Remarque : c'est par un traitement probabiliste des divers événements aléatoires qu'a été construite la figure précédente illustrant le parcours d'un neutron ; il est clair qu'il faudrait répéter beaucoup de telles histoires pour avoir une vision correcte de la population neutronique.

Les calculs que doivent faire les neutroniciens s'avèrent beaucoup plus difficiles que ceux qu'il faudrait faire pour savoir si le sucre s'est effectivement homogénéisé dans la tasse de café. Il y a à cela deux raisons : la première est que, contrairement aux

## 1 L'équation de Boltzmann

Du fait de l'infime concentration des neutrons par rapport aux noyaux atomiques, les interactions neutron-neutron sont totalement négligeables devant les interactions neutron-noyau. Les conséquences sont intéressantes : en ce qui concerne l'approche déterministe, l'équation de Boltzmann pour les neutrons s'avère *linéaire*, ce qui facilite son traitement numérique. En ce qui concerne l'approche *probabiliste*, les histoires de neutrons sont *indépendantes* les unes des autres, ce qui permet de les traiter simultanément sur un ordinateur parallélisé et accélère grandement la simulation si cette machine possède de nombreux processeurs.

La population des neutrons — l'inconnue du problème — est décrite par sa *densité*  $n$  qui dépend :

- du point de l'espace  $\vec{r}$  ;
- de la vitesse des neutrons  $v$  ;
- de leur direction de propagation  $\vec{\Omega}$  ;
- du temps  $t$ .

En pratique, on utilise le « flux » (terme peu adéquat mais consacré par l'usage) :

$$\Phi = vn.$$

Les noyaux d'atomes sont caractérisés par leurs *sections efficaces microscopiques*  $\sigma_x$  pour les diverses réactions  $x$  : diffusion (*scattering*)  $s$  et absorption  $a$  (capture  $c$  et fission  $f$ ).

On définit les *sections efficaces macroscopiques* par :

$$\Sigma_x(\vec{r}) = \sum_i N_i(\vec{r})\sigma_{xi},$$

où les  $N_i$  sont les *concentrations*, nombres d'atomes du milieu considéré par unité de volume. Elles permettent, par la relation :

$$R_x = \Sigma_x \Phi$$

d'exprimer les divers *taux de réaction* (nombres de réactions par unité de volume et unité de temps).

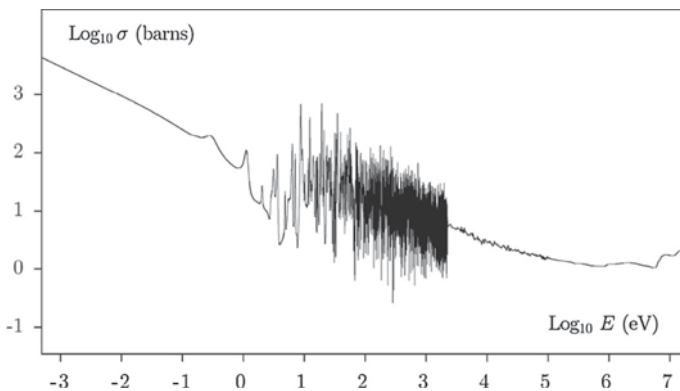
Sous sa forme dite intégro-différentielle, l'équation de Boltzmann s'écrit :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \Phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) + \text{div}[\vec{\Omega} \Phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)] + \Sigma(\vec{r}, v) \Phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \\ &= \int_0^\infty dv' \int_{(4\pi)} d^2\Omega' \Sigma_s[\vec{r}, (v', \vec{\Omega}') \rightarrow (v, \vec{\Omega})] \Phi(\vec{r}, v', \vec{\Omega}', t) \\ &+ \frac{1}{4\pi} \chi(v) \int_0^\infty dv' v \Sigma_f(\vec{r}, v') \int_{(4\pi)} d^2\Omega' \Phi(\vec{r}, v', \vec{\Omega}', t). \end{aligned}$$

Les trois lignes explicitent respectivement l'opérateur de transport, l'opérateur de diffusion et l'opérateur de production par fission ; les  $v$  neutrons émis par fission le sont de façon isotrope sur les  $4\pi$  stéradians et selon le spectre  $\chi$ .

Le lecteur n'est pas tenu de se souvenir de cette équation compliquée !

molécules de sucre, les neutrons s'étagent sur une vaste plage de vitesses. Ils sont émis par fission à environ 20 000 km/s. Les collisions successives qu'ils subissent généralement dans la matière vont progressivement les ralentir. En général, ils se mettent presque en équilibre thermique avec la matière, c'est-à-dire ils terminent leur parcours à des vitesses de l'ordre de 2 à 3 km/s seulement. Ce spectre de vitesses est important à prendre en compte car les sections efficaces, caractérisant les probabilités d'interaction entre les neutrons et la matière, varient énormément et de façon compliquée avec la vitesse du neutron. La figure 1.2 en donne un exemple.



**Figure 1.2** Exemple de courbe de section efficace : fission de l'uranium 235 induite par neutron  $E = \frac{1}{2}mv^2$  est l'énergie cinétique du neutron et  $\sigma$  la section efficace (échelles logarithmiques) [Source : Précis de neutronique, page 75].

- F -

Facteur X : voir X

Filière : 72, 87

Fission : 6, 8, 33, 34, 36, 37, 41 ; voir aussi Fragment et Produit de fission

Fission rapide (Facteur de -) : 52, 94, 114, 117

Fluence : 107, 209

Flux de neutrons : 8, 30, 209, 211

Forces entre les nucléons : 20

Fragment de fission : 63, 66

Fuite de neutrons : 59

Fusion : 37, 39, 177, 178

- G -

Gainage : 75

Gamma-matière (Interactions -) : 182

Génération de neutrons : 201

Gestion du combustible : 154, 156

Goutte (Modèle de la -) : 33, 34

- H -

Hansen (Équation de -) : 201, 202

Hétérogène (Méthode - de calcul de piles) : 115, 119

Homogénéisation : 118, 163

- I -

Incinération des déchets nucléaires : 174 ; voir aussi Séparation-transmutation

Intégrale effective : 54, 94, 96, 146

Interrogation neutronique : 193

Irradiation : 180

Irradiation technologique : 82

Isotope : 19

- K -

Kangourou (Effet -) : 52, 95, 97

- L -

Laplacien matière et laplacien géométrique : 60, 134

Léthargie : 29

**- M -**

Maquette (Expérience -) : 131, 134  
 Masse critique : 43, 45  
 Maximum de vraisemblance : 131  
 Maxwell (Spectre de -) : 97, 98, 101, 114  
 Mégawattjour par tonne : 107, 211  
 Mesures différentielle et intégrale : 130, 132, 133, 134, 170, 191  
 Migration : 6  
 Migration (Aire de -) : 58, 115  
 Mitigation : 181  
 Mode fondamental : 90  
 Modérateur : 51, 72, 75, 102, 115  
 Modération (Rapport de -, Optimum de -) : 73, 74  
 Moindres carrés (Méthode des -) : 132  
 Monochromateur : 193  
 Monte-Carlo (Méthode -, Théorie -) : 7, 175, 182, 183, 185, 186, 187, 212, 213, 214  
 Mox : 157, 158, 159, 160  
 Multicellule (Traitement -) : 145  
 Multigroupe (Théorie -) : 99, 100, 145  
 Multiplication (Facteur de -) : 42, 99, 117  
 Multiplication infini (Facteur de -) : 52, 53, 54, 58

**- N -**

Neutrino : 20  
 Neutron : 18, 19  
 Neutron polarisé : 196  
 Neutron rapide : 50  
 Neutron retardé : 46, 47, 48  
 Neutron thermique : 50  
 Neutronoscopie, Neutronographie : 193  
 Nordheim (Équation de -) : 47  
 Noyau : 17, 18  
 Noyau composé : 56  
 Nucléaire (Force -) : 20  
 Nucléide : 19, 210  
 Nucléon : 18

**- O -**

Oklo (Réacteurs d'-) : 123  
 Oscillation (Expérience d'-) : 135