

Table des matières

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

Partie 1 Les bases physiques de la neutronique	3
---	---

Chapitre 1 • 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.

Chapitre 2 • 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
	<i>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.</i>	
Chapitre 4	• La découverte de la fission	33
	<i>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.</i>	
Chapitre 5	• Le concept de réaction en chaîne	41
	<i>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.</i>	
Chapitre 6	• CP1, la première pile atomique	49
	<i>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.</i>	
Chapitre 7	• Le plutonium, les produits de fission	61
	<i>Les premiers réacteurs de grande puissance, producteurs de plutonium. La découverte de l'effet xénon. Les produits de fission. Le samarium 149.</i>	
Chapitre 8	• La génération « zéro » de réacteurs	71
	<i>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.</i>	
Chapitre 9	• Le Commissariat à l'énergie atomique, la pile Zoé	79
	<i>La création du Commissariat à l'énergie atomique. La pile Zoé. Les réacteurs expérimentaux. Les premiers pas de la neutronique française.</i>	
Chapitre 10	• 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>	
Chapitre 11	• Du calcul de réseau au calcul de cœur.....	93
	<i>Éléments de la théorie des facteurs p, f et η. Les calculs de cœur. Les principaux effets de température. Les piles Marius et César.</i>	
Chapitre 12	• 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</i>	

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.

Chapitre 13 • La première génération de réacteurs..... 111

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.

Interlude 121

Chapitre 14 • Les réacteurs d'Oklo..... 123

On découvrit en 1972 que l'Homme n'avait pas inventé le réacteur nucléaire : la Nature l'avait fait deux milliards d'années avant lui !

Partie 2 L'ère industrielle de la neutronique..... 127

Chapitre 15 • La neutronique expérimentale..... 129

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.

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^e 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 233

Index des thèmes et notions physiques 241