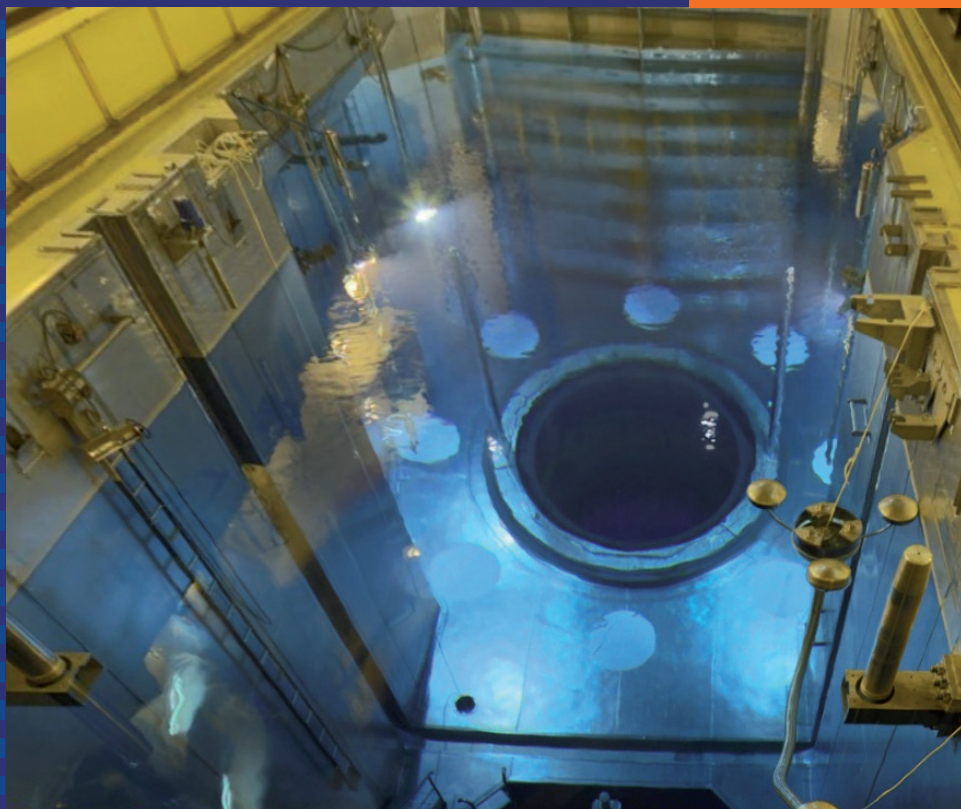


# La physique des réacteurs nucléaires

**Serge Marguet**

3<sup>e</sup> édition





*La physique  
des réacteurs nucléaires*

3<sup>e</sup> édition

## Dans la même collection

### *Traitement des aléas naturels – Théorie et pratique*

*industrielle des statistiques extrêmes*  
N. Bousquet (coord.), à paraître, 2018

### *Électrotechnique des centrales électriques*

C. Schroeder, à paraître, 2018

### *Réseaux publics de distribution d'électricité – Fonctionnement et protection*

M. Oddi, 2016

### *La maintenance des centrales nucléaires*

J.-P. Hutin, 2016

### *Efficacité énergétique – Des principes aux réalités*

P. Baudry, 2015

### *Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique*

D. Noël, 2014

### *Guide international du comptage intelligent*

F. Toledo, 2012

### *Numériser le travail – Théories, méthodes, expérimentations*

S. Lahlou, V. Nosulenko, E. Samoylenko, 2012

### *L'énergie hydraulique, 2<sup>e</sup> édition*

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2012

### *Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité (1946-2006) : 60 années de contrôle électrique*

J. Lecouturier, 2012

### *La physique des réacteurs nucléaires*

S. Marguet, 2011

### *Marketing critique : le consommateur collaborateur en question*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, A. Bonnemaizon, 2010

### *Graphes et algorithmes*

M. Gondran, M. Minoux, 2009

### *Gestion de la complexité dans les études quantitatives de sûreté de fonctionnement des systèmes*

M. Bouissou, 2008

### *Calcul de champ électromagnétique : exemples d'application*

J.-C. Vérité, J.-P. Ducreux, G. Tanneau, P. Baraton,  
B. Paya, 2007

### *Les télécommunications au cœur du système électrique français (1946-2000)*

A. Giandou, C. Leclère, J. Lecouturier,  
J.-M. Spetebroodt, H. Thibert, A. Vilatte, 2007

### *Innover en marketing, 15 tendances en mouvement*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, 2006

### *Éléments finis pour l'ingénieur : grands principes et petites recettes*

P. Thomas, 2006

### *Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel*

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

## Chez le même éditeur

### *Les accidents de réacteurs nucléaires*

S. Marguet, 2012

### *Le risque radioactif : Devenir des radionucléides dans l'environnement et impacts sur la santé*

J.C. Amiard, 2013

### *Dosimétrie externe : Applications à la radioprotection*

A. Fausso, 2011

### *Toxicologie nucléaire environnementale et humaine*

M.-T. Ménager, J. Garnier-Laplace, M. Goyffon,  
Coordonnateurs, 2009

### *La défense en profondeur : contribution de la sûreté nucléaire à la sécurité industrielle*

E. Garbolino, 2008

### *Introduction à l'analyse probabiliste des risques industriels*

H. Procaccia, 2008

### *Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil*

(Rapport à l'Académie des Sciences)

Y. Dautray, 2005

### *Le risque nucléaire*

H. de Choudens, 2001

### *L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques (Rapport à l'Académie des Sciences)*

R. Dautray, 2001

### *Matériaux du nucléaire*

Académie des Sciences, 2000

### *Manuel pratique de radioprotection*

D.-J. Gambini, R. Granier, 3<sup>e</sup> édition, 2007

### *Radioprotection dans les installations nucléaires*

H. de Choudens, G. Troesch, 1997

## Dans la collection Socio-économie de l'énergie

### *Sociologie de la qualité des mondes de l'énergie*

O. Guillaume, à paraître, 2017

### *Pratique sociale et usage de l'énergie*

I. Garabuau-Moussaoui, M. Pierre, 2016

### *Énergie et transformations sociales – Enquête sur les interfaces énergétiques*

J. Cihuelo, A. Jobert, C. Grandclément, 2015

## Hors collection

### *Le stockage de l'électricité - Un défi pour la transition énergétique*

EDF, 2017

# *La physique des réacteurs nucléaires*

**Serge Marguet**

Expert en neutronique à EDF

Préface de Laurent Stricker

Préface de la 3<sup>e</sup> édition : Andrew Sherry

*Édition* : Emmanuel Leclerc  
*Couverture* : Isabelle Godenèche  
*Fabrication* : Estelle Perez  
*Composition* : Thierry Decke  
*Impression* : Lego

*Photo de couverture* :

Vue de la piscine du réacteur de Cattenom et de son puits de cuve (photo logiciel EDF/R&D VVPRO avec permission, remerciements Olivier Petitprez).

© 2018, Lavoisier, Paris

ISBN : 978-2-7430-2309-6 (3<sup>e</sup> édition, 2017)

ISBN : 978-2-7430-1540-4 (2<sup>e</sup> édition, 2013)

ISBN : 978-2-7430-1105-5 (1<sup>re</sup> édition, 2011)

ISSN : 1773-5300

*À mes parents Josette et Daniel qui ont supporté mes études.  
À ma femme Agnès qui me supporte... encore !  
À mes enfants Hélène et Vincent qui m'excitent  
le système immunitaire !*

*Ce livre n'aurait pu voir le jour sans le soutien amical de Paul Reuss, dont les conseils ont été précieux et la relecture attentive. Si la Neutronique est un royaume, Paul en est forcément un de ses princes, car sa compétence n'a d'égale que sa modestie, deux domaines dans lesquels je dois encore beaucoup progresser ! Mon premier contact avec Paul, si j'ose dire, date de mon tout premier jour d'embauche à EDF, le 1<sup>er</sup> septembre 1987, où mon chef avait posé sur mon bureau entièrement vide un listing du code COCCINELLE et le fameux traité de neutronique de Jean Bussac et Paul Reuss, version 1985 de couleur « caca d'oie » peu amène, et que tout le monde dans le Département appelait « Le Reuss », n'en déplaise à Bussac. Lorsqu'à une troisième question de physique à mes nouveaux collègues, on m'eut répondu l'habituel « – C'est dans le Reuss ! », je me suis dit qu'il allait sans doute falloir que je lise ce gros bouquin de fond en comble. Je ne pense pas avoir perdu mon temps ! J'ai eu la chance de pouvoir par la suite suivre les cours de Paul en tant qu'auditeur libre dans le cadre du DEA de Physique des Réacteurs à Saclay, et la clarté de ses propos m'a toujours étonné.*

*Je tiens aussi à remercier mon collègue et grand spécialiste de la Physique des Réacteurs, Michel Lam-Hime pour avoir pris (beaucoup !) sur son temps pour relire ce livre. Je pense aussi à quelques collègues et amis proches : Philippe Tétart, Patrick Erhard et David Couyras, qui ont stoïquement servi de cobayes à mes idées les plus farfelues, à des heures parfois plus que tardives. De nombreuses améliorations viennent de leurs judicieux commentaires. Je tiens enfin à remercier Jean-Michel Delbecq, mon ancien chef de service et membre du comité éditorial d'EDF, qui a tout de suite cru dans ce projet, ainsi que Laurent Stricker, qui m'a fait l'honneur de préfacer ce livre.*

*Lors de la traduction de ce livre en anglais, il a bénéficié d'une nouvelle introduction de la part du Professeur Andrew Sherry qui a d'importantes responsabilités scientifiques au National Nuclear Laboratory en Angleterre, et que je remercie ici, de même que mon collègue Ansar Calloo qui s'est investi sans compter dans ce nouveau défi d'une publication internationale.*



## *Préface à la première édition*

En pleine crise économique mondiale, quel meilleur signe montrer que la publication de ce livre de physique des réacteurs ?

La fin du suréquipement en matière de moyens de production d'électricité en Europe, les immenses besoins en énergie de pays comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, ainsi que la prise de conscience mondiale que l'énergie est devenue un bien rare et cher, tout cela milite pour que tous les moyens de production d'électricité soient utilisés.

Si on ajoute la volonté officielle de lutter contre le changement climatique, les économies d'énergie, les énergies renouvelables et le nucléaire deviennent des priorités. L'énergie nucléaire connaît aujourd'hui une relance vigoureuse, qui se manifesterá notamment en France par le démarrage d'un réacteur *EPR* en 2012, 80 ans après la découverte du neutron par James Chadwick en 1932. La courte histoire de l'énergie nucléaire civile montre qu'il n'y a pas de possibilité d'utiliser durablement cette ressource sans un niveau de sûreté irréprochable, partout et à tout instant.

Les spécialistes distinguent trois fonctions de sûreté : le confinement des produits radioactifs, leur refroidissement et la maîtrise de la réactivité. Pour satisfaire ces fonctions, la neutronique, la mécanique des fluides, la thermique, la résistance des matériaux, la chimie, sont des sciences indispensables. La neutronique est la science qui décrit et explique le comportement des neutrons dans la matière et les réactions qu'ils y induisent. Pour garantir la maîtrise de la réactivité, une solide connaissance de la neutronique est nécessaire pour définir les dispositions à prendre dès la conception du réacteur et au cours des décennies d'exploitation ensuite.

La compréhension des phénomènes physiques souvent complexes qui se déroulent dans une installation nucléaire et qui apparaissent à leurs exploitants par l'intermédiaire des indicateurs enregistreurs et des calculateurs des salles de commandes, est un enjeu essentiel pour une exploitation de qualité, qu'il s'agisse

de réacteurs de puissance (440 en service en 2009, le double ou le triple dans doute en 2030 ou 2040), de réacteurs de recherche pour lesquels la compréhension doit être encore plus approfondie, de laboratoires, ou d'installations du cycle du combustible qui vont se multiplier de par le monde.

Ce livre couvre l'ensemble des aspects de la neutronique : les experts, les ingénieurs, les étudiants y trouveront les références scientifiques leur permettant d'acquérir, puis d'entretenir et d'améliorer leurs compétences.

Je forme le vœu qu'il soit utilisé par de nombreux ingénieurs au service de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire, énergie durable, pour le plus grand bien de l'humanité.

Laurent Stricker

*Chairman of the World Association of Nuclear Operators (WANO)*



## *Préface de l'édition de 2017*

La fourniture d'une énergie propre, peu chère et fiable est un challenge global. Les prédictions d'augmentation de la population mondiale, particulièrement en Afrique et en Asie, nous disent que les besoins en énergie vont augmenter de 50 % en 2035 par rapport à ceux de 2015. L'évidence de l'influence de l'Homme sur le climat donne de l'importance aux technologies à faible production de carbone, le nucléaire, la captation du carbone, qui devraient être développés et déployés largement. L'accord de Paris sur le climat (2016) a montré que les gouvernements sont décidés à réduire les émissions de gaz à effet de serre en accélérant le déploiement de telles technologies.

Dans ce contexte, l'énergie nucléaire est un élément important du mix énergétique global. Aujourd'hui, l'énergie nucléaire compte pour plus de 10 % de la production mondiale d'énergie électrique ; plus de 440 réacteurs sont opérationnels dans le monde, produisant une énergie propre sur le réseau. En 2017, il y a plus de réacteurs en construction qu'à n'importe quel moment des 25 dernières années. Soixante réacteurs sont en construction dans quatorze pays, dont plus d'un tiers en Chine et certains autres dans des pays primo-accédants comme les Emirats Arabes Unis.

Néanmoins en 2011, le tremblement de terre de Tōhoku et le tsunami qui en a résulté, ont conduit à l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi qui a mis l'accent sur la sûreté nucléaire et les trois fonctions cruciales de sûreté, à savoir confiner la radioactivité, assurer le refroidissement du combustible et contrôler la réactivité.

Pour assurer ces trois fonctions de façon adéquate, les différentes sciences de la neutronique, thermohydraulique, physique des réacteurs, science des matériaux, mécanique et thermochimie ont toutes un rôle essentiel à jouer. Chacun de ces domaines techniques a un rôle important en soi, mais aussi les synergies avec les autres matières. Néanmoins, la physique des réacteurs a un rôle particulier dans sa compréhension du comportement des neutrons et des réactions qu'ils induisent. Pour assurer le contrôle de la réactivité des cœurs, il est nécessaire de

parfaitement comprendre le comportement des neutrons. C'est grâce à cette bonne compréhension qu'on peut garantir un design efficace et un fonctionnement sûr.

Ce livre détaille tous les aspects de la physique neutronique et propose un corpus de connaissances et de références qui sera très utile à ceux qui étudient ou bien qui sont en charge de problèmes relatifs aux réacteurs nucléaires.

Je recommande ce livre aux étudiants, ingénieurs, experts et aux opérateurs de réacteur curieux, comme un moyen d'acquérir et de maintenir leurs connaissances au dernier état de l'art dans un domaine aussi important que la science nucléaire.

**Andrew H. Sherry**

*Chief Scientist, National Nuclear Laboratory*



# Table des matières

<b>Préface à la première édition</b> .....	IX
<b>Préface de l'édition de 2017</b> .....	XI
<b>Introduction</b> .....	1

## Chapitre 1

### Notions de physique nucléaire

1. Les corps chimiques .....	5
2. Les molécules .....	8
3. Les isotopes .....	9
4. L'atome .....	12
5. Le nombre d'Avogadro .....	14
6. L'Équivalence masse-énergie .....	18
7. Le neutron .....	21
8. L'électron .....	23
9. Le proton .....	26
10. Le cortège électronique .....	26
11. Le noyau atomique .....	38
12. Le spin nucléaire .....	48
13. La radioactivité .....	49
13.1. La radioactivité $\alpha$ .....	58
13.2. La radioactivité $\beta^-$ .....	62
13.3. La radioactivité $\beta^+$ .....	65
13.4. La capture électronique .....	66
13.5. La radioactivité $\gamma$ .....	66

13.6. La conversion interne.....	67
13.7. La désintégration $\beta^-$ , n ou désintégration neutron .....	69
13.8. La fission spontanée.....	69
14. Les filiations radioactives .....	70
15. Chaîne des noyaux lourds.....	75

## *Chapitre 2*

### **Interaction des neutrons avec la matière**

1. La diffusion du neutron.....	79
1.1. La diffusion élastique sur cible fixe.....	80
1.2. La diffusion élastique sur cible mobile.....	86
1.3. Le modérateur.....	88
1.4. La diffusion inélastique.....	89
2. Les transmutations .....	92
2.1. L'absorption .....	94
2.2. La capture neutronique ou capture radiative ( $n, \gamma$ ) .....	94
2.3. La capture ( $n, \alpha$ ) .....	95
2.4. Les autres captures .....	95
2.5. Les réactions à haute énergie .....	96
2.6. Bilan énergétique.....	96
3. La fission.....	99
4. La fusion.....	99
5. Les sections efficaces.....	100
5.1. Définitions de base.....	101
5.2. Mesure des sections efficaces .....	102
5.3. Notion de flux, taux de réaction .....	103
5.4. Notion de résonance .....	105
6. La fission de l'atome.....	117
6.1. Énergie de fission .....	121
6.2. La fission spontanée.....	123
6.3. Les neutrons produits par fission .....	124
6.3.1. Spectre théorique de fission .....	128
6.3.2. Énergie moyenne des neutrons de fission.....	131
6.4. Les photons de fission prompts .....	132
6.5. Les neutrons de fission retardés.....	132
7. Les Produits de fission issus de la fission .....	136
7.1. Rendement direct d'un isotope .....	138
7.2. Rendement total de chaîne .....	139
7.3. Rendement cumulé d'isotope.....	140
7.4. Ralentissement des produits de fission dans la matière.....	140

### Chapitre 3

#### Interaction des rayonnements électromagnétiques et des particules chargées avec la matière

1. Le rayonnement électromagnétique .....	142
2. Le rayonnement X .....	142
3. Interaction des photons avec la matière .....	146
3.1. Atténuation d'un faisceau de photons .....	146
3.2. Transport des photons .....	148
3.3. La diffusion de Rayleigh-Thomson .....	149
3.4. L'effet photo-électrique .....	149
3.5. L'effet Compton .....	154
3.6. La matérialisation de paires .....	158
3.7. Cumul des effets .....	160
3.8. Rayonnement diffusé et facteurs d'accumulation .....	161
3.9. Application de l'atténuation des photons dans la matière .....	163
3.10. Les photo-neutrons .....	167
3.11. La photofission .....	167
4. La mesure des rayonnements .....	168
5. Interaction des électrons avec la matière .....	169
5.1. L'ionisation .....	172
5.2. La chambre de Wilson .....	172
5.3. L'excitation .....	174
5.4. Le rayonnement de freinage ou bremsstrahlung .....	175
5.5. L'annihilation .....	175
6. L'effet Tcherenkov-Mallet .....	176
7. Les particules chargées : diffusion de Rutherford .....	178
8. Transfert d'énergie à la matière .....	183
9. Création de paires ion-électron par ionisation .....	188
10. Variation de charge .....	189
11. Les produits de fission .....	189
12. Parcours dans la matière .....	190
13. Effets biologiques des rayonnements .....	192

### Chapitre 4

#### Le ralentissement des neutrons

1. Présentation historique .....	195
2. Théorie du ralentissement élastique .....	199
2.1. Choc élastique sur cible fixe .....	199
2.2. Statistique des chocs .....	207
2.3. Effet du mouvement du noyau-cible .....	210
2.4. Probabilité de transfert en fonction de l'angle .....	212
2.5. Choc isotrope .....	214

3. Théorie du ralentissement continu .....	215
3.1. Le ralentissement par l'hydrogène non absorbant .....	220
3.2. Prise en compte de l'absorption de l'hydrogène .....	229
3.3. Prise en compte d'un spectre de source .....	230
3.4. Le ralentissement par une cible plus lourde que l'hydrogène .....	231
3.5. Influence du spectre de fission rapide .....	239
3.6. Mélange de modérateurs .....	242
4. Le ralentissement dans un milieu absorbant .....	243
4.1. L'absorption lentement variable : le modèle de Greuling-Goertzel .....	248
4.2. Le ralentissement dans un milieu à section efficace résonnante ..	251
4.3. Le ralentissement inélastique .....	253
4.4. L'approximation $Q_n$ du ralentissement .....	256

## *Chapitre 5*

### **L'absorption résonnante**

1. Modèle de section efficace .....	261
1.1. Historique .....	261
1.2. Théorie du noyau intermédiaire .....	262
1.3. Relation de réciprocité .....	264
2. Formalisme de Breit-Wigner à un niveau .....	265
2.1. Section totale .....	266
2.2. Section de diffusion .....	267
2.3. Section de capture radiative .....	268
2.4. Section de fission .....	269
2.5. Section d'absorption .....	270
2.6. Résonances négatives .....	270
2.7. Distribution des résonances .....	271
2.8. L'absorption résonnante .....	273
3. L'autoprotection .....	275
4. Ralentissement à travers des résonances .....	277
5. Le formalisme de Livolant-Jeanpierre .....	280
5.1. Milieu homogène .....	280
5.2. L'équation de structure fine .....	282
5.3. Tabulation des sections effectives .....	283
6. Modélisation de l'opérateur de ralentissement par l'isotope résonnant	285
6.1. L'approximation résonance étroite (NR) .....	285
6.2. L'approximation résonance large (WR) .....	286
6.3. L'approximation statistique (ST) .....	287
6.4. Le modèle Toute Résonance (TR) .....	288
7. Milieu hétérogène .....	290
7.1. Problème à deux milieux .....	290



7.2. Traitement de l'interaction spatiale .....	294
7.3. Généralisation à plusieurs régions d'autoprotection.....	297
8. Traitement de l'interaction énergétique : autoprotection des mélanges	298
9. Le modèle Résonance Intermédiaire dans le calcul du flux .....	300
10. La méthode des tables de probabilité.....	303

## Chapitre 6

### L'effet Doppler

1. Analyse intuitive de l'effet Doppler.....	310
2. Section efficace effective d'interaction avec la matière « chaude » .....	312
2.1. Distribution des vitesses des noyaux cibles de la matière : modèle de gaz libre .....	312
2.2. Définition de la section efficace effective .....	313
2.3. Cas d'une section inversement proportionnelle à la vitesse .....	313
2.4. Cas d'une section constante.....	314
3. L'élargissement Doppler généralisé : formule de Bethe-Placzek .....	318
4. L'élargissement Doppler d'une section de type Breit-Wigner .....	321
4.1. Rappel sur la formule de Breit-Wigner.....	321
4.2. Formule de Voigt.....	323
4.3. La fonction d'interférence .....	330
5. Application à la grande résonance de l'uranium 238 .....	331
6. Effet de la température sur les sections efficaces .....	333
6.1. Première fonction de Voigt $\psi$ .....	333
6.2. Fonction d'interférence.....	335
6.3. Évaluation numérique asymptotique .....	336
6.4. Dérivées des fonctions de Voigt en fonction de l'énergie .....	336
6.5. Quelques propriétés mathématiques des profils de Voigt .....	338
7. L'intégrale de résonance effective .....	339
7.1. Milieu homogène .....	339
7.2. Milieu hétérogène.....	342
7.3. Calcul analytique de l'intégrale de résonance élargie : le modèle de Campos-Martinez .....	347
8. Température effective Doppler .....	352
8.1. Effet des liaisons cristallines.....	352
8.2. Effet de l'hétérogénéité du champ de température .....	352

## Chapitre 7

### Thermalisation des neutrons

1. Historique.....	359
2. Théorie des gaz de Boltzmann .....	360

3. Application aux neutrons .....	363
4. Spectre de flux de neutrons .....	367
5. L'équation de thermalisation .....	369
6. Le modèle de Wigner-Wilkins : un gaz de protons libres .....	373
7. Spectre asymptotique .....	376
8. Solution simplifiée de l'équation de thermalisation avec absorption ..	380
9. Le modèle d'Horowitz-Tretiakoff .....	384
9.1. Principe .....	384
9.2. Cas d'une absorption en inverse de la vitesse .....	390
9.3. Cas d'un réacteur fini (avec fuites) .....	390
9.4. Équation de thermalisation du milieu homogène .....	391
10. Le modèle de gaz lourd .....	392
11. Le modèle différentiel de Cadilhac, Horowitz et Soulé .....	393
12. Application du modèle de Cadilhac en milieu hétérogène .....	397
13. Représentation graphique du flux sur tout le spectre d'énergie .....	402
14. Cas de modérateurs réels .....	402
15. Échauffement et refroidissement par diffusion .....	404
16. L'absorption thermalisée .....	407
16.1. Calcul du taux de réaction dans un spectre thermique pur .....	409
16.2. Définition du coefficient de Westcott $g_{(T)}$ .....	410
17. Calcul du taux de réaction dans un spectre thermalisé réel .....	415
17.1. Formalisme de Westcott : introduction des coefficients $r$ et $s$ ....	417
17.2. Extension du modèle pour d'autres noyaux : le modèle logarithmique linéaire .....	422
17.3. Raccordement progressif à l'épithermique .....	424
17.4. Raccordement de Westcott .....	426
17.5. Évaluation de la fonction de coupure .....	427
17.6. Limitations du formalisme de Westcott .....	429
18. Application du formalisme de Westcott .....	429

## *Chapitre 8*

### **L'équation de Boltzmann**

1. Présentation de l'équation de Boltzmann .....	433
1.1. Notion de flux .....	436
2. L'équation intégral-différentielle du transport .....	441
2.1. L'équation du transport intégral-différentielle en cinétique .....	441
2.2. L'équation intégral-différentielle en statique .....	443
2.2.1. Établissement de l'équation intégral-différentielle .....	443
2.2.2. Le problème à valeur propre .....	446
2.2.3. Solutions de l'équation du transport dans des cas simples .....	449
2.2.4. Théorie du transport adjoint .....	453
2.2.5. Le problème aux valeurs propres du réacteur critique ....	462
2.2.6. Flux sans choc .....	464

3.	Forme intégrale de l'équation de Boltzmann.....	472
3.1.	L'opérateur de Peierls .....	472
3.2.	La forme intégrale de volume.....	475
3.3.	Les probabilités de première collision.....	477
3.3.1.	Définition des probabilités de première collision .....	477
3.3.2.	Calcul des probabilités de première collision .....	480
3.3.3.	Méthode de la corde moyenne de Dirac .....	484
3.4.	Géométrie à une dimension.....	486
3.5.	Les probabilités de fuite .....	488
3.5.1.	Probabilité de fuite d'une plaque .....	488
3.5.2.	Probabilité de fuite d'une sphère.....	489
3.5.3.	Probabilités internes d'une sphère creuse .....	490
3.5.4.	Probabilité de fuite d'un cylindre.....	491
3.5.5.	Notion d'opacité .....	493
3.5.6.	Probabilité de fuite multi-choc .....	494
3.5.7.	Probabilité de fuite en transitoire .....	496
3.5.8.	Méthode des courants d'interface .....	497
3.6.	L'équation intégrale en bidimensionnel .....	501
3.7.	Application à un milieu infini avec source de fission.....	501
3.8.	Solution graphique de l'équation de dispersion .....	503
4.	Troisième forme de l'équation du transport :	
	la forme intégrale surfacique.....	505
4.1.	Lemme de Placzek.....	506
4.2.	Équation du flux à l'interface .....	507
4.3.	Application au problème de Milne .....	509
4.4.	Deuxième théorème de complémentarité.....	509
5.	Notion de fonction caractéristique.....	510
6.	Transformée de Fourier de l'équation de Boltzmann.....	514
6.1.	Formalisme .....	514
6.2.	Traitement par fonction de Green .....	516
7.	L'équation du transport à une dimension .....	520
7.1.	Généralités.....	520
7.2.	Méthode de Lafore et Millot, méthode de Case .....	523
7.2.1.	Historique.....	523
7.2.2.	Théorie .....	526
7.3.	Méthode de Perovich .....	529
8.	Solution asymptotique de diffusion.....	530
8.1.	Relaxation exponentielle du flux loin de la source.....	530
8.2.	Établissement de l'équation de dispersion à partir du flux asymptotique .....	537
8.3.	Absorption critique limitant l'établissement de la solution asymptotique.....	539
8.4.	Définition d'un coefficient de diffusion à partir de l'équation du transport .....	540
9.	Équations du transport en géométrie tridimensionnelle .....	544

## Chapitre 9

### Les méthodes de calcul en transport neutronique

1. La méthode des ordonnées discrètes $S_n$ .....	548
2. La méthode $S_n$ exacte .....	557
3. La méthode des polynômes de Legendre .....	557
3.1. Théorie et application au transport 1D .....	557
3.2. Transport 1D multi-groupe et équivalence en diffusion .....	572
4. La méthode $SP_n$ .....	575
5. Traitement des interfaces entre milieux .....	578
6. La méthode des harmoniques sphériques .....	581
6.1. Principe .....	581
6.2. Approximation $P_1$ .....	587
7. Le problème de Milne .....	590
8. La méthode $DP_n$ .....	593
9. Le demi-plan infini : problème de l'albédo .....	595
9.1. Notion de fonctions propres discrètes .....	595
9.2. Méthode de Ganapol par transformée de Laplace .....	600
10. La méthode $B_n$ .....	605
11. La méthode $T_n$ .....	614
12. La méthode $F_n$ .....	618
13. La méthode $C_n$ .....	618
14. La méthode $SK_n$ .....	622
15. La méthode des caractéristiques .....	623
15.1. Principe .....	623
15.2. Géométrie hétérogène .....	625
15.3. Les probabilités directionnelles .....	630
16. La formulation paire-impair de l'équation du transport .....	631
16.1. L'équation paire-impair du flux .....	633
16.2. La méthode nodale variationnelle de la formulation paire/impair .....	636
16.3. La méthode de Ritz .....	639
17. La méthode variationnelle en transitoire .....	642
18. La méthode Gauss-Seidel sur les sources en transitoire .....	644
19. L'approche probabiliste : la méthode de Monte-Carlo .....	645
19.1. Concepts de base de la méthode de Monte-Carlo .....	645
19.2. Application au transport des neutrons : un exemple simple à deux dimensions .....	649
19.3. Erreur statistique .....	658
19.4. Calcul des grandeurs d'intérêt .....	658
19.5. Généralisation, biaisage .....	659
19.6. Calcul du facteur anti-trappe .....	661
19.7. La méthode de Monte-Carlo à mi-parcours .....	663

19.8. L'approximation quasi-déterministe de l'importance .....	667
19.9. Un exemple de calcul Monte-Carlo .....	669

## Chapitre 10

### La diffusion neutronique

1. La loi de Fick .....	671
1.1. Évaluation du coefficient de diffusion des neutrons .....	672
1.2. Discussion des hypothèses .....	677
1.3. L'équation de diffusion dans un champ de forces .....	682
2. Conditions aux limites d'un milieu entouré de vide en théorie de la diffusion .....	683
2.1. Approximation P1 .....	685
2.2. Approche variationnelle de Rulko .....	685
3. Conditions aux limites entre deux milieux quelconques .....	689
3.1. Notion d'Albédo d'un réflecteur .....	690
4. L'Équation de la diffusion en énergie .....	691
5. Équation de la diffusion à un groupe d'énergie .....	693
6. Diffusion « thermique » .....	695
6.1. Équation de diffusion « thermique » .....	695
6.2. Interprétation de la longueur de diffusion thermique .....	697
6.3. Où l'on retrouve la formule des 4 facteurs .....	699
7. Diffusion d'une source dans un milieu non multiplicateur .....	700
7.1. Source ponctuelle isotrope dans un milieu diffusant infini .....	700
7.2. Source ponctuelle dans un milieu diffusant infini .....	703
7.3. Source filaire infinie dans un milieu diffusant infini .....	709
7.4. Source plane infinie dans un milieu diffusant infini .....	711
7.5. Source plane infinie dans une plaque plane diffusante infinie ...	713
7.6. Source volumique dans un mur plan diffusant infini .....	715
7.7. Mur source semi-infini .....	716
7.8. Extension au milieu infini homogène .....	717
7.9. Développement selon les fonctions propres du Laplacien .....	718
7.10. Superposition des flux induits par des sources ponctuelles .....	720
7.11. Plaque absorbante dans un milieu source infini .....	721
7.12. Plaques minces absorbantes, méthode de Galanin .....	722
7.13. Transitoire de Flux .....	723
8. Mesure de la longueur de diffusion d'un modérateur par atténuation .....	725
9. La méthode des neutrons pulsés .....	730
10. La diffusion dans un mur homogène .....	736

11. Transitoire de thermalisation d'une source en théorie de la diffusion.....	740
11.1. Milieu infini.....	740
11.2. Milieu fini .....	741
11.3. Décomposition en fonctions propres .....	742
11.4. Cas d'une source à impulsion .....	744
12. La diffusion polycinétique .....	745

### Chapitre 11

#### La réactivité d'un réacteur nucléaire

1. Facteur de multiplication de la réaction en chaîne .....	753
1.1. Approche déterministe de la réaction en chaîne .....	753
1.2. Approche stochastique de la réaction en chaîne .....	754
2. Formule des « quatre facteurs ».....	759
2.1. Analyse détaillée de la formule des quatre facteurs.....	760
2.1.1. Facteur de multiplication du combustible $\eta$ .....	761
2.1.2. Facteur de fission rapide $\varepsilon$ .....	764
2.1.3. Ralentissement des neutrons – Facteur anti-trappe.....	765
2.1.4. Le domaine thermique : facteur d'utilisation thermique..	765
2.2. Effet du rapport de modération technologique sur la formule des quatre facteurs.....	766
3. Prise en compte des fuites dans le cas d'un réacteur fini .....	767
4. Facteur de multiplication à deux groupes.....	768
5. Facteur de multiplication par bilan de taux de réaction.....	774
6. Effet de réactivité ou écart de réactivité .....	778
6.1. Comparaison des effets sur un combustible UOX.....	779
6.2. Effet en réactivité d'une variation d'isotopie .....	781
7. Calcul de réactivité par la théorie des perturbations.....	782
8. Évolution de la réactivité en fonction de l'avancement dans le cycle ..	784

### Chapitre 12

#### Théorie de la pile critique homogène

1. Introduction .....	785
2. Notion de Laplacien matière et géométrique .....	789
3. Condition de criticité .....	790
4. Notion de taille critique : le modèle fil.....	791
4.1. Analyse de la criticité.....	791
4.2. L'approche par immersion invariante.....	795
5. Mode fondamental d'un réacteur de géométrie simple.....	798

5.1. Plaque plane .....	798
5.2. Parallélépipède .....	802
5.3. Cylindre infini .....	804
5.4. Cylindre fini .....	806
5.5. Le disque .....	808
5.6. Sphère .....	811
5.7. L'hémisphère .....	814
5.8. Les polygones .....	815
5.9. Traitement des singularités en 2D .....	816
5.10. Distance d'annulation du flux .....	824
5.11. Réacteur annulaire .....	825
5.12. Réacteur annulaire .....	826
6. Réacteur tridimensionnel quelconque .....	830
7. Théorie de l'âge de Fermi .....	832
7.1. Historique .....	832
7.2. Rappel sur le ralentissement .....	833
7.3. Application à la diffusion des neutrons .....	834
7.4. Relation entre l'âge de Fermi et le temps .....	835
7.5. Raccordement de la théorie de l'âge à la théorie de la diffusion .....	837
7.6. Équation à deux groupes d'énergie en théorie de l'âge de Fermi .....	839
7.7. Théorie de l'âge-diffusion .....	842
8. Diffusion multigroupe .....	843
9. Monocinétique des réacteurs en théorie de la diffusion avec source .....	844
10. Calcul à source : généralisation en multi-groupes .....	847

## *Chapitre 13*

### **Le réflecteur neutronique**

1. Quelques considérations mathématiques sur le réflecteur .....	849
2. Réflecteur en théorie de la diffusion .....	851
2.1. Cas du réacteur plaque entouré d'un réflecteur infini .....	851
2.2. Réacteur plaque homogène réfléchissant .....	855
2.3. Cas du réacteur cylindrique infini entouré d'un réflecteur infini .....	858
2.4. Cas du réacteur cylindrique infini entouré d'un réflecteur fini .....	862
2.4.1. Calcul monocinétique .....	862
2.4.2. Calcul à deux groupes d'énergie .....	865
2.4.3. Flux en deux dimensions .....	867
3. Définition de l'albédo réflecteur .....	868
3.1. Calcul de l'albédo d'un réflecteur plan .....	870
3.2. Calcul de l'albédo d'un réflecteur cylindrique .....	871
3.3. Calcul de l'albédo d'un réflecteur sphérique .....	872
3.4. Calcul de l'albédo d'un réflecteur supérieur d'un réacteur cylindrique .....	872
3.5. Longueurs d'extrapolation et d'annulation du flux .....	874

3.6. Application numérique .....	876
4. Théorie du réflecteur à deux groupes d'énergie .....	877
4.1. Réflecteur plan .....	877
4.2. Réacteur cylindrique infini réfléchi à deux groupes sans remontée en énergie .....	879
4.3. Calcul du flux combustible .....	879
4.4. Flux dans le réflecteur .....	882
5. Réacteur plan et réflecteur fini sans remontée en énergie .....	884
6. Le modèle d'albédo « Magic Shell » d'Ackroyd .....	886
7. Le modèle de réflecteur Lefebvre-Lebigot .....	889
7.1. Théorie des réflecteurs « équivalents » .....	889
7.2. Calcul des caractéristiques du cœur combustible .....	895
7.3. Point de fonctionnement cœur/réflecteur .....	897
7.4. Effet des contre-réactions thermohydrauliques .....	899
7.5. Calcul des constantes du réflecteur mathématique .....	900
8. Matrice d'albédo .....	901
9. Prise en compte de la remontée en énergie .....	903
10. La correspondance diffusion/transport .....	908
11. Le modèle Reuss-Nisan .....	908
12. Le modèle Mondot .....	914
13. La méthode BETA généralisée .....	916
14. Absorption dans le réflecteur .....	917
15. Albédos doublement-différentiel .....	918

## Chapitre 14

### Le réacteur hétérogène

1. Pourquoi l'hétérogénéité ? .....	921
2. La théorie Gurevitch-Pomerantchuk de l'absorption résonnante hétérogène .....	923
2.1. Aspects théoriques .....	923
2.2. Intégrale de résonance effective .....	927
3. Modélisation de la structure fine de flux .....	928
3.1. Probabilité de première collision .....	929
3.2. La théorie Amouyal-Benoist-Horowitz (A-B-H) .....	931
3.2.1. Théorie classique du facteur d'utilisation thermique .....	931
3.2.2. Théorie A-B-H du facteur d'utilisation thermique .....	933
3.3. Approche multicellule en deux dimensions .....	941
3.3.1. Position du problème .....	941
3.3.2. Facteur de Dancoff-Ginsburg .....	943
3.3.3. L'effet Dancoff dans différentes géométries : problèmes d'écran .....	946
3.3.4. Effet du facteur Dancoff sur l'absorption résonnante .....	956
3.3.5. Généralisation à un réseau .....	956



3.4.	L'approximation rationnelle de Carlvik .....	958
3.5.	Hétérogénéité en composition isotopique .....	963
3.6.	Effet d'ombre sur l'intégrale de résonance .....	964
3.7.	Calcul hétérogène $P_{i,j}$ des réacteurs rapides par la méthode des perturbations .....	967
4.	Le problème de l'équivalence transport-diffusion .....	970
4.1.	Position du problème .....	970
4.2.	Homogénéisation spatiale .....	972
4.3.	Approche multigroupe .....	973
4.4.	L'équivalence SPH de Kavenoky-Hébert .....	974
4.5.	Reconstruction du flux entre différents opérateurs .....	977
4.5.1.	Milieu réfléchi (infini) .....	979
4.5.2.	Milieu fini .....	983
4.6.	Homogénéisation spatiale en présence de fuite .....	986
4.7.	Équivalence du réacteur à plaques .....	989
4.8.	Équivalence par conservation des taux de réaction .....	994
5.	Théorie de l'homogénéisation en diffusion .....	997
5.1.	Homogénéisation flux-volume .....	997
5.2.	Homogénéisation des constantes neutroniques hétérogènes ....	999
5.3.	Homogénéisation flux moyen sur flux au bord, normalisation de Selengut .....	1001
5.4.	Reconstruction de puissance fine .....	1003
5.4.1.	Convolution par une structure fine de puissance .....	1003
5.4.2.	Approche par perturbation : méthode de Rahnema .....	1004
5.5.	Facteurs de discontinuité .....	1009

## Chapitre 15

### La physique du cycle du combustible

1.	Notation schématique de la physique du cycle .....	1011
2.	Les désintégrations .....	1012
3.	Les réactions sous flux neutronique .....	1012
4.	Les équations de Bateman .....	1013
4.1.	Les noyaux lourds .....	1014
4.2.	Les produits de fission .....	1015
4.3.	Les produits d'activation .....	1016
5.	Forme vectorielle de l'équation de Bateman .....	1017
6.	Calcul des grandeurs d'intérêt du cycle du combustible .....	1018
6.1.	Le bilan massique .....	1018
6.2.	Le taux de combustion .....	1018
6.2.1.	Taux de combustion thermique .....	1018
6.2.2.	Taux de combustion en fission (pour les réacteurs rapides)	1022
6.2.3.	Évolution du combustible en fonction du taux de combustion .....	1023

6.3. L'activité.....	1023
6.4. Le calcul de la Puissance Résiduelle.....	1024
6.4.1. La méthode par sommation.....	1024
6.4.2. Les Courbes de Fission Élémentaires.....	1027
6.4.3. Les Courbes de Valeurs Élémentaires.....	1029
6.4.4. La méthode des courbes de fission continue.....	1031
6.4.5. Le calcul des sources de particules et du spectre.....	1034
6.5. Le calcul des débits de dose $\gamma$ et neutrons.....	1034
7. Le calcul de l'évolution des noyaux.....	1038
7.1. Filiation radioactive : la formule de récurrence.....	1038
7.2. Cas des noyaux lourds.....	1040
7.3. Cas des produits de fission.....	1042
7.4. Compositions de référence de quelques combustibles REP.....	1043
8. Principe de réduction des chaînes.....	1046
8.1. Chaîne de noyaux lourds pour le calcul de la réactivité des réacteurs.....	1047
8.2. Réduction de chaîne.....	1054
9. Un exemple d'activation : les barres de contrôle.....	1056
10. Physique du xénon.....	1057
10.1. Production du xénon.....	1057
10.2. Saturation du xénon.....	1058
10.3. Empoisonnement du xénon après l'arrêt du réacteur.....	1061
11. Physique du samarium.....	1063
12. Physique du gadolinium.....	1064
13. Le cycle industriel du combustible en France.....	1065

## *Chapitre 16*

### **Les contre-réactions neutroniques**

1. Effet de la température combustible sur le coefficient de multiplication.....	1073
1.1. L'effet Doppler combustible.....	1073
1.2. Effet Doppler sur le comportement du réacteur.....	1076
2. Effet de la température du modérateur.....	1077
2.1. Définition.....	1077
2.2. Effet des fuites et des absorbants.....	1080
2.3. Effet de la pression.....	1082
2.4. Modérateur graphite.....	1082
2.5. Déplacement du spectre neutronique.....	1083
2.6. Effet de vidange.....	1084
3. Effet de bore dans les réacteurs à eau pressurisée.....	1085
3.1. Efficacité différentielle du bore.....	1085
3.2. Effet du bore sur le coefficient de température modérateur.....	1086
4. Coefficient de puissance.....	1087

5. Modélisation des contre-réactions .....	1087
5.1. Un modèle simple : la contre-réaction de puissance .....	1090
5.2. Un modèle évolué de contre-réactions : le modèle Lefebvre-Seban .....	1091
6. Correction d'historique isotopique .....	1102

## Chapitre 17

### La cinétique des réacteurs

1. Les neutrons prompts .....	1105
1.1. Évolution d'un réacteur hypothétique à neutrons prompts .....	1105
1.2. Calcul du flux : hypothèse du réacteur-point .....	1112
2. Les neutrons retardés .....	1114
2.1. Fraction de neutrons retardés .....	1117
3. Effet des neutrons retardés sur la cinétique des réacteurs .....	1120
4. Équation de la cinétique neutronique .....	1122
4.1. Concentration des précurseurs .....	1124
4.2. Cinétique du réacteur-point (« point-reactor kinetics ») .....	1126
4.3. Combustible mobile .....	1127
5. L'équation de Nordheim .....	1127
6. Notion de « prompt jump » : injection d'un échelon de réactivité .....	1132
7. La théorie de l'âge dans l'équation de cinétique des neutrons thermiques .....	1134
8. Équations de cinétique réduite .....	1138
9. Cinétique avec source de neutrons imposée .....	1139
10. Spectre des neutrons retardés .....	1141
11. Perturbations au premier ordre .....	1148
12. Réactimètre numérique .....	1149
13. Détermination pratique du temps de génération des neutrons prompts .....	1153
14. Principales causes de variation de la réactivité .....	1155
14.1. Augmentation de la quantité de noyaux fissiles .....	1155
14.2. L'augmentation de la modération des neutrons .....	1156
14.3. Diminution de la capture des neutrons .....	1156
15. Accident de réactivité : insertion d'une très grande réactivité .....	1158
15.1. Analyse à un groupe de neutrons retardés .....	1158
15.2. Analyse du cas $\rho \gg \beta$ : l'accident de réactivité .....	1160
15.3. Insertion de réactivité faible $0 < \rho \ll \beta$ .....	1163
16. Insertion d'anti-réactivité .....	1164
17. Synthèse des cas .....	1166
18. Créneau de réactivité .....	1167
19. Chute des barres, insertion d'une grande anti-réactivité .....	1169
20. Rampe de réactivité .....	1170
21. Transitoire de réactivité .....	1174
22. L'excursion de puissance .....	1174
22.1. Le modèle Nordheim-Fuchs .....	1175

22.2. Les travaux de Chernick .....	1180
22.3. Le modèle de Bethe-Tait .....	1182
23. L'approche sous-critique : démarrage d'un cœur .....	1186
24. Stabilité du réacteur .....	1188
25. Oscillations spatio-temporelles du xénon .....	1190
26. Effets cinétiques mécaniques .....	1195
27. Le bruit neutronique .....	1196
27.1. Notion de bruit, analyse spectrale .....	1197
27.2. Corrélation entre neutrons .....	1199
27.3. La méthode Feynman- $\alpha$ .....	1204
27.4. Effet des neutrons retardés .....	1212
27.5. Application à la mesure des instabilités de taux de vide .....	1214
27.6. Application à la détection de vibrations .....	1216

## *Chapitre 18*

### **Les méthodes de calcul en diffusion neutronique**

1. Notion de maillages de calcul .....	1219
2. Équations de diffusion multigroupe .....	1222
2.1. Cas général .....	1222
2.2. Diffusion à « 1,5 » groupes .....	1223
2.3. Diffusion adjointe .....	1224
2.4. Prise en compte des réactions surproductrices de neutrons .....	1225
3. La méthode des puissances .....	1227
3.1. Généralités .....	1227
3.2. Représentation matricielle .....	1228
3.3. Accélération de Tchebychev .....	1230
4. La méthode des Différences Finies .....	1233
4.1. Formalisme .....	1233
4.2. Les conditions aux limites .....	1237
4.3. Mise sous forme matricielle .....	1238
5. Les Méthodes Nodales .....	1239
5.1. La méthode nodale d'ordre 4 .....	1240
5.2. Approximation quadratique des fuites transverses .....	1248
5.3. La méthode AFEN .....	1251
6. La méthode des Éléments Finis .....	1252
7. Les méthodes variationnelles .....	1256
7.1. Principe .....	1256
7.2. Prise en compte des conditions limites .....	1258
8. Le calcul des barres de contrôle .....	1260
8.1. Effet physique d'une barre .....	1260
8.2. Poids des grappes : approche par perturbation .....	1261
8.3. Mesure de l'efficacité des barres des REP .....	1264
8.4. Calcul de l'efficacité des barres .....	1266

---

8.5. La décomposition analytique du domaine barré.....	1269
9. Le traitement des instrumentations.....	1273
9.1. Modélisation par trace.....	1273
9.2. Modélisation de l'instrumentation de l'EPR : le modèle KTM.....	1274
9.2.1. Traitement KTM des sections efficaces.....	1278
9.2.2. Traitement KTM des structures fines de puissance.....	1279
<b>Conclusion</b> .....	1285
<i>Annexe</i>	
<b>La physique des réacteurs et les codes de neutronique à EDF ...</b>	1287
<b>Références bibliographiques</b> .....	1307
<b>Index</b> .....	1349

**Serge Marguet** est expert en neutronique à EDF où il a contribué au développement de la chaîne de calcul de cœurs de réacteur nucléaire depuis ces 30 dernières années. Il a dirigé les équipes de recherche d'EDF sur les accidents graves, sujet sur lequel il a été nommé expert européen en charge de l'évaluation des projets communautaires. Il enseigne également la physique des réacteurs à l'École nationale supérieure des risques industriels de Bourges depuis plus de 12 ans, ainsi qu'au sein de l'Institut de transfert de technologie d'EDF.

***La physique des réacteurs nucléaires*** est le premier ouvrage français conçu pour aborder de façon progressive et détaillée la complexité théorique du comportement des neutrons, en situation sûre ou accidentelle. Fruit de l'expérience pédagogique de l'auteur et de son expertise internationale reconnue en sûreté nucléaire, il est rapidement devenu un ouvrage de référence au sein de la communauté nucléaire française.

Après des rappels de physique nucléaire remplaçant les notions théoriques dans leur contexte historique, l'auteur expose les théories mathématico-physiques les plus récentes concernant :

- le ralentissement des neutrons dans la matière ;
- les particules chargées et les rayonnements électromagnétiques ;
- les phases de calcul, en soulignant les hypothèses simplificatrices ;
- le concept de criticité, lorsque se développe et s'entretient une réaction nucléaire en chaîne ;
- le calcul théorique des réacteurs homogènes et hétérogènes ;
- les problèmes d'autoprotection ;
- les méthodes numériques des 2 approches historiques du traitement des neutrons (transport neutronique et diffusion).

Cette 3<sup>e</sup> édition, revue et augmentée, approfondit certaines notions, notamment le spectre théorique de fission, l'effet des liaisons cristallines, l'effet de l'hétérogénéité du champ de température, l'effet Dancoff, les équations du transport en géométrie dimensionnelle, le calcul du facteur anti-trappe, la méthode des neutrons pulsés, l'effet d'ombre de l'intégrale de résonance, la méthode Feynman- $\alpha$ , le traitement des instrumentations de l'EPR...

Complété par plus de 400 références bibliographiques, dont de nombreuses commentées et une annexe remplaçant les travaux d'EDF dans le contexte national du développement de l'énergie nucléaire, cet ensemble constitue la référence théorique la plus complète en neutronique.

Cet ouvrage est conforme aux enseignements de l'Institut de transfert de technologie d'EDF et sert de référentiel aux enseignements de l'École nationale supérieure d'ingénieurs de Bourges (INSA-Centre Val de Loire). Il a été conçu pour les ingénieurs et techniciens sur sites souhaitant enrichir leur propre expertise, pour les étudiants de 3<sup>e</sup> cycle et les élèves ingénieurs en sciences énergétiques.

