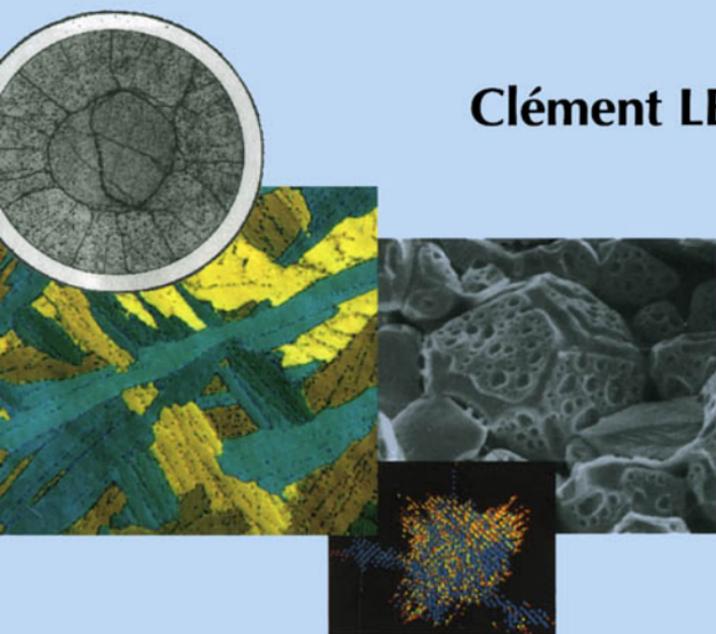


COLLECTION  
**GÉNIE  
ATOMIQUE**

# Science des matériaux pour le nucléaire

Clément LEMAIGNAN



**instn**

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES  
ET TECHNIQUES NUCLÉAIRES

Extrait de la publication

  
EDP  
SCIENCES



# SCIENCE DES MATÉRIAUX POUR LE NUCLÉAIRE

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

GÉNIE ATOMIQUE

# Science des Matériaux pour le Nucléaire

Clément Lemaignan



17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 2-86883-672-0



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 2004

# Introduction à la collection « Génie Atomique »

---

Au sein du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) est un établissement d'enseignement supérieur sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale et du ministère de l'Industrie. La mission de l'INSTN est de contribuer à la diffusion des savoir-faire du CEA au travers d'enseignements spécialisés et de formations continues, tant à l'échelon national, qu'aux plans européen et international.

Cette mission reste centrée sur le nucléaire, avec notamment l'organisation d'une formation d'ingénieur en « Génie Atomique ». Fort de l'intérêt que porte le CEA au développement de ses collaborations avec les universités et les écoles d'ingénieurs, l'INSTN a développé des liens avec des établissements d'enseignement supérieur aboutissant à l'organisation, en co-habilitation, de trente-huit enseignements de 3e cycle (DEA et DESS). À ces formations s'ajoutent les enseignements des disciplines de santé : les spécialisations en médecine nucléaire et en radiopharmacie, ainsi qu'une formation destinée aux physiciens d'hôpitaux.

La formation continue constitue un autre volet important des activités de l'INSTN, lequel s'appuie aussi sur les compétences développées au sein du CEA et chez ses partenaires industriels.

Dispensé dès 1956 au CEA Saclay où ont été bâties les premières piles expérimentales, la formation en « Génie Atomique » (GA) l'est également depuis 1976 à Cadarache où a été développée la filière des réacteurs à neutrons rapides. Depuis 1958, le GA est enseigné à l'École des Applications Militaires de l'Énergie Atomique (EAMEA) sous la responsabilité de l'INSTN.

Depuis sa création, l'INSTN a diplômé plus de 4000 ingénieurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands groupes ou organismes du secteur nucléaire français : CEA, EDF, Framatome, Technicatome, Cogema, Marine Nationale. De très nombreux étudiants étrangers provenant de différents pays ont également suivi cette formation.

Cette spécialisation s'adresse à deux catégories d'étudiants : civils et militaires. Les étudiants civils occuperont des postes d'ingénieurs d'études ou d'exploitation dans les réacteurs nucléaires, électrogènes ou de recherches, ainsi que dans les installations du cycle du combustible. Ils pourront évoluer vers des postes d'experts dans l'analyse du risque nucléaire et de l'évaluation de son impact environnemental. La formation de certains officiers des sous-marins et porte-avions nucléaires français est dispensée par l'EAMEA.

Le corps enseignant est formé par des chercheurs du CEA, des experts de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), des ingénieurs de l'industrie (EDF, AREVA,...). Les principales matières sont : la physique nucléaire et la neutronique, la thermohydraulique, les matériaux nucléaires, la mécanique, la protection radiologique, l'instrumentation nucléaire, le fonctionnement et la sûreté des réacteurs à eau sous pression (REP), les filières et le cycle du combustible nucléaire. Ces enseignements dispensés

sur une durée de six mois sont suivis d'un projet de fin d'étude, véritable prolongement de la formation réalisé à partir d'un cas industriel concret, se déroulent dans les centres de recherches du CEA, des groupes industriels (EDF, Framatome, Technicatome, etc.) ou à l'étranger (États-Unis, Canada, Royaume-Uni,...) La spécificité de cette formation repose sur la large place consacrée aux enseignements pratiques réalisés sur les installations de l'INSTN (réacteur Ulysse, simulateurs de REP, laboratoires de radiochimie, etc.) Aujourd'hui, en pleine maturité de l'industrie nucléaire, le diplôme d'ingénieur en « Génie Atomique » reste sans équivalent dans le système éducatif français et affirme sa vocation : former des ingénieurs qui auront une vision globale et approfondie des sciences et techniques mises en œuvre dans chaque phase de la vie des installations nucléaires, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leur exploitation puis leur démantèlement.

L'INSTN s'est engagé à publier l'ensemble des supports de cours dans une collection d'ouvrages destinés à devenir des outils de travail pour les étudiants en formation et à faire connaître le contenu de cet enseignement dans les établissements d'enseignement supérieur, français et européens. Édités par EDP Sciences, acteur particulièrement actif et compétent dans la diffusion du savoir scientifique, ces ouvrages sont également destinés à dépasser le cadre de l'enseignement pour constituer des outils indispensables aux ingénieurs et techniciens du secteur industriel.

Joseph Safieh  
Responsable Général  
du cours de Génie Atomique

# Avant - Propos

---

Dans le cadre de la diffusion des connaissances scientifiques et techniques dont il a la charge, le CEA dispense au sein de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaire une formation d'ingénieur en Génie Atomique. Régulièrement actualisée depuis qu'elle a vu le jour dans les années 1960, celle-ci s'appuie sur une série de monographies traitant de tous les thèmes abordés. La récente réorganisation générale de cet enseignement a été l'occasion d'une actualisation de cette collection et la mise en chantier le travail de rédaction correspondant. Le présent volume en constitue la partie relative aux matériaux.

Naturellement, le public visé est d'abord constitué par les étudiants du Génie Atomique. Cependant cet ouvrage devrait aussi être utile à tous les ingénieurs et techniciens travaillant sur des installations où l'irradiation est susceptible d'affecter le comportement des matériaux. De même, les chercheurs se focalisant sur un sujet particulier relatif aux matériaux du nucléaire pourront trouver profit dans ces pages, pour acquérir une vision globale des phénomènes mis en jeu.

Le niveau scientifique requis correspond à une formation d'ingénieur généraliste ; en cas de lacunes en sciences des matériaux, le chapitre 2 en rappelle les notions essentielles. Les développements mathématiques sont réduits au minimum, l'objectif étant plus d'accéder à la physique des phénomènes qu'à une modélisation analytique formelle et détaillée, trop souvent peu utilisable en science des matériaux.

Enfin, dans sa forme actuelle, cet ouvrage doit beaucoup aux nombreux relecteurs qui se sont penchés sur les versions précédentes, suggérant additions, restructuration, approches complémentaires ou exprimant simplement leurs encouragements aux moments opportuns... Collègues du CEA ou d'ailleurs, professeurs, enseignants, chercheurs ou étudiants, ils sont trop nombreux pour être nommés individuellement. Je souhaiterais cependant que tous trouvent en ces lignes l'expression de ma profonde gratitude.

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

# Table des matières

---

## Introduction à la collection « Génie Atomique »

Avant - propos .....	VII
----------------------	-----

<b>Chapitre 1 : Introduction aux matériaux pour le nucléaire</b> .....	1
--	---

1. Le combustible .....	1
2. Le caloporteur .....	2
3. Les composants à fonctionnalité nucléaire .....	2
4. Les éléments de structure .....	3

<b>Chapitre 2 : Rappels de science des matériaux</b> .....	5
--	---

1. Les cristaux et leurs défauts .....	5
2. Microstructures des métaux et alliages .....	7
3. Les transformations en phases solides .....	9
4. La déformation plastique des alliages métalliques .....	11
5. La détermination des propriétés mécaniques des métaux et alliages .....	14
6. Application à quelques alliages industriels .....	15
7. La corrosion des alliages métalliques .....	16
8. Les matériaux à liaisons ioniques : céramiques et ciments .....	17
8.1. Les céramiques .....	17
8.2. Les verres .....	18
8.3. Les ciments .....	18
9. Les liaisons covalente : les polymères .....	19

<b>Chapitre 3 : Interactions particules matière et défauts élémentaires</b> .....	23
---	----

1. Physique des interactions particule-matière .....	23
1.1. Les photons $\gamma$ .....	23
1.2. Les électrons .....	24

1.3. Les neutrons . . . . .	24
1.3.1. Réactions nucléaires . . . . .	24
1.3.2. Interactions élastiques . . . . .	25
1.4. Les ions lourds . . . . .	25
2. Le dommage élémentaire . . . . .	29
2.1. Les ionisations . . . . .	29
2.1.1. Effets des ionisations sur les matériaux à liaison covalente . . . . .	29
2.1.2. Effets des ionisations sur les matériaux à liaison ionique . . . . .	29
2.2. Le transfert d'énergie cinétique et de quantité de mouvement . . . . .	31
2.3. Le développement d'une cascade de déplacements . . . . .	32
2.4. Le nombre d'atomes déplacés dans une cascade . . . . .	33
2.5. Le taux de création de défauts . . . . .	36
3. L'évolution des défauts ponctuels au cours du temps . . . . .	37
3.1. Les modes de recombinaison des défauts ponctuels . . . . .	37
3.1.1. La recombinaison élastique . . . . .	37
3.1.2. La disparition des défauts ponctuels sur les puits . . . . .	38
3.1.3. L'agrégation des défauts ponctuels . . . . .	38
3.2. La cinétique de recombinaison . . . . .	39
4. Méthodes numériques de calcul des dommages d'irradiation . . . . .	41
4.1. Calculs par description des collisions individuelles . . . . .	41
4.2. Techniques de dynamique moléculaire . . . . .	42
<b>Chapitre 4 : Dommage d'irradiation et microstructure . . . . .</b>	<b>43</b>
1. L'évolution des défauts ponctuels . . . . .	43
1.1. Les boucles de dislocations . . . . .	43
1.2. Les déformations induites par les boucles . . . . .	44
2. Formation de cavités et gonflement . . . . .	45
3. Les transports atomiques accélérés par l'irradiation. . . . .	46
4. Les déplacements des équilibres thermodynamiques . . . . .	47
5. Les désordres induits par l'irradiation . . . . .	48
<b>Chapitre 5 : Applications aux composants des réacteurs . . . . .</b>	<b>51</b>
1. Les éléments de structure . . . . .	51
1.1. Les aciers de construction et la cuve des réacteurs à eau pressurisée . . . . .	51
1.1.1. La transition ductile-fragile . . . . .	52
1.1.2. Les éléments de mécanique de la rupture . . . . .	54
1.1.3. La fragilisation sous irradiation . . . . .	54
1.1.4. Les mécanismes de fragilisation . . . . .	57

1.1.5. Le programme de surveillance . . . . .	58
1.1.6. Le recuit des cuves . . . . .	60
1.1.7. Les aciers de cuve du futur . . . . .	61
1.1.8. Les difficultés rencontrées lors de la fabrication des cuves . . . . .	61
1.2. Les alliages d'aluminium (effets de transmutation) . . . . .	63
1.3. Les aciers inoxydables . . . . .	64
1.3.1. Le durcissement induit par l'irradiation . . . . .	64
1.3.2. La fissuration intergranulaire . . . . .	65
2. Effets d'irradiation sur les matériaux utilisés comme modérateurs . . . . .	67
2.1. La radiolyse . . . . .	68
2.1.1. La dissociation de la molécule d'eau . . . . .	68
2.1.2. Le rendement de la radiolyse . . . . .	69
2.1.3. Les réactions de recombinaison . . . . .	69
2.2. L'effet Wigner dans le cas du graphite . . . . .	71
3. Les matériaux absorbants . . . . .	72
3.1. Les composés au bore . . . . .	72
3.2 Absorbant en alliage argent-indium-cadmium (AIC). . . . .	73

## **Chapitre 6 : Le combustible . . . . .**

1. Le combustible des réacteurs à eau . . . . .	75
1.1. Le combustible proprement dit, la céramique nucléaire . . . . .	75
1.1.1. L'enrichissement isotopique . . . . .	75
1.1.2. La fabrication des pastilles $UO_2$ . . . . .	76
1.1.3. La fabrication des crayons MOX . . . . .	77
1.1.4. Autres composés d'uranium . . . . .	78
1.2. Le gainage (alliages de zirconium) . . . . .	78
1.2.1. Propriétés physiques du zirconium . . . . .	79
1.2.2. Le développement des alliages . . . . .	80
1.2.3. L'élaboration des alliages de zirconium . . . . .	81
2. Comportement des céramiques combustibles sous irradiation . . . . .	83
2.1. La thermique du combustible . . . . .	83
2.1.1. Le profil de température dans le crayon . . . . .	83
2.1.2. Conséquences des distributions de température . . . . .	84
2.2. Les produits de fission . . . . .	86
2.3. La sortie des gaz de fission . . . . .	86
2.3.1. Les mécanismes de sortie des gaz . . . . .	88
2.3.2. Le taux de Sortie des gaz . . . . .	90
2.4. La formation du RIM (REP-REB) . . . . .	90

2.5. Le combustible mixte en REP (MOX) .....	91
2.6. Les spécificités du combustible RNR .....	92
3. Comportement du gainage du combustible des réacteurs à eau : cas des alliages de zirconium .....	95
3.1. La stabilité des phases sous irradiation .....	95
3.2. La croissance sous irradiation .....	95
3.3. Les propriétés mécaniques sous irradiation .....	96
3.3.1. La résistance mécanique .....	96
3.3.2. Le fluage d'irradiation .....	98
3.4. La corrosion en réacteur .....	100
3.4.1. Les mécanismes contrôlant les cinétiques d'oxydation .....	100
3.4.2. Le comportement global .....	101
3.5. L'hydruration .....	102
4. Le gainage des aiguilles combustibles RNR (acier inoxydable) .....	103
5. Situations dégradées du combustible .....	106
5.1. La rupture du gainage .....	106
5.1.1. La corrosion sous contrainte par l'iode .....	107
5.1.2. Remèdes à l'IPG .....	108
5.1.3. La corrosion interne dans les RNR .....	110
5.2. Le comportement des crayons rompus .....	110
5.3. Aspects sûreté du combustible .....	111
5.3.1. Dans les REP .....	111
5.3.2. Dans les RNR .....	112

## **Chapitre 7 : Autres matériaux spécifiques pour usages nucléaires** .....

1. Les bétons à usage nucléaires .....	115
2. Les verres pour le confinement des déchets .....	116
2.1. L'élaboration des verres de stockage .....	116
2.2. Le comportement à long terme des verres de stockage .....	117

## **Chapitre 8 : Matériaux classiques utilisés en réacteurs** . . .

1. Les alliages à base de nickel .....	119
1.1. Les alliages utilisés pour les tubes de GV .....	119
1.2. Les contraintes des tubes de GV .....	120
2. La fatigue thermique des conduites auxiliaires .....	121
3. La corrosion des aciers ferritiques par l'acide borique .....	123
4. Évolution structurelle des aciers austénitiques moulés .....	124

---

<b>Chapitre 9 : Recommandations et perspectives.</b> . . . . .	127
1. La pérennité de l'industrie nucléaire . . . . .	127
2. Spécificités de la science des matériaux pour le nucléaire . . . . .	128
3. Les effets d'irradiation . . . . .	128
4. Installations en service et évolutions attendues . . . . .	129
5. Recherche et développement . . . . .	130
6. Formation et culture scientifique . . . . .	131
<b>Annexe I</b> . . . . .	133
<b>Annexe II</b> . . . . .	135
<b>Annexe III</b> . . . . .	139
<b>Bibliographie.</b> . . . . .	141
<b>Crédit des illustrations et références associées :</b> . . . . .	143
<b>Sigles.</b> . . . . .	145
<b>Index.</b> . . . . .	147

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

# 1

# Introduction aux matériaux pour le nucléaire

Inhérents à tous les réacteurs nucléaires, les intenses rayonnements de photons, électrons, neutrons et ions lourds, présents dans leurs environnements, induisent des modifications sensibles dans les matériaux qui les constituent. Détaillés dans leurs mécanismes à l'échelle atomique, les effets d'irradiation observés seront fort différents selon les composants sur lesquels ils s'activent.

Dans le monde industriel, le développement de l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques n'aurait pu se faire sans l'utilisation de matériaux qui puissent résister aux irradiations. Toute source d'irradiation induit des modifications sur les matériaux ; cependant dans le cadre de ce document, nous nous limiterons essentiellement aux réacteurs nucléaires de puissance, examinant parfois les réacteurs d'essai, voire les accélérateurs de particules afin de préciser certains des mécanismes mis en jeu. On se limitera donc au concept générique des effets d'irradiation avec des détails pour les utilisations industrielles que sont les réacteurs à eau pressurisés (REP) et les réacteurs à neutrons rapides (RNR). Quelques illustrations complémentaires seront relatives aux réacteurs de recherche, de type piscine, et aux autres types comme les réacteurs à uranium naturel graphite gaz (UNGG) ou les réacteurs à eau lourde CANDU.

Dans les ensembles complexes que sont les réacteurs nucléaires, la grande majorité des éléments de structures n'est pas concernée par les phénomènes liés à la présence du rayonnement nucléaire. Afin de préciser les effets d'irradiation sur les matériaux, on se limitera essentiellement aux composants de la chaudière nucléaire, bien qu'elle ne représente qu'une faible part d'une installation de production d'énergie nucléaire.

L'énergie nucléaire libérée par la fission, est essentiellement récupérée dans le combustible sous forme d'énergie thermique. Elle est utilisée, *via* le caloporteur, pour fabriquer de la vapeur, elle-même envoyée au groupe turbo-alternateur. Nous ne détaillerons pas les spécificités éventuelles de la partie non nucléaire. Le comportement de ces composants auxiliaires relève en effet d'une démarche d'ingénieur mécanicien généraliste, avec prise en compte d'un milieu industriel spécifique.

Dans cet ouvrage, parmi les éléments qui seront détaillés, on traitera des domaines emboîtés que sont le combustible, le caloporteur, les composants à fonctionnalités nucléaires et les structures.

## 1. Le combustible

Il est essentiellement constitué d'uranium enrichi, à l'état métallique dans les UNGG ou à l'état d'oxyde, c'est-à-dire sous forme céramique, dans la majorité des autres réacteurs. Une variante de cet oxyde est l'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX) pour les réacteurs à eau ou le mélange (U, Pu)O<sub>2</sub>, pour les réacteurs rapides.

Des variantes de ces types de combustible céramique sont aussi envisagées pour les réacteurs hybrides et brûleurs d'actinides sous forme de cibles. Ces matériaux sont soumis à un intense rayonnement lié à la fission des atomes d'uranium ou de plutonium, ainsi qu'à des évolutions chimiques importantes induites par la création de produits de fission.

Le combustible lui-même est isolé du caloporteur par un gainage étanche. Selon le type de réacteur, le gainage sera en alliage de zirconium pour les réacteurs à eau et en acier inoxydable pour les réacteurs rapides. Ces métaux, qui jouent le rôle de première barrière, sont soumis à des doses d'irradiation neutronique très importantes à la fois en neutrons rapides et en neutrons thermiques. Ils seront le lieu de dommages d'irradiation importants, qui seront détaillés.

## 2. Le caloporteur

Il a pour objet de transférer l'énergie thermique du cœur du réacteur vers les générateurs de vapeur. Dans les réacteurs thermiques, le caloporteur est généralement de l'eau, eau naturelle ou eau lourde. Pour les réacteurs rapides, on évite d'avoir des éléments modérateurs dans le caloporteur, ce qui a conduit à l'utilisation de métaux liquides, généralement le sodium. L'utilisation de gaz comme caloporteur est aussi possible, par exemple l'hélium dans les réacteurs à haute température ou le gaz carbonique dans les réacteurs graphite-gaz et UNGG. Le caloporteur est lui aussi soumis à un intense rayonnement, c'est pourquoi l'on se penchera sur les phénomènes de radiolyse qui peuvent apparaître dans l'eau.

## 3. Les composants à fonctionnalité nucléaire

Le premier composant ayant un rôle dans la réaction nucléaire est le modérateur qui va peu à peu ralentir les neutrons en transférant l'énergie des neutrons rapides sur des atomes légers et peu absorbants. On utilise l'eau naturelle dans les réacteurs à eau pressurisée ou les réacteurs bouillants, ou l'eau lourde dans les réacteurs de type CANDU. Le graphite est aussi utilisé comme modérateur.

Pour contrôler la réaction nucléaire, on utilise des « absorbants », éléments chimiques ayant une forte section efficace de capture des neutrons. Il s'agit du bore utilisé sous forme de carbure dans les barres de commande ( $B_4C$ ) ou en solution dans l'eau, sous forme d'acide borique, pour les réacteurs à eau pressurisée. D'autres éléments absorbants, comme le cadmium ou l'indium, sont utilisés dans les barres de contrôle des réacteurs sous forme d'alliage argent-indium-cadmium, dit AIC. Ces éléments, par les réactions nucléaires d'absorption qu'ils mettent en œuvre, sont l'objet de transmutations importantes et voient leur chimie évoluer au cours de l'irradiation. Les poisons consommables sont des éléments qui ont une forte section efficace de capture par les neutrons et qui disparaîtront rapidement au début de l'irradiation. Ils servent ainsi de réserve de réactivité pour compenser l'épuisement du combustible. Le gadolinium est l'exemple type du poison consommable. Il est souvent ajouté dans les charges initiales de combustible sous forme de solution solide dans l'oxyde d'Uranium. Cet élément a la particularité, lors de la capture d'un neutron, de se transformer en isotope de masse plus élevée sans changer de nature chimique.

## 4. Les éléments de structure

Les éléments de structure, qui supportent l'ensemble des composants du réacteur et assurent le confinement du caloporteur et/ou du modérateur doivent résister aux multiples rayonnements provenant du cœur. Les métaux, comme nous le verrons ultérieurement, sont particulièrement résistants aux rayonnements neutroniques et ioniques. Par contre, c'est loin d'être le cas pour les polymères, en raison de leur liaison covalente, qui sont donc bannis des cœurs. De même les céramiques ne sont utilisées qu'à haute température pour des applications relatives au combustible. Les éléments de structure ont donc été pratiquement toujours réalisés en métaux et alliages.

Les alliages industriels qui seront à prendre en compte concernent essentiellement les aciers, comme les aciers de construction pour les cuves de réacteurs, ou les aciers inoxydables pour les structures internes de réacteurs thermiques ou les éléments de structures des réacteurs à neutrons rapides. D'autres métaux peuvent être utilisés pour des réacteurs moins classiques, comme les alliages d'aluminium pour les réacteurs de recherche ou les alliages de zirconium dans les réacteurs thermiques de type CANDU et les réacteurs de type RBMK, dans les deux cas pour la fabrication de tubes de force qui contiennent l'eau sous pression. Ces métaux sont tous soumis à un dommage d'irradiation faible pour les cuves, plus important pour les internes. L'origine de ce dommage d'irradiation réside dans les déplacements d'atomes produits par le flux de neutrons rapides.

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

M

microstructure, 5, 16, 23, 43, 57, 88, 91, 98, 99, 104  
 modérateur, 2, 67, 71  
 MOX, 1, 90, 91, 92

N

neutron, 1, 23, 24, 25, 31, 46, 58, 65, 67, 68, 71, 88, 95, 110

O

oxyde, 1, 16, 17, 30, 77, 83, 90, 101, 110

P

paire de Frenkel, 31, 37, 71  
 pastille, 78, 83, 94, 106, 107, 108, 111  
 perte d'énergie, 15, 26, 67  
 phase, 7, 8, 15, 42, 69, 77, 87, 101, 110  
 photo-électroconduction, 30  
 photons, 23, 30  
 pka, 32  
 pouvoir d'arrêt, 26  
 précipités, 10, 11, 63, 82, 95, 96  
 produits de fission, 2, 23, 86, 91  
 propriétés mécaniques, 14, 52, 55, 63, 112  
 puissance linéique, 84, 86, 107  
 puits, 38, 46, 66, 83, 95, 99, 104  
 PuO<sub>2</sub>, 78

R

radiolyse, 2, 69, 73  
 réacteurs à neutrons rapides, 87, 110

recombinaison, 33, 42, 48, 69, 70, 71  
 réseau cristallin, 9, 24, 31, 33, 83  
 revenu, 15, 52  
 rupture, 14, 52, 59, 64, 85, 106, 107, 108

S

section efficace d'interaction, 32, 36  
 ségrégation, 7, 46, 66  
 simulations, 41  
 site cristallin, 5, 24, 25, 31  
 sodium, 2, 111, 112  
 solution solide, 5

T

taux de combustion, 90, 108  
 taux de sortie, 87, 94  
 température centrale, 83, 90, 92, 107  
 température d'irradiation, 55, 65, 71, 72  
 texture cristallographique, 44, 82, 95, 108  
 traitement thermique, 7, 13, 52, 111  
 transformation, 8, 15, 68, 95, 101  
 transition ductile-fragile, 15, 55, 56, 57  
 transitoire de puissance, 90, 109  
 trempe, 9, 15, 16, 52

U

UO<sub>2</sub>, 27, 76, 77, 78, 86, 90, 110

Z

zirconium, 2, 44, 70, 79, 82, 83, 86, 100, 107, 110

Imprimé en France, JOUVE, 11, Bd de Sébastopol, 75001 PARIS - FRANCE  
N° 339328L - Dépôt légal : Janvier 2004

Extrait de la publication