

COLLECTION
**GÉNIE
ATOMIQUE**

Thermohydraulique des réacteurs

Edition révisée



Jean-Marc DELHAYE

instn

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES
ET TECHNIQUES NUCLÉAIRES

edp sciences

GÉNIE ATOMIQUE

Thermohydraulique des réacteurs nucléaires

Jean-Marc Delhaye

Avec la collaboration de Michel Giot, Laurent Mahias,
Patrick Raymond et Claude Renault

Edition révisée



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

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-1094-9 (édition révisée)

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^{er} 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

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'Education 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 plus d'une vingtaine de Masters. A 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 1954 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'Ecole des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA) sous la responsabilité de l'INSTN.

Depuis sa création, l'INSTN a diplômé plus de 4200 ingénieurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands groupes ou organismes du secteur nucléaire français : CEA, EDF, AREVA, 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,...).

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. Edités 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

Table des matières

Avant-Propos	xv
1 Caractéristiques thermohydrauliques des réacteurs	1
1 Introduction	1
2 Rappels sur les cycles thermodynamiques	3
2.1 Cycle de Carnot	4
2.2 Cycle de Rankine	6
2.3 Cycle de Brayton	11
3 Caractéristiques générales des réacteurs nucléaires	13
3.1 Cœurs et combustibles	13
3.2 Circuits et composants	14
4 Les réacteurs à eau sous pression	15
4.1 Description générale	15
4.2 Le cœur et le combustible	15
4.3 Le circuit de refroidissement	20
4.4 La cuve des REP	21
4.5 Les générateurs de vapeur	21
4.6 Les circuits auxiliaires	23
4.7 Les circuits de sauvegarde	26
5 Les réacteurs à eau bouillante	27
5.1 Description générale	27
5.2 Le cœur et le combustible	30
5.3 La cuve	31
5.4 L'enceinte de confinement des réacteurs à eau bouillante	35
5.5 Les circuits de sauvegarde	36
6 Les réacteurs à gaz à haute température	37
6.1 Description générale	37
6.2 Le cycle thermodynamique d'un réacteur HTR	39
6.3 Le cœur et le combustible	41
6.4 Le circuit de refroidissement	44
7 Les réacteurs de propulsion navale	44
7.1 Description générale	44
7.2 Le cœur et le combustible	45
7.3 Le circuit de refroidissement	46
7.4 Les réacteurs de petite puissance	49

8	Les réacteurs de recherche	50
8.1	Description générale	50
8.2	Le cœur et le combustible	52
8.3	Circuit de refroidissement et systèmes de sauvegarde	53
8.4	L'enceinte de confinement	55
9	Exercices	55
9.1	Cycles thermodynamiques	55
9.2	Analyse d'un réacteur à eau bouillante simplifié (SBWR)	55
	Nomenclature	61
	Références	62
2	Conception et dimensionnement thermique des réacteurs	63
1	Généralités	64
1.1	Grandeurs caractéristiques de la production d'énergie	64
1.2	Grandeurs caractéristiques du dimensionnement thermique	65
1.3	Facteur de point chaud	66
1.4	Facteur d'élévation d'enthalpie	67
2	Principes de sûreté appliqués au dimensionnement des réacteurs	68
2.1	Objectifs de sûreté	68
2.2	Principe de défense en profondeur	69
2.3	Amélioration de la conception en utilisant le retour d'expérience et les études probabilistes de sûreté (EPS)	71
3	Principes de dimensionnement	72
3.1	Etat de fonctionnement du réacteur	72
3.2	Événements initiateurs	72
3.3	Options de sûreté	72
3.4	Critères de sûreté	73
3.5	Classification des incidents et accidents	74
4	L'analyse de sûreté	76
4.1	L'approche déterministe	76
4.2	Marges et incertitudes	77
4.3	L'approche probabiliste	78
5	Exigences de conception	79
5.1	Cœur et combustible	79
5.2	Systèmes de refroidissement du réacteur	80
5.3	Enceinte de confinement	82
6	Exercices	82
	Nomenclature	84
	Références	85
3	Thermique de l'élément combustible	87
1	Introduction	87
2	Thermique du combustible et dimensionnement	90
2.1	Génération de puissance dans le combustible	90
2.2	Dimensionnement du cœur et de l'élément combustible	94
3	Echanges de chaleur entre caloporteur et combustible	95

3.1	Bilan d'énergie du caloporteur	95
3.2	Transfert de chaleur entre caloporteur et combustible	98
4	Propriétés thermiques des éléments de combustible	100
4.1	Introduction	100
4.2	Choix des matériaux	101
4.3	Rappels sur la conduction thermique	103
4.4	Propriétés thermiques de l'UO ₂	104
5	Champ de température dans les éléments combustibles	108
5.1	Combustibles à plaques	108
5.2	Combustibles cylindriques	111
5.3	Combustibles sphériques	117
6	Exemple d'applications	119
6.1	Etude thermique du canal de refroidissement d'un combustible à plaques	119
7	Exercices	123
7.1	Résistance thermique de contact	123
7.2	Profil de température dans un élément combustible	123
7.3	Répartition radiale de température dans un crayon de REP 900 MWe	123
7.4	Facteur d'aplatissement axial dans un REP	125
7.5	Puissance volumique et flux thermique surfacique moyens dans un REB	125
	Nomenclature	125
	Références	128
4	Configurations des écoulements diphasiques en conduite	129
1	Paramètres descriptifs des écoulements diphasiques en conduite	131
1.1	Variable indicatrice de phase	131
1.2	Moyenne spatiale instantanée	131
1.3	Moyenne temporelle locale	132
1.4	Commutativité des opérateurs de moyenne	133
1.5	Grandeurs associées au débit-masse	134
1.6	Grandeurs associées au débit-volume	135
2	Écoulements verticaux cocourants ascendants	135
2.1	Description sommaire	135
2.2	Prédiction des types d'écoulement	138
3	Écoulements horizontaux cocourants	141
3.1	Description sommaire	141
3.2	Prédiction des types d'écoulement	144
4	Remontée et retombée du liquide dans un tube vertical	148
4.1	Description des phénomènes	149
4.2	Corrélations empiriques	151
5	Exercices	153
5.1	Vitesse superficielle du mélange	153
5.2	Écoulement dans un tube vertical	153
5.3	Remontée et retombée du liquide	153
5.4	Remontée du liquide dans un condenseur	153

Nomenclature	154
Références	156
5 Rappels sur les équations des écoulements monophasiques	159
1 Vitesse de déplacement d'une surface	160
2 Volumes de contrôle	161
2.1 Volume de contrôle matériel	161
2.2 Volume de contrôle géométrique fixe non matériel	162
2.3 Volume de contrôle géométrique mobile non matériel	162
3 Bilans globaux instantanés	162
3.1 Bilan de masse	163
3.2 Bilan de quantité de mouvement linéaire	164
3.3 Bilan de quantité de mouvement angulaire	164
3.4 Bilan d'énergie totale	165
3.5 Bilan d'entropie	165
4 Les outils mathématiques	166
4.1 Règle de Leibniz	166
4.2 Théorème de transport de Reynolds	167
4.3 Théorème de Gauss	167
5 Equations locales instantanées primaires	168
5.1 Bilan de masse	168
5.2 Bilan de quantité de mouvement linéaire	169
5.3 Bilan de quantité de mouvement angulaire	170
5.4 Bilan d'énergie totale	171
5.5 Bilan d'entropie	174
6 Equations locales instantanées secondaires	174
6.1 Equation de l'énergie cinétique	175
6.2 Equation de l'énergie interne	176
6.3 Equation de l'enthalpie	177
7 Relations de comportement	178
7.1 Relation de comportement mécanique	178
7.2 Relation de comportement thermique	178
7.3 Relation de comportement thermodynamique	178
8 L'équation de Gibbs	179
9 Equation d'entropie et source d'entropie	179
10 Equations aux discontinuités	180
10.1 Bilan de masse sur une discontinuité	181
10.2 Bilan de quantité de mouvement sur une discontinuité	181
10.3 Bilan d'énergie totale sur une discontinuité	181
11 Exemples d'applications	181
11.1 Puissance de pompage	181
11.2 Montée en pression d'une enceinte REP en situation d'APRP grosse brèche	182
11.3 Détermination du profil axial de température dans un canal chauffant : exemple du cœur d'un REP en conditions nominales	187
11.4 Etude d'un système de recirculation d'eau par éjecteur	189
12 Exercices	193

12.1	Représentations paramétriques d'une sphère	193
12.2	Ascension d'une bulle qui grossit	193
12.3	Bilans globaux instantanés	194
12.4	Règle de Leibniz	194
12.5	Volume matériel	194
12.6	Equations de bilan locales instantanées primaires	194
12.7	Equations locales instantanées secondaires	194
12.8	Equations d'état du gaz parfait idéal	194
12.9	Premier principe	195
12.10	Equations de bilan sur une discontinuité	195
12.11	Détermination du profil axial de température dans un canal chauffant : exemple du cœur d'un REP en conditions nominales	195
	Nomenclature	195
	Références	197
6	Equations de base des écoulements diphasiques	199
1	Méthodologie	199
2	Bilans globaux instantanés pour les systèmes diphasiques	200
2.1	Bilan de masse	200
2.2	Bilan de quantité de mouvement linéaire	201
2.3	Bilan de quantité de mouvement angulaire	201
2.4	Bilan d'énergie totale	202
2.5	Bilan d'entropie	202
2.6	Bilan global instantané généralisé pour les systèmes diphasiques en l'absence de tension interfaciale	203
3	Equations locales instantanées dans chaque phase et à l'interface	203
3.1	Méthodologie	203
3.2	Bilan de masse	204
3.3	Conséquences du bilan de masse sur les interfaces	206
3.4	Bilan de quantité de mouvement linéaire en l'absence de tension interfaciale	206
3.5	Conséquences du bilan de quantité de mouvement linéaire sur les interfaces en l'absence de tension interfaciale	207
3.6	Introduction de la tension interfaciale	209
3.7	Equations locales instantanées généralisées dans chaque phase et sur les interfaces en l'absence de tension interfaciale	210
4	Equations moyennées	212
4.1	Equations instantanées moyennées sur la section de passage d'une phase dans une conduite cylindrique	214
4.2	Equations locales moyennées sur le temps de présence d'une phase	219
4.3	Equations aux moyennes composites	223
5	Exemples d'applications	224
5.1	Dynamique d'une bulle de gaz : équation de Rayleigh	224
6	Exercices	226
6.1	Tenseur antisymétrique correspondant au vecteur position	226
6.2	Equations locales instantanées dans chaque phase et sur les interfaces	226

6.3	Force de recul	226
6.4	Bilan de quantité de mouvement bidimensionnel avec tension interfaciale	226
6.5	Bilans sur les interfaces	226
6.6	Dynamique d'une bulle de gaz : équation de Rayleigh	227
6.7	Formes limites de la règle de Leibniz et du théorème de Gauss	227
6.8	Moyennes composites	227
	Nomenclature	228
	Références	230
7	Modélisation des écoulements diphasiques en conduite	231
1	Modèles à schéma cinématique imposé	232
1.1	Modèle homogène	233
1.2	Modèle de Bankoff (1960)	233
1.3	Modèle de Wallis (1963, 1969)	234
1.4	Modèle de Zuber et Findlay (1965)	236
2	Modèle à deux fluides sans évolution(s) imposée(s)	240
2.1	Les équations de bilan instantanées moyennées sur la section de passage d'une phase dans une conduite	241
2.2	Exemple de l'écoulement à deux couches	242
2.3	Les équations de bilan simplifiées	245
2.4	Les relations de fermeture pour les interactions entre phases et pour les interactions entre phases et paroi	248
3	Modèles à évolution(s) imposée(s)	249
4	Le modèle homogène équilibré	250
4.1	Les évolutions imposées	250
4.2	Les équations de bilan du modèle homogène équilibré	251
4.3	Le système d'équations final	253
5	Le modèle à flux de dérive tridimensionnel	253
5.1	Définitions des grandeurs caractéristiques du modèle à flux de dérive tridimensionnel	254
5.2	Identités utiles	255
5.3	Bilan de masse du mélange	256
5.4	Bilan de masse de la phase dispersée	257
5.5	Bilan de quantité de mouvement du mélange	257
5.6	Equation d'enthalpie du mélange	258
5.7	Système d'équations final pour le modèle à flux de dérive tridi- mensionnel	258
6	Le modèle à flux de dérive monodimensionnel	260
6.1	Définition des grandeurs utilisées dans le modèle à flux de dérive monodimensionnel	260
6.2	Identités utiles	261
6.3	Bilan de masse du mélange moyenné sur la section droite de la conduite	261
6.4	Bilan de masse de la phase dispersée moyenné sur la section droite de la conduite	262

6.5	Bilan de quantité de mouvement du mélange moyenné sur la section droite de la conduite	262
6.6	Equation d'enthalpie du mélange moyennée sur la section droite de la conduite	263
6.7	Système d'équations final pour le modèle à flux de dérive monodimensionnel	264
7	Le modèle de Martinelli-Nelson	266
7.1	Equations de bilan simplifiées pour le mélange	266
7.2	Evolutions spécifiées	267
7.3	Le système d'équations final	268
8	Exercices	268
8.1	Expression de la masse volumique du mélange	268
8.2	Expression du taux de vide maximal calculable	268
8.3	Les équations du modèle à flux de dérive utilisé par W. Wulff (1998)	268
	Nomenclature	269
	Références	272
8	Pertes de pression dans les conduites	275
1	Position du problème	275
2	Caractéristiques d'un circuit thermohydraulique	276
2.1	Caractéristique interne d'un canal chauffant	276
2.2	Caractéristique externe	278
2.3	Point de fonctionnement	279
3	Caractéristique interne calculée par le modèle homogène équilibré	280
3.1	Ce que l'on connaît	280
3.2	Conditions imposées	280
3.3	Ce que l'on cherche	280
3.4	Hypothèses de départ	281
3.5	Méthodologie	281
3.6	Expression du coefficient de frottement diphasique dans le cadre du modèle homogène équilibré	281
3.7	Zone 1 : sortie monophasique vapeur ($G < G_{12}$)	282
3.8	Zone 2 : sortie diphasique liquide-vapeur ($G_{12} < G < G_{21}$)	284
3.9	Zone 3 : sortie monophasique liquide ($G_{21} < G$)	285
3.10	Détermination de la caractéristique interne	286
3.11	Applicabilité du modèle homogène	286
4	Caractéristique interne calculée par la méthode de Martinelli-Nelson	288
4.1	Ce que l'on connaît	288
4.2	Conditions imposées	288
4.3	Ce que l'on cherche	288
4.4	Hypothèses de départ	288
4.5	Méthodologie	289
4.6	Méthode de Lockhart-Martinelli	289
4.7	Méthode de Martinelli-Nelson	293
4.8	Détermination de la caractéristique interne	294
4.9	Remarques sur la méthode de Martinelli-Nelson	297

4.10	Méthode de Thom	298
4.11	Méthode de Baroczy	300
4.12	Méthode de Chisholm	301
4.13	Corrélation de Friedel	304
5	Etudes comparatives et recommandations	304
5.1	Exemple de résultats de calcul de perte de pression obtenus par différentes méthodes	304
5.2	Recommandations	310
6	Exemples d'applications	311
6.1	Détermination de la caractéristique interne d'un canal chauffant à l'aide du modèle homogène équilibré	311
7	Exercices	313
7.1	Viscosité équivalente d'Ishii-Zuber	313
7.2	Pertes de pression calculées par le modèle homogène	313
7.3	Méthode de Lockhart-Martinelli	313
7.4	Caractéristique interne d'un tube de générateur de vapeur	313
	Nomenclature	314
	Références	316
9	Transferts de chaleur en ébullition et en condensation	319
1	Rappels sur le phénomène de changement de phase	319
1.1	L'équation de Gibbs-Duhem	319
1.2	L'équation de Clapeyron	319
1.3	Equations de Thomson	320
1.4	Rayon d'une interface sphérique à l'équilibre	322
2	Ebullition en vase	323
2.1	L'expérience de Nukiyama	324
2.2	Démarrage de l'ébullition nucléée	328
2.3	L'ébullition nucléée	330
2.4	La crise d'ébullition	338
2.5	Ebullition en film	343
2.6	Ebullition de transition	345
3	Ebullition en convection forcée dans un tube chauffant	345
3.1	Titres et bilans thermiques	345
3.2	Evolution des températures le long d'un tube chauffant	348
3.3	Convection forcée dans un liquide sous-saturé	350
3.4	Apparition de l'ébullition nucléée	350
3.5	Apparition significative de la vapeur	351
3.6	Arrêt de l'ébullition nucléée	354
3.7	Ebullition sous-saturée	354
3.8	Ebullition saturée	355
3.9	La crise d'ébullition	356
3.10	Ebullition de transition	362
3.11	Configuration des écoulements en aval de la crise d'ébullition	363
4	Condensation d'une vapeur pure	364
4.1	Définition des coefficients d'échange thermique	364

4.2	Condensation en film sur une plaque ou sur un tube vertical (à l'extérieur ou à l'intérieur)	366
4.3	Condensation en film à l'intérieur d'un tube horizontal	371
5	Exemples d'applications	373
5.1	Ecoulements diphasiques dans un sous-canal de cœur de REP	373
6	Exercices	384
6.1	Rayon d'une interface sphérique à l'équilibre	384
6.2	Ebullition en vase	384
6.3	Ebullition en convection forcée	385
	Nomenclature	385
	Références	388
10	Instabilités des écoulements diphasiques en conduite	393
1	Définitions des différentes instabilités	393
2	Redistributions de débit	394
2.1	Caractéristiques d'un canal chauffant	395
2.2	Stabilité du régime permanent	396
2.3	Forme des caractéristiques	398
2.4	Mécanisme de la redistribution de débit	399
2.5	Analyse	400
2.6	Autres exemples d'instabilités statiques	400
3	Instabilité de type d'écoulement	401
4	Expulsion périodique	402
4.1	Description	402
4.2	Analyse	402
4.3	Principaux effets paramétriques	403
5	Oscillations de débit	403
5.1	Définition	403
5.2	Mécanisme	404
5.3	Seuil d'apparition des oscillations	405
5.4	Oscillations d'ondes de densité	405
5.5	Analyse théorique des oscillations de débit	406
6	Exemples d'applications	407
6.1	Redistribution de débit dans une boucle à circulation naturelle	407
7	Exercices	415
7.1	Redistribution de débit	415
7.2	Oscillations d'ondes de densité	416
	Nomenclature	417
	Références	418
11	Blocage des écoulements diphasiques	421
1	Introduction	421
2	Détermination du débit critique en écoulement monophasique	422
2.1	Définition du débit critique	422
2.2	Modélisation de l'écoulement	425
2.3	Détermination du débit critique	428
3	Détermination du débit critique en écoulement diphasique	431

3.1	Les corrélations	431
3.2	Le modèle homogène équilibré	435
3.3	Les insuffisances des corrélations et du modèle homogène équilibré	436
3.4	Le modèle à deux fluides	438
3.5	Le déséquilibre thermodynamique et le modèle DEM (<i>Delayed Equilibrium Model</i>)	445
4	Localisation de la section critique	455
4.1	Gaz parfait : conditions de double criticité (Seynhaeve, 1995) .	455
4.2	Gaz parfait : écoulement à travers un élargissement brusque . .	456
4.3	Écoulement de Fanno	457
4.4	Régimes d'écoulement	459
4.5	Validation expérimentale de la méthode	460
4.6	Extension au cas de l'écoulement avec autovaporisation	462
4.7	Vérification expérimentale de la double localisation de la section sonique pour un écoulement avec autovaporisation	464
5	Conclusions	465
6	Exemples d'applications	466
6.1	Calcul du débit critique à travers une tuyère en écoulement diphase avec autovaporisation	466
7	Exercices	468
7.1	Equations de bilan monophasiques	468
7.2	Système pratique d'équations des écoulements monophasiques .	468
7.3	Expression du gradient de pression en écoulement monophasique	468
7.4	Vitesse du son dans un écoulement diphase à deux constituants	468
7.5	Écoulement de Fanno	468
7.6	Blocage de débit à la suite d'une brèche de type guillotine . . .	468
	Nomenclature	469
	Références	471
12	Thermohydraulique des réacteurs de propulsion navale	475
1	Généralités	475
2	Cahier des charges des réacteurs de propulsion navale	477
2.1	Contraintes liées au navire	477
2.2	Critères de sûreté spécifiques	477
3	Chaufferie	478
3.1	Architecture	478
3.2	Analyse des caractéristiques imposées par le cahier des charges	482
4	Caractéristique des composants	482
4.1	Le combustible	483
4.2	La gaine	483
4.3	Les canaux de refroidissement	484
4.4	Le cœur	486
4.5	Le générateur de vapeur	488
5	Accident de perte de réfrigérant primaire	489
6	Exemples d'applications	490
6.1	Répartition des débits lors du zonage d'un cœur	490

6.2	Augmentation de la vitesse de rotation de la pompe lors du zonage d'un cœur	493
7	Exercices	498
	Nomenclature	498
	Références	500
	Sigles et acronymes	501
	Index	503

Vj ku' r ci g' k p v g p v k q p c m { ' i g h v' d i r p m

Avant-Propos

Cet ouvrage résulte de nombreuses années d'enseignement soit au niveau des écoles d'ingénieurs, soit au niveau de la formation continue. Son objectif essentiel est de présenter sous une forme rigoureuse et pédagogique les connaissances de base nécessaires à la compréhension et à la modélisation des phénomènes thermohydrauliques rencontrés dans le fonctionnement et la conception des réacteurs nucléaires.

La majorité des chapitres comportent des exemples d'application des concepts étudiés à des problèmes de génie nucléaire, et des exercices destinés à maîtriser ces concepts. Ces exemples et exercices ont été le plus souvent adaptés de problèmes posés lors de contrôles des connaissances associés au cours de Thermohydraulique des réacteurs du Génie Atomique. Chaque exemple d'application comporte une solution détaillée. Certains de ces exemples sont inspirés de problèmes figurant dans les ouvrages de Todreas et Kazimi¹ qui restent à ce jour des références incontournables.

Les notations utilisées sont définies dès leur première apparition dans le texte et regroupées dans une nomenclature placée à la fin de chaque chapitre. Ces nomenclatures indiquent le cas échéant le numéro de la relation de définition de chaque variable. En règle générale, les symboles utilisés sont ceux de la littérature anglo-saxonne. Le séparateur décimal est le point, et non la virgule, cela pour faciliter une prochaine version de cet ouvrage en langue anglaise. Ce livre ne contient pas d'études bibliographiques critiques et ne se veut pas exhaustif sur un sujet donné. Il aborde les connaissances minimales que doit comprendre et savoir utiliser le thermohydraulicien nucléaire.

Les connaissances mathématiques requises ne vont guère au-delà de celles enseignées dans les écoles d'ingénieurs. Le lecteur pourra trouver les rappels nécessaires sur le site Mathworld. Les exemples d'application pourront être avantageusement traités à l'aide d'outils comme Maple, Matlab ou Mathematica. Les propriétés thermodynamiques de l'eau et de sa vapeur peuvent être consultées en ligne sur le site du National Institute of Standards and Technology

1. Todreas, N.E. et Kazimi, M.S., 2001, *Nuclear Systems, II Elements of Thermal Hydraulic Design*, Taylor and Francis ; Todreas, N.E. et Kazimi, M.S., 2012, *Nuclear Systems, I Thermal Hydraulic Fundamentals*, Second Edition, CRC Press.

(NIST). Des informations complémentaires sur le génie nucléaire pourront être aisément trouvées dans la collection des livres du Génie Atomique et sur le site Wikipedia.

Les chapitres 1 et 2, respectivement intitulés Caractéristiques thermohydrauliques des réacteurs et Conception et dimensionnement thermique des réacteurs, ont été rédigés par Patrick Raymond (CEA), le chapitre 3, intitulé Thermique de l'élément combustible, a été écrit en collaboration avec Claude Renault (CEA) ; le chapitre 11, Blocage des écoulements diphasiques, en collaboration avec Michel Giot (Université Catholique de Louvain) et le chapitre 12, sur la Thermohydraulique des réacteurs de propulsion navale, en collaboration avec Laurent Mahias (Ecole des Applications Militaires de l'Energie Atomique).

L'ensemble de cet ouvrage a été relu avec minutie et compétence par Laurent Mahias qui a apporté de nombreuses améliorations visant à en faciliter la lecture et la compréhension. Enfin, ce livre n'aurait pu voir le jour sans les encouragements constants et amicaux de Joseph Safieh (INSTN).

La présente édition révisée a pris en compte les nombreuses remarques et corrections de Marc Boucker (EDF, Chatou), Pascal Brocheny (Areva, Lynchburg, USA), Fabrice François (CEA, Grenoble), Olivier Lebaigue (CEA, Grenoble), Hervé Lemonnier (CEA, Grenoble) et Laurent Mahias (EAMEA, Cherbourg).

I have poked in every dark recess, I have made an assault on every problem, I have plunged into every abyss. I have scrutinized the creed of every sect, I have tried to lay bare the inmost doctrines of every community. All this I have done that I might distinguish between true and false, between sound tradition and heretical innovation.

Abu Hamid Al-Ghazali (1058-1111)

Al-Munqidh min ad-Dalal, trans. in W. Montgomery Watt, *The Faith and Practice of Al-Ghazali, Deliverance from Error* (Allen and Unwin, London, 1953), p. 20.

Cette édition révisée est dédiée à la mémoire de Novak Zuber (1922-2013) dont j'ai eu le grand privilège d'être l'ami pendant quarante-huit ans. Tamo daleko...

Jean-Marc DELHAYE
delhaye@clemson.edu

Chapitre 1

Caractéristiques thermohydrauliques des réacteurs

Chapitre rédigé par Patrick Raymond, CEA.

1 Introduction

L'énergie produite par le phénomène de fission de noyaux lourds dans un réacteur nucléaire est récupérée par le milieu sous forme d'agitation thermique des atomes du combustible. Ce dégagement d'énergie, qui est maintenu par la réaction en chaîne lorsque le réacteur est critique, représente environ 95 % de l'énergie totale dégagée, le reste résultant de la désintégration des corps radioactifs produits par la fission des noyaux (tableau 1.1). La chaleur dégagée est proportionnelle au nombre de fissions réalisées, donc à la fraction du flux de neutrons qui induit des fissions nucléaires. Cette chaleur doit être évacuée du combustible pour :

1. servir à la production d'énergie mécanique (dans un réacteur électrogène),
2. éviter que les températures du combustible et de son environnement n'atteignent un niveau tel que la maîtrise du procédé ne soit plus assurée.

L'énergie est dégagée dans le *cœur* du réacteur qui est constitué, généralement, d'*éléments combustibles* solides renfermant la matière fissile. Elle est évacuée par un *fluide caloporteur* dans des conditions qui permettent d'assurer l'intégrité des éléments combustibles.

Il est important de noter que l'arrêt de la réaction en chaîne ne conduit pas à l'arrêt de la production d'énergie. En effet, les réactions nucléaires, induites principalement par la désintégration des produits de fission, se poursuivent

- Kutateladze (Nombre de), 152
- Ledinegg
critère de, 397
- Leung
méthode de, 434
- Limites d'exposition réglementaire, 69
- Lockhart-Martinelli
méthode de, 289
paramètres de, 289
- Longueur extrapolée, 95
- Mandhane (Carte de), 144
- Martinelli-Nelson
méthode de, 288, 293
paramètres de, 293
- Martinelli-Nelson (Modèle de), 266
- Mikic et Rohsenow
corrélation de, 334
- Mist flow, 137, 143
- Modèle
à deux fluides, 240
pour le débit critique, 438
à flux de dérive
monodimensionnel, 260
tridimensionnel, 253
à schéma cinématique imposé, 232
de Bankoff, 233
de Martinelli-Nelson, 266
de Wallis, 234
de Zuber et Findlay, 236
DEM, 445
homogène, 233
homogène équilibré, 250, 280
pour le débit critique, 435
- Montée en pression d'une enceinte, 182
- Moyenne
spatiale instantanée, 131
temporelle locale, 132
- Moyennes
espace/temps, 223
temps/espace, 223
- Multiplicateurs diphasiques, 297
- Nombre d'ébullition, 239
- Nukiyama
courbe de, 324
expérience de, 324
- Ondes
acoustiques, 404
de pression, 404
- Opérateur de moyenne
spatiale instantanée, 131
- Opérateurs de moyenne
commutativité des, 133
temporelle locale, 132
- Options de sûreté, 72
- Oscillations
acoustiques, 404
d'ondes de densité, 405
de débit, 403
- Paramètre de distribution, 236–238
- Perte de pression, 275
par frottement
en écoulement monophasique, 278
- Pincement, 14
- Plug flow, 141
- Point de fonctionnement, 279, 396
- Pompe à rotor noyé, 34
- Propulsion navale, 475
- Puissance
électrique brute, 64
électrique nette, 64
de pompage, 181
linéique, 66, 92
linéique moyenne, 14
massique, 66
du cœur, 93
résiduelle, 2, 65
spécifique, 14, 65
spécifique cœur, 93
thermique, 64
volumique, 65
du cœur, 93
- Réacteur
à eau bouillante, 27
cœur, 30
circuits de sauvegarde, 36
combustible, 30
cuve, 31
cycle direct, 29
description générale, 27
enceinte, 35
à eau sous pression, 15
cœur, 15
circuit de refroidissement, 20
circuits auxiliaires, 23
circuits de sauvegarde, 26
combustible, 15
cuve, 21
description générale, 15

- générateurs de vapeur, 21
- à gaz à haute température, 37
- de propulsion navale
 - cahier des charges, 477
- de petite puissance, 49
- de propulsion navale, 44, 475
 - accident de perte de réfrigérant primaire, 489
 - cœur et combustible, 45
 - chaufferie, 478
 - circuit de refroidissement, 46
 - composants, 482
 - critères de sûreté, 477
 - description générale, 44
- de recherche, 50
 - cœur et combustible, 52
 - circuit de refroidissement, 53
 - description générale, 50
 - enceinte de confinement, 55
 - systèmes de sauvegarde, 53
- nucléaire, 13
- Règle de Leibniz
 - forme limite, 220
- Règle de Leibniz, 166
 - forme limite, 215
- Recirculation, 189
- Redistribution de débit, 394
- Relation de comportement, 178
 - mécanique, 178
 - thermique, 178
 - thermodynamique, 178
- Relations de fermeture, 248
- Relations topologiques, 243
- Remontée du liquide, 149, 151
- Remontée et retombée du liquide, 148
- Rendement, 6
- Retombée du liquide, 149
- Retour d'expérience, 71
- Reynolds
 - théorème de transport de, 167
 - forme particulière, 169
- Rohsenow
 - corrélation de, 334
- Séquence accidentelle, 74
- Sackur-Tetrode (Equation de), 178
- Saha-Zuber
 - corrélation de, 352
 - diagramme de, 352
- SBWR
 - cycle thermodynamique, 55
- Section critique, 424
 - localisation de la, 455
- Sites de nucléation, 331
- Slug flow, 136, 140, 141
- Smooth stratified flow, 141
- Source d'entropie, 179
- Sous-canal, 95
- Sous-canal unitaire, 97
- Sous-marins nucléaires
 - d'attaque, 476
 - lanceurs d'engins, 475
- Sous-saturation
 - nombre de, 406
- Taitel
 - Carte de, 140
- Taitel et Dukler (Carte de), 145
- Taux de présence
 - local, 133
 - spatial instantané, 131
- Tension interfaciale, 209
- Théorème de Gauss
 - forme limite, 215, 220
- Thom
 - méthode de, 298
- Thomson
 - équation de, 320
- Titre
 - à l'équilibre thermodynamique, 134
 - massique, 134
 - volumique, 135
- Titre massique, 345
- TRISO (Particule), 38, 41, 117
- UO₂
 - capacité thermique massique, 107
 - conductivité thermique, 105
 - température de fusion, 107
- Variable indicatrice de phase, 131
- Viscosité équivalente, 282
- Vitesse
 - apparente, 135
 - apparente adimensionnelle, 151
 - de déplacement d'une surface, 160
 - de dérive pondérée, 236, 239
 - du son
 - en écoulement diphasique, 431
 - en écoulement monophasique, 425
 - massique, 134
 - superficielle, 135
- Volume de contrôle, 161