

COLLECTION
**GÉNIE
ATOMIQUE**

Thermohydraulique des réacteurs



Jean-Marc DELHAYE

instn

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES
ET TECHNIQUES NUCLÉAIRES


EDP
SCIENCES

Table des matières

Introduction à la collection « Génie Atomique »	i
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	45
7.1 Description générale	45
7.2 Le cœur et le combustible	45
7.3 Le circuit de refroidissement	47

7.4	Les réacteurs de petite puissance	48
8	Les réacteurs de recherche	49
8.1	Description générale	49
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	Evénements 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	95

3.1	Bilan d'énergie du caloporteur	95
3.2	Transfert de chaleur entre caloporteur et combustible	98
4	Analyse thermique 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	124
7.5	Puissance volumique et flux thermique surfacique moyens dans un REB	125
	Nomenclature	125
	Références	127
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	205
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	227
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	228
	Nomenclature	230
	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 tri- dimensionnel	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	Les équations de Clapeyron et de Clausius-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	329
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	Écoulements 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	401
3	Instabilité de type d'écoulement	401
4	Expulsion périodique	402
4.1	Description	402
4.2	Analyse	403
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