

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Introduction</b> . . . . .	5
<b>Chapitre 1. Notion sur les écoulements gaz-liquide</b> . . . . .	15
1.1. Introduction et notions de base . . . . .	15
1.2. Les écoulements gaz-liquide . . . . .	16
1.2.1. La physique du diphasique . . . . .	17
1.2.1.1. Rappels de thermodynamique : l'équilibre liquide vapeur . . . . .	17
1.2.1.2. La capillarité. . . . .	20
1.2.1.3. Dynamique de la bulle . . . . .	24
1.2.1.4. Ébullition nucléée . . . . .	28
1.2.2. Classification des écoulements . . . . .	30
1.2.2.1. Écoulements verticaux ascendants . . . . .	31
1.2.2.2. Écoulements horizontaux. . . . .	31
1.2.2.3. Écoulement vertical descendant. . . . .	31
1.2.3. Typologie des écoulements diphasiques. . . . .	32
1.2.3.1. Les paramètres . . . . .	33
1.2.3.2. Écoulements verticaux ascendants . . . . .	34
1.2.3.3. Écoulements verticaux descendants . . . . .	35
1.2.3.4. Écoulements horizontaux. . . . .	36
1.2.3.5. Zones de validité de ces écoulements . . . . .	37
1.2.4. Topologies d'un écoulement vertical chauffé . . . . .	38

1.2.4.1. Zones d'écoulement . . . . .	40
1.2.4.2. Profils de température . . . . .	41
1.2.4.3. Définition de la qualité . . . . .	42
1.2.5. Calcul des flux. . . . .	42
1.2.5.1. Écoulement monophasique ( <i>single phase flow</i> ) . . . . .	42
1.2.5.2. Ébullition nucléée ( <i>subcooled nucleate boiling</i> ) . . . . .	44
1.2.5.3. Ébullition développée ( <i>fully developed subcooled boiling</i> ) . . . . .	45
1.2.5.4. Ébullition nucléée saturée ( <i>saturated nucleate boiling</i> ) . . . . .	46
1.2.5.5. Région de convection forcée diphasique . . . . .	46
1.2.5.6. Autres approches . . . . .	48
1.2.5.7. Région d'écoulement monophasique « sec » . . . . .	49
1.3. Écoulements à phase dispersée : brouillards et sprays . . . . .	50
1.3.1. Brouillard . . . . .	50
1.3.2. La génération des sprays . . . . .	52
1.3.3. Caractérisation d'un spray : la granulométrie . . . . .	53
1.3.3.1. Distributions de tailles . . . . .	53
1.3.4. Vaporisation d'un spray : cas de la goutte isolée . . . . .	57
1.4. Quelques exemples . . . . .	59

## **Chapitre 2. La convection des espèces . . . . . 79**

2.1. Introduction . . . . .	79
2.2. Caractérisation d'un mélange et définition . . . . .	79
2.3. Loi du transfert diffusif : loi de Fick . . . . .	80
2.4. Similitude des équations de transport. . . . .	82
2.5. Résolution des équations de transport diffusif . . . . .	85
2.5.1. Analogies . . . . .	85
2.5.2. Couche limite non réactive et concentration fixée à la paroi . . . . .	87
2.5.2.1. Couche limite laminaire . . . . .	87
2.5.2.2. Couche limite turbulente . . . . .	89
2.5.3. Couche limite non réactive et catalyse pariétale . . . . .	90
2.5.3.1. Couche limite inerte . . . . .	90
2.5.3.2. Analogie thermique à l'ordre 1 . . . . .	91
2.5.3.3. Principe de superposition. . . . .	93
2.5.4. Couche limite réactive . . . . .	96

<b>Chapitre 3. Matériaux à changement de phase . . . . .</b>	<b>97</b>
3.1. Introduction . . . . .	97
3.2. MCP pour le refroidissement des dispositifs mécatroniques . . .	100
3.2.1. Description du transfert de chaleur et du comportement du MCP . . . . .	102
3.2.1.1. Conduction . . . . .	102
3.2.1.2. Convection . . . . .	102
3.2.1.3. Rayonnement . . . . .	103
3.2.2. Comportement du MCP . . . . .	103
3.3. Modèle numérique . . . . .	105
3.3.1. Description du modèle 3D . . . . .	105
3.3.2. Dissipateur thermique sans MCP . . . . .	106
3.3.3. Dissipateur thermique avec MCP . . . . .	107
3.4. Conclusion . . . . .	111
<b>Chapitre 4. Modélisation électrothermomécanique des systèmes . . . . .</b>	<b>113</b>
4.1. Introduction . . . . .	113
4.2. Théorie du couplage électrothermomécanique . . . . .	114
4.2.1. Phénomènes électrothermiques . . . . .	114
4.2.1.1. La loi d'Ohm . . . . .	115
4.2.1.2. La conduction électrique . . . . .	115
4.2.2. Formulation numérique du couplage électrothermomécanique . . . . .	116
4.2.2.1. Couplage électrothermique . . . . .	116
4.2.2.2. Couplage thermomécanique . . . . .	118
4.2.2.3. Couplage électrothermomécanique . . . . .	120
4.3. Simulation par la méthode des éléments finis du comportement électrothermomécanique . . . . .	121
4.3.1. Couplage fort de la modélisation électrothermomécanique . . . . .	121
4.3.2. Couplage faible de la modélisation électrothermomécanique . . . . .	123
4.4. Exemple de simulation électrothermomécanique d'un transistor HBT . . . . .	123
4.4.1. Modèle global du HPA . . . . .	124

4.4.1.1. Modélisation numérique des effets de serrage sur le comportement de la semelle . . . . .	124
4.4.1.2. Modélisation globale de l'amplificateur HPA . . . . .	126
4.4.2. Modèle local du transistor HBT . . . . .	129
4.5. Analyse modale des composants mécatroniques . . . . .	132
4.5.1. Mise en équation du problème vibratoire . . . . .	132
4.5.2. Formulation variationnelle . . . . .	134
4.5.3. Approximation par éléments finis . . . . .	134
4.5.4. Résolution dans le domaine fréquentiel . . . . .	136
4.5.4.1. Calcul des fréquences propres (analyse modale) . . . . .	136
4.5.4.2. Calcul de la fonction de réponse en fréquence . . . . .	137
4.6. Analyse modale stochastique des composants mécatroniques . . . . .	137
4.7. Identification numérique des paramètres élastiques des composants électroniques . . . . .	139
4.8. Exemple de modélisation et simulation du comportement vibratoire des composants mécatroniques . . . . .	140
4.9. Conclusion . . . . .	148

<b>Annexe 1. Propriétés physiques de fluides usuels . . . . .</b>	<b>149</b>
---	------------

<b>Annexe 2. Propriétés physiques de solides courants . . . . .</b>	<b>151</b>
---	------------

<b>Annexe 3. Propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau . . . . .</b>	<b>155</b>
---	------------

<b>Annexe 4. Fonctions <math>erf(x)</math>, <math>erfc(x)</math> et <math>ierfc(x)</math> . . . . .</b>	<b>159</b>
---	------------

<b>Liste des notations . . . . .</b>	<b>163</b>
--------------------------------------	------------

<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>169</b>
--------------------------------	------------

---

<b>Index</b> . . . . .	177
<b>Sommaire de <i>Transfert thermique 1</i></b> . . . . .	181
<b>Sommaire de <i>Transfert thermique 2</i></b> . . . . .	183
<b>Sommaire de <i>Transfert thermique 3</i></b> . . . . .	185