

Table des matières

Avant-propos	13
Chapitre 1. Modélisation des transferts de chaleur	15
1.1. Les différents modes de transfert de chaleur	15
1.1.1. Introduction et définitions	15
1.1.1.1. Champ de température	15
1.1.1.2. Gradient de température	15
1.1.1.3. Flux de chaleur	16
1.1.1.4. Bilan d'énergie	16
1.1.2. Conduction	17
1.1.3. Convection	19
1.1.4. Rayonnement	20
1.1.4.1. Linéarisation du flux radiatif	21
1.1.4.2. Cas d'une source à haute température	21
1.1.5. Stockage de chaleur	22
1.2. Modélisation des transferts de chaleur par conduction	22
1.2.1. L'équation de la chaleur	22
1.2.2. Conduction en régime permanent	25
1.2.2.1. Mur simple	25
1.2.2.2. Mur multicouche	26
1.2.2.3. Mur composite	27
1.2.2.4. Cylindre creux long (tube)	29
1.2.2.5. Cylindre creux multicouche	30
1.2.2.6. Cas général	31
1.2.3. Conduction en régime variable	32
1.2.3.1. Milieu à température uniforme	32
1.2.3.2. Milieu semi-infini	33

1.2.4. La méthode des quadripôles	41
1.2.4.1. Transfert unidirectionnel dans des murs plans	41
1.2.4.2. Transfert radial	47
1.3. Les propriétés thermiques d'un matériau	48
1.3.1. Conductivité thermique	48
1.3.1.1. Modèle parallèle	49
1.3.1.2. Modèle série	49
1.3.1.3. Modèle de Maxwell	50
1.3.1.4. Modèle de Bruggeman	50
1.3.1.5. Cas particulier d'un milieu poreux	51
1.3.2. Diffusivité thermique	51
1.3.3. Capacité thermique volumique	52
1.3.4. Effusivité thermique	52
1.3.5. Conclusion	52

Chapitre 2. Outils et méthodes pour la caractérisation thermique. 53

2.1. Mesure de la température	53
2.1.1. Thermomètre à colonne de liquide	53
2.1.2. Thermocouple	54
2.1.3. Thermistance	56
2.1.4. Résistance de platine	57
2.1.5. Détecteur IR	58
2.1.6. Caméra IR	58
2.1.7. Choix d'une méthode de mesure	61
2.1.8. Filtrage des données	62
2.2. Outils pour l'estimation des paramètres	64
2.2.1. Introduction	64
2.2.2. Modélisation quadripolaire	64
2.2.3. Analyse dimensionnelle	69
2.2.4. Étude des sensibilités réduites	71
2.2.4.1. Régime transitoire	72
2.2.4.2. Régime permanent	75
2.2.4.3. Conclusion	77
2.2.5. Méthode d'estimation des paramètres	78
2.2.6. Évaluation de l'erreur d'estimation due au bruit de mesure	80
2.2.6.1. Calcul analytique	80
2.2.6.2. Calcul statistique (simulations de Monte-Carlo)	81
2.2.6.3. Intérêt du calcul	81

2.2.7. Les autres sources d'erreur	82
2.2.7.1. Étalonnage du dispositif de mesure	82
2.2.7.2. Erreur sur les paramètres connus	84
2.2.7.3. Erreur de modèle	85
2.2.8. Domaine de validité d'un modèle et intervalle de temps d'estimation	88
2.2.8.1. Simulation numérique	88
2.2.8.2. Analyse des résidus	92
2.2.9. Choix de l'origine de la température	95
2.2.10. Conclusion	95

Chapitre 3. Méthodes de régime permanent 97

3.1. Introduction	97
3.2. Plaque chaude gardée	98
3.2.1. Principe	98
3.2.2. Hypothèses et modèle	99
3.2.3. Dispositif expérimental	100
3.2.4. Pratique de la mesure	100
3.3. Plan chaud centré	100
3.3.1. Principe	100
3.3.2. Hypothèses et modèle	101
3.3.3. Dispositif expérimental	103
3.3.4. Pratique de la mesure	104
3.4. Ruban chaud	107
3.4.1. Principe	107
3.4.2. Hypothèses et modèle	108
3.4.3. Dispositif expérimental	112
3.4.4. Pratique de la mesure	112
3.5. Tube chaud	114
3.5.1. Principe	114
3.5.2. Hypothèses et modèle	115
3.5.3. Dispositif expérimental	117
3.5.4. Pratique de la mesure	119
3.5.4.1. Mesure sur des solides	119
3.5.4.2. Mesure sur des liquides	121
3.6. <i>Cut bar</i>	122
3.6.1. Principe	122
3.6.2. Hypothèses et modèle	124
3.6.2.1. Méthode <i>cut bar</i> version 1	124
3.6.2.2. Méthode <i>cut bar</i> version 2	124

3.6.3. Dispositif expérimental	125
3.6.4. Pratique de la mesure.	125
3.6.4.1. Version 1.	125
3.6.4.2. Version 2.	128
3.6.4.3. Exemple d'installation de mesure	129

Chapitre 4. Méthodes transitoires flux/température 133

4.1. Introduction.	133
4.2. Plan chaud infini.	133
4.2.1. Principe.	133
4.2.2. Hypothèses et modèles.	134
4.2.2.1. Modèle complet.	134
4.2.2.2. Modèle simplifié	136
4.2.2.3. Limites de validité des modèles	137
4.2.3. Dispositif expérimental	138
4.2.4. Pratique de la mesure.	138
4.2.5. Montage asymétrique.	141
4.3. Plan chaud asymétrique fini	144
4.3.1. Mesure d'une température.	144
4.3.2. Mesure de deux températures	148
4.4. Fil chaud	151
4.4.1. Principe	151
4.4.1.1. Méthode à un fil	151
4.4.1.2. Méthode à deux fils	151
4.4.2. Hypothèses et modèle	152
4.4.2.1. Méthode à un fil	152
4.4.2.2. Méthode à deux fils	155
4.4.3. Dispositif expérimental	156
4.4.4. Pratique de la mesure.	156
4.5. Flash 1D.	159
4.5.1. Principe.	159
4.5.2. Hypothèses et modèles.	162
4.5.2.1. Le modèle 3D.	163
4.5.2.2. Réduction du modèle	165
4.5.2.3. Le modèle 1D.	171
4.5.2.4. Prise en compte de la forme et de la longueur de l'impulsion.	173
4.5.3. Méthodes d'estimation de la diffusivité	175
4.5.3.1. Méthode de Parker (Parker, 1961).	176
4.5.3.2. Méthode des temps partiels (Degiovanni, 1977)	177

4.5.3.3. Méthode des moments temporels (Degiovanni et Laurent, 1986)	178
4.5.3.4. Estimation à partir du modèle complet	178
4.5.4. Dispositifs expérimentaux	183
4.5.4.1. Banc de mesure	183
4.5.4.2. Exemple d'installations et de mesures	185
4.6. Flash 3D	192
4.6.1. Principe et historique	192
4.6.1.1. Principe	192
4.6.1.2. Un peu d'histoire	193
4.6.2. Hypothèses et modèle	194
4.6.3. Méthode d'identification	197
4.6.3.1. Première étape	197
4.6.3.2. Deuxième et troisième étapes	197
4.6.3.3. Validation de la méthode	198
4.6.4. Exemple de dispositif expérimental	200
4.6.5. Pratique de la mesure	204
4.6.5.1. Mise en œuvre de l'identification	204
4.6.5.2. Analyse des difficultés	205
4.7. <i>Hot disc</i>	208
4.7.1. Principe	208
4.7.2. Hypothèses et modèles	209
4.7.2.1. Modèle « sans sonde »	209
4.7.2.2. Modèle quadripolaire « avec sonde »	211
4.7.2.3. Étude de sensibilité	212
4.7.3. Dispositif expérimental	213
4.7.4. Étude expérimentale	214
4.8. Ruban chaud	217
4.8.1. Principe	217
4.8.2. Hypothèses et modèles	219
4.8.2.1. Modèle quadripolaire	219
4.8.2.2. Modèle simplifié	221
4.8.2.3. Cas d'un matériau anisotrope	222
4.8.2.4. Étude de sensibilité	222
4.8.3. Dispositif expérimental	224
4.8.4. Pratique de la mesure	225
4.8.4.1. Méthodes d'estimation des paramètres	225
4.8.4.2. Dimensions du ruban chaud	228
4.8.4.3. Résultats de mesures	230
4.8.4.4. Conclusion	232
4.9. Méthode 3ω	233

4.9.1. Principe	233
4.9.2. Hypothèses et modèle	234
4.9.3. Dispositif expérimental	236
4.9.4. Pratique de la mesure.	237
4.10. Calorimétrie.	239
4.10.1. Calorimètre différentiel.	240
4.10.2. Calorimètre à chute	242

Chapitre 5. Méthodes transitoires température/température 245

5.1. Introduction.	245
5.1.1. Exemple 1 : flash classique	247
5.1.2. Exemple 2 : méthode du tricouche	248
5.2. Tricouche plan	249
5.2.1. Principe	249
5.2.2. Hypothèses et modèle	252
5.2.2.1. Hypothèses	252
5.2.2.2. Modèle	252
5.2.2.3. Prise en compte de la conduction dans l'air ambiant	253
5.2.2.4. Étude de sensibilité.	254
5.2.3. Dispositif expérimental	256
5.2.4. Pratique de la méthode.	257
5.3. Tricouche cylindrique.	259
5.3.1. Principe	259
5.3.2. Hypothèses et modèle	261
5.3.2.1. Méthode d'estimation des paramètres inconnus.	263
5.3.2.2. Étude des sensibilités réduites	264
5.3.2.3. Influence du diamètre du tube extérieur	266
5.3.2.4. Évaluation de l'effet d'une erreur sur une donnée	266
5.3.2.5. Évaluation de l'effet d'une erreur de centrage.	267
5.3.2.6. Évaluation des écarts types sur les valeurs estimées	267
5.3.3. Dispositif expérimental	269
5.3.4. Pratique expérimentale.	270
5.4. Méthode de l'ailette transitoire	273
5.4.1. Principe	273
5.4.2. Hypothèses et modèle	274
5.4.2.1. Modèle	274
5.4.2.2. Méthode d'estimation des paramètres inconnus.	276
5.4.2.3. Étude des sensibilités réduites	276
5.4.3. Dispositif expérimental	276
5.4.4. Pratique de la mesure.	278

Chapitre 6. Choix d'une méthode adaptée	279
6.1. Conseils de mesure	279
6.1.1. Combien de mesures ?	279
6.1.2. Régime permanent ou régime transitoire ?	280
6.1.3. Et si le milieu est humide ?	281
6.1.4. Et si le matériau est semi-transparent ?	282
6.1.4.1. Milieux purement diffusants	283
6.1.4.2. Milieux purement absorbants	284
6.2. Choix d'une méthode	285
6.2.1. Solide consolidé	285
6.2.2. Liquides	287
6.2.3. Poudres	287
6.2.4. Couches minces	288
Chapitre 7. Analogie entre les différents transferts	289
7.1. Diffusion de la chaleur par conduction	289
7.2. Diffusion de la vapeur d'eau	290
7.3. Écoulement d'un gaz dans un milieu poreux	292
7.4. Analogie entre les différents transferts	294
7.5. Exemple d'adaptation d'une méthode thermique à un autre domaine	294
Annexes	299
Nomenclature	327
Bibliographie	329
Index	341