

Table des matières

Avant-propos	17
Chapitre 1. Four rotatif pour calcination, échange thermique par rayonnement	19
1.1. Généralités	19
1.1.1. Objet des fours de calcination.	19
1.1.2. Caractéristiques particulières du transfert thermique	19
1.1.3. Chauffage des gaz dans les fours	19
1.2. Description	20
1.2.1. Principe du four	20
1.2.2. Circulation des gaz dans l'appareil.	21
1.2.3. Portages.	22
1.2.4. Revêtement.	23
1.2.5. Joints d'étanchéité aux extrémités du tambour.	24
1.2.6. Cinématique de l'entraînement d'un four de calcination	24
1.2.7. Alimentation des séchoirs tournants	25
1.2.8. Bris des grains	25
1.2.9. Puissance à l'arbre du moteur électrique	26
1.2.10. Progression axiale du produit dans un tambour nu en l'absence de gaz.	27
1.2.11. Détermination de l'angle de progression α	28
1.2.12. Expression du temps de séjour	29
1.2.13. Prise en compte de la présence du gaz	30
1.2.14. Taux de remplissage	31
1.3. Echange thermique par rayonnement – Rappels	32
1.3.1. Hypothèse de travail	32

1.3.2. Concepts utilisés	33
1.3.3. La loi de Kirchhoff pour les surfaces	34
1.3.4. Luminance et densité de flux émis	35
1.3.5. Réflexion spéculaire et réflexion diffuse	38
1.3.6. Notion de radiosité d'une surface parfaitement diffuse	38
1.3.7. Surface équivalente d'échange direct (S.E.E.D.)	39
1.3.8. Parcours équivalent et parcours moyen dans un gaz	40
1.3.9. Emissivité, absorptivité, transmittivité du mélange gazeux (calcul)	41
1.3.10. Répartition du rayonnement direct	44
1.3.11. Densité de flux énergétique émise par chaque élément de paroi	46
1.3.12. Flux net reçu par la surface A_i	48
1.3.13. Différence entre flux net reçu et flux absorbé	48
1.3.14. Flux net sur une surface grise unique entourant un gaz gris	49
1.3.15. Flux net sur deux surfaces rapprochées	50
1.3.16. Evaluations des S.E.E.D. – Cas particuliers simples	51
1.4. Transfert thermique dans les fours rotatifs pour calcination	52
1.4.1. Mécanisme du transfert	52
1.4.2. S.E.E.D. pour la paroi dénudée et la surface libre du produit	53
1.4.3. Densités de flux nettes reçues par la paroi et le produit	54
1.4.4. La paroi en tant que régénérateur	56
1.4.5. Expression des coefficients complémentaires pour le transfert thermique	58
1.4.6. Solution de l'équation de la paroi	58
1.4.7. Puissance thermique globale transférée au produit à calciner	60

Chapitre 2. Les échangeurs tubulaires et les échangeurs

à plaques	67
2.1. Description des échangeurs	67
2.1.1. Les configurations possibles	67
2.1.2. Caractéristiques des tubes	68
2.1.3. Diamètre de calandre et de faisceau – Nombre de tubes	69
2.1.4. Chicane transversales (caractéristiques)	71
2.2. Calculs côté tubes	72
2.2.1. Transfert thermique à l'intérieur des tubes (liquide clair ou gaz)	72
2.2.2. Transfert thermique à l'intérieur des tubes (dispersion liquide-solide)	74
2.2.3. Chute de pression à l'intérieur des tubes	76

2.3. Calculs côté calandre	77
2.3.1. Coefficient de transfert brut côté calandre	77
2.3.2. Correction du coefficient pour les fuites	81
2.3.3. Chute de pression pour l'écoulement à courant croisé	81
2.3.4. Chute de pression côté calandre	83
2.3.5. Coefficient de transfert thermique global	87
2.4. Données pratiques	87
2.4.1. Les valeurs usuelles de la chute de pression	87
2.4.2. Calcul des échangeurs sur ordinateur	88
2.4.3. Remarque : température calorique	89
2.5. Les échangeurs à plaques.	90
2.5.1. Description	90
2.5.2. Le nombre d'unités de transfert.	90
2.5.3. Le paramètre de chute de pression	92
2.5.4. Groupage des plaques et coefficient correcteur	93
2.5.5. Encrassement	93
2.5.6. Matériaux de construction utilisés	94

Chapitre 3. Echangeurs à tubes ailetés 95

3.1. Généralités	95
3.1.1. Intérêt des tubes à ailettes	95
3.1.2. Types d'échangeurs à tubes ailetés.	95
3.1.3. Définition de la section frontale	95
3.2. Données techniques	96
3.2.1. Disposition du faisceau	96
3.2.2. Les boîtes d'extrémité des aérorefrigérants.	96
3.2.3. Caractéristiques des tubes ailetés pour aérorefrigérants	97
3.3. Efficacité des ailettes	99
3.3.1. Préliminaires.	99
3.3.2. Champ de température dans une ailette	99
3.3.3. Calcul des fonctions de Bessel modifiées d'ordre zéro et un	101
3.3.4. Définition de l'efficacité.	102
3.3.5. Calcul théorique de l'efficacité	103
3.3.6. Calcul approché de l'efficacité	105
3.4. Autres paramètres thermiques	106
3.4.1. Coefficient de transfert côté gaz	106
3.4.2. Coefficient global sur tubes nus	107
3.4.3. Températures de sortie (courant croisé pur)	108
3.4.4. Températures de sortie (contre-courant pur)	109

3.4.5. Courant croisé (plusieurs passes par rapport au gaz)	110
3.5. Détermination de la géométrie.	111
3.5.1. Nombre de rangées et surface frontale.	111
3.5.2. Fonctions mathématiques utilisées	113
3.5.3. Nombre de tubes par passe	113
3.5.4. Largeur des rangées de tubes	114
3.5.5. Nombre de tubes par rangée et par passe	115
3.6. Simulation et calcul direct	116
3.6.1. Simulation	116
3.6.2. Calcul direct	117
3.7. Les ventilateurs	118
3.7.1. Généralités	118
3.7.2. Emplacement	118
3.7.3. Diamètre	119
3.7.4. Nombre	120
3.7.5. Puissance de ventilation	120
3.8. Mise en œuvre des aéroréfrigérants.	121
3.8.1. Régulation	121
3.8.2. Protection contre le gel ou le givrage	122
3.8.3. Encrassement côté air	122

Chapitre 4. Echangeurs à surface raclée, tour de sphérolation, solidification sur support 123

4.1. Généralités	123
4.1.1. Intérêt pour les produits visqueux	123
4.1.2. Conceptions possibles pour l'appareil et transfert thermique	124
4.2. Les divers types d'échangeurs à surface raclée ou balayée	125
4.2.1. Appareils à jeu quasi nul, mais pratiquement insensible à l'usure	125
4.2.2. Appareils à jeu moyen sensibles à l'usure	128
4.2.3. Appareils à large espacement	128
4.3. Tour de sphérolation	130
4.3.1. Introduction	130
4.3.2. Formation des gouttelettes.	130
4.3.3. Données pratiques	131
4.3.4. Dimensionnement.	131
4.3.5. Pollution	135
4.4. Solidification continue sur support	135
4.4.1. Principe.	135
4.4.2. Eléments pour un calcul	135

Chapitre 5. L'efficacité des échangeurs monophasiques, l'encrassement	137
5.1. Nombre d'unités de transfert et efficacité	137
5.1.1. La différence logarithmique moyenne de température (DLMT)	137
5.1.2. Le nombre d'unités de transfert (NUT)	140
5.1.3. Efficacité	140
5.1.4. Applications de la notion d'efficacité	143
5.1.5. Echangeurs multipasses et coefficient F.	146
5.2. Remarques d'ordre pratique – L'encrassement	148
5.2.1. Conception du transfert thermique	148
5.2.2. Les types d'encrassement les plus courants.	148
5.2.3. Conséquences pratiques de l'encrassement.	149
5.2.4. Les valeurs usuelles de l'encrassement	150
5.2.5. Calcul des températures de la paroi	151
Chapitre 6. Les condenseurs, les purgeurs, les lignes de condensats	153
6.1. Condenseurs par surface	153
6.1.1. Structure	153
6.1.2. Montage	153
6.1.3. Coefficient de condensation isotherme d'une vapeur pure	153
6.1.4. Calcul d'un condenseur à vapeur pure.	156
6.1.5. Densités de flux thermique pour un mélange de vapeurs.	157
6.1.6. Cas d'une vapeur condensable en présence d'incondensable	158
6.1.7. Mélange de deux vapeurs condensables.	159
6.1.8. Evaluation de D_{am}/δ et D_{AB}/δ	160
6.1.9. Evaluations de y_{Ac} et x_{Ac}	161
6.1.10. Débit de réfrigérant	162
6.1.11. Calcul de la surface du condenseur	162
6.2. Surefroidissement du condensat.	163
6.2.1. Préliminaires	163
6.2.2. Coefficient de transfert pour le surefroidissement	163
6.3. Condenseurs par mélange	165
6.3.1. Généralités	165
6.3.2. Calcul des condenseurs à mélange	166
6.4. Les types de purgeurs	170
6.4.1. Utilité du purgeur de condensats	170
6.4.2. Purgeur thermostatique à bilame	170

6.4.3. Purgeur thermostatique équilibré à dilatation de liquide	170
6.4.4. Purgeur thermostatique équilibré à vaporisation de liquide	171
6.4.5. Purgeur à cloche.	171
6.4.6. Purgeur à flotteur	172
6.4.7. Purgeurs thermodynamiques	172
6.5. Le choix et le montage des purgeurs	173
6.5.1. Installation des purgeurs (montage classique)	173
6.5.2. Nécessité de la purge directe à l'atmosphère	174
6.5.3. Intérêt du bipasse vers le réseau des condensats	175
6.5.4. Claquement dans les tuyauteries de vapeur	175
6.5.5. Débit de condensat à purger sur une tuyauterie de vapeur	175
6.5.6. Choix des purgeurs	176
6.6. Les lignes de condensats : évacuation et utilisation des condensats	177
Chapitre 7. Ebullition et transfert thermique	179
7.1. Ebullition stagnante	179
7.1.1. Définitions	179
7.1.2. Densité de flux thermique traversant la paroi	180
7.1.3. Calcul de la surchauffe de la paroi	181
7.1.4. Assèchement de la paroi	183
7.2. Ebullition convective : coefficient de transfert thermique	185
Chapitre 8. Les rebouilleurs thermosiphon	189
8.1. Méthode manuelle	189
8.1.1. Principe de fonctionnement du rebouilleur	189
8.1.2. Détermination du niveau où commence l'ébullition.	190
8.1.3. Calcul des chutes de pression et vérification de la hauteur motrice de liquide dans le réservoir ou le fond de colonne	193
8.1.4. Vérification de l'intensité du transfert thermique	197
8.2. Utilisation de l'ordinateur	199
8.2.1. Calcul des rebouilleurs en simulation	199
8.2.2. Calcul des rebouilleurs en détermination directe	207
8.3. Stabilité de fonctionnement des rebouilleurs thermosiphon (respiration).	208
8.3.1. Mécanisme du phénomène	208
8.3.2. Facteurs pratiques agissant sur la stabilité des bouilleurs	209

Chapitre 9. La concentration des solutions par vaporisation	211
9.1. Introduction : terminologie.	211
9.2. Le retard à l'ébullition	211
9.2.1. Définition.	211
9.2.2. Calcul du retard à l'ébullition	212
9.3. L'évaporation à multiples effets.	216
9.3.1. La consommation spécifique idéale	216
9.3.2. La consommation spécifique pratique	217
9.3.3. Arrangements possibles	217
9.3.4. Préchauffe des liqueurs	220
9.3.5. Bilan thermique d'un effet.	220
9.3.6. Bilans matière et thermique d'un multiple effet (méthode manuelle).	222
9.3.7. Bilan matière sur ordinateur.	222
9.3.8. Bilan thermique sur ordinateur, calcul d'ensemble	224
9.3.9. Pertes thermiques	224
9.4. La recompression des buées	225
9.4.1. Thermocompression des buées	225
9.4.2. Recompression mécanique des buées (RMB)	225
9.5. Description, choix et calcul des évaporateurs.	226
9.5.1. Évaporateur à tubes courts (caisses de sucrerie)	226
9.5.2. Évaporateur à grimpage	227
9.5.3. Évaporateur à circulation forcée	228
9.5.4. Évaporateur à film tombant	229
9.5.5. Autres types d'évaporateurs.	230
9.5.6. Calcul des évaporateurs	231
9.5.7. Les séparateurs de buées.	231
9.5.8. Les propriétés physiques nécessaires au calcul des appareils de vaporisation	231
9.5.9. Ordre de grandeur des coefficients de transfert thermique	232
 Chapitre 10. Vaporiseur (évaporateur) à film tombant	 233
10.1. Généralités	233
10.1.1. Types d'évaporateurs à film tombant	233
10.1.2. Performances de l'appareil.	234
10.1.3. Intérêt des évaporateurs à film tombant	235
10.2. Mouillage des tubes	236
10.2.1. Charge linéique minimale	236
10.2.2. Charge linéique maximale	237

10.3. Vitesse des buées dans les tubes	237
10.3.1. Courant ascendant pour les buées.	237
10.3.2. Courant descendant pour les buées	239
10.4. Transfert thermique	240
10.4.1. Coefficient de transfert partiel côté tubes	240
10.4.2. Coefficient de transfert global.	242
10.5. Plaque de répartition.	243
10.5.1. Description	243
10.5.2. Calcul sur ordinateur	244
10.5.3. Chute de pression des buées le long des tubes	245
10.6. Dimensionnement de l'évaporateur	246
10.6.1. Longueur des tubes (préchauffe d'une alimentation froide)	246
10.6.2. Longueur des tubes (section de vaporisation).	247
Chapitre 11. Transfert thermique en cuve agitée	249
11.1. Transfert par serpentín	249
11.1.1. Généralités	249
11.1.2. Définition du serpentín	249
11.2. Coefficient à la paroi de la cuve	250
11.2.1. Turbines et palettes	250
11.2.2. Hélice marine	252
11.2.3. Serpentín	252
11.2.4. Double enveloppe : coefficient intérieur.	253
11.3. Fluides visqueux – Régime laminaire.	253
11.3.1. Ruban	253
11.3.2. Ancre	253
11.4. Conditionnement thermique des cuves et réservoirs	253
11.4.1. Principe de l'opération	253
11.4.2. Transfert thermique à l'aide d'un serpentín.	254
11.4.3. Transfert thermique par la paroi à double enveloppe	255
11.4.4. Disposition interne	256
11.4.5. Disposition externe	257
11.4.6. Disposition mixte	258
Chapitre 12. Refroidissement ou réchauffement des solides de forme simple et des végétaux, blanchiment	261
12.1. Conditionnement thermique des solides compacts de forme simple	261

12.1.1. Expression des températures – Etude théorique	261
12.1.2. Variables auxiliaires	265
12.2. Conditionnement thermique des solides de forme simple	
– Etude semi-empirique	265
12.2.1. Introduction.	265
12.2.2. Plaque et parallépipède rectangle	266
12.2.3. Cylindre fini ou infini.	268
12.2.4. Sphère	269
12.3. Conditionnement thermique et traitement hydrothermique	271
12.3.1. Torrification des végétaux	271
12.3.2. Traitement hydrothermique des graines oléagineuses	271
12.3.3. Séchage	272
12.3.4. Blanchiment	272

Chapitre 13. Isolation thermique des tuyauteries, traçage 273

13.1. Isolation thermique	273
13.1.1. Types d'isolation	273
13.1.2. Types d'isolants	274
13.1.3. Coefficient de pertes thermiques avec l'ambiance	274
13.1.4. Densité de flux thermique	275
13.1.5. Température de la paroi au contact de l'ambiance	276
13.1.6. Calcul de l'épaisseur d'un calorifuge	276
13.2. Traçage d'une tuyauterie	277
13.2.1. Principe de la méthode	277
13.2.2. Coefficient de transfert thermique	278
13.2.3. Données pratiques.	280

Chapitre 14. Combustion et point de rosée sulfurique 283

14.1. Caractéristiques de la combustion	283
14.1.1. L'air comburant	283
14.1.2. Le combustible.	284
14.1.3. Pouvoir comburivore	284
14.1.4. Pouvoir fumigène et composition des fumées en volume.	285
14.2. Teneur en SO ₃ et point de rosée	285
14.2.1. Calcul de la pression partielle d'anhydride sulfurique.	285
14.2.2. Calcul de la température de rosée sulfurique	287

Chapitre 15. L'apport de chaleur par rayonnement micro-ondes ou infrarouge	289
15.1. Le chauffage micro-ondes : théorie	289
15.1.1. Equations de Maxwell	289
15.1.2. Bilan énergétique du rayonnement électromagnétique	290
15.1.3. Equation de propagation du champ électrique	291
15.1.4. Profondeur de pénétration dans un diélectrique	293
15.1.5. Conductivité diélectrique.	295
15.1.6. Impédance d'onde.	296
15.2. Le chauffage micro-ondes : pratique	297
15.2.1. Consommation énergétique et durée de chauffe	297
15.2.2. Puissance thermique dégagée – Emballément	298
15.2.3. Coefficients de transmission à l'interface de deux diélectriques.	299
15.2.4. Champ électrique dans le four et densité de flux énergétique	301
15.2.5. Dispositions pratiques et utilisation	302
15.3. Séchage par rayonnement infrarouge	302
15.3.1. Production du rayonnement	302
15.3.2. Absorption du rayonnement	303
15.3.3. Données pratiques.	305
 Chapitre 16. Congélation, surgélation, décongélation	 307
16.1. Introduction : propriétés des produits.	307
16.2. Dispositifs industriels pour la congélation	307
16.2.1. Principe de la surgélation	308
16.2.2. Charges en armoire	308
16.2.3. Tunnel à chariots	308
16.2.4. Surgélateur continu à balayage d'air	308
16.2.5. Congélation par contact	308
16.2.6. Congélation par aspersion	309
16.2.7. Surgélation par aspersion.	309
16.2.8. Surgélateur continu à double bande	309
16.2.9. Surgélateur à lit fluidisé ou à lit fixe	309
16.2.10. Les groupes frigorifiques	310
16.2.11. Les fluides frigorifiques.	310
16.2.12. Bilan thermique	311
16.3. Le temps de congélation : équation de Planck.	311

16.3.1. Cas d'une plaque	311
16.3.2. Cas de la sphère	312
16.3.3. Généralisation I	313
16.3.4. Généralisation II	313
16.3.5. Temps de congélation et de décongélation (calcul numérique)	313
16.4. Le temps de congélation : méthode pratique	314
16.4.1. Remarque préalable	314
16.4.2. Définitions des dimensions caractéristiques	314
16.4.3. Méthode de Cleland <i>et al.</i>	315
16.4.4. Température moyenne de congélation	317
16.4.5. Correction de prérefroidissement	317
16.5. La décongélation	320
16.5.1. Décongélation par micro-ondes	320
16.5.2. Réchauffement externe	321
16.5.3. Réchauffement par contact	321
16.5.4. Pertes par exsudation	321
16.5.5. Calcul du temps de décongélation	321
Chapitre 17. La lyophilisation	323
17.1. Généralités	323
17.1.1. Principe de la lyophilisation	323
17.1.2. Apport de chaleur	324
17.1.3. Mise en œuvre de la lyophilisation	324
17.2. Thermodynamique de la congélation	325
17.2.1. Activité de l'eau solvante en équilibre avec la glace	325
17.2.2. Expression empirique de l'activité de l'eau pour la congélation préalable	327
17.2.3. Expression des enthalpies pour la lyophilisation	330
17.2.4. Conclusion : le processus de lyophilisation	332
17.3. Les équations de la migration	333
17.3.1. Libre parcours moyen	333
17.3.2. Débit dans un tube en régime de Knudsen	334
17.3.3. Viscosité d'un gaz	334
17.3.4. Equations de la migration	335
17.3.5. Rayon de pore moyen	337
17.3.6. Relation entre la porosité instantanée et la teneur en eau	338
17.4. La simulation d'une lyophilisation	339

Annexe A. Caractéristiques des tubes pour échangeurs	341
Annexe B. Résistance, conductance, « diffusance »	343
Bibliographie	345
Index	353