

Table des matières

Avant-propos	13
Chapitre 1. L'air humide, les tours de refroidissement d'eau	15
1.1. Les grandeurs de l'air humide	15
1.1.1. Humidité absolue et humidité relative	15
1.1.2. Enthalpie de l'air humide	16
1.1.3. Masse volumique de l'air humide	17
1.1.4. Pression de vapeur de l'eau	19
1.1.5. Les coefficients de transfert et le nombre de Lewis	19
1.1.6. Equation du thermomètre humide	20
1.2. Le diagramme de Mollier	21
1.3. Mesure de la température humide : thermomètre humide et psychromètre	24
1.4. La tour de refroidissement	26
1.4.1. Description de la tour.	26
1.4.2. Calcul de la tour.	27
1.4.3. Tour à courants croisés.	31
1.4.4. Panache blanc de l'air sortant de la tour (en hiver)	32
1.4.5. Tour à tirage naturel	32
Chapitre 2. Adsorption et chromatographie, échange d'ions	35
2.1. Généralités	35
2.1.1. Adsorption d'une impureté gazeuse	35
2.1.2. Différents modes opératoires de la chromatographie	36

2.1.3. Analyse frontale	37
2.1.4. Développement par élution (avec le solvant initial)	39
2.1.5. Développement par déplacement (« poussage »)	39
2.2. Modes d'alimentation d'une colonne d'adsorption	40
2.2.1. Injection rectangulaire – Injection brève	40
2.2.2. Alimentation échelon	41
2.3. Paramètres de transfert	42
2.3.1. Dispersivité axiale de la phase fluide	42
2.3.2. Coefficient de transfert de matière fluide-solide	44
2.3.3. Equation (de bilan) pour le fluide	46
2.3.4. Conditions initiales et conditions aux limites	48
2.4. Hauteur équivalente à un plateau théorique	49
2.4.1. Détermination graphique de t_R , de l'écart-type σ et du paramètre k'	49
2.4.2. La notion de paramètre de capacité	50
2.4.3. Hauteur équivalente à un plateau théorique : Horvath et Lin, 1978	52
2.4.4. Hauteur équivalente à un plateau théorique : Knox, 1977	53
2.4.5. Le calcul de Glueckauf (1955) pour le nombre de plateaux théoriques	54
2.5. Système idéal et bilan matière	56
2.5.1. Le système quasi idéal	58
2.5.2. Lignes à concentration constante dans le fluide	58
2.5.3. Bilan matière à deux termes (système quasi idéal)	59
2.5.4. Loi de Sillen	61
2.5.5. Conséquence de la loi de Sillen	62
2.6. Les solutions analytiques	63
2.6.1. La solution de Rosen (1952, 1954) pour une alimentation échelon dans une colonne	63
2.6.2. Isotherme linéaire, injection échelon	65
2.6.3. Echange d'ions de même valence	67
2.6.4. Coefficient de la cinétique réactionnelle	68
2.6.5. Calcul du profil de concentrations constant	70
2.6.6. La courbe en cloche de Villermaux et Van Swaaij pour une injection brève	72
2.7. Cheminement d'un soluté unique	74
2.7.1. Injection de forme quelconque. Abscisse de la discontinuité	74
2.7.2. Propagation d'une impulsion rectangulaire, système quasi idéal	75

2.7.3. Propagation d'une discontinuité de concentration	76
2.7.4. Allure du profil de q en fonction du temps (soluté unique)	77
2.7.5. Calcul du temps d'élution du front de concentration	79
2.7.6. Position et largeur du pic d'élution.	82
2.8. Nombre de solutés supérieur à 1	84
2.8.1. Etude d'un mélange binaire	84
2.8.2. Profils de concentration (plusieurs solutés).	86
2.8.3. Exceptions à la règle	87
2.9. La simulation numérique par collocation orthogonale :	
méthode des éléments finis	87
2.9.1. Présentation du problème	87
2.9.2. La méthode des éléments finis	88
2.9.3. Les polynômes orthogonaux	89
2.9.4. Erreur du développement en série : nœuds de collocation	90
2.9.5. Matrice de discrétisation [A]	90
2.9.6. Généralisation aux autres matrices de discrétisation	92
2.9.7. Cas d'un polynôme pair quelconque.	92
2.9.8. Intégration par rapport au temps	94
2.10. Autres méthodes numériques.	95
2.10.1. Méthode des différences finies	95
2.10.2. La méthode de Craig	97
2.11. L'échange d'ions.	98
2.11.1. Principe de l'échange d'ions.	98
2.11.2. Capacité d'échange : les unités utilisées.	98
2.11.3. Les résines faiblement acides ou basiques.	99
2.11.4. Les résines fortement acides ou basiques	100
2.11.5. Liqueurs de régénération	101
2.11.6. Partage et sélectivité	102
2.11.6.1. Fuites	103
2.11.7. Capacités d'échange	104
2.11.8. Echange d'ions de même valence.	105
2.11.9. Coefficient de la cinétique réactionnelle.	106

Chapitre 3. Données pratiques sur l'adsorption, l'échange d'ions et la chromatographie 109

3.1. Quelques caractéristiques de l'équilibre fluide-solide.	109
3.2. Adsorption (« discontinue ») à partir d'une charge :	
l'adsorption par contact suivie de filtration.	111
3.3. Définition d'une colonne industrielle pour la chromatographie	112

3.3.1. Conception de l'installation	112
3.3.2. Nombre de plateaux théoriques	112
3.3.3. Relation entre nombre de plateaux et la HEPT	114
3.3.4. Débit de production (chromatographie liquide)	114
3.3.5. Chute de pression à travers un lit fixe	115
3.3.6. Adsorption en lit fixe et temps de brisure	116
3.4. Utilisation pratique des adsorbants.	118
3.4.1. Caractéristique du charbon des adsorbants.	118
3.4.2. Régénération du charbon	118
3.4.3. Précautions à prendre : explosion, points chauds (charbon)	118
3.4.4. Corrosion	119
3.4.5. Lit fixe	119
3.4.6. Lit mobile de charbon fluidisé par gaz	119
3.4.7. L'alumine activée : lit fixe	120
3.4.8. Plateaux fluidisés (silice)	121
3.4.9. Lit fixe (silice)	121
3.4.10. Les zéolites	122
3.4.11. Les résines : nature	123
3.4.12. Utilisations industrielles des résines.	123
3.4.13. Longévité des résines	124
3.4.14. Mise en œuvre des résines.	124
3.5. Adsorption non isotherme	125
3.5.1. Quelques notations pour commencer	125
3.5.2. Une proposition pour la diffusivité en adsorption en milieu poreux	125
3.5.3. Bilan thermique local dans un sphérule	127
3.5.4. Bilan thermique du fluide.	129
3.5.5. Equations d'échanges fluide-solide	130
3.5.6. Diffusivité intracorpulaire	131
3.5.7. La méthode empirique de Lee et Cummings	132
3.6. Cas particuliers de la chromatographie	132
3.6.1. Elution avec gradient	132
3.6.2. Chromatographie dite avec inversion de phases (C.I.P.)	133
3.6.3. Questions diverses	134
3.7. Pratique de l'échange d'ions	134
3.7.1. Procédures pratiques de régénération	134
3.7.2. Le gonflement des résines	135
3.7.3. Procédés divers et combinaisons possibles	135
3.7.4. Obtention d'eau très pure par déminéralisation poussée.	136
3.7.5. Quelques applications de l'échange ionique	137

Chapitre 4. Théorie du séchage, théorie de l'imbibition et du drainage, le phénomène d'hystérèse	139
4.1. Propriétés des produits	139
4.1.1. Qu'est-ce que le séchage ?	139
4.1.2. La loi des phases	139
4.1.3. Les cristaux humides	140
4.1.4. Les produits alimentaires	141
4.1.5. Chaleur latente d'excès (appelée aussi chaleur de liaison)	142
4.1.6. Diffusivité de l'eau dans les végétaux	144
4.2. Méthodes générales de calcul des séchoirs	145
4.2.1. Bilan matière.	145
4.2.2. Expression des enthalpies	146
4.2.3. Bilan thermique théorique	147
4.2.4. Bilan thermique pratique.	148
4.2.5. Hypothèse de température uniforme des cristaux	149
4.2.6. Transfert de matière du solide au gaz	150
4.2.7. Bilans différentiels	151
4.2.8. Evaporation à travers une surface élémentaire	152
4.2.9. Température humide	154
4.2.10. Calcul d'un séchoir continu en régime convectif.	156
4.2.11. Séchage des cristaux et des graines (une solution possible)	157
4.2.12. Une méthode de calcul possible pour les séchoirs continus	157
4.2.13. Humidité irréductible	158
4.2.14. Graphe enthalpique	159
4.2.15. Estimation rapide et approximative d'un séchoir.	160
4.2.16. Séchage diffusionnel	161
4.3. Les coefficients de transfert	162
4.3.1. Coefficient de transfert de chaleur	162
4.3.2. Correspondance entre coefficients surfacique et volumique	164
4.3.3. Coefficients de transfert de matière, coefficient psychrométrique	165
4.4. Pression capillaire (imbibition-drainage)	166
4.4.1. Définition.	166
4.4.2. Angle de contact	168
4.4.3. Les trois états d'un corps poreux imbibé de liquide.	168
4.4.4. Pression capillaire et saturation.	169
4.5. Thermodynamique et capillarité.	171
4.5.1. Energie libre et aire de l'interface	171

4.5.2. Equation de Kelvin	172
4.5.3. Conséquence : film liquide sur une surface solide.	174
4.5.4. Relation d'équilibre (un inerte est présent dans le gaz).	175
4.6. Adsorption et capillarité dans un corps poreux inorganique	178
4.7. Hystérèse	180
4.7.1. Hystérèse : adsorption et désorption d'un gaz dans un solide inorganique	180
4.7.2. Courbure et rayon de pore : hystérèse par angle de contact	181
4.7.3. Hystérèse et modèle de la bouteille	182
4.7.4. Hystérèse des matériaux biologiques	184
4.7.5. L'hystérèse et la condensation capillaire selon Broekhoff et de Boer	185
4.8. Mouvements des fluides	188
4.8.1. Ecoulement biphasique : composition de l'écoulement.	188
4.8.2. Perméabilités relatives	189
4.8.3. Séchage d'un milieu poreux, rigide et inerte	193

Chapitre 5. Les séchoirs. 195

5.1. Généralités	195
5.1.1. Les diverses classes de séchoirs	195
5.1.2. Phases et composants.	196
5.2. Séchoirs par charges	197
5.2.1. Intérêt	197
5.2.2. Séchoir sous vide brassé par racleur	197
5.2.3. Séchoir à lit fluidisé fonctionnant par charges	198
5.2.4. Armoires et étuves	198
5.3. Tour d'atomisation et tour de sphérolation	200
5.3.1. Principe de la méthode.	200
5.3.2. Dispositifs de pulvérisation	200
5.3.3. Conception et intérêt des tours	202
5.3.4. Calcul d'une colonne de sphérolation	208
5.4. Séchoir tournant à chauffage indirect	210
5.4.1. Description et intérêt	210
5.4.2. Calculs préalables.	210
5.5. Séchoir pneumatique	211
5.5.1. Description.	211
5.5.2. Simulation dans le divergent	212

5.5.3. Calculs préliminaires	213
5.5.4. Calcul thermique	216
5.5.5. Calcul dans le tuyau	218
5.5.6. Surchauffe du produit	218
5.5.7. Section du col du venturi	219
5.5.8. Entrée d'air au venturi	219
5.5.9. Données pratiques et utilisation.	220
5.5.10. Estimation rapide d'un appareil.	220
5.6. Séchoirs à cylindres	222
5.6.1. Principe et description	222
5.6.2. Densité de flux thermique pour la vaporisation	224
5.6.3. Simulation	225
5.7. Séchoir continu à table fluidisée : principe	226
5.8. Séchage des corps poreux	227
5.8.1. Définitions	227
5.8.2. Le séchage des produits rétractiles	228
5.8.3. Humidité critique	230
5.8.4. Le solide est entouré d'une peau	230
5.8.5. Les céramiques : méthode simplifiée	231
5.9. Le séchage en four tunnel : disposition pratique	233
5.10. Transfert thermique dans les séchoirs à tambour	237
5.10.1. Surface de contact entre produit et gaz.	237
5.10.2. Coefficient de transfert thermique	238
5.10.3. Exemple de calcul thermique simplifié d'un séchoir à lames	238
5.11. Les installations annexes	240
5.11.1. Dépoussiérage de l'air	240
5.11.2. Refroidissement du produit	241
5.12. Le choix des séchoirs	242
5.12.1. Selon l'état physique du produit	242
5.12.2. Selon l'énergie dépensée	243
5.12.3. Selon le sort réservé au produit dans le séchoir.	243
5.12.4. Selon l'hygroscopicité du produit.	244
5.12.5. Selon le débit traité	244
5.12.6. Selon le prix	245
5.12.7. Selon la température d'entrée du gaz.	245
5.13. Quelques considérations énergétiques	245
5.13.1. Récupération thermique par pompe à chaleur.	245
5.13.2. Séchage avec récupération du solvant	246

Annexe A. Intégration numérique, méthode de Runge-Kutta d'ordre 4	247
Annexe B. Quelques identités importantes	249
Bibliographie	253
Index	263