

Table des matières

Première partie - BASES THÉORIQUES SUR LES OPÉRATIONS UNITAIRES DE SÉPARATION

Chapitre 1 - Lois communes aux procédés de séparation avec équilibre 3

1. Introduction sur les procédés de séparation	3
1.1. Généralités	3
1.2. Divers types de procédés	9
2. Équilibres et bilans opératoires	15
2.1. Équilibre liquide-gaz	16
2.2. Équilibre liquide-vapeur	21
2.3. Équilibre liquide-liquide	27
2.4. Équilibre solide-liquide	31
2.5. Conclusions	36
3. Notion de plateau théorique et d'unité de transfert	36
3.1. Plateau théorique	37
3.2. Efficacité des plateaux	41
3.3. Unité de transfert	48
3.4. Efficacité et capacité de production	53
3.5. Stratégie d'élaboration d'un procédé de séparation	54

Chapitre 2 – Distillation 55

1. Introduction	55
1.1. Généralités sur la distillation	55
1.2. Description de l'appareil	55
1.3. Modes de distillation	57
1.4. Considérations industrielles	58
2. Équilibres liquide-vapeur des mélanges binaires	60
2.1. Notions fondamentales	60
2.2. Équilibres liquide-vapeur	66
2.3. Mélange normal (zéotropique)	78
2.4. Mélange anormal (azéotropique)	83
2.5. Classification des mélanges binaires	94
3. Opérations et déterminations préliminaires à la rectification	97
3.1. Applications de l'équilibre liquide-vapeur à la distillation	98
3.2. Grandeurs caractéristiques d'une unité de distillation	109
3.3. Diverses méthodes de distillation	115
4. Rectification continue d'un mélange binaire	121
4.1. Introduction	121
4.2. Calcul du NET par la méthode de McCabe et Thiele	122

4.3. Calcul du NET par la méthode de Ponchon-Savarit	141
4.4. Aspects pratiques de la distillation continue	153
5. Rectification discontinue d'un mélange binaire	159
5.1. Introduction	159
5.2. Bilan-matière	161
5.3. Étude de la rectification discontinue	163
6. Autres rectifications	169
6.1. Introduction	169
6.2. Rectification des azéotropes	170
6.3. Rectification extractive	176
6.4. Distillation réactive	178
6.5. Distillation en colonnes complexes	180
Chapitre 3 - Évaporation	183
1. Introduction	183
2. Notions théoriques	184
2.1. Évaporation continue à simple effet	184
2.2. Évaporation continue à effet multiple	195
2.3. Système à compression de vapeur	201
3. Technologie des évaporateurs	201
3.1. Problèmes industriels	201
3.2. Évaporateurs à chauffage direct	205
3.3. Évaporateurs à chauffage indirect à faisceau tubulaire	206
3.4. Évaporateurs à plaques	212
3.5. Autres types d'évaporateurs	213
3.6. Appareils connexes à l'évaporateur	214
3.7. Choix du type d'évaporateur	216
Chapitre 4 - Absorption	219
1. Généralités sur l'absorption et la désorption	219
1.1. Introduction	219
1.2. Description sommaire des appareils	221
1.3. Divers types d'opération	222
1.4. Applications industrielles	223
2. Notions théoriques sur l'équilibre gaz - liquide	225
2.1. Équilibre gaz-liquide des systèmes binaires	225
2.2. Équilibre gaz-liquide des systèmes ternaires	229
2.3. Cinétique de l'échange gaz-liquide	230
2.4. Conséquences pratiques des lois d'équilibre	231
3. Méthodes d'absorption et de désorption	235
3.1. Procédés discontinus	236
3.2. Procédés continus à courants parallèles	241
3.3. Procédés continus à contre-courants	245
3.4. Procédés avec réaction chimique	253

4. Technologie des absorbeurs	256
4.1. Appareils à absorption superficielle	257
4.2. Absorbeurs à pulvérisation	259
4.3. Absorbeurs à barbotage	260
4.4. Absorbeurs à surface mouillée	262
Chapitre 5 - Extraction liquide-liquide	263
1. Introduction	263
1.1. Généralités sur l'extraction liquide-liquide	263
1.2. Description du procédé	265
1.3. Domaines d'utilisation	266
2. Diverses méthodes d'extraction liquide-liquide	269
2.1. Notions de base	269
2.2. Principales méthodes d'extraction	275
3. Équilibre liquide-liquide	278
3.1. Détermination expérimentale de l'équilibre	278
3.2. Relations thermodynamiques	287
3.3. Sélection du solvant	292
4. Étude des divers procédés d'extraction liquide-liquide	297
4.1. Extraction liquide-liquide simple à contact unique	297
4.2. Extraction liquide-liquide à contacts multiples à courants croisés	302
4.3. Extraction liquide-liquide à contre-courants	305
4.4. Autres types d'extraction	312
4.5. Éléments de dimensionnement	315
5. Technologie des extracteurs liquide-liquide	319
5.1. Extracteurs liquide-liquide à étages individualisés	320
5.2. Extracteurs liquide-liquide différentiels	326
5.3. Choix d'un appareil d'extraction liquide-liquide	335
Chapitre 6 - Colonnes pour échange gaz-liquide	341
1. Introduction sur les colonnes gaz-liquide	341
1.1. Généralités sur les colonnes	342
1.2. Conception d'une nouvelle colonne	343
1.3. Réhabilitation des colonnes existantes	350
2. Colonnes à garnissages	352
2.1. Généralités sur les garnissages	352
2.2. Notions théoriques sur les colonnes à garnissages	353
2.3. Technologie des garnissages	362
3. Colonnes à plateaux	380
3.1. Généralités	381
3.2. Notions théoriques sur les colonnes à plateaux	384
3.3. Considérations technicoéconomiques sur les plateaux	406
4. Comparaison des colonnes à plateaux et à garnissages	409
4.1. Facteurs en faveur des plateaux	409

4.2. Facteurs en faveur des garnissages	409
4.3. Comparaison des performances entre les plateaux et les garnissages	409
4.4. Choix d'un système de contact en fonction des contraintes	410
Deuxième partie - EXERCICES D'APPLICATION	
Chapitre 7 - Équilibres et rectifications	417
1. Équilibres	417
2. Rectifications continues par la méthode de McCabe et Thiele	427
3. Rectifications continues par la méthode de Ponchon-Savarit	449
4. Rectifications discontinues	466
5. Distillation par chauffage à la vapeur vive	480
Chapitre 8 - Évaporation – Absorption	485
1. Évaporation	485
1.1. Évaporations à simple effet	485
1.2. Évaporations à effet multiple	490
2. Absorption	495
2.1. Bilan-matière d'une absorption physique	495
2.2. Absorption physique d'une solution diluée d'un contaminant de l'air	497
2.3. Absorption physique d'une solution concentrée d'un contaminant de l'air	501
2.4. Absorption chimique	515
Chapitre 9 - Extraction liquide-liquide	521
1. Construction des diagrammes triangulaires	521
2. Extractions liquide-liquide de mélanges dont le solvant et le diluant sont partiellement miscibles	526
2.1. Extractions simples à contact unique	526
2.2. Extractions à contacts multiples à co-courants	531
2.3. Extractions à contacts multiples à contre-courants	541
3. Extractions liquide-liquide de mélanges dont le solvant et le diluant sont totalement insolubles	559
3.1. Extractions à contacts multiples de solutions diluées à co-courants	559
3.2. Extractions à contacts multiples de solutions concentrées à co-courants	561
3.3. Extractions de solutions diluées à contre-courants	565
3.4. Extractions de solutions concentrées à contre-courants	567
4. Comparaisons des divers types d'extraction	570
4.1. Systèmes à solvant et diluant partiellement miscibles	570
4.2. Extractions de solutions diluées de systèmes à diluant et solvant totalement immiscibles	575
4.3. Extractions de solutions concentrées de systèmes à diluant et solvant totalement immiscibles	581

Chapitre 10 - Dimensionnement des colonnes pour échange gaz-liquide 595

1. Colonnes à garnissages	595
1.1. Détermination de grandeurs préliminaires	595
1.2. Dimensionnement des colonnes à garnissages	606
2. Colonnes à plateaux	638

Troisième partie - EXPÉRIMENTATION**Chapitre 11 – Étude des rectifications 655**

1. Rappels théoriques sur la distillation	655
1.1. Introduction	655
1.2. Notions fondamentales	655
1.3. Rectification homozéotropique	657
2. Étude expérimentale de la rectification discontinue	668
2.1. Matériels et méthodes	668
2.2. Étude de l'équilibre de la colonne à reflux total	672
2.3. Rectification discontinue à taux de reflux constant	677
2.4. Rectification discontinue à composition de distillat constante	680
3. Étude expérimentale de la rectification continue	684
3.1. Matériels et méthodes	685
3.2. Principe du simplex	688
3.3. Procédures et mesures	690
3.4. Exploitation des résultats expérimentaux	693

Chapitre 12 - Concentration continue d'un jus sucré 709

1. Rappels théoriques sur l'évaporation	709
1.1. Introduction	709
1.2. Notions fondamentales	709
2. Étude expérimentale de l'évaporation continue	712
2.1. Matériels et méthodes	712
2.2. Évaluation des paramètres influents	720
2.3. Quantification des paramètres influents	722

Chapitre 13 - Extraction liquide-liquide de l'acide acétique 733

1. Rappels théoriques sur l'extraction liquide-liquide	733
1.1. Introduction	733
1.2. Notions fondamentales	733
2. Étude expérimentale de l'extraction liquide-liquide continue	738
2.1. Matériels et méthodes	738
2.2. Détermination des données d'équilibre	742
2.3. Extraction d'une solution aqueuse d'acide acétique par l'acétate de butyle	746

2.4. Extraction d'une solution d'acide acétique dans l'acétate de butyle par l'eau	754
Chapitre 14 - Hydrodynamique d'une colonne à garnissages	763
1. Rappels théoriques sur les colonnes à garnissages	763
1.1. Introduction	763
1.2. Grandeurs caractéristiques d'une colonne à garnissages	763
1.3. Étude de l'engorgement de la colonne	765
2. Étude expérimentale de l'engorgement d'une colonne à garnissages	767
2.1. Matériels et méthodes	767
2.2. Résultats expérimentaux	771
Annexes	
Annexe 1 - Tables de Mollier et Keenan	783
Annexe 2 - Données de l'équilibre liquide-vapeur de mélanges zéotropiques	785
Annexe 3 - Données de l'équilibre liquide-vapeur de mélanges azéotropiques à point d'ébullition inférieur	794
Annexe 4 - Données de l'équilibre liquide-vapeur de mélanges azéotropiques à point d'ébullition supérieur	805
Annexe 5 - Élévation du point d'ébullition des solutions aqueuses	807
Annexe 6 - Évolution de la température et de l'enthalpie de condensation de la vapeur d'eau saturée en fonction de la pression absolue	811
Annexe 7 - Évolution de la solubilité et de la pression partielle des gaz dans l'eau en fonction de la température	812
Annexe 8 - Données de l'équilibre liquide-liquide de quelques mélanges ternaires	814
Annexe 9 - Valeurs des coefficients de partage de quelques systèmes ternaires	821
Annexe 10 - Caractéristiques physiques des principaux solvants	823
Annexe 11 - Diagramme de Lobo	825
Annexe 12 - Caractéristiques des garnissages en vrac	826
Annexe 13 - Titres massiques en éthanol des solutions hydroéthanoliques en fonction de la masse volumique et de la température	829
Annexe 14 - Compositions des solutions aqueuses de saccharose en fonction de l'indice de réfraction	832
Annexe 15 - Courbe d'étalonnage du débitmètre à air utilisé dans l'étude de l'engorgement d'une colonne à garnissages	834
Bibliographie	835
Index des produits	841
Index des sujets	847