

TABLE DES MATIERES

Nomenclature

IX

CHAPITRE I : LES OPERATIONS UNITAIRES

1 – Les procédés industriels	1
2 – Principes mis en jeu dans les opérations de séparation	2
2.1. Schéma du procédé	2
2.2. Sélectivité de l'opération de séparation	2
2.3. Principales opérations de séparation	3
2.4. Exemple d'un procédé continu : la préparation du formaldéhyde	5
3 – Analyse des mécanismes de transfert	7
3.1. Introduction	7
3.2. Rappel sur les transferts au sein d'une phase non homogène	7
3.3. Analyse des transferts de matière dans un milieu biphasique	11
4 – Le transfert de matière en milieu biphasique	14
4.1. L'absorption	14
4.2. Les profils de concentration du soluté à l'interface gaz-liquide : schéma de Nernst	15
4.3. Le transfert de matière gaz-liquide	15
4.4. Rôle de la surface d'échange S	17
4.5. Théorie des deux films : schéma de Lewis et Whitman	18
4.6. Relations entre K_g , K_L , k_g et k_l	19
4.7. Modèle d'absorption en milieu turbulent	21
5 – Conclusion	22

CHAPITRE II : LES EQUILIBRES LIQUIDE-VAPEUR

1 – Conventions et principes	24
2 – Diagrammes d'équilibre de phase (P, T, composition)	24
2.1. Diagramme isobare : $P = \text{cte}$	24
2.2. Diagramme isotherme : $T = \text{cte}$	26
2.3. Diagramme des titres molaires à $P = \text{cte}$: courbe de partage $y = f(x)$	27
3 – Equilibre des phases	28
3.1. Rappel de la notion d'équilibre	28
3.2. Cas d'un mélange binaire idéal	28
3.3. Cas des mélanges binaires non idéaux $E_{AB} \neq E_{AA} \neq E_{BB}$	32

CHAPITRE III : LA DISTILLATION

1 – Constations expérimentales	37
1.1. Vaporisation d'un binaire non miscible	37

1.2.	Vaporisation d'un binaire complètement miscible à $T = cte$	39
1.3.	Vaporisation d'un binaire complètement miscible à $P = cte$	40
1.4.	Principe de la distillation fractionnée d'un mélange miscible à $P = cte$	41
1.5.	Montage retenu et technologies disponibles	43
1.6.	Le fonctionnement d'une colonne à plateaux	44
1.7.	Rectification continue – Distillation à reflux fini	46
1.8.	Conclusions et objectifs	47
2 –	Rectification continue – Méthode graphique de Mac Cabe et Thiele	48
2.1.	Le principe	48
2.2.	Bilans matière sur la colonne en régime permanent	48
2.3.	Hypothèses de Mac Cabe et Thiele – Diagramme enthalpique d'un mélange	50
2.4.	Construction de Mac Cabe et Thiele	52
2.5.	Droite d'alimentation - Etat thermique de l'alimentation de la colonne	54
3 –	Rectification continue – Méthode graphique de Ponchon et Savarit	62
3.1.	Le domaine d'utilisation	62
3.2.	Représentation des équilibres sur un diagramme enthalpique	63
3.3.	Bilans matière et d'énergie : relation entre les phases qui se croisent	63
3.4.	Construction de Ponchon et Savarit	70
3.5.	La zone d'alimentation de la colonne	72
3.6.	Utilisation des données enthalpiques	76
4 –	Fonctionnement d'une colonne de rectification	78
4.1.	Analyse des échanges de matière sur un plateau réel : PR	78
4.2.	Calcul de la hauteur réelle d'une colonne à plateau	80
4.3.	Calcul de la hauteur réelle d'une colonne garnie	82
4.4.	Rectification à reflux total	83
4.5.	Détermination de N_{min} – Equation de Fenske	84
4.6.	Rectification à reflux minimum R_{min}	86
4.7.	Calcul du reflux minimum R_{min}	88
4.8.	Conditions optimales de fonctionnement	90
5 –	Distillation discontinue d'un binaire avec rectification	92
5.1.	Choix du mode opératoire	92
5.2.	Bilan matière	92
5.3.	Mode de fonctionnement de la colonne	93
5.4.	Détermination du titre du distillat à l'aide des bilans matière	93
5.5.	La distillation à reflux élevé constant	95
5.6.	La distillation discontinue à reflux constant	96
5.7.	La distillation discontinue à reflux variable	98
5.8.	Remarques sur le mode opératoire	100
6 –	Comparaison des techniques de distillation	101
7 –	Distillation des mélanges multicomposants	102
7.1.	Analyse des gradients le long de la colonne	102
7.2.	Définition des constituants clefs	103
7.3.	Choix de la méthode de séparation	104
8 –	Régulation de la colonne	105

CHAPITRE IV : L'ABSORPTION

1 – Exemples	106
2 – Mode opératoire et fonctionnement du procédé	106
2.1. Objectifs	106
2.2. Les critères de choix du solvant	108
2.3. Influence des paramètres qui permettent de définir les conditions opératoires	108
3 – Détermination du nombre de plateaux théoriques	109
3.1. Introduction	109
3.2. Courbe d'équilibre	109
3.3. Bilan sur le soluté	109
4 – Trace des plateaux théoriques	110
4.1. Absorption du pentane par l'huile de paraffine pure	110
4.2. Désorption du pentane dans l'huile de paraffine par la phase gazeuse	111

CHAPITRE V : DIMENSIONNEMENT D'UNE COLONNE

1 – Les contacteurs gaz-liquide	113
2 – Notion de nombre et hauteur des plateaux théoriques	114
2.1. Détermination du nombre de plateaux théoriques : NPT	114
2.2. Détermination du nombre de plateaux réels dans les colonnes à plateaux : NPR	114
2.3. Cas des colonnes à garnissage : notion de HEPT	114
3 – Etude d'une colonne à garnissage	115
3.1. Introduction	115
3.2. Etude du transfert dans une colonne à garnissage : méthode de Chilton et Colburn	115
3.3. Relations entre les coefficients k_L , k_g , K_L et K_G	120
4 – Détermination de la hauteur de garnissage	121
4.1. Notion d'unité de transfert	121
4.2. Calcul de la hauteur du garnissage	123
5 – Définitions des grandeurs HUT et HEPT	127
6 – Comparaison des grandeurs NUT et NPT	128

CHAPITRE VI : EXTRACTION LIQUIDE-LIQUIDE

1 – Principes – Définitions	130
2 – Exemples d'extraction liquide-liquide	131
3 – Représentation des mélanges sur les diagrammes ternaires	131
3.1. Lecture des diagrammes ternaires	131
3.2. Règle des mélanges : relation barycentrique ou règles des segments inverses	133
3.3. Représentation des ternaires sur des diagrammes rectangulaires	134

4 – Les diagrammes de solubilité partielle	135
4.1. Systèmes à trois liquides et un, deux ou trois binaires	135
4.2. Système à 2 liquides partiellement solubles et un solide	137
5 – Choix du solvant	138
5.1. La sélectivité β	139
5.2. Régénération et recyclage du solvant	139
5.3. Densité	139
5.4. Tension interfaciale	139
5.5. Autres propriétés	140
6 – Courbe de distribution et droites de conjugaison (conodales)	140
7 – Schéma des procédés d'extraction liquide-liquide	141
7.1. Introduction et conventions	141
7.2. Extraction à étage unique	142
7.3. Extraction à étages multiples et courants croisés	144
7.4. Extraction continue à contre-courant	146
7.5. Extractions à deux alimentations	152
8 – Conclusion	156

CHAPITRE VII : EXTRACTION SOLIDE-LIQUIDE

1 – Définitions	157
2 – Exemples d'extraction solide-liquide	158
3 – Mécanisme d'extraction : étapes du transfert de matière	158
3.1. Processus élémentaires	158
3.2. Paramètres agissant sur le transfert de matière	158
3.3. Notion d'étage de transfert : bac mélangeur – décanteur	159
4 – Représentation des équilibres dans l'extraction solide-liquide	161
4.1. Le diagramme triangulaire et le diagramme de distribution	161
4.2. Diagramme ternaire modifié	162
5 – Cas de l'extraction solide-liquide continue	164
5.1. Extraction à étage unique	164
5.2. Cas de l'extraction liquide-solide continue à contre-courant à étages multiples	166
5.3. Efficacité des étages	170

CHAPITRE VIII : CRISTALLISATION INDUSTRIELLE

1 – Définitions	171
2 – Exemples d'applications	171
3 – Courbes de solubilité et mode opératoire	171
3.1. Courbe de solubilité : courbe d'équilibre L-S	171
3.2. Cristallisation – Courbe de sursaturation	172

4 – Approche phénoménologique	173
4.1. Processus de nucléation	173
4.2. Processus de croissance	174
4.3. Phénomènes particuliers	177
5 – Conclusion	178

CHAPITRE IX : EXERCICES AVEC SOLUTIONS DETAILLEES

1 – Fonctionnement d’une colonne de rectification avec 2 alimentations et un soutirage intermédiaire	180
2 – Séparation de l’oxygène et de l’azote de l’air	191
3 – Etude de la rentabilité économique d’une distillation continue	203
4 – Calcul de la hauteur d’une colonne d’absorption à garnissage	223
5 – Extraction de la nicotine (C) en solution dans l’eau (1) par le kérosène (B) à $T = 20^{\circ}\text{C}$ et $P = 10^5 \text{ Pa}$	237
6 – Purification du zirconium par extraction liquide-liquide avec section de lavage	245
7 – Extraction solide-liquide en continu à contre courant : extraction de l’huile contenue dans des graines par le benzène	258
8 – Cristallisation : calcul du profil de refroidissement	264

INDEX	267
--------------	------------

OUVRAGES RECOMMANDES	269
-----------------------------	------------