

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## GÉNIE CHIMIQUE

# Les opérations unitaires

Procédés industriels  
Cours et exercices corrigés

Daniel MORVAN

ellipses

2-660-3-1

2-660-3-1

TECHNOLOGIE

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉNIE CHIMIQUE



# Les opérations unitaires

Procédés industriels  
Cours et exercices corrigés

Daniel MORVAN

Professeur des universités

ENS Chimie Paris



## TABLE DES MATIERES

### Nomenclature

IX

### CHAPITRE I : LES OPERATIONS UNITAIRES

<b>1 – Les procédés industriels</b>	<b>1</b>
<b>2 – Principes mis en jeu dans les opérations de séparation</b>	<b>2</b>
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
<b>3 – Analyse des mécanismes de transfert</b>	<b>7</b>
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
<b>4 – Le transfert de matière en milieu biphasique</b>	<b>14</b>
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
<b>5 – Conclusion</b>	<b>22</b>

### CHAPITRE II : LES EQUILIBRES LIQUIDE-VAPEUR

<b>1 – Conventions et principes</b>	<b>24</b>
<b>2 – Diagrammes d'équilibre de phase (P, T, composition)</b>	<b>24</b>
2.1. Diagramme isobare : $P = cte$	24
2.2. Diagramme isotherme : $T = cte$	26
2.3. Diagramme des titres molaires à $P = cte$ : courbe de partage $y = f(x)$	27
<b>3 – Equilibre des phases</b>	<b>28</b>
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

<b>1 – Constations expérimentales</b>	<b>37</b>
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
<b>2 –</b>	<b>Rectification continue – Méthode graphique de Mac Cabe et Thiele</b>	<b>48</b>
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
<b>3 –</b>	<b>Rectification continue – Méthode graphique de Ponchon et Savarit</b>	<b>62</b>
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
<b>4 –</b>	<b>Fonctionnement d'une colonne de rectification</b>	<b>78</b>
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
<b>5 –</b>	<b>Distillation discontinue d'un binaire avec rectification</b>	<b>92</b>
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
<b>6 –</b>	<b>Comparaison des techniques de distillation</b>	<b>101</b>
<b>7 –</b>	<b>Distillation des mélanges multicomposants</b>	<b>102</b>
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
<b>8 –</b>	<b>Régulation de la colonne</b>	<b>105</b>

**CHAPITRE IV : L'ABSORPTION**

<b>1 – Exemples</b>	<b>106</b>
<b>2 – Mode opératoire et fonctionnement du procédé</b>	<b>106</b>
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
<b>3 – Détermination du nombre de plateaux théoriques</b>	<b>109</b>
3.1. Introduction	109
3.2. Courbe d'équilibre	109
3.3. Bilan sur le soluté	109
<b>4 – Trace des plateaux théoriques</b>	<b>110</b>
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**

<b>1 – Les contacteurs gaz-liquide</b>	<b>113</b>
<b>2 – Notion de nombre et hauteur des plateaux théoriques</b>	<b>114</b>
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
<b>3 – Etude d'une colonne à garnissage</b>	<b>115</b>
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
<b>4 – Détermination de la hauteur de garnissage</b>	<b>121</b>
4.1. Notion d'unité de transfert	121
4.2. Calcul de la hauteur du garnissage	123
<b>5 – Définitions des grandeurs HUT et HEPT</b>	<b>127</b>
<b>6 – Comparaison des grandeurs NUT et NPT</b>	<b>128</b>

**CHAPITRE VI : EXTRACTION LIQUIDE-LIQUIDE**

<b>1 – Principes – Définitions</b>	<b>130</b>
<b>2 – Exemples d'extraction liquide-liquide</b>	<b>131</b>
<b>3 – Représentation des mélanges sur les diagrammes ternaires</b>	<b>131</b>
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

<b>4 – Les diagrammes de solubilité partielle</b>	<b>135</b>
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
<b>5 – Choix du solvant</b>	<b>138</b>
5.1. La sélectivité $\beta$	139
5.2. Régénération et recyclage du solvant	139
5.3. Densité	139
5.4. Tension interfaciale	139
5.5. Autres propriétés	140
<b>6 – Courbe de distribution et droites de conjugaison (conodales)</b>	<b>140</b>
<b>7 – Schéma des procédés d'extraction liquide-liquide</b>	<b>141</b>
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
<b>8 – Conclusion</b>	<b>156</b>

## CHAPITRE VII : EXTRACTION SOLIDE-LIQUIDE

<b>1 – Définitions</b>	<b>157</b>
<b>2 – Exemples d'extraction solide-liquide</b>	<b>158</b>
<b>3 – Mécanisme d'extraction : étapes du transfert de matière</b>	<b>158</b>
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
<b>4 – Représentation des équilibres dans l'extraction solide-liquide</b>	<b>161</b>
4.1. Le diagramme triangulaire et le diagramme de distribution	161
4.2. Diagramme ternaire modifié	162
<b>5 – Cas de l'extraction solide-liquide continue</b>	<b>164</b>
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

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

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

## **CHAPITRE IX : EXERCICES AVEC SOLUTIONS DETAILLEES**

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

<b>INDEX</b>	<b>267</b>
--------------	------------

<b>OUVRAGES RECOMMANDES</b>	<b>269</b>
-----------------------------	------------