

Table des matières

PREMIÈRE PARTIE

SÉPARATION DE MÉLANGES HOMOGÈNES PAR DISTILLATION.....13

I. ÉLÉMENTS THERMODYNAMIQUES DES ÉQUILIBRES LIQUIDE-VAPEUR.....15

I.1 Équilibre liquide-vapeur d'un corps pur 15

I.1.1 Température d'ébullition normale des composés organiques et de l'eau..... 15

I.1.2 Enthalpie molaire de vaporisation des corps purs..... 17

I.1.3 Pression de vapeur saturante des corps purs..... 19

I.2 Équilibre liquide-vapeur d'un mélange, généralités..... 22

I.2.1 Conditions d'équilibre entre phases 22

I.2.2 Modélisation de l'équilibre entre phases 22

I.2.3 Choix du modèle thermodynamique 25

I.2.4 Définition de la volatilité et de la volatilité relative..... 26

I.3 Équilibre liquide-vapeur d'une solution idéale et d'un gaz parfait 27

I.3.1 Volatilité relative, pressions et températures de bulle et de rosée 27

I.3.2 Courbes de bulle, de rosée et d'équilibre isobares de mélanges binaires 28

I.3.3 Enthalpies molaires de mélanges à l'équilibre liquide-vapeur 30

I.3.4 Volatilité relative et écart des températures d'ébullition isobares 31

I.3.5 Volatilité relative et courbe d'équilibre isobare de mélanges binaires..... 33

I.4 Équilibre liquide-vapeur d'une solution réelle 34

I.4.1 Interaction entre molécules et coefficient d'activité 34

I.4.2 Volatilité relative et pressions et températures de bulle et de rosée..... 35

I.4.3 Définition et condition d'existence d'un azéotrope binaire..... 37

I.4.4 Azéotropes binaires à déviation positive..... 38

I.4.5 Azéotropes binaires à déviation négative 42

I.5 Remarques conclusives 44

II. INTRODUCTION À LA DISTILLATION CONTINUE45

II.1 Considérations générales 45

II.1.1 Principe, intérêt et importance industrielle de la distillation 45

II.1.2 Les différents modes de distillation 46

II.1.3 Exemples emblématiques de séparation par distillation 46

II.1.4 Situations défavorables à la distillation..... 48

II.2 Distillation continue simple, condensation ou évaporation partielle 49

II.2.1 Présentation du procédé 49

| | | |
|--------------|---|------------|
| II.2.2 | Analyse mathématique d'une distillation continue simple multiconstituant | 50 |
| II.2.3 | Distillation continue simple d'un mélange binaire | 52 |
| II.3 | Distillation continue fractionnée, principe et bilans globaux..... | 55 |
| II.3.1 | Principe de l'étagement de la séparation..... | 55 |
| II.3.2 | Technologies employées et comparaison avec l'absorption gaz-liquide | 56 |
| II.3.3 | Établissement des bilans de matière et enthalpiques globaux | 58 |
| II.4 | Distillation continue fractionnée, approches de modélisation..... | 59 |
| II.4.1 | Hypothèses caractérisant les différentes approches | 59 |
| II.4.2 | Méthodes d'analyse graphique | 60 |
| II.4.3 | Modèles considérant une cascade d'étages théoriques | 60 |
| II.4.4 | Modèles basés sur l'estimation des flux de transfert | 62 |
| II.4.5 | Estimation des dimensions de la colonne..... | 63 |
| II.4.6 | Tableau comparatif des approches..... | 64 |
| II.5 | Cascade d'étages théoriques et équations MESH | 65 |
| II.5.1 | Représentation des étages théoriques et notations | 65 |
| II.5.2 | Formulation et résolution du système d'équations MESH..... | 66 |
| II.5.3 | Exemple de résultats et représentations graphiques..... | 68 |
| II.6 | Analyse graphique de la séparation de mélanges binaires | 70 |
| II.6.1 | Schémas et notations pour une cascade d'étages théoriques | 70 |
| II.6.2 | Comparaison avec l'analyse graphique de l'absorption gaz-liquide..... | 71 |
| II.6.3 | Construction de McCabe-Thiele pour une cascade d'étages théoriques | 72 |
| II.6.4 | Débits molaires circulant au sein de la colonne et flux enthalpiques échangés.. | 83 |
| II.6.5 | Représentation graphique du stripage et de plusieurs alimentations | 86 |
| II.7 | Rectification de mélanges binaires avec modèle de transfert..... | 92 |
| II.7.1 | Schéma de la colonne, notations et droites de bilan | 92 |
| II.7.2 | Force motrice et flux molaire spécifique..... | 93 |
| II.7.3 | Estimation de la hauteur d'une section de la colonne | 95 |
| II.7.4 | Estimations analytiques approchées et relation de Colburn | 96 |
| II.8 | Méthode FUG pour la distillation fractionnée multiconstituant | 98 |
| II.8.1 | Éléments généraux..... | 98 |
| II.8.2 | Nombre d'étages théoriques minimal, équation de Fenske..... | 99 |
| II.8.3 | Taux de reflux minimal, équations d'Underwood | 101 |
| II.8.4 | Relation entre le nombre d'étages théoriques et le taux de reflux | 103 |
| II.8.5 | Débits molaires circulant au sein de la colonne et flux enthalpiques échangés | 106 |
| II.9 | Éléments de contrôle et de régulation d'une colonne à distiller..... | 106 |
| II.9.1 | Grandeurs contrôlées et débits régulés..... | 106 |
| II.9.2 | Schémas typiques de régulation | 107 |
| II.10 | Remarques conclusives | 109 |
| II.11 | Exercices d'application | 110 |

| | |
|---|------------|
| III. ÉLÉMENTS DE DISTILLATION DISCONTINUE..... | 129 |
| III.1 Distillation discontinue simple..... | 129 |
| III.1.1 Distillation discontinue simple d'un mélange binaire | 130 |
| III.1.2 Distillation discontinue simple multiconstituant | 133 |
| III.1.3 Norme de distillation ASTM D 86 du pétrole brut..... | 133 |
| III.2 Distillation discontinue fractionnée, généralités | 134 |
| III.2.1 Présentation du procédé et déroulement de la séparation | 134 |
| III.2.2 Modélisation de la distillation discontinue fractionnée | 135 |
| III.3 Distillation discontinue fractionnée d'un mélange binaire | 136 |
| III.3.1 Bilans sur l'ensemble de la colonne : équation de Rayleigh..... | 136 |
| III.3.2 Droite de bilan en régime pseudo-stationnaire..... | 138 |
| III.3.3 Invariants de la distillation discontinue fractionnée : <i>NET</i> et débit de vapeur | 138 |
| III.3.4 Conduite temporelle d'une distillation discontinue fractionnée..... | 140 |
| III.3.5 Caractéristiques de la séparation et durée de l'opération..... | 141 |
| III.3.6 Exemple illustratif | 143 |
| III.4 Distillation discontinue fractionnée multiconstituant | 145 |
| III.4.1 Caractérisation de mélanges multiconstituants | 145 |
| III.4.2 Séparation de mélanges multiconstituants | 146 |
| III.4.3 Norme de distillation ASTM D 2892 du pétrole brut, TBP | 146 |
| III.5 Remarques conclusives | 147 |
| III.6 Exercices d'application..... | 148 |
| IV. ANALYSE GRAPHIQUE DE LA DISTILLATION TERNAIRE | 151 |
| IV.1 Intérêt de l'analyse graphique | 151 |
| IV.2 Établissement et caractéristiques d'une courbe de résidu | 152 |
| IV.2.1 Définition à partir d'une expérience de distillation discontinue simple | 152 |
| IV.2.2 Représentation graphique d'une courbe de résidu d'un mélange ternaire | 153 |
| IV.3 Réseaux de courbes de résidu, régions et frontières de distillation | 154 |
| IV.3.1 Réseaux de courbes de résidu de mélanges zéotropiques..... | 155 |
| IV.3.2 Réseaux de courbes de résidu de mélanges azéotropiques | 155 |
| IV.3.3 Comportement des courbes de résidu au voisinage des nœuds..... | 156 |
| IV.3.4 Classification des réseaux de courbes de résidu, classes les plus fréquentes.. | 157 |
| IV.4 Autres représentations graphiques..... | 159 |
| IV.4.1 Surfaces des températures de bulle et de rosée et vecteurs d'équilibre | 160 |
| IV.4.2 Liens entre les isothermes, les vecteurs d'équilibre et les courbes de résidu . | 160 |
| IV.4.3 Isothermes de bulle et de rosée pour des mélanges ternaires hétérogènes..... | 161 |
| IV.4.4 Courbes d'unidistribution et d'univolatilité..... | 163 |
| IV.5 Réseaux de courbes de résidu en distillation fractionnée continue..... | 164 |

| | |
|--|------------|
| IV.5.1 Profils spatiaux d'une distillation fractionnée continue | 164 |
| IV.5.2 Représentation graphique d'une distillation fractionnée continue | 166 |
| IV.5.3 Séparation directe et indirecte..... | 168 |
| IV.5.4 Produits atteignables, séparation ultime, séparation préférée | 170 |
| IV.5.5 Séquençage des colonnes de distillation..... | 172 |
| IV.6 Remarques conclusives | 174 |
| IV.7 Exercices d'application | 174 |
| V. STRATÉGIES DE DISTILLATION AUGMENTÉE | 177 |
| V.1 Contexte et motivations | 177 |
| V.1.1 Exemples de mélanges difficiles à séparer..... | 177 |
| V.1.2 Classification des stratégies de séparation et importance industrielle | 179 |
| V.2 Distillation avec variation de pression | 181 |
| V.2.1 Stratégie employée | 181 |
| V.2.2 Critères de pertinence économique..... | 183 |
| V.2.3 Analyse d'une distillation binaire par la méthode de McCabe-Thiele..... | 185 |
| V.3 Distillation azéotropique hétérogène | 186 |
| V.3.1 Mélanges binaires auto-entraînants | 186 |
| V.3.2 Analyse d'une distillation binaire par la méthode de McCabe-Thiele..... | 187 |
| V.4 Distillation extractive | 190 |
| V.4.1 Principe et schéma du procédé | 190 |
| V.4.2 Action de l'entraîneur | 191 |
| V.4.3 Exemple du système eau – méthanol – acétone | 192 |
| V.4.4 Évolution des titres molaires en distillation extractive | 196 |
| V.4.5 Estimation du débit minimal de solvant..... | 202 |
| V.4.6 Stratégie de recherche et de choix du solvant | 203 |
| V.5 Distillation réactive..... | 205 |
| V.5.1 Distillation réactive avec catalyse homogène | 206 |
| V.5.2 Distillation réactive avec catalyse hétérogène..... | 208 |
| V.5.3 Simulation et modélisation des procédés de distillation réactive | 210 |
| V.6 Remarques conclusives..... | 210 |
| V.7 Exercices d'application | 211 |
| VI. INTÉGRATION THERMIQUE DE LA DISTILLATION | 213 |
| VI.1 Contexte et éléments généraux | 213 |
| VI.1.1 Importance de la consommation d'énergie liée à la distillation..... | 213 |
| VI.1.2 Considérations relatives à l'échange thermique..... | 214 |
| VI.2 Besoin énergétique d'une distillation fractionnée simple..... | 219 |
| VI.2.1 Expression du besoin énergétique..... | 219 |

| | |
|---|------------|
| VI.2.2 Efficacité thermodynamique maximale | 221 |
| VI.2.3 Stratégies de minimisation du besoin énergétique | 222 |
| VI.3 Couplage du condenseur et du bouilleur d'une même colonne | 224 |
| VI.3.1 Principe du couplage | 224 |
| VI.3.2 Distillation avec compression mécanique de vapeur..... | 226 |
| VI.3.3 Distillation à deux pressions | 230 |
| VI.4 Intégration thermique de la distillation dans le procédé | 231 |
| VI.4.1 Intégration thermique des échangeurs de chaleur extrémaux | 231 |
| VI.4.2 Intégration thermique par utilisation d'échangeurs de chaleur latéraux..... | 235 |
| VI.5 Distillation à intégration de chaleur interne ou HIDiC | 237 |
| VI.6 Intégration thermique des procédés d'évaporation partielle..... | 239 |
| VI.6.1 Évaporateur à intégration thermique pour le dessalement d'eau de mer | 239 |
| VI.6.2 Évaporateur à effet multiple pour la concentration de solutions..... | 241 |
| VI.6.3 Éléments de modélisation d'un évaporateur à effet multiple..... | 242 |
| VI.7 Remarques conclusives | 245 |
| VI.8 Exercices d'application | 245 |
| VII. DISTILLATION DE MÉLANGES ZÉOTROPIQUES MULTICONSTITUANTS..... | 247 |
| VII.1 Contexte, conventions graphiques et terminologie | 247 |
| VII.2 Configurations d'une distillation multiconstituant | 247 |
| VII.2.1 Nombre de colonnes, nombre de constituants et configuration régulière | 247 |
| VII.2.2 Séparation élémentaire, séparation nette et préfractionnement | 248 |
| VII.2.3 Configurations basiques régulières d'une distillation ternaire..... | 248 |
| VII.2.4 Configurations intégrant un couplage thermique des colonnes | 251 |
| VII.2.5 Espace de recherche de la configuration optimale..... | 251 |
| VII.3 Recherche de la configuration optimale | 252 |
| VII.3.1 Critère d'optimalité : minimisation du débit de vapeur | 252 |
| VII.3.2 Débit minimal de vapeur pour la séparation d'un mélange ternaire | 252 |
| VII.3.3 Comparaison du débit minimal de vapeur de différentes configurations | 257 |
| VII.4 Mise en œuvre du couplage thermique | 258 |
| VII.4.1 Réarrangement des sections de la configuration..... | 258 |
| VII.4.2 Colonne à cloison ou DWC | 261 |
| VII.5 Application au fractionnement du pétrole brut..... | 261 |
| VII.5.1 Caractérisation du pétrole brut et pseudo-composés..... | 261 |
| VII.5.2 Analyse d'une unité de fractionnement de pétrole brut..... | 262 |
| VII.6 Remarques conclusives..... | 264 |
| VII.7 Exercices d'application | 264 |

DEUXIÈME PARTIE

OPERATIONS DE L'AIR HUMIDE ET PROCÉDÉS DE SÉCHAGE265

VIII. DÉFINITIONS ET DIAGRAMMES DE L'AIR HUMIDE267

VIII.1 Définitions et principales relations caractérisant l'air humide..... 267

VIII.1.1 Qualification de l'air et pressions considérées 267

VIII.1.2 Quantification de la teneur en eau de l'air 268

VIII.1.3 Températures caractérisant l'air humide 269

VIII.1.4 Masse volumique et volume massique de l'air humide 270

VIII.1.5 Enthalpie massique et capacité calorifique massique de l'air humide 270

VIII.1.6 Valeurs numériques relatives à l'air et à l'eau 272

VIII.2 Température du bulbe humide..... 274

VIII.2.1 Définition et représentation des couches limites de transfert 274

VIII.2.2 Expression des flux de transfert..... 275

VIII.2.3 Température stationnaire de l'eau et expression de l'isotherme humide 276

VIII.2.4 Analogies de transfert et coefficient psychrométrique..... 277

VIII.3 Évolution isenthalpe de l'air humide..... 279

VIII.4 Température de saturation adiabatique..... 279

VIII.5 Diagrammes psychrométriques et analyses graphiques associées 281

VIII.5.1 Les différents types de diagramme 281

VIII.5.2 Représentation graphique d'opérations sur l'air humide 284

VIII.6 Mesure de l'humidité de l'air 286

VIII.7 Remarques conclusives 286

VIII.8 Exercices d'application 287

IX. OPÉRATIONS INDUSTRIELLES DE L'AIR HUMIDE289

IX.1 Généralités et éléments technologiques 289

IX.1.1 Classification des opérations et profils interfaciaux associés 289

IX.1.2 Technologies des tours de refroidissement par contact direct 291

IX.1.3 Étapes de modélisation d'un contacteur 295

IX.2 Modélisation d'un contacteur air – eau opéré à contre-courant 296

IX.2.1 Notations, analyse du système et hypothèses..... 296

IX.2.2 Établissement des équations du modèle 297

IX.2.3 Expression adimensionnelle du modèle 301

IX.2.4 Profils spatiaux de température des phases, de débit d'eau et d'humidité..... 304

IX.3 Modèle simple d'un refroidissement d'eau à contre-courant 305

IX.3.1 Simplification du système algèbre-différentiel 305

IX.3.2 Représentation graphique de l'enthalpie interfaciale et de la droite de bilan . 307

| | | |
|-------------|---|------------|
| IX.3.3 | Température minimale de l'eau en sortie de la tour | 307 |
| IX.3.4 | Débit minimal d'air | 308 |
| IX.3.5 | Hauteur de la tour de refroidissement | 309 |
| IX.3.6 | Humidité absolue maximale et température minimale de l'air sortant..... | 310 |
| IX.3.7 | Rapport des débits massiques et pertes relatives d'eau | 311 |
| IX.4 | Refroidissement d'eau ou d'air par pulvérisation | 312 |
| IX.4.1 | Hypothèses et équations du modèle | 312 |
| IX.4.2 | Représentation graphique de l'enthalpie interfaciale et de la droite de bilan . | 313 |
| IX.5 | Procédés d'humidification de l'air | 315 |
| IX.5.1 | Modélisation des procédés d'humidification à évaporation | 315 |
| IX.5.2 | Représentation graphique des opérations d'humidification..... | 320 |
| IX.6 | Remarques conclusives | 321 |
| IX.7 | Exercices d'application | 322 |
| X. | DÉFINITIONS ET CONCEPTS LIÉS AU SÉCHAGE..... | 327 |
| X.1 | Généralités..... | 327 |
| X.1.1 | Déshydratation et séchage..... | 327 |
| X.1.2 | Séchage par ébullition et séchage par entraînement | 328 |
| X.1.3 | Poids économique du séchage..... | 329 |
| X.1.4 | Le séchage dans les industries chimiques | 329 |
| X.2 | Humidité absolue du solide et vitesse de séchage | 330 |
| X.2.1 | Définitions des humidités absolues du solide et de la vitesse de séchage..... | 330 |
| X.2.2 | Humidité absolue à l'équilibre et isotherme d'adsorption | 331 |
| X.2.3 | Estimation de la vitesse de séchage | 332 |
| X.3 | Séchage convectif de solides à structure poreuse ou granulaire | 333 |
| X.3.1 | Mécanisme de migration de l'eau vers l'interface gaz-liquide | 333 |
| X.3.2 | Phases de séchage d'un solide poreux ou granulaire..... | 333 |
| X.3.3 | Courbe caractéristique de séchage et estimation du temps de séchage..... | 336 |
| X.4 | Séchage convectif de solides à structure continue ou cellulaire | 340 |
| X.4.1 | Généralités concernant la théorie diffusionnelle | 340 |
| X.4.2 | Modélisation de la diffusion instationnaire et nombre de Fourier..... | 340 |
| X.4.3 | Vitesse instantanée de séchage d'un solide à structure continue ou cellulaire. | 343 |
| X.5 | Exemples de courbes caractéristiques de séchage | 344 |
| X.6 | Remarques conclusives..... | 345 |
| X.7 | Exercices d'application | 346 |
| XI. | ÉLÉMENTS D'ANALYSE ET DE CALCUL DE SÉCHEURS CONVECTIFS | 349 |
| XI.1 | Technologies de séchage..... | 349 |

| | |
|---|------------|
| XI.1.1 Sécheur à tambour rotatif, sécheur atomiseur et sécheur pneumatique..... | 350 |
| XI.1.2 Sécheur à plateaux fixes ou rotatifs..... | 355 |
| XI.1.3 Sécheur à lit fluidisé..... | 356 |
| XI.2 Caractéristiques des procédés de séchage | 358 |
| XI.2.1 Modes d'apport enthalpique | 358 |
| XI.2.2 Caractéristiques opératoires des procédés convectifs ou mixtes..... | 361 |
| XI.2.3 Enthalpie massique du solide humide | 363 |
| XI.2.4 Performance énergétique des procédés de séchage convectif..... | 364 |
| XI.3 Analyse globale d'un procédé de séchage continu | 366 |
| XI.3.1 Méthodologie de dimensionnement | 366 |
| XI.3.2 Notations et bilans globaux..... | 366 |
| XI.3.3 Estimation du débit de gaz sec et de sa température de préchauffage..... | 367 |
| XI.3.4 Représentation du séchage dans le diagramme de Véron-Casari..... | 368 |
| XI.3.5 Temps de séchage du solide et volume du sécheur | 369 |
| XI.4 Sécheurs à propriétés de l'air uniformes..... | 369 |
| XI.4.1 Séchage de solides à structure poreuse ou granulaires | 370 |
| XI.4.2 Séchage de solides à structure continue ou cellulaire..... | 372 |
| XI.5 Sécheurs de produits granulaires à écoulement piston des phases | 373 |
| XI.5.1 Bilans globaux pour un fonctionnement à contre-courant..... | 373 |
| XI.5.2 Modèle unidimensionnel d'un sécheur opéré à contre-courant | 374 |
| XI.5.3 Modèle unidimensionnel d'un sécheur opéré à co-courant | 381 |
| XI.5.4 Résolution analytique approchée | 382 |
| XI.6 Remarques conclusives | 385 |
| XI.7 Exercices d'application..... | 385 |
| ÉLÉMENTS DE CORRECTION DES EXERCICES | 393 |
| NOTATIONS..... | 457 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 465 |
| LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES..... | 469 |
| INDEX..... | 475 |