

# Table des matières

<b>Préface de la première édition</b> .....	V
<b>Avant-propos de la première édition</b> .....	VII
<b>Avant-propos de la seconde édition</b> .....	IX
<b>Symboles et abréviations</b> .....	XI

## Préambule

1. Introduction sur le génie des procédés et la technologie chimique .....	1
1.1. Définitions .....	1
1.2. Historique .....	2
1.3. Perspectives .....	3
2. Élaboration d'un produit .....	4
3. Génie des procédés, technologie chimique et chimie industrielle .....	5
3.1. Terminologie .....	5
3.2. Missions du « chimiste industriel » .....	6
3.3. Débouchés du « chimiste industriel » .....	7

## Première partie

### Notions théoriques sur le génie des procédés et la technologie chimique

#### Chapitre 1

#### Industrialisation des procédés chimiques

1. Diverses phases d'industrialisation d'un produit .....	11
1.1. Recherche exploratoire .....	11
1.2. Recherche du procédé en laboratoire .....	12
1.2.1. Étude chimique préliminaire .....	12

1.2.2. Étude chimique approfondie . . . . .	12
1.2.3. Études économique et commerciale . . . . .	13
1.3. Développement du procédé et avant-projet industriel . . . . .	13
1.3.1. Construction ou utilisation d'une installation pilote . . . . .	13
1.3.2. Rédaction du projet industriel préliminaire ou avant-projet. . . . .	14
1.3.3. Le projet industriel complet . . . . .	15
1.3.4. Le projet d'installation et de construction . . . . .	15
1.4. Construction et mise en route de l'atelier de production . . . . .	15
2. Divers types d'opérations chimiques . . . . .	15
2.1. Caractéristiques de l'industrie chimique . . . . .	15
2.2. Opération discontinue (système fermé) . . . . .	17
2.3. Opération continue (système à courants) . . . . .	18
2.4. Opération semi-continue (système ouvert) . . . . .	19
3. Opérations unitaires du génie des procédés . . . . .	20
3.1. Opérations purement mécaniques. . . . .	20
3.1.1. Opérations mécaniques sur les fluides . . . . .	20
3.1.2. Opérations mécaniques sur les solides . . . . .	21
3.1.3. Opérations mécaniques de séparations solide-fluide . . . . .	23
3.2. Opérations de transfert de matière et/ou de chaleur entre phases . . . . .	24
3.2.1. Phases vapeur-liquide. . . . .	24
3.2.2. Phases liquide-solide . . . . .	25
3.2.3. Phases vapeur-solide . . . . .	26
3.2.4. Phases liquide-liquide . . . . .	27
3.3. Opérations de transformation chimique et de transfert thermique. . . . .	27
3.3.1. Réacteurs. . . . .	28
3.3.2. Agitation. . . . .	28
3.3.3. Échangeurs thermiques . . . . .	29
3.3.4. Production de chaleur et de froid. . . . .	29

## *Chapitre 2*

### **Principales grandeurs physicochimiques utilisées en génie des procédés**

1. Notions générales sur les grandeurs physicochimiques . . . . .	31
1.1. Définition d'une grandeur . . . . .	32
1.2. Équation aux dimensions . . . . .	34
1.2.1. Finalité . . . . .	34
1.2.2. Exercices d'application. . . . .	34
1.3. Les systèmes d'unités . . . . .	35
1.3.1. Le système international (SI) . . . . .	36
1.3.2. Le système CGS . . . . .	36
1.3.3. Le système anglo-saxon . . . . .	36
1.3.4. Autres systèmes . . . . .	37

1.3.5. Exercices d'application sur les conversions d'unités.....	38
2. Étude de quelques grandeurs physicochimiques.....	39
2.1. Grandeurs générales d'espace et de temps.....	39
2.1.1. Grandeurs géométriques d'espace.....	39
2.1.2. Grandeur de temps.....	41
2.1.3. Grandeurs mécaniques d'espace et de temps.....	42
2.2. Grandeurs mécaniques.....	43
2.2.1. Masse.....	43
2.2.2. Grandeurs dérivées de la masse.....	43
2.2.3. Grandeurs de débit de matière.....	47
2.2.4. Force.....	48
2.2.5. Pression.....	48
2.2.6. Énergie.....	49
2.2.7. Puissance.....	50
2.2.8. Rendement.....	51
2.2.9. Viscosité.....	51
2.3. Grandeurs thermodynamiques.....	52
2.3.1. Température.....	52
2.3.2. Quantité de chaleur.....	53
2.3.3. Flux thermique.....	53
2.3.4. Capacités thermiques.....	54
2.3.5. Enthalpies de changement d'état.....	55
2.4. Grandeurs moléculaires et de composition.....	56
2.4.1. Grandeurs des entités constituant la matière.....	56
2.4.2. Équivalent.....	58
2.4.3. Grandeurs exprimant la composition d'un mélange.....	58
2.4.4. Molalité.....	61
2.4.5. Masse molaire moyenne.....	61
2.4.6. Exercices d'application sur les grandeurs de composition.....	61

## *Chapitre 3*

### **Bilans-matière**

1. Introduction.....	68
1.1. Définition.....	68
1.2. But.....	68
1.3. Principe de la conservation de la matière.....	68
1.4. Conséquences du principe de la conservation de la matière.....	70
1.4.1. Cas général.....	70
1.4.2. Processus physiques.....	70
1.4.3. Processus chimiques.....	71
1.4.4. Divers types de bilans-matière.....	72
2. Caractéristiques d'une production.....	72
2.1. Schéma général de procédé et terminologie.....	73
2.2. Transformation des réactifs en produits.....	74

2.3. Grandeurs caractéristiques . . . . .	75
2.3.1. Grandeurs concernant les réactifs . . . . .	75
2.3.2. Grandeurs concernant les réactifs et les produits . . . . .	76
2.3.3. Exemples d'applications . . . . .	77
3. Établissement des bilans-matière dans les procédés industriels . . . . .	80
3.1. Exemple de bilan sur la fabrication de l'acide sulfurique selon le procédé de contact . . . . .	80
3.2. Comment établir un bilan ? . . . . .	81
3.2.1. Faire un schéma simplifié du procédé . . . . .	81
3.2.2. Écrire l'équation de réaction . . . . .	81
3.2.3. Choisir une base de calcul . . . . .	82
3.2.4. Faire l'inventaire de toutes les données . . . . .	82
3.2.5. Détecter les grandeurs à calculer et les inconnues . . . . .	82
3.2.6. Construire un tableau récapitulatif . . . . .	83
3.2.7. Indiquer dans le tableau toutes les données de l'énoncé . . . . .	83
3.2.8. Faire les calculs nécessaires et compléter le tableau . . . . .	83
3.3. Quand faire un bilan ? . . . . .	87
3.3.1. Dilutions et préparations de mélanges binaires et ternaires . . . . .	87
3.3.2. Bilans-matière dans les opérations unitaires . . . . .	88
3.3.3. Bilans-matière dans les neutralisations . . . . .	88
3.3.4. Bilans-matière dans les productions chimiques . . . . .	89

## *Chapitre 4*

### **Bilans énergétiques**

1. Introduction . . . . .	91
1.1. Définition . . . . .	91
1.2. But . . . . .	91
1.3. Rappels de thermodynamique . . . . .	92
1.3.1. Principe zéro . . . . .	92
1.3.2. Premier principe . . . . .	92
1.3.3. Deuxième principe . . . . .	93
1.3.4. Troisième principe . . . . .	93
1.3.5. Loi de Hess . . . . .	94
1.4. Conventions de signes . . . . .	95
2. Principales formes d'énergie . . . . .	96
2.1. Énergies propres au système . . . . .	96
2.1.1. Énergie interne . . . . .	96
2.1.2. Énergie potentielle . . . . .	97
2.1.3. Énergie cinétique . . . . .	97
2.2. Énergies propres aux processus du système . . . . .	98
2.2.1. Travail . . . . .	98
2.2.2. Quantité de chaleur ou énergie thermique . . . . .	99
3. Effets thermiques en relation avec l'enthalpie . . . . .	99
3.1. Enthalpie . . . . .	99

3.1.1.	Définition	99
3.1.2.	Enthalpie d'un processus continu stationnaire	100
3.1.3.	Enthalpie d'un processus discontinu à pression constante	100
3.2.	Effets thermiques liés aux phénomènes physiques.	100
3.2.1.	Enthalpie sensible.	100
3.2.2.	Capacités thermiques.	101
3.2.3.	Enthalpies de changement d'état	109
3.2.4.	Enthalpie totale des substances pures	112
3.2.5.	Enthalpie des mélanges	115
3.3.	Effets thermiques liés aux processus chimiques	118
3.3.1.	Notions sur les enthalpies de réaction	119
3.3.2.	Variation de l'enthalpie de réaction avec la température et la pression.	123
4.	Établissement des bilans thermiques dans les procédés industriels.	134
4.1.	Conséquences du principe de la conservation de l'énergie	134
4.2.	Différents types de procédés	135
4.2.1.	Procédé isotherme	135
4.2.2.	Procédé isobare	136
4.2.3.	Procédé isométrique ou isochore	136
4.2.4.	Procédé adiabatique	136
4.2.5.	Procédé polytropique.	136
4.3.	Comment établir un bilan thermique ?	136
4.3.1.	Équation du bilan thermique	137
4.3.2.	Exemple de bilan thermique	137
4.3.3.	Stratégie	138

## *Chapitre 5*

### **Équilibres physiques et chimiques**

1.	État gazeux	146
1.1.	Gaz parfaits	147
1.1.1.	Lois générales sur les gaz purs.	147
1.1.2.	Lois des mélanges de gaz parfaits.	149
1.2.	Gaz réels	150
1.2.1.	Lois des états.	151
1.2.2.	Équations d'état	151
1.3.	Exercices d'application	153
2.	Équilibres physiques entre phases	156
2.1.	Systèmes à un seul constituant.	157
2.1.1.	Équilibre liquide-vapeur	158
2.1.2.	Équilibre solide-vapeur	161
2.1.3.	Équilibre solide-liquide	162
2.2.	Systèmes binaires	162
2.2.1.	Équilibre liquide-vapeur	162
2.2.2.	Équilibre solide-liquide	166

2.3.	Systèmes ternaires . . . . .	167
2.3.1.	Équilibre liquide-gaz . . . . .	167
2.3.2.	Équilibre liquide-liquide . . . . .	168
2.4.	Exercices d'applications . . . . .	169
3.	Équilibres chimiques statiques . . . . .	172
3.1.	Introduction sur les réactions . . . . .	172
3.2.	Classification des réactions . . . . .	173
3.2.1.	Classification d'après le mode de déplacement des espèces . . . . .	173
3.2.2.	Classification d'après la thermicité . . . . .	174
3.2.3.	Classification d'après la nature des phases en présence . . . . .	174
3.2.4.	Classification d'après l'unicité du processus . . . . .	175
3.2.5.	Classification d'après la nature des réactifs . . . . .	176
3.2.6.	Classification d'après le mode d'activation . . . . .	177
3.3.	Équilibres chimiques statiques . . . . .	178
3.3.1.	Généralités sur les équilibres chimiques statiques . . . . .	178
3.3.2.	Notions théoriques sur l'équilibre chimique statique . . . . .	179
3.3.3.	Énergie libre et enthalpie libre . . . . .	183
3.3.4.	Étude spéciale de l'enthalpie libre . . . . .	184
3.4.	Exercices d'applications . . . . .	192
4.	Équilibres chimiques dynamiques . . . . .	198
4.1.	Introduction . . . . .	198
4.2.	Relations entre thermodynamique et cinétique . . . . .	199
4.3.	Concepts de base . . . . .	200
4.3.1.	Composition du milieu réactionnel . . . . .	200
4.3.2.	Débit de transformation . . . . .	200
4.3.3.	Notions sur la vitesse de réaction . . . . .	201
4.3.4.	Ordre de réaction et constante de vitesse . . . . .	207
4.3.5.	Activation des réactions . . . . .	207
4.4.	Classement cinétique des réactions . . . . .	211
4.4.1.	Réactions d'ordre 0 . . . . .	211
4.4.2.	Réactions d'ordre 1 . . . . .	212
4.4.3.	Réactions d'ordre 2 . . . . .	212
4.4.4.	Réactions d'ordre n . . . . .	213
4.4.5.	Réactions réversibles . . . . .	214
4.4.6.	Ordre partiel . . . . .	215
4.4.7.	Analyse des résultats cinétiques . . . . .	216
4.4.8.	Conclusion sur la cinétique . . . . .	218
4.5.	Exercices d'application . . . . .	218

## *Chapitre 6*

### **Notions sur la production des composés chimiques**

1.	Réacteurs chimiques . . . . .	225
1.1.	Introduction sur les réacteurs . . . . .	226
1.2.	Réacteurs idéaux . . . . .	228
1.2.1.	Réacteurs parfaitement agités fermés . . . . .	229

1.2.2.	Réacteurs parfaitement agités semi-fermés ou semi-ouverts . . .	230
1.2.3.	Réacteurs ouverts . . . . .	231
1.2.4.	Comparaison des réacteurs . . . . .	236
1.3.	Réacteurs chimiques industriels . . . . .	236
1.3.1.	Introduction . . . . .	236
1.3.2.	Réflexions sur le choix d'un réacteur . . . . .	237
1.3.3.	Classement des réacteurs industriels . . . . .	239
1.3.4.	Réacteurs monophasiques . . . . .	240
1.3.5.	Réacteurs polyphasiques . . . . .	244
1.3.6.	Accessoires connexes au réacteur de type « Grignard » . . . . .	251
1.3.7.	Matériaux . . . . .	254
1.3.8.	Contrôle du fonctionnement d'un réacteur . . . . .	259
2.	Notions sur la qualité, la sécurité et l'environnement . . . . .	260
2.1.	Risques rencontrés dans l'industrie chimique . . . . .	261
2.1.1.	Risques toxicologiques . . . . .	263
2.1.2.	Risques incendie . . . . .	271
2.1.3.	Risques explosion . . . . .	279
2.1.4.	Risques environnementaux . . . . .	285
2.1.5.	Sécurité dans l'usine . . . . .	287
2.1.6.	Analyse des risques . . . . .	292
2.2.	Traitement des déchets et des eaux usées industrielles . . . . .	297
2.2.1.	Introduction sur les nuisances . . . . .	298
2.2.2.	Composés gazeux . . . . .	300
2.2.3.	Composés liquides . . . . .	303
2.2.4.	Déchets solides . . . . .	314
2.3.	Qualité dans l'industrie chimique . . . . .	319
2.3.1.	Principes de base de la gestion de la qualité . . . . .	320
2.3.2.	Gestion de la qualité . . . . .	324

## *Deuxième partie*

### **Exercices de synthèse**

#### *Chapitre 7*

#### **Grandeurs physicochimiques et mélanges**

1.	Grandeurs moléculaires . . . . .	337
2.	Mélanges binaires et ternaires . . . . .	348

#### *Chapitre 8*

#### **Bilans-matière**

1.	Bilans-matière dans les opérations de transfert . . . . .	357
2.	Bilans-matière dans les neutralisations . . . . .	378
3.	Bilans-matière dans les productions chimiques . . . . .	387

## Chapitre 9

### Bilans thermiques

1. Bilans thermiques dans les opérations physicochimiques . . . . .	425
2. Bilans thermiques dans les productions chimiques . . . . .	444

## Chapitre 10

### Équilibres chimiques

1. Équilibres chimiques statiques . . . . .	455
2. Cinétique appliquée au calcul de réacteurs . . . . .	487
2.1. Réacteurs agités discontinus . . . . .	487
2.2. Réacteurs agités continus . . . . .	495
2.3. Réacteurs agités continus en série . . . . .	497
2.4. Réacteurs de type piston . . . . .	498
2.5. Comparaison des réacteurs . . . . .	506
2.6. Exercice de synthèse . . . . .	511

## Troisième partie

### Expérimentation

## Chapitre 11

### Bilans dans les opérations de transfert de matière et d'énergie

1. Bilans massiques et thermiques dans les distillations discontinue et continue . . . . .	525
1.1. Notions théoriques sur la distillation . . . . .	525
1.1.1. Diverses méthodes de distillation . . . . .	525
1.1.2. Caractéristiques d'une rectification discontinue . . . . .	527
1.1.3. Caractéristiques d'une rectification continue . . . . .	530
1.2. Pratique des bilans massiques et thermiques dans la distillation discontinue . . . . .	533
1.2.1. Description de l'unité . . . . .	533
1.2.2. Étude de l'équilibre de la colonne en reflux total . . . . .	536
1.2.3. Résultats expérimentaux . . . . .	538
1.3. Pratique des bilans massiques et thermiques dans la rectification continue . . . . .	541
1.3.1. Description de l'unité . . . . .	541
1.3.2. Procédure . . . . .	545
1.3.3. Résultats expérimentaux . . . . .	546
2. Bilans massiques et thermiques dans une évaporation continue . . . . .	553
2.1. Notions théoriques sur l'évaporation . . . . .	553
2.1.1. Divers modes d'évaporation . . . . .	554



2.1.2.	Divers types d'évaporateurs . . . . .	555
2.1.3.	Relations massiques et thermiques . . . . .	555
2.2.	Pratique des bilans massiques et thermiques dans l'évaporation . . .	557
2.2.1.	Description de l'unité . . . . .	557
2.2.2.	Procédure . . . . .	560
2.2.3.	Résultats expérimentaux . . . . .	562
3.	Bilans massiques et thermiques dans une cristallisation discontinue. . . .	569
3.1.	Notions théoriques sur la cristallisation. . . . .	569
3.1.1.	Dissolution et cristallisation . . . . .	570
3.1.2.	Divers types de cristallisation. . . . .	572
3.1.3.	Bilans massique et thermique . . . . .	573
3.2.	Pratique des bilans massiques et thermiques dans la cristallisation discontinue . . . . .	576
3.2.1.	Description de l'installation . . . . .	577
3.2.2.	Évaporation-cristallisation d'une solution de glycine en régime discontinu . . . . .	579
3.2.3.	Résultats expérimentaux . . . . .	581
3.2.4.	Conclusions . . . . .	585
4.	Bilans massiques dans les extractions liquide-liquide . . . . .	585
4.1.	Notions théoriques sur les divers types d'extraction . . . . .	585
4.1.1.	Notions générales. . . . .	586
4.1.2.	Divers types d'extraction . . . . .	587
4.1.3.	Bilan-matière d'une extraction liquide-liquide . . . . .	588
4.2.	Pratique des bilans massiques dans l'extraction liquide-liquide discontinue . . . . .	590
4.2.1.	Procédure . . . . .	590
4.2.2.	Résultats expérimentaux . . . . .	592
4.3.	Pratique des bilans massiques dans l'extraction liquide-liquide continue. . . . .	597
4.3.1.	Description de l'unité. . . . .	597
4.3.2.	Procédure . . . . .	597
4.3.3.	Résultats expérimentaux . . . . .	599
5.	Bilans thermiques sur les échangeurs de chaleur . . . . .	603
5.1.	Notions théoriques sur les échangeurs thermiques . . . . .	603
5.1.1.	Transfert par conduction . . . . .	603
5.1.2.	Transfert par convection . . . . .	604
5.1.3.	Transfert par rayonnement . . . . .	604
5.1.4.	Échangeurs thermiques . . . . .	604
5.2.	Pratique des bilans sur les échangeurs thermiques . . . . .	607
5.2.1.	Description de l'unité. . . . .	607
5.2.2.	Bilan thermique sur les échangeurs de chaleur . . . . .	609
5.2.3.	Résultats expérimentaux . . . . .	610

## Chapitre 12

### Bilans massiques dans les synthèses

1. Bilans massiques dans la synthèse de la glycine	617
1.1. Notions théoriques	617
1.2. Réalisation de la synthèse.	619
1.2.1. Procédure	619
1.2.2. Résultats expérimentaux	622
2. Bilans massiques dans la synthèse de l'hydroxyde de potassium	627
2.1. Notions théoriques	627
2.1.1. Généralités	627
2.1.2. Principe de la synthèse.	627
2.1.3. Données physicochimiques	628
2.2. Réalisation de la synthèse.	628
2.2.1. Procédure	628
2.2.2. Résultats expérimentaux	630
3. Bilans massiques dans la synthèse du sulfate de potassium	633
3.1. Notions théoriques	633
3.1.1. Généralités	633
3.1.2. Principe de la synthèse.	634
3.1.3. Données physicochimiques	634
3.2. Réalisation de la synthèse.	635
3.2.1. Procédure	635
3.2.2. Résultats expérimentaux	638
4. Bilans massiques dans la synthèse et l'hydrolyse du borate de tributyle.	641
4.1. Notions théoriques	641
4.1.1. Principe des opérations	641
4.1.2. Rectification azéotropique	642
4.1.3. Données physicochimiques	644
4.2. Procédure.	645
4.2.1. Produits et matériel	645
4.2.2. Synthèse du borate de tributyle	646
4.2.3. Hydrolyse du borate de tributyle	647
4.2.4. Dosages.	648
4.3. Résultats expérimentaux de la synthèse	650
4.3.1. Matières premières.	650
4.3.2. Résultats	651
4.4. Résultats expérimentaux de l'hydrolyse	653
4.4.1. Matières premières.	653
4.4.2. Résultats	654

### Annexes

<b>Annexe 1</b> – Principaux symboles schématiques utilisés en génie des procédés (extrait des normes ISO 10 628 : 1997).	659
--	-----

<b>Annexe 2 – Facteurs de conversion des unités des grandeurs mécaniques non usuelles en unités du système international</b> . . . . .	669
<b>Annexe 3 – Caractéristiques physiques de quelques solides minéraux</b> . . . . .	672
<b>Annexe 4 – Caractéristiques physiques de quelques solides organiques</b> . . . . .	674
<b>Annexe 5 – Caractéristiques physiques de quelques liquides</b> . . . . .	675
<b>Annexe 6 – Caractéristiques physiques de quelques gaz</b> . . . . .	678
<b>Annexe 7 – Masses atomiques des éléments chimiques cités.</b> . . . . .	680
<b>Annexe 8 – Titres massiques et concentrations de quelques solutions basiques en fonction de la masse volumique (à 15 °C)</b> . . . . .	681
<b>Annexe 9 – Titres massiques et concentrations de quelques solutions acides en fonction de la masse volumique (à 15 °C)</b> . . . . .	684
<b>Annexe 10 – Compositions des mélanges éthanol-eau en fonction de la densité.</b> . . . . .	691
<b>Annexe 11 – Constantes des capacités thermiques molaires à pression constante de quelques gaz</b> . . . . .	695
<b>Annexe 12 – Variations des enthalpies molaires de dissolution (<math>\Delta H_s^\circ</math>) et de dilution (<math>\Delta H_d^\circ</math>) avec la concentration</b> . . . . .	696
<b>Annexe 13 – Enthalpies molaires de dissolution de quelques composés minéraux dans l'eau</b> . . . . .	699
<b>Annexe 14 – Enthalpies standard de formation de quelques composés minéraux</b> . . . . .	702
<b>Annexe 15 – Enthalpies molaires de dissolution de quelques composés organiques dans l'eau</b> . . . . .	704
<b>Annexe 16 – Enthalpies standard de formation (<math>\Delta H_f^\circ</math>) et de combustion (<math>\Delta H_c^\circ</math>) de quelques composés organiques.</b> . . . . .	705
<b>Annexe 17 – Constantes critiques</b> . . . . .	708
<b>Annexe 18 – Évolution de la tension de vapeur des composés organiques avec la température du liquide.</b> . . . . .	712
<b>Annexe 19 – Propriétés thermodynamiques de quelques solides minéraux (à 298 K)</b> . . . . .	715
<b>Annexe 20 – Propriétés thermodynamiques de quelques composés hydrocarbonés (à 298 K)</b> . . . . .	718
<b>Annexe 21 – Indicateurs de sécurité de quelques substances chimiques</b> . . . . .	720
<b>Annexe 22 – Nouveaux pictogrammes d'étiquetage des produits chimiques et conseils d'utilisation</b> . . . . .	723
<b>Annexe 23 – Caractéristiques physiques d'inflammabilité de quelques substances chimiques.</b> . . . . .	731
<b>Annexe 24 – Enthalpies totales de vaporisation de l'eau en fonction de la pression absolue et de la température de vaporisation.</b> . . . . .	734

<b>Annexe 25</b> – Compositions des solutions aqueuses de saccharose en fonction de l'indice de réfraction . . . . .	737
<b>Annexe 26</b> – Caractéristiques physiques des solutions aqueuses de glycine . . . . .	739
<b>Bibliographie</b> . . . . .	741
<b>Index des produits</b> . . . . .	743
<b>Index des sujets</b> . . . . .	751