

Table des matières

Préface de la première édition	V
Avant-propos de la première édition	VII
Avant-propos de la seconde édition	IX
Symboles et abréviations	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

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

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

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