

sciences de
l'ingénieur

CD-ROM
inclus

- Ghasem
- Henda

Bilans matière et énergétique pour l'ingénierie chimique

Principes et applications pratiques



de boeck

Sommaire

Préface	xiii
Remerciements	xvii
Les auteurs	xix
Systèmes d'unités	xxi
CHAPITRE 1	
Introduction	1
1.1 Qu'est-ce que l'ingénierie chimique?	1
1.2 Bilans matière et énergétique	2
1.3 Valeurs, unités et dimensions	3
1.3.1 Systèmes d'unités	4
1.4 Conversion des unités	5
1.4.1 Temps	5
1.4.2 Masse	5
1.4.3 Longueur	6
1.4.4 Volume	6
1.4.5 Masse volumique	6
1.4.6 Force	6
1.4.7 Pression	7
1.4.8 Énergie	7
1.4.9 Puissance	7
1.4.10 Poids	7
1.5 Homogénéité dimensionnelle	8
1.6 Chiffres significatifs	9
1.6.1 Multiplication et division	10
1.6.2 Addition et soustraction	10
1.7 Procédé et variables de procédé	11
1.7.1 Masse volumique, masse et volume	12
1.7.2 Débit	12

1.7.3	Moles et masse molaire	13
1.7.4	Fraction massique et fraction molaire	13
1.7.5	Concentration	13
1.7.6	Pression	14
1.7.7	Types de pressions	16
1.7.8	Manomètres pour la mesure de pression et de ΔP	20
1.7.9	Mesure de la température	23
1.7.10	Conversion des températures	23
1.7.11	Loi des gaz parfaits	25
1.7.12	Conditions standard de température et de pression	26
1.8	Classification des procédés	29
1.9	Problèmes	29
1.9.1	Classification des procédés	29
1.9.2	Types de procédés	30
1.9.3	Conversion d'unités	30
1.9.4	Débit dans un tuyau horizontal	30
1.9.5	Débit molaire	30
1.9.6	Homogénéité dimensionnelle	30
1.9.7	Calcul d'une masse à partir de la densité et du volume	31
1.9.8	Conversion d'une équation dans d'autres unités	31
	Pour aller plus loin	31

CHAPITRE 2

Opérations unitaires et analyse des degrés de liberté

2.1	Analyse des degrés de liberté	33
2.1.1	Résultats possibles de l'analyse des degrés de liberté	34
2.2	Origine des équations	35
2.3	Opérations unitaires: Fonctions de base	36
2.3.1	Diviseur	36
2.3.2	Agitateur (Mélangeur)	36
2.3.3	Sécheur (À chauffage direct)	37
2.3.4	Filtre	37
2.3.5	Colonne de distillation	38
2.3.6	Évaporateur	39
2.3.7	Déshumidificateur	40
2.3.8	Humidificateur	41
2.3.9	Lixiviation et extraction	42
2.3.10	Absorption et désorption (de gaz)	43
2.3.11	Condenseur partiel	44
2.3.12	Vaporiseur et distillation flash	45
2.3.13	Cristalliseur	46
2.3.14	Réacteurs (Réacteurs chimiques, chambre de combustion, four et reformeur)	46

2.4	Résumé sur l'analyse des degrés de liberté	63
2.5	Problèmes	64
2.5.1	Absorption de l'acétone contenue dans un courant d'air	64
2.5.2	Séparation d'un mélange liquide	64
2.5.3	Système absorbeur-stripper	64
2.5.4	Filtration	65
2.5.5	Évaporation	65
	Pour aller plus loin	65

CHAPITRE 3

	Bilans matière sur les procédés unitaires	67
3.1	Équation générale des bilans matières	68
3.1.1	Simplification d'un bilan matière	69
3.2	Schémas de procédé	69
3.2.1	Remarque à propos des notations	69
3.3	Problèmes impliquant des bilans matières sur une unique unité	69
3.4	Notions fondamentales sur les bilans matière	72
3.4.1	Classification des procédés	73
3.4.2	Types de bilans	73
3.4.3	Spécification des courants	74
3.5	Changement d'échelle	76
3.6	Base de calcul	76
3.6.1	Concept	76
3.6.2	Méthode de résolution des problèmes de bilan matière	77
3.6.3	Bilan matière sur un procédé biologique	93
3.7	Problèmes	95
3.7.1	Séparation d'un courant de procédé éthanol/méthanol	95
3.7.2	Procédé de séchage du cuir	95
3.7.3	Séparation d'un mélange éthanol/méthanol/propanol	95
3.7.4	Séparation d'un mélange éthanol/méthanol	96
3.7.5	Mélange d'acide chlorhydrique et d'eau	96
3.7.6	Élimination de l'acétone d'un courant d'azote à l'aide d'un absorbeur	96
3.7.7	Séparation d'un mélange benzène/toluène	96
3.7.8	Dilution d'une solution de méthanol	96
3.7.9	Chambre d'humidification	97
3.7.10	Absorption d'eau à partir d'un mélange gazeux	97
3.7.11	Séchage du sucre humide	97
	Pour aller plus loin	97

CHAPITRE 4

Calculs sur des procédés à plusieurs unités 99

4.1	Procédé constitué de plusieurs unités	99
4.2	Recirculation, by-pass, purge et appoint.	101
4.2.1	Recirculation	101
4.2.2	By-pass	102
4.2.3	Purge.	103
4.2.4	Appoint.	103
4.3	Problèmes	127
4.3.1	Séparation de mélanges benzène, toluène, xylène	127
4.3.2	Procédé de filtration.	128
4.3.3	Concentration du jus d'orange	128
4.3.4	Séparation d'un mélange NaCl/KCl	128
4.3.5	Système de désulfuration	129
4.3.6	Séparation d'un mélange DMF/azote	129
4.3.7	Séparation d'un mélange benzène/toluène.	129
4.3.8	Séparation du nitrate de potassium.	130
4.3.9	Production de café soluble	130
	Pour aller plus loin	131

CHAPITRE 5

Bilans matière dans les procédés avec réaction 133

5.1	Quantité de matière dans une mole.	133
5.1.1	Pourquoi utiliser la mole?	134
5.2	Bilan matière global	135
5.2.1	Bilan différentiel	135
5.2.2	Bilan intégral	136
5.3	Notions fondamentales sur la stœchiométrie	136
5.3.1	Équation équilibrée	137
5.3.2	Coefficients stœchiométriques (ν_i)	137
5.3.3	Rapport stœchiométrique.	137
5.4	Réactifs limitant et réactifs en excès.	138
5.5	Taux de conversion	141
5.6	Techniques de résolution des bilans matière pour des procédés impliquant des réactions chimiques	141
5.6.1	Technique de l'avancement de la réaction	141
5.6.2	Technique du bilan sur les éléments ou atomique	142
5.6.3	Technique du bilan moléculaire ou sur les composés	143
5.7	Réactions multiples et avancement de réaction	153
5.8	Analyse des degrés de liberté pour des procédés avec réaction	156
5.8.1	Bilans sur les espèces moléculaires et avancement de réaction.	156

5.8.2	Bilans sur les espèces atomiques	156
5.9	Réactions chimiques indépendantes	157
5.10	Bilans sur des espèces indépendantes	157
5.11	Équilibre chimique	157
5.12	Réactions de combustion	160
5.12.1	Air théorique et en excès	160
5.13	Problèmes	165
5.13.1	Combustion incomplète du butane	165
5.13.2	Combustion complète du butane	166
5.13.3	Combustion du méthane	166
5.13.4	Combustion de la méthyl éthyl cétone en présence d'un excès d'air	166
5.13.5	Grillage de la pyrite	166
5.13.6	Réaction du gaz à l'eau	167
5.13.7	Production d'acide sulfurique	167
	Pour aller plus loin	168

CHAPITRE 6

	Systèmes multiples avec réaction, recyclage et purge	171
6.1	Réaction avec séparation du produit et recyclage	171
6.2	Réaction avec recyclage et purge	172
6.2.1	Schéma d'un procédé de réaction avec recyclage	173
6.2.2	Schéma d'un procédé de réaction avec recyclage et purge	173
6.3	Réaction et procédés stationnaires à plusieurs unités	177
6.4	Problèmes	197
6.4.1	Analyse d'un réacteur	197
6.4.2	Procédé de synthèse d'un détergent	198
6.4.3	Production du butanal	198
6.4.4	Procédé d'hydrodéalkylation	200
6.4.5	Combustibles nucléaires à base d'uranium et de zirconium	200
	Pour aller plus loin	202

CHAPITRE 7

	Bilan énergétique en absence de réaction	203
7.1	Enthalpie et bilans énergétiques	203
7.1.1	Comment l'énergie se déplace-t-elle dans les systèmes?	204
7.2	Les différentes formes de l'énergie	204
7.2.1	Énergie cinétique (E_c)	204
7.2.2	Énergie potentielle (E_p)	205
7.2.3	Énergie interne (U)	205
7.3	Variables intensives et extensives	206

7.4	Transfert d'énergie	206
7.5	Premier principe de la thermodynamique	207
7.5.1	Bilan énergétique d'un système fermé	207
7.5.2	Simplifications possibles du bilan énergétique d'un système fermé	208
7.5.3	Bilan énergétique sur un système ouvert à l'état stationnaire . .	212
7.5.4	Simplifications possibles du bilan énergétique d'un système ouvert.	213
7.6	Calculs d'enthalpie	214
7.7	État de référence et propriétés d'état	214
7.8	Utilisation de l'interpolation linéaire avec les données des tableaux de propriété de vapeur	215
7.9	Variation d'enthalpie dans des procédés non réactifs	216
7.9.1	Variation d'enthalpie résultant d'une variation de température . .	216
7.9.2	Variation d'enthalpie résultant d'un changement d'état.	217
7.9.3	Variation d'enthalpie résultant d'un mélange.	221
7.10	Bilan énergétique d'un bioprocédé	222
7.11	Diagramme psychrométrique	230
7.12	Résumé sur les bilans énergétiques en l'absence de réaction.	238
7.13	Problèmes	238
7.13.1	Vaporisation de méthanol liquide	238
7.13.2	Chauffage du propane	238
7.13.3	Détente de vapeur saturée	239
7.13.4	Bilan énergétique sur un système ouvert (chauffage du méthanol)	239
7.13.5	Bilan énergétique sur un système ouvert (chauffage de méthanol liquide)	240
7.13.6	Vaporisation de <i>n</i> -hexane liquide	240
7.13.7	Bilan énergétique sur un système fermé (chauffage d'acétone) . .	240
7.13.8	Bilan énergétique sur un système ouvert (Puissance générée par une turbine).	240
7.13.9	Bilan énergétique sur un système ouvert (Puissance absorbée par un compresseur)	241
	Pour aller plus loin	241

CHAPITRE 8

Bilan énergétique avec réaction 243

8.1	Introduction.	243
8.2	Enthalpie de réaction	243
8.3	Enthalpie de réaction à partir de l'avancement de réaction	244
8.3.1	Notes sur les enthalpies de réaction	245
8.4	Réactions dans des procédés fermés	246
8.5	Mesure des enthalpies de réaction	247

8.6	Loi de Hess	248
8.7	Calcul de l'enthalpie standard de réaction ($\Delta\hat{H}_r^0$) à partir des enthalpies de formation	249
8.8	Calcul de $\Delta\hat{H}_r^0$ à partir des enthalpies de combustion	250
8.9	Calcul de $\Delta\hat{H}_r^0$ à partir de $\Delta\hat{H}_c^0$	251
8.10	Bilan énergétique sur les procédés avec réaction	251
	8.10.1 Technique des enthalpies de réaction	252
	8.10.2 Technique des enthalpies de formation	254
8.11	Procédure générale de calcul des bilans énergétiques pour les procédés avec réaction	258
8.12	Procédés dont les conditions de sortie sont inconnues	258
8.13	Bilan énergétique d'un bioprocédé	268
8.14	Problèmes	270
	8.14.1 Estimation d'une enthalpie de réaction	270
	8.14.2 Production de vapeur surchauffée	270
	8.14.3 Procédé de synthèse de l'ammoniac	270
	8.14.4 Transalkylation catalytique du toluène en benzène	272
	8.14.5 Combustion du méthane	273
	8.14.6 Fermentation anaérobie de levure	273
	Pour aller plus loin	274

CHAPITRE 9

Bilans matière et énergétique combinés

9.1	Bilans matière	277
	9.1.1 Conversion	277
	9.1.2 Rendement	278
	9.1.3 Sélectivité	278
	9.1.4 Avancement de la réaction (ξ)	278
9.2	Bilans énergétiques	279
	9.2.1 Technique des enthalpies de réaction	279
	9.2.2 Technique des enthalpies de formation	279
	9.2.3 Concept des bilans atomiques	280
	9.2.4 Formulation mathématique du bilan atomique	280
	9.2.5 Analyse des degrés de liberté dans le cas du bilan atomique	280
	9.2.6 Mise en place d'un recyclage sur un procédé de séparation	283
9.3	Problèmes	311
	9.3.1 Mélange d'éthanol chaud et froid	311
	9.3.2 Combustion de l'acétylène	311
	9.3.3 Déshydrogénation de l'éthanol	311
	9.3.4 Réactions chimiques indépendantes	312
	9.3.5 Synthèse du cumène	312
	9.3.6 Déshydrogénation du propane	314
	Pour aller plus loin	314

CHAPITRE 10

Bilans matière et énergétique en conditions transitoires	315
10.1 Bilan matière en conditions transitoires	315
10.2 Bilan énergétique en conditions transitoires	329
10.3 Problèmes	342
10.3.1 Écoulement d'un fluide depuis un bac de stockage	342
10.3.2 Ébullition de l'eau	342
10.3.3 Chauffage par de la vapeur saturée	342
10.3.4 Chauffage d'un solvant dans un bac agité	343
10.3.5 Évolution de la concentration d'un réactif en fonction du temps	343
Pour aller plus loin	343
Annexes	345
index	371

■ Ghasem
■ Henda

Bilans matière et énergétique pour l'ingénierie chimique

Principes et applications pratiques

L'objectif de cet ouvrage est de présenter aux étudiants et ingénieurs en génie chimique les principes de base de cette discipline et les techniques de calcul utilisées.

Après un bref rappel des grandeurs manipulées en génie chimique, ce manuel, écrit de manière claire et concise, aborde de façon systématique les différentes opérations unitaires (mélange, séparation, réaction, etc.) et le calcul des degrés de liberté qui leur sont associés.

Suivant une progression logique, l'ouvrage détaille le calcul des bilans matières sur les procédés unitaires, les procédés comportant plusieurs unités, les procédés avec réaction ainsi que l'importance du recyclage et de la purge. Il traite ensuite des bilans énergétiques pour des procédés sans et avec réaction pour finir par le calcul combiné des bilans matière et énergétique et les bilans sur les procédés non stationnaires.

De nombreux exercices corrigés, dont les calculs sont présentés de manière détaillée, ainsi que des problèmes, permettent à l'étudiant de vérifier l'acquisition des connaissances.

Le CD-ROM qui accompagne l'ouvrage contient un résumé en anglais de chaque chapitre, des exercices, et met à disposition des logiciels de simulation et de calcul adaptés.

Traduction de l'édition américaine

Vincent Lafond est Ingénieur chimiste et Docteur en chimie des matériaux. Il officie depuis plusieurs années comme traducteur professionnel, spécialisé dans différents domaines de la chimie industrielle (extraction minière, pétrochimie, analyse).

ISBN : 978-2-8041-6567-3



9 782804 165673

GHASEM

www.deboeck.com