

Génie chimique et des procédés

Écoulement des fluides, bilans et
transferts thermiques

Johanne Bonnin

Olivier Chedeville

Henri Fauduet

DUNOD

Couverture : © oonal - istockphoto.com

© Dunod, 2019
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
ISBN 978-2-10-079776-9
www.dunod.com

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

● Table des matières

Avant-propos

VII

Partie 1

Fluides

1

Chapitre 1 Grandeurs physicochimiques

2

1. Notions générales sur les grandeurs

2

2. Équation aux dimensions

3

3. Systèmes d'unités

4

4. Principales grandeurs physiques

4

5. Principales grandeurs de composition

10

L'essentiel

12

Entraînez-vous

13

Chapitre 2 Hydrostatique

14

1. Notions générales sur les fluides

14

2. Lois fondamentales de l'hydrostatique

15

3. Mesure des pressions

18

L'essentiel

21

Entraînez-vous

22

Chapitre 3 Dynamique des fluides incompressibles

23

1. Régime d'écoulement des fluides

23

2. Lois fondamentales du déplacement des fluides

25

3. Détermination des pertes de charge

29

L'essentiel

33

Entraînez-vous

34

Chapitre 4	Pompes à liquides	36
1.	Notions théoriques	36
2.	Pompes de circulation	38
	L'essentiel	44
	Entraînez-vous	45
Chapitre 5	Écoulement d'un fluide dans un milieu poreux	47
1.	Interactions entre un solide et un fluide	47
2.	Filtration	55
3.	Fluidisation	63
	L'essentiel	70
	Entraînez-vous	71
Chapitre 6	Sédimentation des solides dans les fluides	74
1.	Décantation	74
2.	Centrifugation	85
3.	Notions de dépoussiérage	95
	L'essentiel	100
	Entraînez-vous	101

Partie 2

Bilans et transferts thermiques 103

Chapitre 7	Bilans-matière	104
1.	Généralités sur les bilans	104
2.	Principe de conservation de la matière	106
3.	Établissement des bilans-matière dans les procédés industriels	111
	L'essentiel	117
	Entraînez-vous	118

Chapitre 8 Bilans thermiques	120
1. Principales lois thermiques	120
2. Principales formes d'énergie	123
3. Établissement des bilans thermiques	137
L'essentiel	142
Entraînez-vous	143
Chapitre 9 Le transfert thermique	146
1. Le transfert thermique par conduction	147
2. Le transfert thermique par convection	150
3. Transfert thermique par conduction et convection	153
4. Transfert thermique par rayonnement	156
L'essentiel	159
Entraînez-vous	160
Chapitre 10 Les échangeurs thermiques	162
1. Calcul d'un échangeur thermique	162
2. Technologies d'échangeur thermique	170
3. Production de chaud et de froid	172
L'essentiel	174
Entraînez-vous	175
Solutions	178
Bibliographie	229
Index	230

Avant-propos

Cet ouvrage présente les aspects fondamentaux du génie chimique, science de l'ingénieur qui se situe à l'interface de la physique et de la chimie. Cette discipline est née à la fin du XIX^e siècle, suite au développement de la pétrochimie, pour faire le lien entre les professionnels de la chimie, de la mécanique et de la thermique et répondre à une demande croissante de biens de consommation. Elle étudie la méthodologie et la technologie qui permettent de transposer un mode opératoire de laboratoire en termes industriels en élaborant les produits nécessaires à la société.

Ainsi, il a été montré que tout procédé industriel se ramenait à une combinaison logique d'opérations physicochimiques unitaires que l'on retrouvait dans tous les domaines. Les procédés unitaires où intervenaient les transformations chimiques ont été ensuite étudiés pour être transposés industriellement en discontinu en utilisant des méthodes rationnelles de dimensionnement et d'extrapolation. Enfin, l'intérêt du mode continu s'est développé pour atteindre de grosses capacités de production, tout en diminuant les besoins en main-d'œuvre et en améliorant la sécurité.

Le réacteur est maintenant le cœur du procédé et son dimensionnement influe sur la nature, la qualité et la quantité des produits formés. Les opérations de séparation et de purification des produits finis nécessaires en aval sont coûteuses et doivent être étudiées avec soin avant d'être mises en œuvre. De plus, les nouvelles techniques allient les analyses scientifiques, les traitements numériques et les incidences économiques, sécuritaires et environnementales en améliorant la productivité tout en réduisant les impacts sur les Hommes et leur environnement. Quelle que soit l'échelle, tout procédé industriel est réalisé par une suite coordonnée d'opérations unitaires qui utilisent des solides, des liquides et des gaz, ou des mélanges de ces composés.

Dans ce premier volume sont présentés les concepts fondamentaux concernant les écoulements des fluides qui sont à la base des transferts de matière et d'énergie dans l'industrie. La présence d'un solide dans un fluide induit des interactions qui modifient leur circulation. On obtient alors un mélange diphasique que l'on rencontre dans des opérations de séparation mécanique telles que la filtration, la décantation, la centrifugation ou le dépoussiérage, ou dans des opérations utilisant les lits fluidisés.

Lavoisier a démontré le premier l'intérêt de choisir les frontières d'un système et d'y réaliser un bilan-matière. Les apports des bilans massiques, à la base de tous les problèmes de transfert de matière, et des bilans thermiques sont présentés en seconde partie de ce livre. Les transformations physiques et/ou chimiques n'étant que très rarement athermiques, l'étude des transferts thermiques et l'intérêt de choisir un échangeur adapté sont enfin présentés à la fin de cet ouvrage.

Ce manuel reprend le contenu du programme pédagogique national (PPN) des départements chimie des Instituts Universitaires de Technologie. Il repose sur le cours dispensé en première année du département chimie de l'IUT d'Orléans. Il peut être adapté à la formation des techniciens supérieurs et de tout personnel devant utiliser les méthodes du génie des procédés dans son activité quotidienne.

Partie 1

Fluides

Introduction

Les composés rencontrés dans notre environnement se présentent sous trois états : solide, liquide et gazeux. Chaque état résulte des forces qui ont tendance à rapprocher ou éloigner les molécules. Dans l'état solide, les forces de cohésion sont plus importantes que les forces de répulsion (état ordonné). Dans l'état gazeux, c'est l'inverse qui se produit (état du désordre). L'état liquide est intermédiaire, c'est-à-dire organisé mais déformable.

Un fluide est donc un corps sans rigidité qui peut changer de forme sous l'action d'une force très faible. Il inclut les gaz, les liquides et certaines suspensions. Les fluides n'ont pas de forme propre et possèdent la propriété de se déformer et de s'écouler facilement. Cependant ces caractéristiques sont liées à la viscosité. Plus un fluide est visqueux et plus sa déformation nécessite d'énergie.

L'industrie chimique utilise des fluides comme matières premières, produits finis, carburants, etc. mais aussi comme vecteurs d'énergie (fluides caloporteurs) et associés à des solides dans les opérations de séparations mécaniques.

Cette première partie est consacrée à la mécanique des fluides incompressibles (liquides) et peut se partager en deux spécialités. La première concerne les fluides seuls et se rapporte aux fluides au repos (statique) ou au déplacement des fluides (rhéologie et dynamique). La seconde spécialité concerne les fluides associés à une autre phase (système diphasique) et est en rapport avec la filtration, la fluidisation, la décantation, la centrifugation et le dépoussiérage. Chaque chapitre présentera les lois fondamentales illustrées par des exercices et les applications technologiques.

Avant d'aborder ces études, il est primordial de connaître les principales grandeurs (définitions, unités) utilisées dans ce manuel.

Grandeurs physicochimiques

Introduction

La dimension d'une grandeur physicochimique est essentielle et son homogénéité, obtenue à partir d'une équation, doit systématiquement être vérifiée. Les unités sont aussi importantes pour la quantification d'une grandeur. Un système d'unités est un ensemble d'unités cohérentes entre elles permettant de définir l'ensemble des grandeurs observées. On compte plusieurs systèmes d'unités et principalement le système métrique, que nous utiliserons. Les conversions entre les unités demandent une certaine rigueur.

Avant d'étudier les fluides et les bilans, il est primordial de connaître les définitions des principales grandeurs physiques et de composition qui seront utilisées tout au long de ce manuel.

Objectifs

- Connaître** les grandeurs et unités de base.
- Vérifier** systématiquement l'homogénéité d'une expression
- Savoir** établir une équation aux dimensions
- Connaître** les définitions des principales grandeurs
- Savoir** l'unité légale d'une grandeur

Plan

- 1 Notions générales sur les grandeurs
- 2 Équation aux dimensions
- 3 Systèmes d'unités
- 4 Principales grandeurs physiques
- 5 Principales grandeurs de composition

1 Notions générales sur les grandeurs

DÉFINITION

Une *grandeur physicochimique* représente toute propriété de la nature pouvant être quantifiée par la mesure ou le calcul, et dont les différentes valeurs possibles s'expriment à l'aide d'un nombre généralement accompagné d'une unité de mesure.

Par exemple, la longueur est une grandeur regroupant tout ce qui concerne les distances et s'exprime en mètre, l'unité de base. L'indice de réfraction d'un milieu est une grandeur sans dimension et donc sans unité.

Les grandeurs physicochimiques sont classées selon deux catégories : les grandeurs dites *extensives* et les grandeurs dites *intensives*. Les grandeurs extensives dépendent de la quantité de composé comme la masse, le volume, etc. En revanche, les grandeurs intensives sont indépendantes de la quantité de matière, comme la température et la pression.

L'addition et la soustraction sont seulement possibles entre données de même grandeur. En outre, il est possible de multiplier ou de diviser des grandeurs différentes aboutissant à une nouvelle grandeur dérivée des deux autres. Par exemple, la longueur divisée par le temps aboutit à une nouvelle grandeur dérivée qui est la vitesse linéaire.

Le domaine de la physique traitant des relations entre grandeurs est l'analyse dimensionnelle. Il existe deux types de grandeurs :

- Les *grandeurs de base* ou *grandeurs fondamentales* : elles sont au nombre de sept et sont admises par convention. Elles sont totalement indépendantes les unes des autres et possèdent une unité de base. Les sept grandeurs de base sont rassemblées dans le tableau 1.1.
- Les *grandeurs dérivées* : elles sont définies par une équation en fonction des grandeurs de base. Elles possèdent des unités composées ou un nom spécial (newton, pascal, etc.).

Tableau 1.1 – Grandeurs de base.

Grandeurs de base	Symbole	Unité SI
Longueur	L	Mètre (m)
Temps	T	Seconde (s)
Masse	M	Kilogramme (kg)
Température	θ	Kelvin (K)
Quantité de matière	N	Mole (mol)
Intensité électrique	I	Ampère (A)
Intensité lumineuse	J	Candela (cd)

En génie chimique, nous travaillerons essentiellement avec les cinq grandeurs de base indiquées en gras dans le tableau 1.1, à savoir : la longueur, le temps, la masse, la température et la quantité de matière.

2 Équation aux dimensions

Une équation aux dimensions ne contient aucun coefficient numérique mais caractérise seulement la nature de la grandeur en fonction des grandeurs de base, affectées d'un exposant positif ou négatif, entier ou fractionnaire. L'utilité des équations aux dimensions est de déterminer l'homogénéité des expressions et de donner une relation symbolique qui lie une grandeur aux grandeurs fondamentales.

Exercice d'application

Déterminer l'équation aux dimensions de la pression

Il faut tout d'abord partir de la définition d'une pression qui est une force appliquée sur un élément de surface. Or une force est le produit d'une masse et d'une accélération et donc l'équation aux dimensions de la pression est :

$$\text{pression} = \frac{\text{force}}{\text{surface}} = \frac{\text{masse} \times \text{accélération}}{\text{surface}} = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = ML^{-1}T^{-2}$$

3 Systèmes d'unités

Le système international (SI) est le système métrique décimal obligatoire dans tous les pays depuis la 11^e Conférence générale des poids et mesures (11^e CGPM) en 1960. Mais le système anglosaxon d'unités est encore le plus souvent utilisé dans les pays de langue anglaise. Dans certains domaines de la science, le système d'unités CGS (centimètre, gramme, seconde) est encore utilisé. Par exemple, la force est exprimée en newton dans le SI et en dyn dans le système CGS. Le tableau 1.1 répertorie les unités légales des grandeurs fondamentales. Dans le tableau 1.2 sont rassemblés les principaux multiples et sous-multiples légaux des unités du SI.

Tableau 1.2 – Principaux multiples et sous-multiples SI.

	Multiples					
Facteur	10	10 ²	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²
Préfixe	déca	hecto	kilo	méga	giga	téra
Symbole	da	h	k	M	G	T
	Sous Multiples					
Facteur	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²
Préfixe	déci	centi	milli	micro	nano	pico
Symbole	d	c	m	μ	n	p

4 Principales grandeurs physiques

4.1 Masse volumique et densité

DÉFINITIONS

La *masse volumique* (ρ) est le rapport entre la masse de matière (m) et le volume occupé par cette masse (V) comme indiqué dans l'équation 1.1. L'équation aux dimensions est donc ML^{-3} et la masse volumique s'exprime en $kg \cdot m^{-3}$.