

# **Génie chimique et des procédés**

**Écoulement des fluides, bilans et  
transferts thermiques**

**Johanne Bonnin**

**Olivier Chedeville**

**Henri Fauduet**

**DUNOD**

Couverture : © oonal - istockphoto.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-078893-4

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> 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

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

## Partie 2

---

### **Bilans et transferts thermiques** 103

<b>Chapitre 7</b>	<b>Bilans-matière</b>	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
	<b>L'essentiel</b>	117
	Entraînez-vous	118

<b>Chapitre 8</b>	<b>Bilans thermiques</b>	120
	1. Principales lois thermiques	120
	2. Principales formes d'énergie	123
	3. Établissement des bilans thermiques	137
	<b>L'essentiel</b>	142
	Entraînez-vous	143
<b>Chapitre 9</b>	<b>Le transfert thermique</b>	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
	<b>L'essentiel</b>	159
	Entraînez-vous	160
<b>Chapitre 10</b>	<b>Les échangeurs thermiques</b>	162
	1. Calcul d'un échangeur thermique	162
	2. Technologies d'échangeur thermique	170
	3. Production de chaud et de froid	172
	<b>L'essentiel</b>	174
	Entraînez-vous	175
	<b>Solutions</b>	178
	<b>Bibliographie</b>	229
	<b>Index</b>	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<sup>e</sup> 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 dépeussierage. 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	$\theta$	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<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (11<sup>e</sup> 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					
<b>Facteur</b>	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>12</sup>
<b>Préfixe</b>	déca	hecto	kilo	méga	giga	téra
<b>Symbole</b>	da	h	k	M	G	T
	Sous Multiples					
<b>Facteur</b>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-12</sup>
<b>Préfixe</b>	déci	centi	milli	micro	nano	pico
<b>Symbole</b>	d	c	m	μ	n	p

### 4 Principales grandeurs physiques

#### 4.1 Masse volumique et densité

##### DÉFINITIONS

La *masse volumique* ( $\rho$ ) 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  $kg \cdot m^{-3}$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

La masse volumique est facile à mesurer pour les liquides et est du même ordre de grandeur que celle de l'eau ( $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), tandis que celle des gaz est du même ordre de grandeur que celle de l'air, c'est-à-dire à peu près  $1,2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  aux environs des conditions normales.

Les liquides étant des fluides incompressibles, leur masse volumique est peu sensible aux variations de température et de pression. À l'inverse, la masse volumique des gaz est, elle, sensible à ces variations comme l'indique sa formule ( $\rho = \frac{M p}{R T}$ ). La masse volumique des solides est beaucoup plus délicate à mesurer (voir chapitre 5).

### DÉFINITION

La *densité* ( $d$ ) est le rapport de la masse volumique du corps ( $\rho$ ) par rapport à celle d'un composé de référence ( $\rho_0$ ) à température et pression fixées.

$$d = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1.2)$$

La densité est un nombre sans dimension et donc sans unité. Pour les liquides, la masse volumique du composé de référence est celle de l'eau à  $4\text{ °C}$  et  $1,013\text{ bar}$  qui est exactement de  $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 4.2 Force et pression

### DÉFINITION

La *force* ( $F$ ) est le produit de la masse d'un corps ( $m$ ) par une accélération ( $a$ ) (cf. Éq. 1.3). La *pression* ( $p$ ) est la force appliquée ( $F$ ) perpendiculairement sur un élément de surface ( $S$ ). La pression s'exerce uniformément sur toute la surface, comme on le voit sur la figure 1.1.



**Figure 1.1** – Schématisation des grandeurs physiques.

(A) Force. (B) Force de la pression.

La pression peut aussi être l'énergie ( $E_{\text{pression}}$ ) rapportée à un élément de volume ( $V$ ) puisque l'énergie est égale au produit d'une force par un déplacement. L'expression de la force et de la pression est donnée respectivement dans les équations 1.3 et 1.4.

$$F = m a \quad (1.3)$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{S} \frac{l}{l} = \frac{E_{\text{pression}}}{V} \quad (1.4)$$

L'équation aux dimensions de la force est  $MLT^{-2}$  et s'exprime en N (newton) en SI, la pression est  $ML^{-1}T^{-2}$  et l'unité SI est le pascal (Pa).

Dans un fluide homogène au repos, la pression en un point quelconque est la même sur tous les éléments de surface. Si les pressions étaient différentes, le fluide ne serait pas en équilibre et, par conséquent, serait mobile.

Il existe beaucoup d'unités dérivées différentes pour la pression. La plus communément utilisée est le bar et  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ . La pression peut aussi s'exprimer en hauteur de fluide équivalente, comme en hauteur d'eau ou en hauteur de mercure. En effet, cette unité de pression en hauteur de mercure provient des anciens baromètres ou manomètres qui contenaient principalement ce liquide. La pression atmosphérique (atm) est aussi une unité utilisée. Voici les principaux facteurs de conversion :

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} = 10^2 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar} = 760 \text{ mm Hg} = 10,33 \text{ m CE (m de colonne d'eau)}.$$

Le tableau 1.3 donne des ordres de grandeur de différents systèmes sous pression.

**Tableau 1.3** – Ordre de grandeur de pression.

Exemples	Pression (bar)
Bouteille de gaz comprimé	≈ 100
Pneumatiques	1 à 8
Réseau d'eau urbain	2 à 5
Pression atmosphérique normale	1,013
Pression artérielle normale	0,16 à 0,2

## 4.3 Vitesse et débit

### DÉFINITIONS

La *vitesse linéaire* ( $u$ ) est égale au quotient de l'intervalle de la distance parcourue par un mobile ( $dl$ ) dans l'intervalle de temps ( $dt$ ). Son équation aux dimensions est  $LT^{-1}$  et la vitesse s'exprime en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$u = \frac{dl}{dt} \quad (1.5)$$

Le débit est égal au quotient d'une quantité par un temps. Il existe plusieurs types de débit. Le *débit volumique* est le volume écoulé pendant un certain temps (cf. Éq. 1.6) et le *débit massique* est la masse écoulée pendant un certain temps (cf. Éq. 1.7).

Le débit volumique ( $q_v$ ) peut être relié à la vitesse ( $u$ ) de circulation d'un fluide dans une canalisation de section ( $S$ ) : l'équation aux dimensions du débit volumique est  $L^3T^{-1}$  et les unités SI sont  $m^3 \cdot s^{-1}$ .

$$q_v = \frac{V}{t} = u S \quad (1.6)$$

L'équation aux dimensions du débit massique est  $MT^{-1}$  et les unités SI sont  $kg \cdot s^{-1}$ . Le débit massique ( $q_m$ ) est relié au débit volumique ( $q_v$ ) par la masse volumique du fluide.

$$q_m = \frac{m}{t} = \rho q_v = \rho u S \quad (1.7)$$

**Exercice d'application**

Un volume d'eau de 100 L s'écoule en 1 min dans une canalisation. Quel est le débit volumique ? En déduire son débit massique sachant que  $\rho_{\text{eau}} = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

$$q_v = \frac{V}{t} = \frac{100 \times 10^{-3}}{1 \times 60} = 1,67 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ et } q_m = \rho q_v = 1\,000 \times 1,67 \times 10^{-3} = 1,67 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

**ATTENTION !**

Il est vivement conseillé d'effectuer les calculs après avoir homogénéisé toutes les données avec les unités du système international (SI).

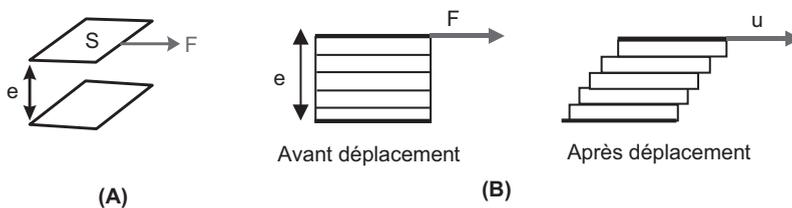
**4.4 Viscosité**

**DÉFINITIONS**

La *viscosité* est une propriété du fluide traduisant sa résistance à l'écoulement. Un fluide en mouvement est soumis à des forces de frottement créant une force de résistance à son déplacement ou à son changement de forme.

Ainsi plus un liquide est visqueux, plus il est difficile à déplacer, à écouler, comme la pâte dentifrice.

La viscosité est mise en évidence en plaçant un liquide visqueux, comme de l'huile, d'épaisseur ( $e$ ) entre deux plaques solides planes et parallèles de surface ( $S$ ), tel que représenté sur la figure 1.2 :



**Figure 1.2 – Mise en évidence de la viscosité.**

(A) Vue générale. (B) Vue en coupe.

La plaque solide inférieure est maintenue au repos tandis que la plaque supérieure est soumise à un déplacement de force ( $F$ ). Il est ainsi observé qu'après déplacement, les différentes couches de fluide sont entraînées à des vitesses ( $u$ ) différentes par le mouvement de la plaque.

La formule de Newton permet d'exprimer la force à exercer sur la plaque ( $F$ ) en fonction de la surface ( $S$ ), de la vitesse ( $u$ ) de la plaque et de l'épaisseur de liquide ( $e$ ) entre les plaques et du coefficient de frottement ( $\mu$ ).

$$F = \mu S \frac{u}{e} \quad (1.8)$$

La *viscosité dynamique* ( $\mu$ ) représente le facteur de proportionnalité entre  $F$  et  $S \frac{u}{e}$  et caractérise la force à exercer pour déplacer les particules de fluide les unes par rapport aux autres. Si les plaques sont très rapprochées, leur surface étant ( $dS$ ), leur distance ( $de$ ) et la différence des vitesses ( $du$ ), la formule de Newton peut s'écrire :  $\frac{dF}{dS} = \mu \frac{du}{de}$  dans laquelle  $\frac{dF}{dS}$  représente la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) et  $\frac{du}{de}$  le gradient de vitesse ou de cisaillement ( $D$ ).

$$\tau = \mu D \quad (1.9)$$

La représentation de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du gradient de cisaillement ( $D$ ) se nomme rhéogramme et est mesuré grâce à un appareil appelé rhéomètre. Le rhéogramme d'un produit permet de connaître son comportement rhéologique et de le classer selon la nature dans différentes catégories comme newtoniens, rhéofluidifiants, rhéoépaississants. Dans cet ouvrage, nous ne traiterons que des fluides newtoniens, c'est-à-dire des fluides dont la viscosité ( $\mu$ ) ne varie pas avec le gradient de cisaillement ( $D$ ).

Pour les fluides newtoniens comme l'eau, le rhéogramme caractéristique est représenté sur la figure 1.3. La pente représente la viscosité dynamique  $\mu$  qui est une constante.

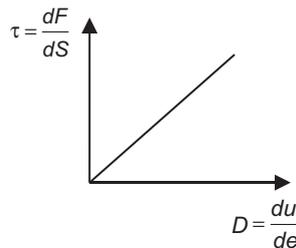


Figure 1.3 – Rhéogramme d'un fluide newtonien.

La viscosité dynamique  $\mu$  est une grandeur propre à chaque fluide dépendant de la température. Son équation aux dimensions est  $ML^{-1}T^{-1}$  et son unité SI est le  $Pa \cdot s$ . La viscosité dynamique peut aussi être exprimée en cPo (centipoise) avec  $1 \text{ cPo} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot s$ ,

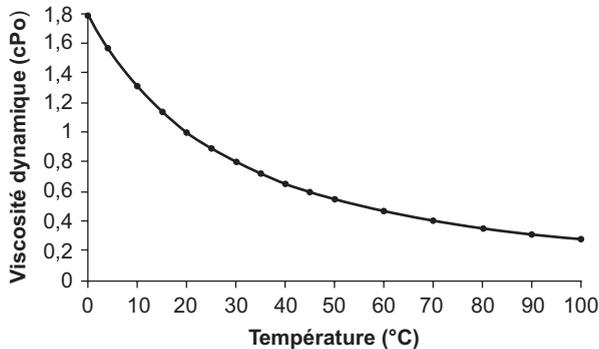
ce qui correspond à la viscosité de l'eau à 20 °C. Le tableau 1.4 présente des valeurs de viscosité dynamique de différents liquides et gaz.

**Tableau 1.4** – Valeurs de la viscosité de différents composés à 20 °C.

Liquides (Pa·s)		Gaz (Pa·s)	
Acétone	$0,33 \times 10^{-3}$	Hydrogène	$0,89 \times 10^{-5}$
Eau	$1 \times 10^{-3}$	Méthane	$1,09 \times 10^{-5}$
Éthanol	$1,20 \times 10^{-3}$	Dioxyde de carbone	$1,48 \times 10^{-5}$
Mercure	$1,55 \times 10^{-3}$	Azote	$1,75 \times 10^{-5}$
Huile d'olive	$84 \times 10^{-3}$	Air	$1,85 \times 10^{-5}$
Glycérine	$1\ 500 \times 10^{-3}$	Oxygène	$2,02 \times 10^{-5}$
Huile minérale ou miel	$10\ 000 \times 10^{-3}$	Vapeur d'eau	$10,5 \times 10^{-5}$

La viscosité est très sensible aux variations thermiques. Quand la température augmente, la viscosité des liquides diminue tandis que celle des gaz augmente.

Sur le graphique de la figure 1.4 est représentée l'évolution de la viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température. On peut voir que la viscosité de l'eau diminue avec l'augmentation de la température et passe de  $1,8 \times 10^{-3}$  Pa·s à 0 °C à  $0,3 \times 10^{-3}$  Pa·s à 100 °C. L'eau est donc six fois moins visqueuse à 100 °C qu'à 0 °C.



**Figure 1.4** – Variation de la viscosité dynamique de l'eau avec la température.

La viscosité dynamique est en revanche peu sensible à une variation de pression.

## 4.5 Autres grandeurs physiques

Il est fréquent d'utiliser d'autres grandeurs physiques en génie des procédés.

## a) Énergie

L'énergie peut être un travail ( $W$ ) ou une quantité de chaleur ( $Q$ ). Elle traduit l'aptitude d'un objet à vaincre une force de résistance. L'énergie s'énonce avec le produit d'une force par un déplacement selon l'équation 1.10 et s'exprime en joule, J ( $ML^2T^{-2}$ ).

$$W = F l \quad (1.10)$$

Lorsqu'il s'agit d'une quantité de chaleur, il est possible de trouver aussi l'ancienne unité thermique : la calorie (1 cal = 4,18 J).

## b) Puissance

La *puissance* est l'énergie rapportée au temps et traduit la capacité d'une machine à produire rapidement une énergie. Elle est égale au quotient de l'énergie transmise en un certain temps par cette durée et s'exprime en W ( $ML^2T^{-3}$ ).

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.11)$$

## 5 Principales grandeurs de composition

L'industrie employant souvent des mélanges, il est important d'en définir la composition. On fait surtout appel aux concentrations et aux titres.

### 5.1 Concentrations

La *concentration* est le rapport d'une quantité de substance en solution (masse, quantité de matière, volume) au volume global de solution (soluté + solvant). La concentration peut donc être massique, molaire ou volumique. La formule de définition, l'équation aux dimensions et l'unité de chaque grandeur sont indiquées dans le tableau 1.5.

### 5.2 Titres

Le *titre* (fraction ou pourcentage) d'un constituant dans un mélange se définit comme le quotient de la masse, de la quantité de matière ou du volume d'un constituant par rapport à la masse, la quantité de matière ou le volume total du mélange. Ces grandeurs, sans dimension, s'expriment en nombre fractionnaire variant de 0 à 1 (ou en pourcentage de 0 à 100 %).

Il faut noter que pour les gaz, le titre volumique est égal au titre molaire puisque le volume molaire est le même pour tous les gaz :  $x_A = \frac{n_A}{n_T} = \frac{V_A}{V_T} = \Phi_A$ .

**Tableau 1.5** – Grandeurs de composition.

Grandeur	Formule de définition	Équation aux dimensions	Unité SI	Autre formule
Concentration massique	$c_A = \frac{m_A}{V_T}$	$ML^{-3}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
Concentration molaire	$C_A = \frac{n_A}{V_T}$	$NL^{-3}$	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$	$C_A = \frac{c_A}{M}$
Concentration volumique	$C_{V_A} = \frac{V_A}{V_T}$	1	sans	
Titre massique	$w_A = \frac{m_A}{m_T}$	1	sans	$w_A + w_B + \dots = 1$
Titre molaire	$x_A = \frac{n_A}{n_T}$	1	sans	$x_A + x_B + \dots = 1$
Titre volumique	$\Phi_A = \frac{V_A}{V_T} = C_{V_A}$	1	sans	$\Phi_A + \Phi_B + \dots = 1$

## Les points clefs du chapitre

- 1 En génie chimique, toutes les grandeurs peuvent être exprimées en fonction de cinq grandeurs de base :  $L$ ,  $T$ ,  $M$ ,  $\theta$  et  $N$ .
- 2 L'équation aux dimensions caractérise la nature d'une grandeur en fonction des grandeurs de base.
- 3 Une grandeur est dite adimensionnelle si son équation aux dimensions est unitaire.
- 4 L'unité d'une grandeur peut s'exprimer à partir des unités des grandeurs de base même si certaines unités dérivées regroupent des grandeurs de base ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ).
- 5 En génie chimique il est indispensable de connaître les définitions des grandeurs physicochimiques suivantes et de déterminer les relations qui existent entre elles : masse, volume, masse volumique, force, pression, vitesse, débit, viscosité, énergie, puissance.
- 6 En génie chimique il est impératif de connaître les définitions des grandeurs de compositions suivantes et de savoir les transformer : concentrations et titres.
- 7 Les grandeurs de compositions massiques sont les plus importantes dans les procédés physicochimiques. En outre, les grandeurs de compositions molaires sont incontournables dans les procédés chimiques.
- 8 Il est primordial de convertir toutes les grandeurs dans les unités SI avant de faire une application numérique.



## 1.1 Conversion d'unités

Convertir les grandeurs suivantes dans les unités du système SI : 1 mL, 1 cm<sup>2</sup>, 1 kg · L<sup>-1</sup>, 1 g · mL<sup>-1</sup>, 1 m<sup>3</sup> · h<sup>-1</sup>, 1 t · min<sup>-1</sup>, 1 cal · kg<sup>-1</sup> · °C<sup>-1</sup> et 1 cal · cm<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>.

## 1.2 Équation aux dimensions

La viscosité dynamique d'un fluide est exprimée par la formule de Newton, dans laquelle  $F$  représente la force de glissement,  $S$  la surface de glissement,  $u$  la vitesse de glissement et  $z$  la

distance entre deux couches de fluide :  $\mu = \frac{F}{S} \frac{z}{u}$ . Déterminer les dimensions de la viscosité et son unité dans le système légal.

## 1.3 Équation aux dimensions

L'équation de la perte de charge linéaire due aux frottements d'un fluide dans une canalisation

est donnée par l'équation de Darcy :  $\Delta p = \frac{\lambda \rho u^2 L}{2 D}$ . Dans cette expression,  $\Delta p$  représente

la perte de charge du fluide (perte de pression),  $u$  la vitesse du fluide,  $L$  la longueur de la canalisation,  $D$  le diamètre de la canalisation,  $\lambda$  le coefficient de friction et  $\rho$  la masse volumique du fluide. Déterminer les dimensions du coefficient de friction et son unité dans le système SI.

## 1.4 Détermination de la densité

On veut déterminer la densité du méthanol à l'aide d'un pycnomètre (petit récipient permettant de mesurer la densité des liquides avec précision). Sa masse est de 19,9160 g quand il est vide, de 39,8761 g lorsqu'il est rempli d'eau à 20 °C et de 35,7547 g lorsqu'il est rempli de méthanol à 20 °C. Calculer la masse volumique et la densité du méthanol dans ces conditions sachant que la masse volumique de l'eau à 20 °C est de 998,2 kg · m<sup>-3</sup>.

## 1.5 Détermination des grandeurs de composition

Une solution aqueuse d'acide sulfurique possède une concentration massique de 418 g · L<sup>-1</sup> et une masse volumique à 15 °C de 1,250 kg · L<sup>-1</sup>. Sachant que la masse volumique de l'acide sulfurique à 15 °C est de 1,841 kg · L<sup>-1</sup>, calculer :

- la concentration en quantité de matière ;
- le titre volumique ;
- le titre massique ;
- le titre molaire.

## 1.6 Détermination de la masse molaire moyenne d'un mélange gazeux

Calculer la masse molaire moyenne d'un mélange gazeux possédant la composition volumique suivante : H<sub>2</sub> (15 %), CO<sub>2</sub> (35 %), CO (3 %), N<sub>2</sub> (30 %) et CH<sub>4</sub> (17 %).