

Henri Fauduet

Mécanique
des fluides & des solides
appliquée à la chimie

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Mécanique des fluides et des solides appliquée à la chimie

Henri Fauduet



11, rue Lavoisier
75008 Paris

Chez le même éditeur

Approche statistique pour les écoulements turbulents pariétaux

Collection « Mécanique des fluides »

Tardu S., 2010

Écoulements pour les procédés : applications à la réaction chimique et à la séparation mécanique

Collection « Mécanique des fluides »

Mory M., 2010

Thermodynamique des systèmes fluides et des machines thermiques : principes, modèles et applications

Collection « Mécanique des fluides »

Fohr J.-P., 2010

Aéroélasticité et aéroacoustique

Destuynder P., 2006

Éléments de mécanique des fluides et de thermique

Peube J.-L., 2006

Principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique : aspects théoriques et pratiques

Fauduet H., 1997



© LAVOISIER, 2011

ISBN : 978-2-7430-1315-8

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code pénal art. 425).

Symboles et abréviations

Les symboles utilisés dans cet ouvrage sont indiqués ci-après selon les alphabets latin et grec et sont suivis de leur signification et de l'unité dans le système légal.

Alphabet latin

<i>A</i>	surface (m^2)
<i>A, a</i>	coefficient ou constante quelconque (variable)
<i>a</i>	accélération ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
<i>B</i>	induction magnétique (T)
<i>B, b</i>	coefficient ou constante quelconque (variable)
<i>b</i>	gradient de tension superficielle ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
<i>C</i>	concentration massique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
<i>C</i>	cylindrée d'un compresseur (m^3)
<i>C</i>	conductance d'une canalisation ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
<i>C</i>	coefficient de friction (traînée) (sans dimension)
<i>C</i>	capacité d'un crible ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
<i>C</i>	moment d'un couple de torsion (N.m)
<i>C, C_c</i>	coefficient de contraction (sans dimension)
<i>C, c</i>	coefficient ou constante quelconque (variable)
<i>C_p</i> et <i>C_v</i>	capacités thermiques molaires à pression constante et à volume constant ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
<i>C_T</i>	raison du classement gravimétrique (sans dimension)
<i>C_v</i>	coefficient de variation (sans dimension)
<i>CTNA</i>	charge totale nette à l'aspiration (<i>cf.</i> NPSH) (m de fluide)

c	vitesse de la lumière ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
c	compacité (sans dimension)
c_p et c_v	capacités thermiques massiques à pression constante et à volume constant ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
D, d	diamètre quelconque (canalisation, roue, goutte, etc.) (m)
D	coefficient de diffusivité ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
D_H	diamètre hydraulique de la conduite (m)
d	densité (sans unité)
dp, dT, dV, dp	variation de pression (Pa), de température (K), de volume (m^3), de la masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
E	énergie (J)
E	module de Young (Pa)
E	degré Engler ($^{\circ}\text{E}$)
e	épaisseur ou largeur (couche, paroi, roue, etc.) (m)
E_s	énergie de surface (J)
Eu	nombre de Euler (sans dimension)
F, f	force (N)
f	fluidité ($\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
$f = \lambda / 4$	coefficient de Fanning (sans dimension)
$G = \rho u$	débit massique surfacique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
g	accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
H	excitation magnétique ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
H	indice de Hardgrove (g)
H, h	hauteur d'un fluide par rapport à un plan de référence (m)
H_T	hauteur manométrique (énergétique) totale ou de la pompe (m)
$h_B - h_A$	différence de cote entre deux niveaux d'un fluide (m)
h_t	charge totale du fluide (m)
I	coefficient d'imperfection d'un tamisage (sans dimension)
i	indice de coulabilité d'une poudre (sans dimension)
I_H	indice d'Haussner (sans dimension)
I_C	indice de Carr (sans dimension)
K	coefficient de perte de charge singulière (sans dimension)
K, k	constante dépendant des caractéristiques de l'appareil (pompe, viscosimètre, etc.) (variable)
k	constante ou coefficient quelconque (variable)
k	exposant polytropique (sans dimension)
l	longueur quelconque (canalisation, pore, lit de particules, etc.) (m)
l_e	longueur équivalente d'une perte de charge singulière (m)

L_v	enthalpie molaire de vaporisation ($J \cdot mol^{-1}$)
M	aimantation induite ($A \cdot m^{-1}$)
M	masse molaire ($g \cdot mol^{-1}$)
M	moment des forces ($N \cdot m$)
m	masse (kg)
m	constante expérimentale (variable)
Ma	nombre de Mach (sans dimension)
NPSH	<i>net pressure suction head</i> (cf. CTNA) (m de fluide)
n	nombre quelconque (grains, étapes, cylindres, etc.) (sans dimension)
n	quantité de matière (mol)
n	constante ou coefficient quelconque (variable)
p	pression du gaz (Pa)
p	périmètre (m)
p	constante ou coefficient quelconque (variable)
\bar{p}	quantité de mouvement non relativiste ($kg \cdot m \cdot s^{-1}$)
p°	pression de vapeur du liquide à la température considérée (Pa)
P_A	puissance absorbée (W)
P_u	puissance utile (W)
Q	quantité de chaleur (J)
q_m	débit massique ($kg \cdot s^{-1}$)
q_v	débit volumique ou vitesse de pompage ($m^3 \cdot s^{-1}$)
R	constante des gaz parfaits ($R = 8,31 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)
R	résistance d'un matériau (Pa)
R, r	rayon (tube, rotor, etc.) (m)
R	taux (rapport) de réduction (broyage) (sans dimension)
r	rayon de courbure ou d'un pore (m)
Re	nombre de Reynolds (sans dimension)
S ou s	surface ou section (conduite, particule, etc.) (m^2)
SAE	indice SAE (sans dimension)
s_m	surface spécifique massique ($m^2 \cdot kg^{-1}$)
$s_{m\Sigma}$	surface spécifique massique moyenne ($m^2 \cdot kg^{-1}$)
s_v	surface spécifique volumique (m^{-1})
T	température absolue (K)
T	tension moléculaire
t	temps (s)
u	vitesse d'écoulement d'un fluide ou de déplacement d'une particule ($m \cdot s^{-1}$)

U	énergie interne (J)
u_l	vitesse limite de chute d'une particule ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
V	volume quelconque (particules, réservoir, etc.) (m^3)
v	volume massique ($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)
V_b	volume balayé d'un compresseur ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
W	travail, énergie (J)
w	titre massique (sans unité)
x	variable quelconque (variable)
Z	facteur de compressibilité (sans dimension)
z	hauteur géométrique (m)
$z + h_{stat}$	hauteur piézométrique (m)

Alphabet grec

α	angle (sans dimension)
α	constante ou coefficient quelconque (variable)
α	coefficient de dilatation volumique isobare (K^{-1})
β	coefficient de compressibilité isochore (K^{-1})
β	angle d'inclinaison ($^\circ$)
β	constante ou coefficient quelconque (variable)
$\gamma = C_p/C_v$	facteur isentropique (sans dimension)
γ	constante ou coefficient quelconque (variable)
Δ	coefficient de remplissage d'un broyeur (sans dimension)
Δ	nombre de dureté de Brinell (Pa)
$\Delta h, \Delta z$	différence de hauteur (m)
Δh_f	perte de charge linéaire exprimée en hauteur équivalente de fluide (m)
Δh_s	perte de charge singulière exprimée en hauteur équivalente de fluide (m)
Δh_t	perte de charge totale exprimée en hauteur équivalente de fluide (m)
Δp	différence de pression (perte de charge) (Pa)
Δp_f	différence de pression par frottement (perte de charge régulière) (Pa)
Δp_s	différence de pression due aux accidents de tuyauterie (perte de charge singulière) (Pa)
ε	coefficient de rugosité (sans dimension)
ε	coefficient de déformation (élastique, plastique, etc.) (sans dimension)
ε	porosité externe d'une couche de solide (sans dimension)
η	rendement ou efficacité (sans dimension)
θ	température relative ($^\circ\text{C}$)
θ	angle de contact ($^\circ$)

κ	coefficient de compressibilité isotherme (Pa^{-1})
λ	coefficient de frottement (sans dimension)
λ	coefficient de conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
μ	coefficient de viscosité dynamique (Pa.s)
μ	perméabilité magnétique (H.m^{-1})
μ_0	perméabilité dans le vide ($\mu_0 = 4 \pi.10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$)
ν	coefficient de viscosité cinématique (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
π	rapport du périmètre d'un cercle à son diamètre ($\pi = 3,1416$)
ρ	masse volumique (kg.m^{-3})
ρ_0	masse volumique d'un corps de référence (kg.m^{-3})
σ	coefficient de tension superficielle (N.m^{-1} , kg.s^{-2})
σ	contrainte de traction (Pa)
σ'	contrainte de consolidation (Pa)
σ_c	résistance à la compression (Pa)
τ	contrainte tangentielle de cisaillement (Pa)
τ_c	taux de compression (sans dimension)
Φ	facteur de forme (sans dimension)
Φ	flux de matière (mol.s^{-1} , kg.s^{-1})
Φ	titre volumique (sans dimension)
Φ_E	flux d'énergie (W)
Φ_S	sphéricité (sans dimension)
χ	porosité interne d'un grain ou d'une couche de solide (sans dimension)
χ	susceptibilité magnétique d'un matériau (sans dimension)
Ψ	susceptibilité magnétique spécifique ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)
ω	vitesse angulaire (rad.s^{-1})

Indice

a	absolu, aéré, apparente, interparticulaire, point quelconque
asp	aspiration
atm	atmosphère
b	broyage, point quelconque
c	cinétique, couche
c, cr	critique
disp	disponible
dyn	dynamique
e	élastique, entrée, équivalent
eff	efficace

f	fluide, frottement
g	grain
i	interagglomérat, moyen
int	interne
k	polytropique
l	limité, liquide
m	massique, mécanique, moyen
max	maximum
moy	moyen
n	point quelconque
p	intraparticulaire, particule, pompe, potentiel
q	adiabatique
R	Rittinger
r	centripète, épuration, réduite, relatif, rupture
ref	refoulement
req	requis
s	solide, sortie, surfacique
sp	sphère
stat	statique
t, T	total
t	tassé, total
v	volumétrique, volumique, vrai
0	référence
θ	isotherme
→	vecteur

Avant-propos

Cet ouvrage fait suite au livre précédemment édité sur les principes fondamentaux du génie des procédés et de la technologie chimique. Il s'adresse plus particulièrement aux étudiants en chimie se destinant aux carrières technologiques mais aussi aux chimistes en activité souhaitant obtenir des informations de base dans une discipline qui n'est pas exactement la leur : le génie des procédés. Cette science est relativement récente et est née des transformations successives de certaines pratiques artisanales ancestrales (purification de l'eau, fermentation alcoolique, fabrication d'engrais, élaboration des métaux, etc.) en développements industriels. Le passage d'une transformation physique et/ou chimique d'une échelle réduite discontinue à une plus grande échelle, souvent continue, est imposé par une demande croissante en biens de consommation. Elle nécessite une étude fondamentale de chaque procédé mis en œuvre avant de choisir le matériel le mieux adapté à la transformation. Le génie des procédés, souvent mal perçu par les étudiants de licence qui trouvent cette science complexe, demande des connaissances variées (physico-chimie, thermodynamique, cinétique, mécanique, etc.). Elle nécessite de plus de la méthodologie et beaucoup de calculs. À défaut d'être maîtrisé, le génie des procédés devrait être connu des chimistes intervenant en milieu industriel dans le développement et dans la production de molécules. Son champ d'activité est très large, il est primordial en chimie lourde et indispensable en chimie fine ou en chimie de spécialité.

Les opérations unitaires utilisées dans l'industrie chimique sont des opérations mécaniques, physiques, physico-chimiques et chimiques qui constituent l'ensemble des moyens permettant d'effectuer une fabrication suivant un ou plusieurs procédés fondamentaux. Les opérations industrielles de production comprennent toujours les techniques mises en œuvre pour le conditionnement, la purification et l'acheminement des *matières premières* sur le site de transformation, la réalisation industrielle de la *production* (faisant généralement intervenir une modification moléculaire) dans un appareillage adapté à l'opération et enfin la séparation, la purification et le conditionnement des *produits finis*.

Tout procédé industriel fait appel, à n'importe quelle échelle, à une série coordonnée d'opérations fondamentales distinctes qui mettent en jeu des solides, des liquides ou des gaz ou des mélanges de composés sous ces divers états et ceci quel que soit le domaine chimique impliqué dans la transformation. Il est donc important de connaître les principales caractéristiques des fluides, des solides et des systèmes diphasiques (solide-fluide) pour les transporter, les stocker, leur faire subir des transformations physiques et/ou chimiques et les séparer. De plus, certains composés ont la particularité de pouvoir facilement passer d'une phase à une autre sous l'influence d'une énergie (mécanique ou thermique). Cette propriété est mise à profit dans les opérations de séparation et de purification de produits par transfert de phases (rectification, extractions, absorption, etc.).

Nous traiterons dans cet ouvrage des fluides et des solides en abordant les concepts théoriques (méthodologie et technologie des appareils) mais aussi pratiques par des exercices d'application et des vérifications expérimentales des lois fondamentales. La première partie est consacrée aux fluides et, notamment, à leurs propriétés, la statique des fluides, la dynamique des fluides incompressibles (liquides purs, solutions) et compressibles (gaz, vapeurs) et la mécanique des machines hydrauliques. Ce dernier chapitre décrit surtout les aspects technologiques fondamentaux concernant la tuyauterie, la robinetterie, les pompes à circulation, les compresseurs et les pompes à vide.

La deuxième partie est relative à l'état solide et traite plus particulièrement des propriétés des solides, de leur mode de classement (triage) par des voies directes (solides seuls) ou indirectes (au moyen d'un fluide auxiliaire), de leur réduction de dimension (fragmentation), de leur mode de transport (manutention) et de leur stockage.

La troisième partie est dédiée aux exercices et problèmes relatifs à la plupart des sujets qui ont été abordés dans les deux parties théoriques. Son objectif est d'illustrer le cours par des exemples concrets, soit purement pédagogiques, soit inspirés de l'industrie. Il doit aussi aider l'étudiant à acquérir une certaine méthodologie de travail et à vérifier que les notions de bases sont bien acquises. Il doit également permettre au chimiste de s'assurer que son interprétation de la théorie est cohérente.

Le domaine couvert par le génie des procédés est très large et s'étend des sciences abstraites au domaine du vivant. C'est essentiellement une science expérimentale utilisée quotidiennement par l'ingénieur ou le technicien supérieur chargé de faire fonctionner une unité de production ou de séparation. Ces ingénieurs sont notamment chargés de mettre en équation les nombreuses variables d'une unité mais surtout de vérifier que les objectifs définis dans ces équations sont globalement atteints, compte tenu des écarts dus aux diverses erreurs expérimentales. C'est la raison pour laquelle il nous a semblé indispensable de terminer cet ouvrage par une partie expérimentale. Les résultats présentés et interprétés sont des résultats moyens obtenus par les étudiants pendant la réalisation de leurs travaux pratiques. Ces expérimentations, réalisées par des opérateurs non spécialisés, ont pour objectif principal de leur faire redécouvrir, par la mesure, les grandes lois qui gouvernent la mécanique des fluides et des solides. Ces lois fondamentales ne sont pas toujours vérifiées correctement parce que plusieurs erreurs viennent perturber

la modélisation. Ces écarts peuvent être interprétés et notre objectif d'enseignant est de les sensibiliser à ces déviations pour mieux les préparer à la mission qui sera la leur dès leur entrée dans la vie professionnelle.

Il est difficile de rédiger seul un ouvrage. J'y associe volontiers mes collègues qui ont accepté de relire certaines parties en me faisant part de leurs remarques. Je remercie chaleureusement Loïc Burnel, agrégé de sciences physiques et chef du département chimie de l'IUT d'Orléans pour les nombreuses discussions que nous avons eues. Il a assuré la relecture du manuscrit avec sa rigueur de physicien et a permis de corriger les imperfections que laisse passer le chimiste. Je remercie aussi mes collègues Johanne Bonnin et Marie Debacq-Lapassat, maîtres de conférences respectivement à l'IUT d'Orléans et au Cnam de Paris d'avoir bien voulu apporter leur contribution à cet ouvrage en assurant la relecture de certaines parties.

Table des matières

Sigles et abréviations	3
Avant-propos	9
Préambule	2
1. La diffusion de matière unidirectionnelle : loi de Fick	2
2. Le diffusion thermique unidirectionnelle : loi de Fourier	3
3. Diffusion de la quantité de mouvement unidirectionnelle : loi de Newton. . .	4

Première partie

Mécanique des fluides

Chapitre 1

Propriétés des fluides

1. Généralités sur les fluides	11
1.1. Notions générales	11
1.2. Fluide parfait et fluide réel	12
1.3. Fluide incompressible	13
1.4. Fluide compressible	14
1.4.1. Fluide compressible parfait	14
1.4.2. Fluide compressible réel	15
2. Grandeurs mécaniques	17
2.1. Débits	18
2.1.1. Débit volumique	18
2.1.2. Débit massique	19
2.1.3. Débit massique surfacique	19

2.2. Masse volumique et densité	19
2.2.1. Masse volumique	19
2.2.2. Densité	20
2.2.3. Mesure de la masse volumique et de la densité	21
2.3. Coefficients de compressibilité et de dilatation	23
2.3.1. Coefficient de compressibilité isotherme	23
2.3.2. Coefficient de dilatation volumique isobare	25
2.3.3. Coefficient de compressibilité isochore	27
2.4. Viscosité	28
2.4.1. Description du phénomène	28
2.4.2. Viscosité dynamique	29
2.4.3. Viscosité cinématique	31
2.4.4. Facteurs influençant la viscosité	32
2.4.5. Viscosité des liquides	34
2.4.6. Viscosité des gaz	35
2.4.7. Détermination expérimentale de la viscosité	35
2.4.8. Notions de rhéologie	40
2.5. Pression de vapeur (tension de vapeur)	43
2.6. Tension superficielle	45
2.6.1. Description de phénomène	45
2.6.2. Effets sur une surface solide	46
2.6.3. Facteurs influents	48
2.6.4. Détermination de la tension superficielle	48
2.7. Diffusivité	50
3. Grandeurs thermiques	52
3.1. Capacité thermique	52
3.2. Conductivité thermique	54
3.2.1. Conductivité thermique des gaz	54
3.2.2. Conductivité thermique des liquides	55
3.2.3. Influence de la température et de la pression sur la conductivité thermique	56

Chapitre 2

Statique des fluides

1. Lois fondamentales de la statique	58
1.1. Pression	58
1.1.1. Définition de la pression	58
1.1.2. Divers types de pression	59
1.2. Équation fondamentale	60
1.3. Principe de Pascal	61
1.3.1. Principe fondamental de l'hydrostatique	61
1.3.2. Applications	62
1.4. Principe d'Archimède	64
1.5. Statique des fluides compressibles	65
2. Mesure des pressions	66
2.1. Notions générales	66
2.2. Manomètres	67
2.2.1. Manomètres à liquide	68

2.2.2. Manomètres à cloche	70
2.2.3. Manomètres à déformation	71
3. Mesure des niveaux	73
3.1. Mesure directe du niveau	73
3.2. Mesure de la pression hydrostatique	73
3.3. Mesure de la poussée d'Archimède	74
3.4. Mesure de la pression de bulle	74
3.5. Mesure de la résistance ou de la capacitance d'un fluide	74
3.6. Mesure par réflexion d'onde	75
4. Stockage des fluides	75
4.1. Stockage des liquides	75
4.2. Stockage des gaz	75

Chapitre 3

Dynamique des fluides incompressibles

1. Régimes d'écoulement des fluides	77
1.1. Divers types d'écoulement dans les conduites circulaires	78
1.1.1. Expériences de Reynolds	78
1.1.2. Nombre de Reynolds	79
1.2. Écoulement laminaire	79
1.3. Écoulement turbulent	80
1.4. Écoulement intermédiaire	80
1.5. Cas particuliers	81
1.5.1. Conduites non circulaires	81
1.5.2. Influence des parois	82
2. Lois fondamentales du déplacement des fluides	82
2.1. Introduction	83
2.2. Principe de la conservation de la matière	84
2.2.1. Écoulement dans une conduite rectiligne	84
2.2.2. Embranchements de conduites	85
2.3. Principe de la conservation de la quantité de mouvement	85
2.4. Principe de la conservation de l'énergie	86
2.4.1. Diverses catégories d'énergie	86
2.4.2. Formules énergétiques du mouvement des fluides stationnaires	88
2.5. Écoulements particuliers	94
2.5.1. Écoulement d'un liquide sous l'influence de son poids	94
2.5.2. Mesure des pressions dans un fluide en écoulement	96
2.5.3. Écoulement en milieu poreux	97
2.5.4. Écoulement de type vortex	97
3. Détermination des pertes de charge	98
3.1. Pertes de charge linéaires	100
3.1.1. Canalisation circulaire lisse	100
3.1.2. Canalisation circulaire rugueuse	102
3.1.3. Canalisation non circulaire	105
3.2. Pertes de charge singulières	105
3.2.1. Calcul à partir de formules	105
3.2.2. Calcul à partir des longueurs équivalentes	112

4. Mesure des débits	116
4.1. Mesure de la vitesse d'écoulement	116
4.1.1. Tube de Pitot	117
4.1.2. Anémomètres et compteurs	119
4.1.3. Autres systèmes de mesure	120
4.2. Mesure de la perte de charge par étranglement	120
4.2.1. Venturi	120
4.2.2. Diaphragme	122
4.2.3. Tuyère	123
4.3. Rotamètre ou flotteur	124
4.4. Autres types d'appareils de mesure	127
4.4.1. Débitmètres à ultrasons	127
4.4.2. Débitmètres électromagnétiques	127
4.4.3. Méthodes par dilution	128
4.4.4. Débitmètre à effet vortex	128
4.4.5. Débitmètre massique	129

Chapitre 4

Dynamique des fluides compressibles

1. Généralités sur les fluides compressibles	131
1.1. Différences entre un gaz et une vapeur	131
1.2. Divers types de processus	133
1.2.1. Processus isotherme	133
1.2.2. Processus adiabatique réversible	134
1.2.3. Processus polytropiques réversibles non adiabatiques	136
1.2.4. Processus polytropiques irréversibles	137
2. Écoulement des gaz	137
2.1. Principe de continuité	138
2.2. Théorème de Bernoulli	139
2.2.1. Écoulement à masse volumique constante	139
2.2.2. Écoulement à masse volumique variable	139
2.3. Pertes de charge	140
2.3.1. Écoulement isotherme	142
2.3.2. Écoulement adiabatique isentropique	143
2.3.3. Écoulement polytropique	144
3. Compression des gaz	145
3.1. Divers modes de compression	145
3.1.1. Échauffement d'un volume constant de gaz	145
3.1.2. Diminution du volume d'un gaz	145
3.2. Étude d'un compresseur alternatif	146
3.2.1. Cycle de compression	146
3.2.2. Compression isotherme	148
3.2.3. Compression adiabatique	149
3.2.4. Compression polytropique	151
3.2.5. Compressions irréversibles	152
4. Étude du vide	152
4.1. Divers types d'écoulement	153
4.1.1. Régime visqueux	154

4.1.2. Régime moléculaire	154
4.1.3. Régime intermédiaire.	154
4.2. Caractéristiques d'une pompe à vide.	155
4.2.1. Débit d'une pompe à vide	155
4.2.2. Vitesse et puissance de pompage	155
4.2.3. Temps de pompage	156
4.3. Conductance d'une canalisation	156
4.3.1. Définitions.	156
4.3.2. Écoulement dans une conduite	157
4.3.3. Débit d'aspiration effectif	158
4.3.4. Expression de la conductance	158
4.3.5. Expression de la conductance dans le cas de l'air.	159
4.3.6. Expression de la conductance dans le cas de la vapeur d'eau . . .	160

Chapitre 5

Mécanique des machines hydrauliques

1. Canalisations et robinetterie	162
1.1. Canalisations	162
1.1.1. Raccords	163
1.1.2. Manchons	163
1.1.3. Brides.	164
1.2. Robinetterie.	164
1.2.1. Classification des appareils d'obturation	165
1.2.2. Description des robinets.	165
1.2.3. Clapets de retenue	168
1.2.4. Soupapes de sûreté	169
1.2.5. Détendeurs de pression	169
1.3. Étanchéité	169
1.3.1. Presse-étoupe	170
1.3.2. Garnitures mécaniques.	170
2. Notions théoriques sur les pompes à liquide	170
2.1. Définitions	171
2.1.1. Aspiration	171
2.1.2. Charge	171
2.1.3. Amorçage	171
2.2. Caractéristiques des pompes centrifuges.	171
2.2.1. Débit volumique	172
2.2.2. Puissance d'une pompe	172
2.2.3. Rendement d'une pompe	172
2.2.4. Pression (ou hauteur) de refoulement	173
2.2.5. Hauteur manométrique totale	173
2.2.6. Hauteur limite d'aspiration	174
2.3. Courbes caractéristiques	175
2.4. Cavitation.	177
2.4.1. NPSH requis.	177
2.4.2. NPSH disponible	179
2.5. Adaptation d'une pompe centrifuge à un circuit	181
2.5.1. Courbe de réseau	182

2.5.2.	Point de fonctionnement d'une pompe centrifuge	183
2.5.3.	Adaptation d'une pompe à un débit	183
2.5.4.	Couplage de pompes centrifuges	184
3.	Pompes de circulation	186
3.1.	Pompes volumétriques	188
3.1.1.	Pompes alternatives	188
3.1.2.	Pompes rotatives	192
3.2.	Turbopompes	197
3.2.1.	Pompes centrifuges	197
3.2.2.	Autres types de turbopompes	200
4.	Ventilateurs et compresseurs	202
4.1.	Ventilateurs et soufflantes	203
4.1.1.	Ventilateurs axiaux	203
4.1.2.	Ventilateurs centrifuges	203
4.2.	Compresseurs	204
4.2.1.	Compresseurs alternatifs	204
4.2.2.	Compresseurs à effet dynamique	208
4.2.3.	Compresseurs rotatifs	209
4.2.4.	Éjecteur à vapeur	211
5.	Pompes à vide	211
5.1.	Pompes mécaniques	213
5.1.1.	Pompes alternatives	213
5.1.2.	Pompes rotatives	213
5.2.	Pompes hydrodynamiques	215
5.2.1.	Éjecteur à vapeur	215
5.2.2.	Pompe à diffusion	216
5.3.	Pompes à fixation	217
5.3.1.	Pompes turbomoléculaires	217
5.3.2.	Pompes cryogéniques	217
5.3.3.	Pompes ioniques	217
6.	Précautions d'emploi des pompes et des compresseurs	218

Deuxième partie

Mécanique des solides

Chapitre 6

Propriétés des solides

1.	Caractéristiques physiques des particules	224
1.1.	Relations entre la masse, la surface et le volume des particules	224
1.1.1.	Masse volumique	224
1.1.2.	Volume massique	226
1.1.3.	Densité relative	226
1.1.4.	Surface spécifique	227
1.2.	Relations entre la taille et la forme des particules	228
1.2.1.	Méthodes de mesure des dimensions	229
1.2.2.	Morphologie	232

1.3. Caractérisation de la structure poreuse	234
1.3.1. Texture	234
1.3.2. Porosité	234
1.4. Caractéristiques particulières des solides	236
1.4.1. Caractéristiques mécaniques	236
1.4.2. Tension superficielle	238
1.4.3. Caractéristiques électrostatiques	240
1.4.4. Caractéristiques magnétiques	242
1.4.5. Caractéristiques thermiques	243
2. Caractéristiques des lits de particules	243
2.1. Coulabilité	244
2.1.1. Indice de coulabilité	244
2.1.2. Mesure de la compressibilité	245
2.1.3. Mesure de l'angle de talus	246
2.2. Propriétés relatives aux vides interparticulaires	247
2.2.1. Compacité	247
2.2.2. Compression	247
2.2.3. Perméabilité	249
2.2.4. Effet capillaire	249
2.3. Fluidisabilité	251
2.4. Propriétés relatives au stockage	252
2.4.1. Adhésion	252
2.4.2. Cohésion	252
2.4.3. Mottage	252
3. Caractéristiques des agglomérats de particules	252
3.1. Masse volumique et porosité	253
3.2. Propriétés mécaniques	253
3.2.1. Rigidité	254
3.2.2. Solidité	255
3.2.3. Autres propriétés	255

Chapitre 7

Triage des solides

1. Procédés par voie directe	258
1.1. Séparation des particules selon leur nature	258
1.1.1. Séparation magnétique	258
1.1.2. Séparation électrostatique	264
1.1.3. Séparation optique	266
1.2. Séparation des particules selon la taille	267
1.2.1. Généralités et définitions	267
1.2.2. Granulométrie des particules solides	269
1.2.3. Mouvement des particules	272
1.2.4. Influence des caractéristiques des particules et de la surface tamisante sur les performances du crible	273
1.2.5. Caractéristiques des surfaces de criblage	277
1.2.6. Tamisage industriel	279
2. Procédés par voie indirecte	285
2.1. Séparation des particules suivant leur taille	287

2.1.1.	Étude du mouvement d'un solide dans un fluide immobile	287
2.1.2.	Principe de la séparation hydraulique	292
2.1.3.	Classificateurs hydrauliques	293
2.1.4.	Classement pneumatique	297
2.2.	Séparation des particules suivant leur nature	301
2.2.1.	Séparations magnétique et électrique	301
2.2.2.	Séparation gravimétrique	301
2.2.3.	Flottation	308

Chapitre 8

Fragmentation des solides

1.	Généralités	317
1.1.	Définitions	317
1.2.	Désagrégation des solides	318
2.	Théorie de la fragmentation	319
2.1.	Divers modes de broyage	319
2.2.	Critères d'évaluation de la fragmentation	320
2.2.1.	Taux de réduction	321
2.2.2.	Efficacité du broyage	321
2.3.	Facteurs influents de la fragmentation	322
2.3.1.	Dureté	322
2.3.2.	Friabilité	322
2.3.3.	Granulométrie	322
2.3.4.	Taux d'humidité	322
2.3.5.	Température	322
2.3.6.	Adjuvants	323
2.4.	Évaluation de la fragmentation	323
2.4.1.	Lois d'aptitude à la fragmentation	323
2.4.2.	Lois énergétiques de la fragmentation	324
3.	Appareillage	326
3.1.	Choix de l'opération et des appareils	326
3.2.	Concasseurs	327
3.2.1.	Concasseurs à mâchoires	329
3.2.2.	Concasseurs giratoires et à cône	329
3.2.3.	Concasseurs à cylindres	330
3.2.4.	Concasseurs à marteaux	331
3.3.	Broyeurs	331
3.3.1.	Le broyeur à boulets	333
3.3.2.	Broyeurs à barres	336
3.3.3.	Broyeurs autogènes	336
3.3.4.	Broyeurs à meules ou à rouleaux	337
3.3.5.	Broyeurs à disques	339
3.3.6.	Broyeurs rotatifs à percussion	339
3.4.	Broyeurs pour fragmentation ultrafine	340
3.4.1.	Broyeurs à rotor et à stator	340
3.4.2.	Broyeurs à corps broyants	340
3.4.3.	Superbroyeurs	340
3.5.	Désintégrateurs	341

Chapitre 9

Manipulation des solides

1. Introduction	343
2. Stockage des solides	344
2.1. Caractéristiques des solides stockés	344
2.1.1. Appareils à déchargement en masse	344
2.1.2. Appareils à déchargement à entonnoir	345
2.1.3. Choix des matériaux pour l'écoulement	345
2.2. Divers modes de stockage	346
2.2.1. Stockage en tas à l'extérieur	346
2.2.2. Stockage en magasin	347
2.2.3. Trémies	347
2.2.4. Silos	347
3. Manutention des solides	347
3.1. Transport discontinu en l'état	348
3.1.1. Manutention à bras	348
3.1.2. Chariots motorisés	348
3.1.3. Appareils de levage	348
3.2. Transport continu en l'état	350
3.2.1. Chargement porté par l'appareil	350
3.2.2. Chargement déplacé sur appareil fixe	351
3.3. Transport continu avec fluide intermédiaire	354
3.3.1. Transport hydraulique	354
3.3.2. Transport pneumatique	354
3.4. Transports particuliers	356
3.4.1. Transporteurs à rouleaux	356
3.4.2. Glissières	356
3.4.3. Convoyeurs à balancelles	356
4. Distributions des solides	356
4.1. Distributeur à porte basculante	357
4.2. Distributeur à piston	357
4.3. Distributeur à secousses	358
4.4. Distributeur à vis d'Archimède	358
4.5. Distributeur à courroie	358
4.6. Distributeur à cylindre	358
4.7. Distributeur vibrant	358
4.8. Distributeur à sole tournante	359

Troisième partie
Exercices d'application

Chapitre 10
Propriétés des fluides

1. Masse volumique et densité	363
2. Propriétés des gaz	368
3. Coefficient de dilatation	372
4. Viscosité	374
5. Tension de vapeur	374
6. Tension superficielle	375
7. Diffusivité	380
8. Grandeurs thermiques	380

Chapitre 11
Statique des fluides

1. Détermination des pressions	383
2. Principe de Pascal	385
3. Statique des fluides compressibles	396
4. Principe d'Archimède	397

Chapitre 12
Dynamique des fluides incompressibles

1. Régimes d'écoulement	405
2. Principe de continuité	408
3. Théorème de Bernoulli	412
4. Théorème de Torricelli	415
5. Pertes de charge	418
6. Mesure des débits	429
7. Exercices de synthèse sur les fluides incompressibles	437

Chapitre 13
Dynamique des fluides compressibles

1. Types d'écoulement	449
2. Écoulement isotherme	453
3. Compression adiabatique	460
4. Vide	468

Chapitre 14
Mécanique des machines hydrauliques

1. Déplacement des fluides	475
2. Cavitation	498

Chapitre 15

Mécanique des solides

1. Propriétés des solides	509
2. Tamisage	516
3. Sédimentation	519
4. Classement gravimétrique	524
5. Broyage	536

Quatrième partie

Expérimentation

Chapitre 16

Détermination des pertes de charge

1. Rappels théoriques sur les pertes de charge	545
1.1. Détermination des pertes de charge	545
1.1.1. Perte de charge linéaire	546
1.1.2. Perte de charge singulière	546
1.2. Mesure des débits	547
1.2.1. Mesure de la perte de charge par étranglement	547
1.2.2. Rotamètre	547
2. Matériels et expérimentation	547
2.1. Description du banc d'essais	547
2.2. Étude des pertes de charge régulières	550
2.2.1. Procédure de marche	550
2.2.2. Étude des canalisations lisse ou rugueuse	550
2.3. Études des pertes de charge singulières	552
2.3.1. Étude des changements de direction	552
2.3.2. Étude des vannes	552
2.3.3. Étude des modifications de section	552
2.4. Étude du diaphragme et du venturi	553
3. Résultats expérimentaux	553
3.1. Étude des pertes de charge linéaires	553
3.1.1. Tube lisse	553
3.1.2. Tube rugueux	555
3.1.3. Exploitation des résultats	557
3.2. Étude des pertes de charge singulières	558
3.2.1. Coudes	559
3.2.2. Vannes	561
3.2.3. Changement de section	562
3.2.4. Systèmes déprimogènes	564
3.2.5. Interprétation des résultats	565

*Chapitre 17***Mesure des débits d'un fluide incompressible**

1. Rappels théoriques sur la mesure des débits	567
1.1. Principes de base	567
1.2. Mesure des débits	569
1.2.1. Venturi	569
1.2.2. Diaphragme	569
1.2.3. Rotamètre	570
1.3. Application au venturi	571
2. Matériels et expérimentation	572
2.1. Banc d'alimentation hydraulique	572
2.2. Mesure des débits	572
2.2.1. Description de l'appareil	572
2.2.2. Mesures	573
2.2.3. Exploitation des mesures	573
2.3. Étude du venturi	574
2.3.1. Description de l'appareil	574
2.3.2. Relevé des mesures	575
3. Résultats expérimentaux	575
3.1. Mesure des débits	575
3.1.1. Relevé des mesures	575
3.1.2. Calcul des débits	575
3.1.3. Calcul des pertes de charge	578
3.2. Étude du venturi	581
3.2.1. Mesure du coefficient de débit	581
3.2.2. Vérification de la distribution des pressions	583

*Chapitre 18***Pompes centrifuges**

1. Rappels théoriques sur les pompes	587
1.1. Caractéristiques d'une pompe	587
1.1.1. Hauteur manométrique totale	587
1.1.2. Puissance utile	588
1.1.3. Rendement	588
1.2. Courbes caractéristiques des pompes centrifuges	588
1.3. Couplage des pompes centrifuges	588
1.3.1. Couplage en série	588
1.3.2. Couplage en parallèle	589
2. Fonctionnement d'une pompe en aspiration	589
2.1. Hauteur limite d'aspiration	589
2.2. La cavitation	590
2.2.1. Le phénomène et ses causes	590
2.2.2. Évaluation de la cavitation	590
3. Matériels et expérimentation	591
3.1. Description du banc	591
3.2. Détermination des caractéristiques des pompes	593
3.2.1. Mise en route	593
3.2.2. Résultats	593

3.3. Couplage des pompes	594
3.3.1. Couplage en série	594
3.3.2. Couplage en parallèle	594
3.4. Détermination du NPSH disponible	594
3.4.1. Mesures à pression atmosphérique	595
3.4.2. Mesures sous pression réduite	595
4. Résultats expérimentaux	595
4.1. Détermination des courbes caractéristiques	595
4.1.1. Pompe P1	595
4.1.2. Pompe P2	596
4.2. Couplage des pompes	596
4.2.1. Couplage en série	596
4.2.2. Couplage en parallèle	598
4.3. Analyse des résultats	599
4.3.1. Hauteur manométrique totale	599
4.3.2. Puissance absorbée	600
4.3.3. Puissance utile	601
4.3.4. Rendement	602
4.3.5. Perte de charge	603
4.4. Étude de la cavitation	604
4.4.1. Conditions opératoires	604
4.4.2. Résultats expérimentaux	605
4.4.3. Interprétation des résultats	607
4.5. Données utilisées pour l'interprétation des résultats	610

Chapitre 19

Broyage et tamisage

1. Rappels théoriques sur le broyage et le tamisage	613
1.1. Broyage	613
1.1.1. Généralités	613
1.1.2. Facteurs influençant le broyage	613
1.1.3. Le broyeur à boulets	614
1.2. Tamisage	614
1.2.1. Généralités	614
1.2.2. Caractéristiques des surfaces de criblage	614
1.2.3. Analyse granulométrique	615
2. Matériels et expérimentation	615
2.1. Produits et matériels	615
2.1.1. Matières premières	615
2.1.2. Matériels et mise en route	615
2.2. Manipulation	616
2.2.1. Analyse granulométrique	616
2.2.2. Broyage du minerai de phosphate	616
2.2.3. Broyage de l'argile	617
3. Résultats expérimentaux	618
3.1. Étude d'un minerai de phosphate	618
3.1.1. Analyse granulométrique de la matière première	618
3.1.2. Influence de la durée du broyage	620
3.1.3. Influence de la vitesse de rotation du broyeur	621

3.2. Étude d'une argile.....	624
3.2.1. Analyse granulométrique de la matière première.....	624
3.2.2. Influence de la vitesse de rotation du broyeur.....	626

Annexes

Annexe 1 – Constantes critiques.....	631
Annexe 2 – Caractéristiques physiques des liquides.....	635
Annexe 3 – Caractéristiques physiques des gaz.....	638
Annexe 4 – Évolution des caractéristiques physiques de l'eau avec la température.....	640
Annexe 5 – Évolution de la masse volumique de l'air sec avec la température au voisinage de la pression atmosphérique normale.....	642
Annexe 6 – Évolution des caractéristiques physiques de l'air avec la température et la pression.....	643
Annexe 7 – Évolution de la compressibilité isotherme des liquides avec la température.....	644
Annexe 8 – Évolution de la viscosité dynamique des liquides avec la température.....	646
Annexe 9 – Évolution de la viscosité dynamique des gaz avec la température.....	647
Annexe 10 – Évolution de la tension de vapeur des composés organiques avec la température du liquide.....	648
Annexe 11 – Évolution de la température et de l'enthalpie de condensation de la vapeur d'eau saturée en fonction de la pression absolue.....	652
Annexe 12 – Tension superficielle des composés par rapport à l'air.....	654
Annexe 13 – Évolution de la tension superficielle et de la compressibilité de l'air avec la température.....	658
Annexe 14 – Influence de la température sur la tension superficielle de solutions aqueuses de méthanol et d'éthanol par rapport à l'air.....	659
Annexe 15 – Diffusivité des fluides dans les solvants.....	660
Annexe 16 – Capacités thermiques des gaz.....	662
Annexe 17 – Caractéristiques physiques de solides minéraux.....	664
Annexe 18 – Dureté des solides.....	667

Annexe 19 – Évolution de la tension de vapeur de solides
inorganiques avec la température.669

Annexe 20 – Évolution de la tension de vapeur des solides
organiques avec la température671

Annexe 21 – Correspondance entre les diverses normes de tamis673

Bibliographie675

Index.677

Henri Fauduet, docteur-ingénieur en chimie organique, a débuté sa carrière comme ingénieur de recherche dans l'industrie chimique et l'administration. Il a été nommé maître de conférences puis professeur des universités à l'université d'Orléans. Il enseigne le génie chimique depuis 25 ans à l'IUT d'Orléans où il a eu pour mission de rénover le hall de génie chimique et de développer ses activités. Il est également responsable de l'équipe Procédés de l'Institut de Chimie Organique et Analytique (Icoa - UMR 6005) de l'université d'Orléans.

À la fois traité de génie chimique et manuel pratique, cet ouvrage sans équivalent présente dans un volume unique, l'ensemble des opérations mécaniques impliquant les fluides et les solides mises en œuvre lors des processus industriels de transformation. Ces opérations sont abordées selon leurs aspects théoriques et technologiques avant de traiter les aspects pratiques à l'aide d'exercices intégralement résolus et l'interprétation de résultats expérimentaux.

L'ouvrage est organisé afin d'acquérir rapidement une véritable expertise industrielle :

- **maîtriser la méthodologie et la technologie des appareils** : les deux premières parties étudient successivement la mécanique des fluides et la mécanique des solides, et propose un véritable inventaire des applications technologiques ;
- **vérifier ses acquis par la résolution d'exercices d'application** : 155 exercices pratiques et leurs corrigés ont été établis sur la base des notions abordées dans les chapitres des deux premières parties et sont classés suivant un degré de difficulté croissante. La méthodologie de calcul a été choisie pour que le lecteur puisse devenir rapidement opérationnel ;
- **savoir interpréter les lois à partir de mesures** : totalement novatrice en langue française, cette partie importante de l'ouvrage concerne la réalisation de mesures sur les postes de travail, la modélisation des résultats et leur interprétation ;
- **accéder rapidement aux principales constantes physiques des produits chimiques** : 21 annexes rassemblent les principales données utilisées dans ce manuel. Elles ont été répertoriées à partir de plusieurs ouvrages et revues reconnus par la communauté scientifique.

Le livre contient plus de 310 figures et tableaux ainsi qu'un index détaillé qui permet de retrouver facilement l'information recherchée.

Véritable ouvrage de référence théorique et pratique, *Mécanique des fluides et des solides appliquée à la chimie* s'adresse aux chimistes professionnels ainsi qu'aux ingénieurs et techniciens supérieurs travaillant dans les industries chimiques, pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires, etc. Il est également destiné aux enseignants en génie chimique et aux étudiants en chimie souhaitant acquérir ou valider les notions élémentaires de mécanique des fluides et des solides. Il leur permettra d'assimiler les notions théoriques et vérifier les acquis en s'exerçant sur des exemples pratiques et des interprétations expérimentales.

978-2-7430-1315-8



9 782743 013158