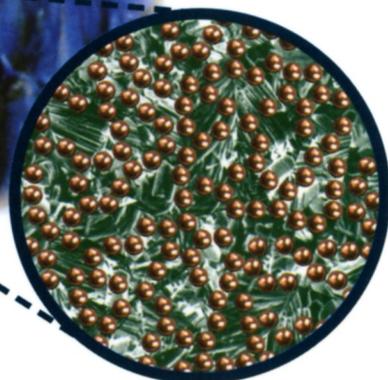


Rhéophysique des pâtes et des suspensions

Philippe Coussot
Christophe Ancey



Extrait de la publication



Rhéophysique des pâtes et des suspensions

Philippe Coussot
Christophe Ancey



7, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 2-86883-401-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite " (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 1999

Avant-propos

De nombreux matériaux utilisés dans l'industrie lors de la préparation ou la mise en œuvre d'un produit sont des suspensions au sens large, c'est-à-dire des mélanges d'un fluide et de particules solides d'une taille caractéristique supérieure à 1 nm environ. Il s'agit par exemple des peintures, des encres, des produits cosmétiques, du béton frais, des désherbants ou encore des produits alimentaires tels que les compotes, les soupes, les sauces, etc. La composition de ces suspensions résulte d'un compromis entre, d'une part, le besoin de les rendre suffisamment fluides pour faciliter leur manipulation et d'autre part, le désir de maximiser la fraction solide qui constitue en général le matériau actif lors de la mise en œuvre. L'un des problèmes-clés consiste alors à être capable de prédire au mieux les caractéristiques des écoulements de suspensions en fonction de leurs composants (caractéristiques du liquide interstitiel, granulométrie, charges à la surface des particules, pH, etc.). Cet ouvrage a précisément pour objectif de fournir des outils de base en vue d'une meilleure compréhension des liens entre les propriétés mécaniques des suspensions concentrées et leur structure interne. Alors que les dissipations d'énergie de type hydrodynamique sont prédominantes au sein des suspensions diluées, divers types d'interaction entre particules peuvent jouer un rôle considérable vis-à-vis du comportement des pâtes ou des suspensions concentrées. Dans ce cadre, les propriétés physiques des particules et leurs comportements collectifs s'avèrent déterminants. Ces caractéristiques font de la rhéologie des suspensions concentrées un domaine aux frontières de la mécanique des fluides, de la mécanique des sols, de la physique des milieux granulaires et de la matière divisée.

Nous avons essayé de présenter dans cet ouvrage un cadre unifié, quoique simplifié, permettant une compréhension des liens entre le comportement macroscopique et les phénomènes physiques au niveau mésoscopique pour les suspensions concentrées réelles, dont les caractéristiques physiques (granulométrie, interactions, etc.) sont complexes.

Dans le premier chapitre, nous proposons un rappel des bases de mécanique des milieux continus et de rhéologie, en détaillant l'origine physique de ces fondements. On passe aussi en revue les principaux types de comportement mécanique des fluides et leur origine physique probable en s'appuyant sur un schéma conceptuel général des fluides.

Le second chapitre concerne la rhéophysique des suspensions concentrées. Nous mettons en valeur le rôle crucial des interactions entre particules et la correspondance entre un type d'interaction prédominant au cours de l'écoulement et un type de comportement mécanique. Ceci nous amène à distinguer deux familles de suspensions concentrées : les suspensions ordinaires (molles) formées de particules en interaction

« molle » (colloïdale ou hydrodynamique) et les suspensions granulaires formées de particules en interaction « dure » et qui forment un réseau de contacts (direct ou lubrifié) d'un bout à l'autre de l'échantillon.

Les suspensions granulaires (dures) ont des propriétés mécaniques très particulières qui résultent du caractère non local de leur comportement, c'est-à-dire que le mouvement d'une particule donnée est assez largement conditionné par le mouvement de l'ensemble des autres particules en contact avec la première par l'intermédiaire du réseau. Ainsi ces suspensions granulaires méritent d'être étudiées de manière spécifique (chap. 3), notamment en s'appuyant sur des connaissances issues du domaine de la mécanique des sols ou de la physique des milieux granulaires.

Le quatrième chapitre aborde en détail le problème fondamental de la détermination expérimentale du comportement des suspensions concentrées. En particulier nous nous attachons à montrer la difficulté de réaliser des mesures pertinentes, c'est-à-dire reflétant le comportement du matériau homogène et constant, avec des suspensions concentrées.

Les chapitres 5, 6 et 7 s'intéressent enfin au comportement de trois types de matériaux qui permettent de passer en revue une large gamme de phénomènes physiques résultant d'évolutions et de structures internes très différentes : le magma, la neige et la boue. Les raisonnements proposés pour expliquer les comportements mécaniques de ces matériaux peuvent être appliqués à des suspensions industrielles ayant des caractéristiques analogues.

Cet ouvrage est le fruit de notre travail mais aussi de discussions avec de nombreux chercheurs que nous souhaitons remercier ici. En particulier Henri Van Damme a été l'un des moteurs de l'étude des pâtes et suspensions concentrées en France, il a en outre apporté un grand soutien et des conseils très utiles à ce projet. Nous remercions aussi François Chevoir, Marie Clément et Christophe Lanos pour leur relecture du manuscrit ainsi que Didier Lesueur et Pierre-Gilles de Gennes pour leurs remarques judicieuses sur le contenu de l'ouvrage, et Franck Radjaï pour son aide matérielle. L'Institut National des Sciences de l'Univers a apporté un soutien financier indispensable au programme de recherches à l'origine de cet ouvrage. Merci enfin à Suzanne Laval pour son appui au départ de ce projet et à Jean-Marc Quilbé pour la confiance qu'il nous a accordée.

Table des matières

Chapitre 1 Eléments de rhéophysique

1.1 Introduction.....	1
1.2 Concepts de base.....	3
1.2.1 Qu'est-ce qu'un fluide ?.....	3
1.2.2 Les variables de l'écoulement.....	7
1.2.3 Continuité du milieu.....	8
1.2.4 Les forces	11
1.3 Principes de la mécanique des milieux continus.....	17
1.3.1 Conservation de la masse.....	17
1.3.2 Conservation de la quantité de mouvement.....	18
1.3.3 Les fluctuations temporelles.....	19
1.3.4 La turbulence.....	20
1.3.5 Résolution d'un problème d'écoulement.....	21
1.3.6 Milieu continu généralisé.....	22
1.4 Lois de comportement.....	23
1.4.1 Généralités.....	23
1.4.2 Le tenseur des taux de déformation.....	24
1.4.3 Forme simplifiée de la loi de comportement.....	24
1.4.4 Cisaillement simple.....	25
1.4.5 Élongation	27
1.4.6 Dissipations d'énergie.....	28
1.5 Principaux types de comportement.....	29
1.5.1 Généralités.....	29
1.5.2 Fluide newtonien.....	30
1.5.3 Vers des propriétés plus complexes	31
1.5.4 Thixotropie	32
1.5.5 Fluides rhéofluidifiants ou rhéoépaississants.....	33
1.5.6 Fluides à seuil.....	34
1.5.7 Viscoélasticité.....	37
Annexe 1.1 Conservation de l'énergie.....	39
Annexe 1.2 Modèle de Eyring.....	40

Chapitre 2 Les suspensions molles

2.1 Introduction.....	43
2.2 Décomposition du tenseur des contraintes.....	47
2.3 Interactions hydrodynamiques.....	48
2.3.1 Généralités.....	48
2.3.2 Viscosité d'une suspension à faible concentration.....	51
2.3.3 Viscosité d'une suspension à concentration modérée.....	52
2.3.4 Viscosité d'une suspension à concentration élevée.....	55
2.3.5 Influence de la configuration	58
2.3.6 Influence de la forme des particules	61
2.3.7 Traînée hydrodynamique.....	62
2.4 Mouvements browniens.....	63
2.4.1 Diffusion brownienne.....	63
2.4.2 Influence sur le comportement de la suspension.....	64
2.5 Interactions colloïdales.....	67
2.5.1 Généralités.....	67
2.5.2 Les forces colloïdales.....	68

2.5.3 Stabilité de la suspension.....	70
2.5.4 Potentiel d'interaction moyen	72
2.5.5 Suspension colloïdale diluée.....	73
2.5.6 Suspension colloïdale concentrée.....	74
2.6 Contacts entre particules.....	87
2.6.1 Définition.....	87
2.6.2 Conséquences sur le comportement de la suspension	88
2.7 Effets inertiels	89
2.8 Classification rhéophysique des suspensions.....	91
Annexe 2.1 Décomposition du tenseur des contraintes	95

Chapitre 3 Les suspensions dures

3.1 Introduction.....	101
3.2 Les interactions entre particules.....	102
3.2.1 Généralités.....	102
3.2.2 Les contacts frictionnels.....	104
3.2.3 Les contacts collisionnels.....	106
3.3 Propriétés physiques des suspensions granulaires.....	110
3.3.1 Seuils de concentration.....	111
3.3.2 Le réseau de contacts	115
3.3.3 La dilatance.....	116
3.3.4 Couplage des phases.....	117
3.3.5 Ségrégation.....	121
3.4 Régimes d'écoulement.....	122
3.4.1 Principaux régimes.....	122
3.4.2 Couplage des phases.....	127
3.5 Le régime frictionnel.....	129
3.5.1 Généralités.....	129
3.5.2 Comportement d'une suspension granulaire en compression.....	130
3.5.3 L'état critique.....	133
3.5.4 Le critère de Coulomb.....	134
3.5.5 Modélisation du comportement aux faibles déformations.....	137
3.5.6 Modélisation du comportement aux grandes déformations.....	137
3.6 Le régime lubrifié.....	140
3.7 Le régime collisionnel.....	141
3.7.1 Généralités.....	141
3.7.2 Comportement collisionnel des suspensions granulaires.....	141
3.7.3 Comportement collisionnel pour les suspensions non granulaires.....	143
3.8 Régimes intermédiaires.....	145
3.8.1 Généralités.....	145
3.8.2 Écoulements à surface libre	146
Annexe 3.1 Écoulement uniforme sur un plan incliné	153

Chapitre 4 Rhéométrie

4.1 Introduction.....	159
4.2 Effets perturbateurs des expériences de rhéométrie	161
4.2.1 Les dimensions du rhéomètre.....	161
4.2.2 Le glissement aux parois.....	163
4.2.3 La fracturation.....	169
4.2.4 Le creusement	172
4.2.5 L'évaporation.....	174
4.2.6 La migration.....	175
4.2.7 Consignes générales pour réaliser des mesures avec des suspensions.....	178

4.3 Les différentes géométries d'écoulement : avantages et inconvénients dans le cas de tests avec des suspensions concentrées.....	179
4.3.1 Le rhéomètre cône-plan.....	179
4.3.2 Le rhéomètre plan-plan.....	182
4.3.3 Le rhéomètre à cylindres coaxiaux	183
4.3.4 Le rhéomètre capillaire.....	187
4.3.5 Le plan incliné.....	189
4.4 Procédures expérimentales spécifiques.....	195
4.4.1 Palier de contrainte ou de vitesse.....	195
4.4.2 Détermination de la courbe d'écoulement.....	197
4.4.3 Détermination du seuil de contrainte.....	201
4.4.4 Évaluation de la thixotropie.....	202
Annexe 4.1 Stabilité d'un écoulement en cisaillement simple.....	206

Chapitre 5 Le magma

5.1 Introduction.....	209
5.2 Propriétés physiques des magmas.....	210
5.2.1 Composition	210
5.2.2 Propriétés thermiques.....	211
5.2.3 Changements de phase.....	214
5.2.4 La sédimentation.....	217
5.3 Propriétés rhéologiques.....	219
5.3.1 Généralités.....	219
5.3.2 Teneur en silice.....	219
5.3.3 Teneur en eau.....	220
5.3.4 Température.....	221
5.3.5 Effet de la pression.....	221
5.3.6 Effet de la cristallisation.....	221
5.3.7 Effet de la présence de gaz.....	223
5.3.8 Synthèse.....	224

Chapitre 6 La neige et les avalanches

6.1 Introduction.....	227
6.2 La neige : formation et propriétés.....	228
6.2.1 Formation de la neige.....	228
6.2.2 Métamorphoses de la neige.....	228
6.2.3 Propriétés thermiques.....	230
6.2.4 Propriétés mécaniques.....	231
6.3 Propriétés rhéologiques.....	232
6.3.1 Les avalanches : définition et types de mouvement	233
6.3.2 Nature du matériau transporté.....	233
6.3.3 Caractéristiques macroscopiques de l'écoulement	236

Chapitre 7 La boue

7.1 Introduction.....	241
7.2 Propriétés physiques des boues naturelles.....	242
7.2.1 Généralités.....	242
7.2.2 L'eau.....	243
7.2.3 L'argile.....	243
7.2.4 Les grains	245

7.3 Propriétés mécaniques des mélanges eau-argiles	245
7.3.1 Généralités	245
7.3.2 Rhéologie des suspensions eau-argiles du groupe 1.....	247
7.3.3 Rhéologie des suspensions eau-argiles du groupe 2.....	251
7.3.4 Influence de divers paramètres.....	254
7.4 Propriétés mécaniques des mélanges eau-argiles-grains	255
7.5 Classification des mélanges boueux	258
7.5.1 La fracturation des pâtes	258
7.5.2 La sédimentation.....	258
7.5.3 Synthèse.....	259
Index	265

Principales notations

Symboles

a	vecteur accélération
<i>a</i>	taux d'élongation
<i>b</i>	distance entre les centres de deux particules voisines
b	densité de force de volume
<i>B_a</i>	nombre de Bagnold (éq. 3.32)
<i>B_r</i>	nombre de Brinkman (éq. 5.6)
<i>C_f</i>	nombre de contact (éq. 3.14)
<i>C</i>	couple
<i>C_p</i>	chaleur spécifique
<i>dv</i>	élément de volume
<i>dσ</i>	élément de surface
<i>D_{II}</i>	second invariant de D
<i>D_a</i>	nombre de Davis (éq. 3.12)
D	tenseur des taux de déformation (éq. 1.24)
D *	tenseur des taux de déformation local
<i>f</i>	coefficient de frottement
<i>e</i>	coefficient de restitution
	ou énergie interne
	ou épaisseur d'un écoulement
<i>E</i>	module élastique d'une particule
	ou énergie fournie à un fluide
<i>F_v</i>	force de traînée hydrodynamique
<i>g</i>	gravité
<i>G_z</i>	nombre de Graetz (éq. 5.7)
<i>G'</i>	module élastique de la suspension
<i>G''</i>	module visqueux de la suspension
<i>G*</i>	nombre de prédominance hydrodynamique-tension superficielle (éq. 5.12)
<i>h</i>	distance entre les surfaces de deux particules voisines
<i>h₀</i>	épaisseur non cisailée
<i>H</i>	hauteur de suspension
	ou épaisseur cisailée
<i>i</i>	pente d'un plan ou d'un canal incliné
i, j, k	vecteurs unitaires d'un repère orthonormé
<i>k</i>	constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
<i>k₀</i>	perméabilité
<i>K</i>	coefficient de traînée
	ou exposant du modèle de Herschel-Bulkley

L		chaleur latente
	ou	longueur caractéristique d'un écoulement
L_e		nombre de Leighton (éq. 3.27)
m		masse d'une particule
n		nombre de particules par unité de volume
	ou	paramètre du modèle de Herschel-Bulkley
\mathbf{n}		vecteur normal unitaire
N		force normale
$N_{i=1,2}$		première et seconde différences de contraintes normales
N_r		nombre de répulsion (éq. 2.33)
p		pression au sein de la suspension
p_0		pression au sein du fluide interstitiel
p_g		pression motrice
p_a		pression atmosphérique
P_e		nombre de Péclet (éq. 2.28)
P_{e_c}		nombre de Péclet colloïdal (éq. 2.35)
P_{e_t}		nombre de Péclet pour les transferts de chaleur (éq. 5.6)
P		puissance dissipée
q		état de contrainte
	ou	débit par unité de largeur
\mathbf{q}		flux de chaleur
Q		débit
r		taille caractéristique d'une particule (racine cubique de son volume)
	ou	distance par rapport à un axe
R		rayon d'une particule sphérique
	ou	rayon d'un outil cylindrique
Re		nombre de Reynolds (éq. 2.53)
Re_p		nombre de Reynolds particulière (éq. 2.54)
R_H		rayon hydraulique (surface/périmètre mouillé)
t		temps
\mathbf{t}		vecteur contrainte (éq. 1.4)
T		contrainte tangentielle adimensionnalisée par le seuil de contrainte ou une contrainte normale
T		température
\mathbf{T}		déviateur du tenseur des contraintes
T_0		temps de relaxation de la structure
	ou	température de référence
T_c^*		temps caractéristique de restructuration d'un réseau de particules
T_{II}		second invariant de \mathbf{T}
T_b		temps caractéristique de diffusion brownienne (éq. 2.26)
T_c		temps caractéristique de déplacement d'une particule colloïdale (éq. 2.42)
T_E		temps caractéristique d'un fluide viscoélastique
T_h		temps caractéristique de l'écoulement ($l/\dot{\gamma}$)

T_N		temps caractéristique de rapprochement de deux particules sous l'action d'une force normale (éq. 3.30)
u, v, w		composantes de la vitesse
\mathbf{u}		vitesse locale en un point de la suspension
$\bar{\mathbf{u}}$		vitesse moyenne (au cours du temps)
\mathbf{u}'		terme fluctuant de la vitesse
U		vitesse moyenne d'un écoulement
V		vitesse relative d'une particule et du fluide ou de deux particules
W		état d'énergie des éléments d'un fluide
x, y, z		coordonnées dans un repère $(O, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$
y_0		épaisseur cisailée au sein de l'écoulement à surface libre d'un fluide à seuil
γ		déformation en cisaillement simple
γ_c		déformation critique
$\dot{\gamma}$		gradient de vitesse
$\dot{\gamma}_R$		gradient de vitesse à la distance R de l'axe
Γ		nombre de transition colloïdal-hydrodynamique (éq. 2.38)
ε		rugosité d'une particule
	ou	émissivité
φ		angle de frottement interne
ϕ_c		concentration critique (pour la formation d'un réseau)
ϕ_m		concentration d'entassement maximal
ϕ		concentration volumique solide
Φ		potentiel total d'interaction entre une particule et ses voisines
Φ_0		potentiel d'interaction à l'équilibre d'une particule avec toutes ses voisines
Φ_b		potentiel d'interaction de Born
Φ_a		potentiel d'interaction de van der Waals
Φ_e		potentiel d'interaction électrostatique
τ		variable quelconque
κ^{-1}		longueur de Debye (éq. 2.32)
λ		paramètre de structure
	ou	conductivité thermique
μ		viscosité apparente $(\tau/\dot{\gamma})$
μ_0		viscosité du fluide interstitiel
μ_E		viscosité élongationnelle
$\bar{\mu}$		viscosité des particules
ρ		masse volumique moyenne de la suspension
ρ_0		masse volumique du fluide interstitiel
ρ_p		masse volumique des particules
ρ'		masse volumique déjaugée $(\rho - \rho_0)$
σ		contrainte normale
	ou	tension interfaciale
	ou	constante de rayonnement

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \dots$	composantes de Σ
$\sigma_{i=1,2,3}$	contraintes normales
σ'	pression effective (au sein du squelette granulaire)
σ_e	surface élémentaire représentative
Σ	tenseur des contraintes
Σ^*	tenseur des contraintes local
Ξ	tenseur des contraintes modifié (incluant les termes liés aux fluctuations)
τ	contrainte tangentielle
τ_c	seuil de contrainte
τ_p	contrainte à la paroi
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \dots$	composantes de \mathbf{T}
ζ	rapport d'aspect
ou	fonction inverse de la loi de comportement en cisaillement simple ($\dot{\gamma} = \zeta(\tau)$)
η	viscosité relative de la suspension (μ/μ_0)
Ω	volume
ou	vitesse de rotation d'un outil autour d'un axe
Ω_e	volume élémentaire représentatif
ψ	fréquence de sortie d'un puits de potentiel au sein d'un fluide

Opérateurs

$\frac{\partial a}{\partial t}$	dérivée partielle
$\frac{da}{dt}$	différentielle totale
$\nabla a = \frac{\partial a}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial a}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial a}{\partial z} \mathbf{k}$	gradient
$\nabla \cdot a = \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial z}$	divergence
$\mathbf{a} \times \mathbf{b}$	produit vectoriel
$\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}$	produit tensoriel (tenseur \mathbf{C} tel que $C_{ij} = a_i b_j$)

*« On ne vous demande ni d'être humble ni d'être superbe.
On vous demande de répondre lorsqu'on vous interroge.
N'oubliez pas que vous êtes un amalgame nocturne de forêts,
de marécages, de fleuves rouges, amalgame peuplé par
des bêtes gigantesques et fabuleuses qui s'entredévorent.
Il n'y a pas de quoi faire le mariole ! »*

Jean Cocteau - « Le testament d'Orphée »

Éléments de rhéophysique

1.1 Introduction

Notre vie de tous les jours nous amène à manipuler des fluides de toutes sortes tels que des mousses, crèmes, savons, vernis, peintures, sauces, soupes, compotes, gelées, purées, pâtes de gâteaux, etc. Leur fluidité, ou à l'inverse, leur viscosité, varie d'un matériau à l'autre et conditionne leur réponse aux sollicitations qu'on leur impose. Par exemple si la mousse à raser était aussi peu visqueuse que l'eau, elle tomberait dans le lavabo avant que nous n'ayons le temps de nous raser. D'autres facteurs conditionnent la façon dont un fluide s'écoule. Il y a d'abord les efforts appliqués par l'extérieur au fluide. Ils sont de deux types : des forces exercées par le biais d'un contact direct avec le fluide, c'est par exemple le cas lorsqu'on malaxe une pâte ; des forces exercées à distance sans contact direct telles que la gravité qui est à l'origine des écoulements à surface libre de fluides naturels sur des terrains pentus. Ensuite, pour déterminer précisément la manière dont le fluide s'écoule il faut aussi prendre en compte l'état du fluide en termes de vitesse et de position au moment où l'on commence à appliquer ces efforts. On pourrait s'attendre alors à ce que les caractéristiques des écoulements de fluides différents, soumis à des actions extérieures et dans des conditions initiales identiques, soient les mêmes. Il n'en est rien car la viscosité du fluide module ses réactions vis-à-vis des actions extérieures.

Cette viscosité est donc une propriété intrinsèque du fluide qui résulte des interactions mutuelles des éléments dont il est constitué : atomes, molécules, chaînes de polymère, bulles, gouttes, grains, etc. Ces éléments sont en général relativement proches les uns des autres et, pour déplacer l'un d'entre eux par rapport à ses voisins, il faut exercer un effort. Ceci signifie qu'une déformation (macroscopique) du fluide nécessite de vaincre les résistances locales aux déplacements relatifs de ses éléments constitutifs. Les efforts exercés par l'extérieur ne servent donc pas seulement, comme

dans le cas d'un corps rigide, à augmenter la vitesse de l'ensemble des éléments mais aussi à vaincre les résistances internes lors de leurs mouvements relatifs. Ainsi, en l'absence de pesanteur, un corps rigide peut être animé d'un mouvement uniforme dans le vide même s'il n'est soumis à aucune force extérieure. En revanche, il est impossible de maintenir un écoulement permanent d'un fluide à peu près au repos dans un récipient à travers un orifice de ce récipient sans appliquer constamment une force, ou plus précisément une différence de pression sur le fluide, par un piston ou par l'action de la pesanteur par exemple. On doit donc apporter de l'énergie pour vaincre ce qu'on appelle les dissipations d'énergie par viscosité, c'est-à-dire le travail des résistances internes lors des déplacements relatifs des éléments qui résultent dans ce cas précis de l'élongation à laquelle est soumis le fluide pour traverser l'orifice. Pour des efforts extérieurs et des conditions d'écoulement identiques, la proportion d'énergie dissipée par viscosité est d'autant plus grande et la vitesse atteinte par le fluide d'autant plus faible que le fluide est plus visqueux.

Dans cet ouvrage, nous nous plaçons résolument dans le cadre de la rhéophysique des fluides, c'est-à-dire que nous nous intéressons tout particulièrement à l'origine physique des écoulements ou des lois de comportement des fluides plutôt qu'aux détails de ces caractéristiques dans le cadre de la mécanique. Dans ces conditions, nous commençons (§ 1.2.1) par examiner la situation des fluides complexes et notamment des suspensions concentrées par rapport à la classification physique usuelle [1-4] des matériaux. Ceci nous amène à proposer une définition rhéophysique d'un fluide, qui intègre à la fois des caractéristiques mécaniques et physiques. Nous définissons ensuite les outils de la mécanique des fluides, autant que possible à partir de concepts physiques. La première hypothèse, très utile pour simplifier l'approche mathématique, consiste à considérer que nous avons affaire à un milieu continu à notre échelle d'observation. Cette hypothèse mérite d'être expliquée et justifiée (*cf.* § 1.2.3) d'autant plus précisément que nous avons l'intention de l'appliquer aux suspensions, qui sont *a priori* des milieux plus hétérogènes que des liquides ordinaires. Ensuite nous pouvons définir les principes généraux de mécanique des milieux continus (*cf.* § 1.3) : principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et enfin de l'énergie. Ce cadre nous servira *a priori* de référence dans le reste de cet ouvrage mais on verra que dans certaines situations (par exemple dans le cas des suspensions granulaires) une description macroscopique adaptée des écoulements nécessite de sortir de ce cadre. De manière générale au cours de ce chapitre seuls les principes et les équations indispensables à la compréhension du reste de l'ouvrage sont abordés. Plusieurs ouvrages de référence développent de façon plus détaillée les thèmes de la mécanique des fluides ou de la rhéologie [5-15]. La particularité de notre présentation réside dans le fait qu'elle tente autant que possible de montrer l'origine physique des principes de la mécanique, ce qui nous permet notamment de mieux discuter la validité des hypothèses à la base de ces principes dans le cas des suspensions.

Certains fluides, et tout particulièrement de nombreuses suspensions concentrées, ne coulent pas sous l'action de la seule gravité lorsqu'ils sont appliqués sur des surfaces en

penne. Il semble même qu'ils puissent reprendre une certaine consistance lorsqu'on les laisse au repos (avant séchage ou prise). Ceci nous amène à remarquer que certains fluides peuvent se comporter très différemment des liquides simples (eau, huile, etc.), qui répondent presque immédiatement (en s'écoulant) à toute sollicitation extérieure et, en première approximation, conservent la même consistance quelles que soient les conditions. Il faut donc envisager le fait que la résistance à l'écoulement de ces matériaux n'est pas caractérisée par un seul coefficient (la viscosité) mais par plusieurs paramètres qui dépendent éventuellement des conditions d'écoulement. Ces relations constituent ce qu'on appelle la loi de comportement d'un matériau. À nouveau, un cadre mathématique adapté doit être mis en place pour traduire et déterminer expérimentalement cette loi de comportement (*cf.* § 1.4). Nous nous attachons ensuite à décrire les caractéristiques les plus fréquentes du comportement des fluides en dégagant les raisons physiques de ces comportements (*cf.* § 1.5).

1.2 Concepts de base

1.2.1 Qu'est-ce qu'un fluide ?

Le caractère fluide qui qualifie un type de comportement mécanique du matériau considéré ne doit pas être confondu avec l'état physique (notamment liquide ou solide) du matériau. En première approximation le comportement de matériaux relativement simples peut être associé à leur état physique. Les matériaux à l'état solide sont des corps élastiques lorsqu'on leur impose de petites déformations : sous l'action d'une force suffisamment faible, ils se déforment quelque peu puis reprennent leur forme initiale lorsqu'on relâche cette force. Si l'effort appliqué dépasse une valeur critique, le corps solide ne reprend pas sa forme initiale, il a un comportement plastique. Ces caractéristiques mécaniques sont en général associées à une répartition ordonnée dans l'espace des éléments constitutifs du matériau (atomes ou molécules) qui sont alors situés dans des positions de minimum d'énergie desquelles ils ne peuvent pas facilement sortir. Ainsi, dans des conditions ordinaires, l'agitation thermique ne leur permet pas de s'extraire de ces positions (*cf.* Fig. 1.1a). Si l'effort appliqué au matériau est relativement faible les éléments sont, seulement provisoirement, quelque peu déplacés et peuvent rapidement se replacer dans leur position d'équilibre lorsqu'on relâche l'effort, ce qui explique l'élasticité du matériau. Lorsque le matériau est soumis à un effort suffisamment grand, certaines particules sont extraites de leur position d'équilibre initiale, ce qui brise au moins localement l'arrangement initial, les propriétés macroscopiques du matériau étant alors modifiées de manière irréversible (plasticité). Les propriétés mécaniques des corps solides sont donc associées à une configuration particulière, c'est-à-dire une distribution spécifique de leurs éléments dans l'espace.

Au contraire, chaque particule (molécule ou atome) d'un gaz est animée de mouvements erratiques résultant de l'agitation thermique qui l'amène en général à parcourir une grande distance (par rapport à sa taille) dans une direction donnée avant

d'entrer en collision avec une autre particule (*cf.* Fig. 1.1b). Après cette collision la particule reprend son mouvement dans une autre direction. La pression au sein d'un gaz ou contre une paroi imperméable résulte de ces collisions. Un gaz peut être déformé de manière quelconque sans que ses propriétés mécaniques soient modifiées. La viscosité d'un gaz provient des transferts de quantité de mouvement par chocs entre couches animées d'un mouvement moyen. Compte tenu de la faible densité de particules, la viscosité d'un gaz est très faible.

La matière à l'état liquide possède des caractéristiques intermédiaires. Bien que les molécules ou atomes soient maintenus les uns contre les autres en général par le biais des forces de van der Waals, il n'existe pas d'agencement ordonné à longue distance. En revanche, les éléments du liquide sont animés de mouvements erratiques résultant de l'agitation thermique. Ces mouvements sont loin d'avoir une amplitude comparable à celle des éléments d'un gaz mais permettent au moins à chaque élément du liquide de s'éloigner progressivement de sa position initiale en l'absence d'un mouvement moyen du liquide (*cf.* Fig. 1.1c). Il en résulte que le liquide ne possède pas de configuration privilégiée de ses éléments notamment vis-à-vis de ses propriétés mécaniques.

Dans certaines conditions, notamment après un refroidissement rapide, les liquides peuvent aussi se trouver dans un état intermédiaire entre l'état solide et l'état liquide : l'état vitreux. L'agitation thermique des éléments est alors fortement atténuée au point que ceux-ci sont animés de mouvements erratiques de faible amplitude autour d'une position d'équilibre comme au sein d'un solide. En revanche le désordre continue de régner à longue distance comme dans un liquide ordinaire. Les éléments sont cependant dans des positions d'équilibre provisoires car cette organisation instantanée est au moins partiellement détruite en cours d'écoulement. Il est par conséquent plus difficile de mouvoir les éléments les uns par rapport aux autres et la viscosité des liquides augmente rapidement lorsqu'ils entrent dans l'état vitreux.

Il existe d'autres types de matériaux qu'il ne semble pas possible de faire entrer dans la classification précédente. Les fluides viscoélastiques, par exemple à base de polymères, en sont un exemple typique. Selon que les caractéristiques du mouvement qui leur est imposé permettent ou non à leurs molécules de se désenchevêtrer, ces matériaux se comportent soit comme des solides élastiques soit comme des liquides (*cf.* § 1.5.7). Les suspensions concentrées ou les pâtes qui sont l'objet de cet ouvrage sont aussi des matériaux complexes. En effet, nous avons d'abord affaire à des matériaux qui sont en général constitués d'au moins deux populations d'éléments de tailles et de propriétés très différentes : les molécules du liquide interstitiel et les particules en suspension. On ne sait pas *a priori* si, pour décrire le comportement du matériau, on doit privilégier les interactions entre les molécules ou entre les particules. Toutefois, lorsque la concentration solide est suffisamment grande, on peut se représenter une suspension ou une pâte comme l'empilement désordonné d'éléments (des cellules comprenant une particule et du liquide) qui restent en contact grâce aux forces de van der Waals comme les molécules d'un liquide, et dont les interactions mutuelles jouent un rôle déterminant

sur le comportement de l'ensemble du matériau (*cf.* chap. 2). En outre, les pâtes ont d'une part un comportement analogue à celui d'un liquide puisqu'elles peuvent être déformées de manière quelconque sans perdre leurs propriétés mécaniques, et d'autre part un comportement analogue à celui d'un solide dans certaines conditions puisqu'elles cessent de s'écouler si l'effort qui leur est appliqué est insuffisant (inférieur au seuil de contrainte). Les caractéristiques physiques et mécaniques des suspensions concentrées présentent finalement de fortes analogies avec celles des liquides à l'état vitreux, la variable gouvernant la transition vers cet état concentré (analogue à l'état vitreux) étant la concentration solide.

Les suspensions granulaires, que l'on définira pour l'instant comme des mélanges d'un grand nombre de particules non colloïdales dans un liquide ou dans un gaz (*cf.* chap. 3), forment une catégorie de matériaux dont les caractéristiques physiques et mécaniques semblent encore plus difficilement associables à l'un des états de base de la matière. Dans certaines situations d'écoulement, une suspension granulaire semble se comporter comme un liquide ordinaire, c'est le cas par exemple des sables mouvants dans lesquels on s'enfonce facilement ou de la poudre qui s'écoule dans un sablier. Dans d'autres cas, au contraire, par exemple si les grains se distribuent légèrement différemment du cas précédent pour former un réseau de contacts directs permanents, une suspension granulaire peut avoir la résistance d'un solide très rigide. Enfin une suspension granulaire sèche très dilatée en écoulement rapide à surface libre a des caractéristiques proches de celles d'un gaz puisqu'alors le mouvement est conditionné par les collisions entre particules (*cf.* § 3.7.3). Notons par ailleurs que les suspensions granulaires ne peuvent pas non plus simplement être rangées dans la catégorie des fluides thixotropes (*cf.* § 1.5.4) en considérant que la distribution instantanée des particules correspond à un état du matériau. En effet, comme l'agitation thermique des particules est négligeable, l'état atteint au moment de l'arrêt de l'écoulement subsiste au repos, contrairement aux effets de la thixotropie, fondamentalement réversibles.

Nous constatons ainsi que les différents états physiques de la matière ne suffisent pas à classer les comportements mécaniques des matériaux et notamment des pâtes et suspensions. Les gaz et les liquides sont en général considérés comme des fluides mais d'autres types de matériaux semblent pouvoir entrer dans cette catégorie. Nous proposons donc ici une définition rhéophysique de la structure d'un fluide qui intègre les propriétés physiques et mécaniques communes aux matériaux *a priori* fluides passés en revue ci-dessus. On considère qu'un fluide est formé en plaçant dans un volume délimité de l'espace un certain nombre d'éléments de formes, de tailles, et de natures variées (atomes, molécules, billes de verre, globules rouges, micelles, cailloux, etc.). Ces éléments interagissent de manières diverses et sont distribués dans l'espace de façon désordonnée à longue distance. Enfin les propriétés mécaniques du fluide, après un temps de repos suffisant, ne varient pas sensiblement lorsque les éléments sont redistribués dans l'espace d'une manière quelconque et plus ou moins aléatoire. Ceci traduit notamment l'absence d'une configuration privilégiée mais n'exclut pas un comportement élastique pour de faibles déformations associé à une configuration

solide 3
stabilité 70
suspension
 colloïdale concentrée 74
 colloïdale diluée 73
 concentrée 45, 55
 diluée 51
taux de déformation 24
température granulaire 143
temps caractéristiques 63, 77, 79,
thixotropie 32, 83, 197, 202
traînée hydrodynamique 62
turbulence 20
viscoélasticité 37, 82
viscosité 1
 apparente 27
vitesse 7
volume élémentaire représentatif 8

© EDP Sciences 1999

Imprimerie Louis-Jean – 05003 GAP Cedex
Dépôt légal 206 – Mars 1999