

SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

RHÉOPHYSIQUE

LA MATIÈRE DANS
TOUS SES ÉTATS



PHILIPPE COUSSOT

edp sciences

CNRS ÉDITIONS

Philippe Coussot

Rhéophysique

La matière dans tous ses états

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Illustration de couverture : Mélange de peintures. Les différentes couleurs permettent de visualiser l'histoire de l'écoulement. La configuration finale est préservée grâce au caractère pâteux (fluide à seuil) de ces matériaux.

Imprimé en France.

© 2012, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. 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 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 courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0759-8

ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-07602-1

Préface

De nombreux matériaux échappent à la distinction entre solide et liquide et nous les avons croisés dès notre plus tendre enfance : qui n'a jamais joué avec la purée dans son assiette, manipulé de la pâte à modeler ou construit des tas de sable ? Cette matière intermédiaire se retrouve dans de nombreux phénomènes naturels ou applications industrielles, depuis les écoulements de sang plus ou moins visqueux selon l'arrangement des globules rouges jusqu'aux bétons auto-plaçants qui se liquéfient sous vibration pour épouser la forme des coffrages, en passant par la mayonnaise, le ketchup et les mousses, ou les crèmes, gels ou émulsions cosmétiques. Santé, génie civil, agroalimentaire ! Tous les domaines sont concernés.

Ces matériaux complexes sont d'une grande importance mais la science dans ce domaine est encore peu développée. Pourtant il s'agit de notre quotidien et c'est à travers ces substances que l'on peut toucher du doigt la réalité d'une multitude de phénomènes physiques, physicochimiques et mécaniques. Ces matériaux ont même initié une nouvelle forme d'enseignement scientifique à l'école, fondée sur une démarche d'investigation appelée « la main à la pâte »¹. De nombreux traités de rhéologie d'un niveau avancé rendent compte de la variété de ces systèmes et de leurs comportements en s'appuyant, le plus souvent, sur des mesures mécaniques. L'originalité de l'ouvrage de Philippe Coussot est de suivre un itinéraire inverse, dans l'esprit des recherches qu'ont menées ces dernières décennies des physico-chimistes inspirés par Pierre Gilles de Gennes, et qui s'appuient sur des descriptions physiques et chimiques pour expliquer dans une approche unifiée l'origine du comportement de ces systèmes qualifiés aujourd'hui de « matière molle ».

Naturellement les développements scientifiques correspondant aux différents chapitres de ce livre ont connu des histoires diverses et autonomes ; à l'intérieur même de chaque chapitre on reconnaît des sources bien distinctes. Retenons un seul exemple, celui que je connais le moins mal : l'étude des milieux granulaires et des matériaux divisés. Les connaissances se sont construites de façon indépendante en génie civil, en science des sols, en agronomie, en génie chimique, en planétologie. . . et j'en oublie certainement. L'effort conduit depuis plusieurs décennies dans ce champ de recherche par une large

1. <http://www.lamap.fr/>

communauté de physiciens et physico-chimistes a consisté à faire rentrer ces avancées dans un cadre unifié. Dans ce but ils ont combiné des expériences modèles, souvent « de coin de table », parfois inspirées d'expériences classiques dans des domaines d'application spécifiques, des approches numériques, et des modèles théoriques s'inspirant de la physique statistique de systèmes microscopiques. L'ouvrage récent *Les milieux granulaires - entre fluide et solide*² écrit dans cette même collection témoigne de cette approche nouvelle et des progrès accomplis. Et l'on pourrait tenir un discours équivalent sur chacun des chapitres de ce livre ambitieux.

Un des grands mérites du projet de Philippe Coussot est d'avoir réussi à conduire une description des divers types de matériaux considérés – polymères, colloïdes, suspensions, émulsions et mousses – en des termes physiques simples et avec un formalisme limité et commun à l'ensemble des chapitres. Tous ces matériaux ont pour point commun essentiel d'être des systèmes dispersés possédant des interfaces d'autant plus importantes que la granularité est fine. La compacité y apparaît comme un paramètre-pilote, et l'on retrouve dans chaque cas des états allant du *dilué* (sans interaction) au *semi dilué* ou au *compact*, pour lesquelles les problèmes d'encombrement imposent des limites qui dépendent le plus souvent des conditions d'élaboration. Si cette approche simplifiée néglige parfois les fortes fluctuations de taille ou d'organisation, le modèle de départ, que j'aime à caractériser comme *la physique du sac de billes*, permet de dégager les effets qualitatifs essentiels de ces diverses phases. Il est toujours possible ultérieurement de prendre en compte des détails géométriques des éléments constituants.

À ces divers régimes correspondent des comportements mécaniques spécifiques tels que *liquide*, *pâteux* (cet adjectif ayant un sens physique encore assez flou, mais une définition mécanique beaucoup plus claire) ou *solide*. L'apparition de chacun de ces régimes dépend d'ailleurs des types des sollicitations imposées et de leurs échelles de temps – ce qui est bien le fondement de la rhéologie. Un intérêt supplémentaire de cet ouvrage est la mise en commun de thèmes *a priori* disjoints, ce qui permet des éclairages croisés entre les différents chapitres. L'écoulement de mousses par exemple peut être mis en regard de celui d'une suspension de grains déformables, les phénomènes d'élongation dans les solutions de polymères se rapprochent des problèmes de grains colloïdaux, etc.

Philippe Coussot a la grande chance de travailler dans un milieu de recherches appliquées autour du génie civil. La rencontre, la confrontation pourrait-on dire entre des propriétés fondamentales et les propriétés d'usage des matériaux avec des effets d'échelles ou de durabilité permet d'apporter de meilleures réponses aux nécessités de la construction.

Ce livre d'une grande clarté sera une référence indispensable pour tous les ingénieurs et les techniciens qui travaillent avec ces matériaux complexes.

2. Les milieux granulaires - entre fluide et solide, B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen EDP Sciences – CNRS Editions, Collection Savoirs Actuels, 2011.

Ils pourront faire usage des lois empiriques permettant de calculer ou de prévoir leurs comportements. Au-delà de ces bases utilitaires, ils pourront compléter leurs connaissances par une approche physique qui précise le sens et l'origine des phénomènes généralement décrits dans les ouvrages de rhéologie plus classiques. Le présent livre de Philippe Coussot offre donc une démarche multidisciplinaire et originale, susceptible d'intéresser un vaste public allant des ingénieurs aux chercheurs.

Étienne Guyon

This page intentionally left blank

Table des matières

Préface	iii
Avant-propos	xiii
1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Les solides	2
1.3 Les liquides	6
1.4 Les suspensions	11
1.4.1 Séparation de phases	11
1.4.2 Impact de la présence de particules sur le comportement du mélange	12
1.4.3 Effets additionnels	13
1.5 Les colloïdes	18
1.5.1 Interactions colloïdales	18
1.5.2 Seuil de contrainte	19
1.5.3 Thixotropie	21
1.6 Les polymères	24
1.6.1 Propriétés des chaînes de polymère	24
1.6.2 Mise en solution	25
1.6.3 Viscoélasticité	26
1.6.4 Autres propriétés des polymères	29
1.7 Les émulsions	30
1.8 Les mousses	33
1.9 Les granulaires	34
1.10 Les matériaux « réels »	37
2 Matériaux simples	39
2.1 Introduction	39
2.2 Interactions entre composants élémentaires et états de la matière simple	40
2.2.1 Composants élémentaires	40
2.2.2 Agitation thermique	41

2.2.3	Potentiel d'interaction	42
2.2.4	Forces de van der Waals	42
2.2.5	Liaisons chimiques	43
2.2.6	Force de répulsion de Born	44
2.2.7	Bilan des forces	44
2.2.8	Lien hydrogène et forces hydrophobiques	45
2.2.9	États de la matière simple	46
2.3	L'état gazeux	47
2.3.1	Distribution de vitesses	47
2.3.2	Libre parcours moyen	49
2.3.3	Entropie	50
2.3.4	Loi d'état des gaz parfaits	51
2.3.5	Théorie cinétique	53
2.4	L'état liquide	59
2.4.1	Transition de l'état gazeux vers l'état liquide	59
2.4.2	Structure	63
2.4.3	Déformation	64
2.4.4	Écoulement	65
2.4.5	Modélisation rhéophysique du comportement	67
2.4.6	Tension interfaciale	69
2.5	L'état solide	70
2.5.1	Structures et interactions	70
2.5.2	Microrhéologie dans le régime solide	71
2.5.3	Élongation	72
2.5.4	Comportement en cisaillement simple	74
2.5.5	Compressibilité	75
2.5.6	Résistance mécanique maximum	76
2.5.7	Transition solide-liquide	79
2.5.8	Transition solide-gaz	79
2.6	L'état vitreux	80
2.6.1	Les verres	80
2.6.2	La transition vitreuse	80
2.6.3	Comportement mécanique associé à la transition vitreuse	82
2.6.4	Viscosité des verres	83
3	Suspensions	85
3.1	Introduction	85
3.2	Préparation d'une suspension	87
3.2.1	Point de vue géométrique	87
3.2.2	Concentration volumique	89
3.2.3	Mise en suspension : point de vue énergétique	89
3.2.4	Comment disperser les particules ?	91
3.2.5	Combien de particules peut-on mettre en suspension ?	92
3.2.6	Résistance du liquide au déplacement d'une particule	94

3.2.7	Stabilité	97
3.3	Effet de la présence de particules sur le comportement du mélange	100
3.4	Effet de la concentration	102
3.4.1	Considérations générales	102
3.4.2	Régimes de concentration	104
3.4.3	Suspension diluée	106
3.4.4	Suspension non diluée	107
3.5	Effet de l'anisotropie des particules	109
3.5.1	Des particules anisotropes idéales : les sphéroïdes	110
3.5.2	Impact sur la viscosité de la présence de particules anisotropes (orientation uniforme et constante)	110
3.5.3	Rotation des particules dans un fluide en cisaillement simple	111
3.5.4	Effet de la concentration	113
3.6	Effet de l'hétérogénéité de la concentration en particules	115
3.7	Rhéoépaississement	119
3.8	Suspensions dans un fluide à seuil	121
3.8.1	Déplacement d'un objet à travers un fluide à seuil	121
3.8.2	Stabilité	123
3.8.3	Comportement	124
4	Polymères	127
4.1	Introduction	127
4.2	Structure des polymères	129
4.2.1	Longueur apparente d'une chaîne	129
4.2.2	Distribution de longueur apparente des chaînes	130
4.2.3	Rayon de giration	132
4.2.4	Allongement d'une chaîne sous l'action d'une force	132
4.2.5	Longueur de persistance	134
4.3	Mise en solution d'un polymère	137
4.3.1	Énergie libre configurationnelle	138
4.3.2	Énergie libre associée aux interactions entre molécules	139
4.3.3	Énergie libre totale et dimension de la chaîne	140
4.4	Plusieurs chaînes en solution	141
4.4.1	Régime dilué	142
4.4.2	Régime semi-dilué	143
4.4.3	Régime concentré	144
4.4.4	Enchevêtrements	145
4.5	Polymères réticulés et gels de polymères	147
4.6	Comportement mécanique des polymères liquides	150
4.6.1	Généralités	150
4.6.2	Régime dilué	153
4.6.3	Régime concentré	156

4.6.4	Régime semi-dilué	161
4.7	Impact de la température	162
5	Colloïdes	165
5.1	Introduction	165
5.2	Mouvement brownien	166
5.2.1	Principes de base	166
5.2.2	Phénomène de diffusion	170
5.2.3	Diffusion rotationnelle	172
5.2.4	Pression osmotique	172
5.2.5	Sédimentation et diffusion brownienne	173
5.3	Forces de van der Waals	175
5.4	Forces électrostatiques	177
5.5	Effets de polymères adsorbés	180
5.6	Interactions de déplétion	183
5.7	Bilan des interactions	185
5.8	Comportement des systèmes répulsifs	188
5.8.1	Suspensions répulsives dures	189
5.8.2	Suspensions répulsives molles	193
5.9	Systèmes attractifs	200
5.9.1	Structure	200
5.9.2	Comportement des suspensions attractives	203
5.10	Transition pâteux-hydrodynamique	208
6	Émulsions – mousses	211
6.1	Introduction	211
6.2	Propriétés physiques à l'échelle des inclusions	212
6.2.1	Énergie	213
6.2.2	Différence de pression au passage d'une interface	213
6.2.3	Déformation d'une inclusion fluide à vitesse nulle et volume constant	214
6.2.4	Déplacement d'une inclusion dans un liquide au repos	216
6.2.5	Sédimentation ou crémage	217
6.3	Préparation	217
6.3.1	Généralités	217
6.3.2	Formation d'inclusions par déformation	219
6.4	Stabilité	222
6.4.1	Coalescence et stabilisation	222
6.4.2	Mûrissement d'Ostwald	227
6.5	Comportement mécanique	229
6.5.1	Généralités	229
6.5.2	Régimes de concentration	231
6.5.3	Régime dilué	233
6.5.4	Régime semi-dilué	235
6.5.5	Régime concentré	236

7	Matériaux granulaires	243
7.1	Introduction	243
7.2	Principaux types d'interactions directes	245
7.2.1	Contact « lubrifié »	245
7.2.2	Contact « frictionnel »	247
7.2.3	Collision	248
7.3	Le rôle de la configuration	250
7.3.1	Principe général	250
7.3.2	Dilatance	251
7.3.3	Tassement	252
7.3.4	État du système	253
7.4	Régimes de comportement	253
7.5	Régime frictionnel	255
7.5.1	Cisaillement simple	255
7.5.2	Loi de comportement	257
7.5.3	Applications à des écoulements quasi-statiques	261
7.6	Régime collisionnel	264
7.7	Régimes intermédiaires	267
7.7.1	Transition du régime frictionnel au régime collisionnel	267
7.7.2	Transition du régime frictionnel au régime lubrifié	267
8	Rhéométrie	273
8.1	Introduction	273
8.2	Géométries de base	274
8.2.1	Disques parallèles	274
8.2.2	Cône-plan	276
8.2.3	Cylindres coaxiaux	277
8.2.4	Écoulement en conduite	279
8.3	Phénomènes perturbateurs des mesures	281
8.3.1	Perturbations du volume de l'échantillon	281
8.3.2	Glissement aux parois	282
8.3.3	Migration	286
8.3.4	Bandes de cisaillement	286
8.3.5	Instabilité associée à une courbe d'écoulement décroissante	288
8.3.6	Autres phénomènes perturbateurs	289
8.4	Procédures expérimentales	290
8.4.1	Choix de la géométrie	291
8.4.2	Préparation du matériau	291
8.4.3	Courbe d'écoulement	292
8.4.4	Seuil d'écoulement	294
8.5	Techniques de mesure pratiques	295
8.5.1	Écrasement	296
8.5.2	Plan incliné	298

Annexe A : Mécanique des fluides : principes de base et origines physiques	301
A.1 Introduction	301
A.2 Les variables de l'écoulement	302
A.3 Continuité du milieu	303
A.4 Les forces en jeu	305
A.5 Conservation de la masse	311
A.6 Conservation de la quantité de mouvement	311
A.7 Les fluctuations temporelles	313
A.8 La turbulence	314
A.9 Résolution d'un problème d'écoulement	315
A.10 Lois de comportement	316
A.10.1 Généralités	316
A.10.2 Le tenseur des taux de déformation	317
A.10.3 Forme simplifiée de la loi de comportement	318
A.10.4 Cisaillement simple	319
A.10.5 Élongation	320
A.10.6 Dissipations d'énergie	321
A.10.7 Principaux types de comportement	321
Annexe B : Éléments de thermodynamique	323
B.1 Premier principe	323
B.2 Entropie	325
B.3 Second principe	325
B.4 Énergie libre	326
B.5 Distribution d'énergie	326
Liste des symboles	329
Index	333

Avant-propos

Notre compréhension de l'origine physique ou physico-chimique du comportement mécanique des matériaux, ce que j'appelle ici la rhéophysique, s'appuie sur des développements plus ou moins poussés selon les matériaux. Après les gaz, les liquides et les solides simples c'est dans le domaine des polymères que les avancées ont été les plus importantes durant les cinquante dernières années. Les ouvrages spécialisés sur ce thème ne manquent pas. Beaucoup plus récemment des livres abordant en détail la rhéologie des mousses, des milieux granulaires ou des colloïdes, ont vu le jour. Le présent ouvrage part de l'idée que, pour aborder la rhéophysique d'un matériau quelconque, il est particulièrement instructif voire nécessaire de maîtriser les outils de base qui permettent de comprendre le comportement d'une large gamme de matériaux. Une telle approche a progressivement émergé dans le cadre de mon cours *Rhéophysique et matière et molle* du Master Science des Matériaux pour la Construction Durable, une formation originale mise en place par le regretté O. Coussy à l'École des Ponts et Chaussées et à l'École Polytechnique et dont le responsable est désormais Xavier Chateau. J'ai donc souhaité rassembler dans un même recueil non pas les connaissances les plus avancées dans chaque domaine, mais les éléments de base de notre compréhension physique du comportement des principales grandes classes de matériaux dans une approche la plus « unifiée » possible.

Cet ouvrage a bénéficié du soutien et des conseils de Michèle Leduc et Michel Le Bellac, directeurs de la collection Savoirs Actuels d'EDP Sciences. Je leur suis reconnaissant de la confiance qu'ils m'ont accordée. Étienne Guyon m'a fait l'honneur d'écrire la préface. J'en suis d'autant plus ravi qu'il a été, avec Pierre-Gilles de Gennes, l'un des initiateurs et moteurs des développements de cette physique des milieux hétérogènes dans laquelle s'inscrit cet ouvrage. Je tiens aussi à remercier chaleureusement plusieurs collègues qui ont accepté de relire certains chapitres et m'ont beaucoup apporté par leur suggestions : Jean-François Tassin, François Chevoir, Julie Goyon, Xavier Chateau, Guillaume Ovarlez, Jean-Noël Roux. L'apport de C. Ancey sur la partie de cet ouvrage concernant les matériaux granulaires, au cours de notre collaboration scientifique dans les années 90, a été essentiel. Et, une fois de plus, je dois une

fière chandelle à ma famille qui a accepté de voir entrer ce nouveau projet à la maison, au point même d'y participer puisqu'Émilie, ma fille, m'a aidé à mettre en scène et prendre des photos du premier chapitre et Valérie a relu les parties les plus « littéraires » du texte.

P. Cousot

Chapitre 1

Introduction

1.1 Introduction

Entre le solide qui se déforme très peu et le fluide qui s'écoule largement, il existe une large gamme de matériaux aux propriétés mécaniques intermédiaires : polymères, émulsions, mousses, granulaires, etc. Cet ouvrage a pour objectif de fournir des connaissances de base permettant de comprendre l'origine physique des comportements mécaniques de ces matériaux intermédiaires. Pour des solides ou des liquides simples, la structure du matériau, à l'échelle des atomes ou des molécules qui le constituent, est homogène ; il est alors possible de déduire les propriétés macroscopiques du matériau à partir de ses propriétés à l'échelle de ces éléments. Dans de nombreux autres cas, cependant, ce ne sont pas les atomes eux-mêmes constitutifs de la matière, ni-même les molécules, qui sont directement à l'origine de ces déformations, mais les mouvements relatifs d'éléments comprenant un grand nombre d'atomes ou de molécules. Ces éléments « mésoscopiques » (c'est-à-dire ni macroscopiques, ni microscopiques) sont par exemple des bulles, des gouttes, des chaînes de polymère, des grains solides, des globules, des cellules, etc. Le comportement mécanique des matériaux correspondants tire son origine des interactions entre ces éléments mésoscopiques. Ce comportement macroscopique résulte, selon les cas, de la moyenne du comportement local, de phénomènes coopératifs impliquant un grand nombre d'éléments ou encore d'une structure collective. Les caractéristiques spécifiques des éléments constitutifs, leur déformabilité, leur élasticité, les interactions qu'ils développent à distance, et leur impact sur les phénomènes collectifs, conduisent à des propriétés macroscopiques très variées et originales qui sont intermédiaires entre celles des solides et celles liquides.

Ce premier chapitre aborde ce domaine en passant en revue les grandes classes de matériaux et en suggérant les bases qualitatives d'une analyse rhéophysique. On commence par les matériaux solides (§ 1.2). Lorsqu'ils sont cristallins, ceux-ci constituent en effet une référence unique compte tenu de la

simplicité de leur structure formée par la juxtaposition à l'identique d'un arrangement local particulier. Avec les liquides simples (§ 1.3), on commence déjà à aborder certaines difficultés de la rhéophysique des fluides, puisque leur comportement mécanique résulte de phénomènes physiques relativement complexes : le désordre et l'agitation thermique des atomes ou molécules. La plupart des fluides complexes sont formés en mélangeant des éléments mésoscopiques avec un liquide. Les matériaux les plus simples, du point de vue des composants et des interactions associées, sont les suspensions (§ 1.4), formées de particules solides immergées dans un liquide. En remplaçant des volumes de liquide par des particules solides, on augmente la résistance du mélange à l'écoulement. Lorsqu'en outre, ces particules développent des interactions à distance à travers le liquide, comme c'est le cas des particules colloïdales (§ 1.5), le mélange peut avoir des propriétés mécaniques plus complexes, intermédiaires entre celles d'un solide et celles d'un liquide simple. On retrouve des phénomènes analogues avec les émulsions (§ 1.7) ou les mousses (§ 1.8). Les polymères forment quant à eux une catégorie à part, du fait que les chaînes peuvent (i) occuper des volumes apparents très grands par rapport à leur volume effectif, (ii) s'allonger comme des ressorts et (iii) s'enchevêtrer. Ces différents phénomènes induisent des comportements mécaniques originaux : comportement apparent élastique dans certaines conditions, comportement liquide dans d'autres conditions (§ 1.6). Enfin les granulaires (§ 1.9), constitués par l'assemblée concentrée de grains solides susceptibles d'entrer en contact direct, forment une classe à part : ils peuvent rester coincés comme des solides ou s'écouler comme des liquides selon les circonstances, mais dans ce dernier cas, contrairement aux liquides, la pression joue un rôle critique.

1.2 Les solides

Nous sommes entourés de matériaux solides qui sont le gage de la réussite, la stabilité ou la pérennité de nos actions : le sol sur lequel nous nous appuyons est solide, nous construisons des maisons ou des immeubles solides (voir Fig. 1.1a), nous nous entourons de meubles également solides sur lesquels nous posons une multitude d'objets que nous souhaitons voir rester en place. Par ailleurs, nous utilisons toutes sortes de véhicules qui nous transportent heureusement sans se déformer. Le corps humain est lui-même constitué d'éléments solides, certains très peu déformables (les os), d'autres très déformables (la peau). Pour comprendre l'impact de la solidité de tous ces objets sur notre vie quotidienne, il suffit de s'imaginer un monde constitué d'objets liquides pendant quelques instants : nous nous enfoncerions progressivement dans le sol, nos maisons se déformeraient, nos lits s'aplatiraient et tous les objets s'écouleraient juste après leur fabrication.

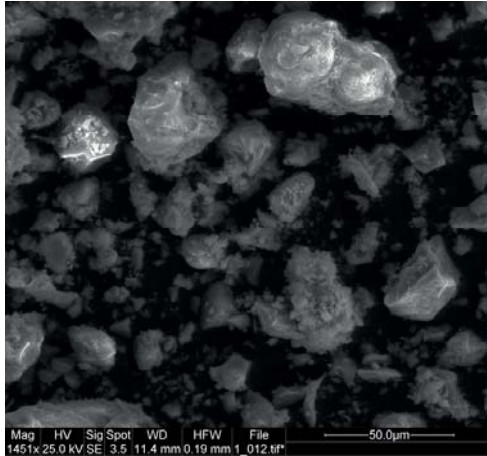
Bien entendu, tous ces matériaux restent solides dans une certaine limite qui varie d'un objet à l'autre : si on leur impose une déformation suffisamment grande, ils se brisent. Quand on y regarde de plus près, tous les matériaux



(a)



(b)



(c)

FIG. 1.1 – Le béton à différentes échelles : (a) Pont de l'île de Ré (construit en béton, le pont de l'île de Ré est le plus long pont de France avec ses 2926 m. Composé de 29 piles, il est courbé et joint l'île au continent) ; (b) structure d'un béton à l'échelle du centimètre. Crédit : G. Grampeix et H. Delahousse (IFSTTAR) ; (c) structure de la pâte de ciment interstitielle (cryogénisée au MEB) à l'échelle du dixième de millimètres. Crédit J. Hot et C. Castella (IFSTTAR).

solides sont élastiques lorsqu'ils sont soumis à de faibles déformations. Certains de ces objets sont ensuite capables de se déformer significativement avant de se briser, ils sont **ductiles**, alors que d'autres se brisent tout net au-delà d'une très faible déformation, ils sont **fragiles** (voir Fig. 1.2). Finalement le point commun de tous ces objets solides est le fait qu'ils ne peuvent pas se déformer indéfiniment sans finir par se briser.

En dépit du fait que tous ces objets ont en commun leur caractère solide, leur composition ou leur structure sont extrêmement variées. Qu'y a-t-il de commun en effet entre la structure interne d'une roche constituée de cristaux agglomérés, celle d'une barre d'acier, d'un caoutchouc formée de polymères enchevêtrés, d'une planche de bois constituée de tissus végétaux ou encore d'un mur en béton constitué d'un empilement de grains de toutes tailles dans une matrice eau-ciment (voir Fig. 1.1b)? En fait, pour tous ces matériaux il existe une échelle à laquelle les éléments constitutifs forment une structure constituée d'un réseau d'éléments en interaction forte. Souvent, c'est à l'échelle atomique ou moléculaire qu'existent les liaisons fortes assurant le comportement solide de l'ensemble (voir § 2.2). À cette échelle on peut notamment avoir des structures **cristallines**, dans lesquelles les atomes ou molécules sont distribuées de manière ordonnée. De telles structures caractérisent en général les corps purs ou les alliages simples, constitués de molécules de tailles comparables. Dans le cas des **verres**, la structure du matériau peut également être amorphe, sans ordre particulier.

De nombreux solides que l'on rencontre dans notre vie quotidienne sont cependant beaucoup plus complexes : ils se composent d'éléments de tailles diverses (cellules, grains, particules d'argile, fibres, etc.) immergés dans des phases cristallines ou amorphes plus ou moins complexes (voir Fig. 1.1c) ou simplement compactés les uns contre les autres. C'est par exemple le cas d'une roche issue du refroidissement d'un magma initialement liquide : une cristallisation fractionnée s'opère, donnant lieu dans un premier temps à la formation de cristaux à partir de certaines espèces, puis au cours du temps à d'autres types de cristaux ; la structure finale est un ensemble de cristaux divers dispersés ou concentrés dans une matrice vitreuse, constituée d'une espèce qui s'est solidifiée sans cristalliser. Dans le domaine de la construction, la plupart des matériaux (plâtres, bétons, mortiers, terre crue ou cuite, etc.) sont également constitués d'une assemblée de grains de tailles diverses enrobés dans une matrice fine (ciment hydraté, pâte d'argile). La présence de ces grains a souvent pour effet de renforcer la résistance mécanique du matériau dans son état solide.

Dans toutes ces structures les éléments sont coincés entre plusieurs voisins proches avec lesquels ils interagissent, autrement dit, ils exercent des forces mutuelles d'interaction. Au repos, chaque élément est dans une position d'équilibre des forces exercées sur lui, tout se passe comme si il était au fond d'un puits d'énergie potentielle. Que se passe-t-il quand on impose un effort sur ce type de structure ? Un effort macroscopique, c'est-à-dire appliqué

à l'ensemble de l'échantillon de matériau solide, induit des efforts locaux entre les éléments qui s'ajoutent aux forces d'interaction. Les éléments se déplacent légèrement vers une nouvelle position d'équilibre associée à ce nouveau jeu de forces. Tout se passe en fait comme si ils grimpaient le long de leur puits de potentiel initial. Pour de petits efforts, les déplacements induits sont faibles, on reste dans un régime « linéaire » pour lequel la force est proportionnelle au déplacement. En outre lorsqu'on relâche l'effort les éléments reviennent naturellement dans leur position d'équilibre initial, ils retombent au fond de leur puits de potentiel. Le comportement macroscopique du matériau est analogue : soumis à des efforts suffisamment faibles, il est linéairement **élastique**. Pour des structures solides simples, il est possible de calculer directement la résistance mécanique à la déformation dans ce régime en fonction des forces d'interaction au niveau local entre les atomes (voir § 2.5).

Au-delà d'une déformation critique, certains éléments peuvent sortir de leur puits de potentiel, ce qui implique que l'arrangement initial est définitivement détruit, car compte tenu de la complexité de la distribution des interactions, il n'est pas envisageable de retrouver la configuration d'origine par une déformation opposée. Dans certains cas, la structure se sépare en plusieurs parties, il s'agit d'une **rupture fragile** (voir Fig. 1.2b). Dans d'autres cas la structure se brise en quelques points seulement (dislocations) et le matériau conserve son intégrité apparente, il s'agit d'une **rupture ductile** (voir Fig. 1.2c). On dit que le matériau subit alors des déformations **plastiques** car elles sont associées à des évolutions irréversibles de la structure initiale (voir § 2.5.6).

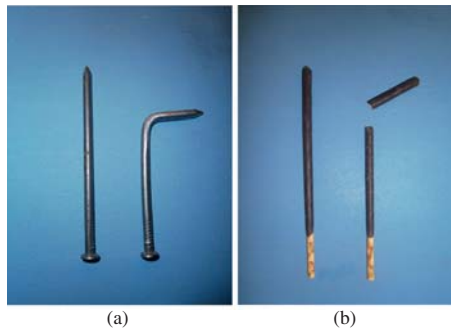


FIG. 1.2 – Différents résultats (à droite) de l'application d'une force en flexion à un matériau solide initialement au repos (à gauche) au-delà du régime élastique : (a) clou ductile ; (b) biscuit fragile.

Ainsi la propriété fondamentale des **solides** est qu'ils ne peuvent subir de déformation infinie sans se briser ou au moins perdre définitivement leurs caractéristiques initiales. Ceci les distingue des **fluides**, qui peuvent être déformés à l'infini sans perdre leurs caractéristiques mécaniques initiales.

La loi de comportement d'un **fluide à seuil simple** s'exprime quant à elle :

$$\begin{aligned} \sqrt{-T_{II}} < \tau_c &\Leftrightarrow \mathbf{D} = 0 \\ \sqrt{-T_{II}} > \tau_c &\Rightarrow \boldsymbol{\Sigma} = -p\mathbf{I} + \tau_c \frac{\mathbf{D}}{\sqrt{-D_{II}}} + F(D_{II})\mathbf{D} \end{aligned} \quad (\text{A.39})$$

où F est une fonction positive du second invariant D_{II} . Le modèle de Bingham correspond à $F = 2\mu_B$ où μ_B est appelée viscosité plastique. Le **modèle de Herschel-Bulkley** correspond à $F(D_{II}) = 2^n k / (\sqrt{-D_{II}})^{1-n}$ où k et n sont deux paramètres du matériau. En cisaillement simple, la loi de comportement (A.39) s'exprime :

$$\begin{aligned} \tau < \tau_c &\Rightarrow \dot{\gamma} = 0 \\ \tau > \tau_c &\Rightarrow \tau = \tau_c + f(\dot{\gamma}) \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

où f est une fonction positive de $\dot{\gamma}$. Avec le modèle de Herschel-Bulkley, on a $f(\dot{\gamma}) = K\dot{\gamma}^n$. On utilise aussi parfois le modèle de Casson, pour lequel $f(\dot{\gamma}) = K\dot{\gamma} + 2\sqrt{K\tau_c\dot{\gamma}}$.

Pour en savoir plus

- G.K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967
- C. Truesdell, *Introduction à la mécanique rationnelle des milieux continus*, Masson, Paris, 1974.
- B.D. Coleman, H. Markowitz, and W. Noll, *Viscometric Flows of Non-Newtonian Fluids*, Springer Tracts in Natural Philosophy, Volume 5, Springer Verlag, Berlin, 1966.
- J.M. Piau, Fluides non-newtoniens, *Techniques de l'Ingénieur*, A710, 1-16, A711, 1-24, 1979.
- J. Ferguson, and Z. Kemplowski, *Applied Fluid Rheology*, Elsevier, Amsterdam, 1991.
- G. Couarraze, et J.L. Grossiord, *Initiation à la rhéologie*, Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 1983.
- R.I. Tanner, *Engineering Rheology*, Clarendon Press, Oxford, 1988.

Annexe B

Éléments de thermodynamique

B.1 Premier principe

Dans le cadre de la thermodynamique, on suppose qu'il est possible de décrire l'énergie totale d'un système comme la somme de son énergie cinétique macroscopique (K) (associée aux mouvements moyens des éléments du système par rapport à un référentiel donné) et de son énergie interne microscopique. Cette **énergie interne** (U) est la somme des énergies potentielles d'interaction entre les éléments constitutifs et de leur énergie cinétique à une échelle locale. U est une fonction de l'état du système, mais compte tenu de la difficulté de décrire en détail cet état, on décrit en général seulement les variations de cette fonction lors d'une transformation du système.

Le premier principe de la thermodynamique postule que la variation d'énergie totale durant une transformation est la somme de la quantité de chaleur fournie au système et du travail des forces extérieures sur le système. Le **transfert thermique** (Q) est une énergie associée à une élévation de température ou un changement de phase (donc d'état) des éléments du système. Le **travail** (W) est une énergie transmise par l'application d'une force lorsqu'elle donne lieu à un déplacement des éléments macroscopiques du système. La **puissance** est la variation du travail par unité de temps.

On peut finalement écrire le premier principe sous la forme :

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dK}{dt} = \mathcal{P}_e + \frac{\delta Q}{\delta t} \quad (\text{B.1})$$

avec $U = \int_{\Omega} \rho e dv$; $K = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \rho u^2 dv$; $\mathcal{P}_e = \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} \cdot \mathbf{u} dv + \int_{\Sigma} (\boldsymbol{\Sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{u} ds$

où e est la densité d'énergie interne, \mathcal{P}_e est la puissance résultant du travail des forces extérieures. Par ailleurs, on peut aussi écrire le flux de chaleur apporté ($\delta Q/\delta t$) au volume considéré (Ω) sous la forme :

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \int_{\Omega} r dv - \int_{\Sigma} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} ds \quad (\text{B.2})$$