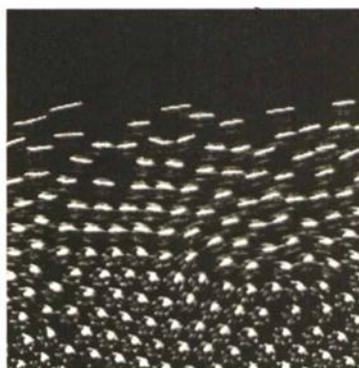
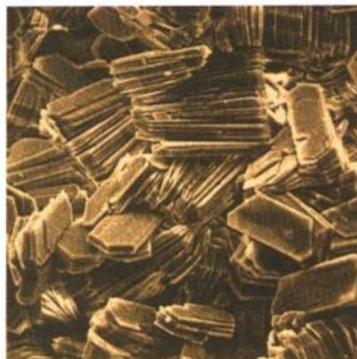
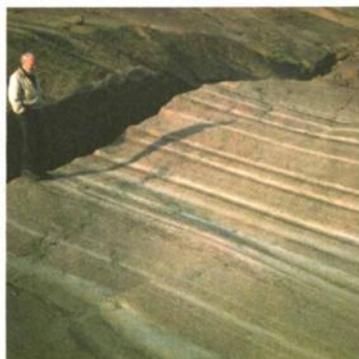


Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable

Introduction aux suspensions en géologie et en physique



B. ILDEFONSE

C. ALLAIN

P. COUSSOT

Cemagref
EDITIONS

Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable

Introduction aux suspensions en géologie et en physique

Benoît ILDEFONSE Catherine ALLAIN Philippe COUSSOT

Remerciements

Nous nous sommes attachés à faire relire chaque chapitre par des collègues spécialistes et non-spécialistes de la discipline traitée, afin d'assurer un niveau de lecture optimal pour tous les chercheurs et étudiants concernés par ce livre, qu'ils soient géologues, mécaniciens, physiciens...

Emmanuel Ball, Roger Bayer, Jean-Luc Bouchez, François Boudier, Jean-Claude Bousquet, Renaud Caby, Bernard Célérier, Françoise Chevoir, Tim Druitt, Pierre Evesque, Jean-Pierre Hulin, Pierre Sabaté, Christian Teyssier, Andrea Tommasi et Alain Vauchez ont bien voulu nous aider dans cette tâche. Qu'ils en soient ici remerciés.

Nous remercions par ailleurs le Cemagref qui a bien voulu nous faire confiance et éditer cet ouvrage.

Benoît ILDEFONSE
Catherine ALLAIN
Philippe COUSSOT

Photos de couverture :

en haut à gauche, litage magmatique dans les gabbros du Skaergaard, Groenland, Ph.© Adolphe Nicolas ; *en haut à droite*, kaolinites (particules d'argiles) observées par microscopie électronique, Ph.© Schlumberger-Dowell ; *en bas à gauche*, écoulement de surface de billes dans un tambour en rotation, Ph.© Jean Rajchenbach ; *en bas à droite*, avalanche de neige en aérosol, Ph.© Pierre Dupont, document ANENA.

Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable - Introduction aux suspensions en géologie et en physique. Coordination : C. Allain, P. Coussot, B. Ildefonse, © Cemagref 1997, 1^{ère} édition. ISBN 2-85362-485-4. Dépôt légal 4^e trimestre 1997. Coordination de l'édition : J. Baudel. Maquette de couverture : E. Duchateau. Impression et façonnage : Atelier Dicova, Parc de Tourvoie, BP 22, 92162 Antony Cedex. Vente par correspondance : Publi-Trans, BP 22, 91167 Longjumeau Cedex, tél. 01 69 10 85 85. Diffusion aux libraires : TEC et DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, tél. 01 47 40 67 00. Prix : 220 F TTC.

*Cet ouvrage est dédié à la mémoire de Jean-Michel Caron,
qui m'a toujours poussé à aller voir ailleurs...*

Benoît Ildefonse

Table des matières

Introduction	11
Résumés	15
Abstracts	19
Chapitre 1. Structures et propriétés rhéologiques des magmas	23
1.1. Introduction	23
1.2. Rhéologie des magmas	23
1.3. Rhéologie et structures	28
1.3.1. Quelques exemples	28
1.3.2. Bi-magmatisme (mélange de deux magmas chimiquement contrastés)	32
1.4. Conclusion	34
1.5. Références	34
Chapitre 2. Ecoulement magmatique dans les gabbros et problème des chambres magmatiques sous les dorsales océaniques	37
2.1. Introduction	37
2.2. Structures et dynamique des gabbros ophiolitiques	41
2.3. Ecoulement en suspension pour de faibles fractions liquides	43
2.3.1. Effet géométrique des fabriques de formes	43
2.3.2. Mécanisme d'accommodation dans les gabbros	45
2.4. Rhéologie d'une suspension gabbroïque hyper-dense	45
2.5. Conclusion	47
2.6. Références	47
Chapitre 3. Les écoulements pyroclastiques et les avalanches de débris en domaine volcanique	51
3.1. Introduction	51
3.2. L'activité volcanique : produits et mécanismes	51
3.2.1. Les explosions volcaniques et leurs produits	51
3.2.2. Les écoulements gravitaires en domaine volcanique	52
3.3. Les écoulements pyroclastiques denses	54
3.3.1. Origine des écoulements	54
3.3.2. Caractéristiques des dépôts	54
3.3.3. Mécanismes d'écoulements et de dépôt	57
3.4. Les déferlantes	60
3.4.1. Les différents types de déferlantes	60
3.4.2. Caractéristiques des dépôts	60
3.4.3. Mécanismes d'écoulement et de dépôt	61
3.5. Les avalanches de débris volcaniques	63
3.5.1. Définition et origine	63
3.5.2. Caractéristiques des dépôts	63
3.5.3. Mécanismes d'écoulement et de dépôt	64

3.6. Unité et diversité des écoulements gravitaires en domaine volcanique	66
3.7. Conclusions	68
3.8. Références	68
Chapitre 4. Les laves torrentielles	71
4.1. Introduction	71
4.2. Caractéristiques des laves torrentielles	72
4.2.1. Caractéristiques des écoulements	72
4.2.2. Déclenchement des laves torrentielles	76
4.2.3. Caractères distinctifs des laves torrentielles par rapport aux autres phénomènes torrentiels et aux mouvements de terrain	77
4.3. Rhéologie des laves torrentielles	79
4.3.1. Le modèle viscoplastique	79
4.3.2. Le modèle "granulaire"	82
4.3.3. Discussion	83
4.4. Références	85
Chapitre 5. Les avalanches	89
5.1. Introduction	89
5.1.1. Nature des problèmes rencontrés	89
5.1.2. Définition et classification des avalanches	90
5.2. Quelques caractéristiques des avalanches	90
5.2.1. Nature du matériau mobilisé	90
5.2.2. Caractéristiques de l'écoulement	92
5.3. Modélisation des avalanches	97
5.3.1. Les modèles mathématiques	97
5.3.2. La modélisation sur maquette	97
5.3.3. Les modèles empiriques	98
5.3.4. Les modèles physiques	100
5.3.5. Les modèles symboliques	101
5.4. Conclusion	102
5.5. Références	102
Chapitre 6. Transport solide par charriage torrentiel	105
6.1. Introduction	105
6.2. Description du phénomène de transport solide torrentiel	105
6.2.1. Le contexte torrentiel	105
6.2.2. Description des écoulements torrentiels	107
6.3. Modes de transport solide	110
6.4. Les effets du transport solide	111
6.4.1. Du point de vue de l'hydraulique	111
6.4.2. Du point de vue du risque torrentiel	112
6.5. Les formules de transport solide par charriage	113
6.5.1. Contrainte de cisaillement ; contrainte critique	114
6.5.2. Formule de Meyer-Peter (1948)	115
6.5.3. Formule de Smart et Jaeggi (1983)	115
6.5.4. Formule de Rickenmann (1990)	116

6.5.5. Formule de Lefort (1991)	117
6.5.6. Considérations générales	117
6.6. Perspectives : travaux récents et à entreprendre	118
6.6.1. Domaine d'application des formules de transport solide	118
6.6.2. Tri granulométrique	119
6.6.3. Microstructure du charriage torrentiel	119
6.6.4. Modèle numérique d'évolution d'un lit torrentiel	120
6.7. Conclusion	121
6.8. Références	121
Chapitre 7. Rhéologie et structure des suspensions concentrées, aspects généraux	123
7.1. Concepts rhéologiques de base	124
7.2. Modèles classiques pour la viscosité non-newtonienne	127
7.2.1. Les modèles théoriques	127
7.2.2. Les relations empiriques	128
7.2.3. Les modèles "structurels"	128
7.3. L'analyse dimensionnelle	131
7.4. Propriétés générales des écoulements stationnaires	132
7.4.1. Courbes maîtresses à $\phi = Cte$	132
7.4.2. Viscosités limites à faible et fort cisaillements	133
7.4.3. Extension du modèle de sphères dures	136
7.4.4. Cinétique de structure et comportement non-newtonien	138
7.4.5. Prédiction des comportements pseudo-plastique, plastique, dilatant	139
7.5. Remarques finales	141
7.6. Références	142
Chapitre 8. Sédimentation de particules macroscopiques	145
8.1. Introduction	145
8.2. Particules macroscopiques-particules colloïdales	146
8.3. Une particule isolée	147
8.4. Une suspension de particules	150
8.5. Dispersion hydrodynamique	153
8.6. Techniques expérimentales	154
8.7. Conclusion	155
8.8. Références	155
Chapitre 9. Sédimentation et agrégation dans les suspensions colloïdales	157
9.1. Les colloïdes	157
9.2. Les phénomènes d'agrégation irréversible	159
9.2.1. Géométrie fractale des agrégats formés	161
9.2.2. Cinétique de croissance	162
9.3. L'effet de la gravité : couplage agrégation-sédimentation	162
9.3.1. Les différents régimes	163
9.3.2. Dynamique de la séparation	166
9.4. Conclusion	168

9.5. Références	168
Chapitre 10. Physico-chimie et rhéologie des mélanges argile-eau	169
10.1. Introduction	169
10.2. Minéralogie	169
10.3. L'organisation des mélanges argile-eau	173
10.3.1. Le régime dilué	173
10.3.2. Le régime semi-dilué	174
10.3.3. Le régime concentré	178
10.4. Comportement mécanique	178
10.4.1. Généralités	178
10.4.2. Influence de certains paramètres	186
10.5. Conclusion	188
10.6. Références	189
Chapitre 11. Introduction générale aux milieux granulaires	193
11.1. Introduction	193
11.2. Quelques caractéristiques essentielles des milieux granulaires	194
11.3. Propriétés d'écoulement des milieux granulaires	198
11.4. Ségrégation et mélange	199
11.4.1. Ségrégation par écoulement	200
11.4.2. Ségrégation par vibration (noix du Brésil)	201
11.4.3. Ségrégation par "percolation"	202
11.4.4. Ségrégation par cisaillement	202
11.5. Conclusion	203
11.6. Références	203
Chapitre 12. L'hydrodynamique des milieux granulaires	205
12.1 Introduction	205
12.2. Régime des déformations lentes	208
12.2.1. Un exemple d'écoulement lent : la vidange d'un sablier	208
12.2.2. Modèles stochastiques d'écoulements lents	210
12.3. Les écoulements rapides	211
12.3.1. Lois de comportement dans les suspensions concentrées	211
12.3.2. Simulations numériques	213
12.3.3. Modèles d'écoulements collisionnels	214
12.4. Ecoulement par avalanches intermittentes	218
12.4.1. Introduction	218
12.4.2. Résultats expérimentaux concernant les avalanches	220
12.4.3. Problème de la bistabilité	222
12.5. Références	227
Chapitre 13. La mécanique du sable mouillé	231
13.1. Introduction	231
13.2. Rappels introductifs	232
13.2.1. Frottement	232
13.2.2. Frottement et cohésion	233

13.2.3. Plan de Mohr-Coulomb, cercle de Mohr	234
13.2.4. Dilatance	235
13.3. Influence de l'eau	235
13.3.1. Absence de courant	236
13.3.2. Effet d'un courant	236
13.3.3. Equation de continuité	237
13.3.4. Conditions drainées et non drainées	237
13.3.5. Exemples	238
13.4. Les différents types d'essais	239
13.4.1. L'oedomètre	239
13.4.2. L'appareil triaxial	241
13.5. Comportement mécanique d'un milieu granulaire	242
13.5.1. Essais sur sol normalement consolidé	243
13.5.2. Essais sur sol surconsolidé	245
13.6. Discussion sur le comportement spécifique des sables et conclusion	250
13.7. Références	251
Auteurs	253

Introduction

Du 4 au 6 octobre 1995 un atelier a réuni, à la Grande-Motte, une soixantaine de physiciens, de mécaniciens, de géophysiciens et de géologues autour du thème "Structures internes et comportement des suspensions géologiques concentrées". L'idée de cette réunion était née quelques temps auparavant de la rencontre entre deux d'entre nous (B. Ildefonse et P. Coussot) qui s'étaient rendus compte que, bien que s'intéressant à des domaines de la géophysique très éloignés a priori (écoulements magmatiques et coulées de boues), les problèmes auxquels ils étaient confrontés et les outils issus de la physique qu'ils étaient amenés à utiliser n'en étaient pas moins très proches. L'atelier de la Grande-Motte avait pour but d'étendre à un champ beaucoup plus large la confrontation entre chercheurs des différentes communautés s'intéressant aux suspensions concentrées. Ainsi les physiciens et mécaniciens des suspensions et des milieux granulaires allaient pouvoir faire le point des connaissances acquises dans leur domaine et susceptibles d'être utilisées par les géologues. Les géologues et géophysiciens allaient quant à eux pouvoir faire un bilan des problèmes subsistants concernant les suspensions concentrées dans leur domaine. Cet atelier se voulait donc un lieu d'échanges privilégié et inédit entre chercheurs de communautés qui ne se côtoient pas fréquemment.

Dans cette perspective, en plus des communications relatives à des résultats de recherches récentes, de nombreux exposés généraux et pédagogiques ont été présentés. Par ailleurs, compte tenu du caractère interdisciplinaire et des objectifs de cet atelier, nous souhaitons qu'une large place soit laissée à la discussion entre chercheurs à la suite de chaque présentation et à la fin des thèmes généraux. Pour favoriser la compréhension mutuelle en dépit des différences de vocabulaire et de mode de pensée chaque communication était présidée par un spécialiste de la même communauté que le conférencier et par un chercheur de l'autre communauté, qui jouait alors le rôle de candide et de garde-fou. Entre les participants s'est finalement instauré un dialogue sans complexes, que l'on ne rencontre pas dans les congrès plus importants ou centrés sur une seule discipline. Tout ceci, ainsi qu'un climat (...) favorable au huis-clos, a permis de véritables échanges et approfondissements sur de nombreux points, obscurs pour l'une ou l'autre des communautés de chercheurs. A l'issue de cet atelier, une majorité de participants se sont prononcés en faveur de la réalisation d'un ouvrage faisant le point sur ce domaine. Encore une fois, compte tenu de l'interdisciplinarité des thèmes abordés, il ne pouvait s'agir d'un recueil de communications de forme classique, cet ouvrage devait au contraire tenter d'être didactique, général et informatif.

Nous avons déjà insisté sur le fait que le champ couvert est large et il convient d'abord de bien comprendre le lien entre les différents domaines. Nous sommes aidés en cela par les conclusions dégagées lors de la discussion finale de l'atelier. Les géologues ou géophysiciens étudient des phénomènes naturels divers (laves volcaniques, érosion torrentielle, déformations dans les magmas, glissements sous-marins, écoulements pyroclastiques, etc.). Tous ces phénomènes mettent en jeu des

matériaux (magma, sable humide, boue, etc.) qui sont des suspensions concentrées au sens d'un grand nombre de particules solides placées dans un fluide. Tous les chercheurs étudient des mouvements de ces matériaux. Cependant, suivant les motivations scientifiques et les contraintes de chacun, les méthodes de recherche varient. Deux grandes catégories peuvent être distinguées :

- Dans certains cas il est possible d'observer les écoulements au moment où ils se produisent (laves torrentielles, avalanches, laves volcaniques, etc), on peut donc disposer de mesures relatives aux caractéristiques de ces écoulements. Cette possibilité reste cependant marginale, et, par essence, exceptionnelle, et il est de toute façon impossible de reproduire volontairement le phénomène à l'échelle naturelle. Ces phénomènes sont souvent étudiés du fait de leurs conséquences catastrophiques et l'on s'intéresse alors à la structure interne des matériaux et à son influence sur les caractéristiques macroscopiques des matériaux ou des écoulements.

- Dans d'autres cas, les écoulements ne sont pas observables (mouvements des magmas dans la croûte, turbidites, glissements sous-marins, etc.) et l'on doit se contenter d'analyser la configuration finale au terme de ces mouvements. Les chercheurs étudient alors les phénomènes de stratification, de ségrégation, de sédimentation, ou d'orientation au sein du matériau pour n'en citer que quelques-uns. Ils parviennent ainsi à déduire certaines caractéristiques de l'écoulement au moment où il s'est produit. Dans ce cadre l'objectif des recherches consiste le plus souvent à comprendre les mouvements terrestres plutôt qu'à chercher à les contrecarrer.

Sans reprendre en détail les différents types de matériaux concernés, il est clair qu'il s'agit de suspensions complexes formées par le mélange d'un ou plusieurs fluides et de particules solides variant dans une large gamme de taille et de nature. Ceci constitue une différence essentielle avec un grand nombre de travaux réalisés par les physiciens. En effet, ceux-ci étudient des phénomènes physiques et de ce fait doivent être en mesure de caractériser les objets qu'ils utilisent avec un nombre de paramètres le plus faible possible. Il est donc par exemple préférable pour le physicien d'utiliser un mélange de billes de diamètre identique plutôt qu'un sable grossier quoique naturel dont la granulométrie s'étend de quelques microns à quelques centimètres. Les mécaniciens qui étudient le comportement macroscopique d'un milieu donné peuvent quant à eux être amenés à étudier des matériaux naturels, donc complexes. Mais lorsqu'il s'agit de mettre en relation la structure interne et le comportement macroscopique d'un matériau il est préférable de s'intéresser d'abord à des matériaux modèles.

Les géologues et géophysiciens ne peuvent pas utiliser directement la même démarche. Lorsqu'ils veulent analyser de manière fine les phénomènes qu'ils étudient, ils sont en effet de manière générale confrontés à une double difficulté :

- impossibilité de reproduire à volonté le phénomène qu'ils étudient (dans des conditions identiques) ;

- le milieu granulaire (ou la suspension) mis en jeu est complexe.

Ils sont donc souvent amenés à utiliser des outils ou des méthodes développés par les physiciens dans des cas bien précis (théorie cinétique, fluide modèle,

turbulence, etc) sans toutefois avoir la certitude que ceux-ci sont applicables aux phénomènes plus complexes qui les concernent. Il semble donc que l'objectif essentiel des futures rencontres entre les différentes communautés devra être de pousser les physiciens et mécaniciens à délimiter au mieux le domaine de validité de leurs résultats vis à vis d'une large gamme de matériaux, en tenant compte des observations des géologues et géophysiciens. Ces derniers devront quant à eux tenter de cerner et simplifier au mieux et de manière acceptable la description physique des phénomènes qu'ils étudient afin de sensibiliser plus directement les physiciens à leurs problèmes. Nous souhaitons que le présent ouvrage constitue un premier pas dans ce sens.

Compte tenu de la diversité des thèmes abordés et de l'imbrication des sujets traités il était difficile d'établir un plan rigoureux reposant sur une séparation en différents domaines scientifiques. Nous avons choisi, dans la première partie de l'ouvrage, de présenter simplement les différents thèmes les uns à la suite des autres en allant des phénomènes naturels chauds, situé en profondeur, et mobilisant de grandes masses de solide, aux phénomènes naturels froids, superficiels et mobilisant de faibles volumes solides. Dans la seconde partie de l'ouvrage, après une introduction générale au comportement des suspensions, on passe en revue le comportement et la structure interne des suspensions en allant des matériaux les plus colloïdaux aux plus granulaires.

Un index général pouvait difficilement être proposé compte tenu de la structure de l'ouvrage et du champ couvert. De façon à permettre au lecteur de parcourir sans encombres et à son propre rythme cet ouvrage nous proposons ci-dessous un tableau récapitulant les différents domaines traités (par chapitre) et les principaux thèmes abordés au sein de chaque chapitre (par mots-clé). Ainsi le lecteur *a priori* concerné par un domaine bien précis pourra rapidement percevoir dans quel chapitre il peut espérer trouver des problématiques ou des phénomènes similaires abordés par l'une ou l'autre des communautés.

Catherine ALLAIN
Philippe COUSSOT
Benoît ILDEFONSE

Chapitre -----	Ch. 1	Ch. 2	Ch. 3	Ch. 4	Ch. 5	Ch. 6	Ch. 7	Ch. 8	Ch. 9	Ch. 10	Ch. 11	Ch. 12	Ch. 13
Mot-clé													
Milieu granulaire			•	•	•	•		•			•	•	•
Colloïde							•		•	•			
Susp. magmatique	•	•					•						
Eau-argile				•					•	•			
Eclt. à surface libre			•	•	•							•	
Bouffées (avalanches)			•	•	•							•	
Charriage						•							
Rhéologie	•	•		•	•		•			•			
Newtonien	•				•		•			•			
Rhéofluidification				•			•			•			
Elasticité							•			•			
Plasticité	•			•	•		•			•			•
Thixotropie							•			•			
Structure interne	•	•							•	•	•	•	•
Sédimentation			•			•		•	•				
Dépôts			•	•	•	•		•	•				
Stratification	•		•			•						•	
Ségrégation	•	•	•			•		•			•		
Dilatance					•						•		•
Transition liq.-sol.	•	•			•				•		•		•
Orientation préférentielle	•	•						•					

Résumés

CHAPITRE 1

Structures et propriétés rhéologiques des magmas

Angel Fernandez, Benoît Ildefonse et Dominique Gasquet

Nous présentons ici quelques repères concernant les viscosités des magmas et les structures qui en résultent. La rhéologie des magmas, qui évolue avec la température et le degré de cristallisation, s'articule autour de deux points importants qui sont 1) l'apparition d'un seuil de contrainte et 2) la connectivité de la phase solide, celle-ci induisant une augmentation de viscosité de plusieurs ordres de grandeur. Après le rappel de ces quelques notions physiques élémentaires, nous présentons un catalogue succinct des principales structures magmatiques et décrivons leurs rapports avec l'évolution des propriétés rhéologiques du magma.

CHAPITRE 2

Écoulement magmatique dans les gabbros et problème des chambres magmatiques sous les dorsales océaniques

Benoît Ildefonse et Adolphe Nicolas

Ce chapitre traite de la structure et de la rhéologie des magmas basaltiques présents dans les chambres magmatiques situées sous les dorsales océaniques. Pour concilier les données géophysiques marines et les études de terrain dans les ophiolites, on doit considérer ces magmas comme des suspensions très concentrées de cristaux dans un liquide basaltique. Les cristaux constituent une phase solide connectée et ne peuvent glisser les uns sur les autres que grâce à leur dissolution locale sous contrainte. La viscosité estimée ($\sim 10^{15}$ Pa.s) est très élevée, caractéristique d'un milieu mécaniquement plus proche d'un solide que d'un liquide magmatique.

CHAPITRE 3

Écoulements pyroclastiques et avalanches de débris en domaine volcanique

Jean-Luc Schneider

Les écoulements granulaires gravitaires volcaniques résultent directement de l'activité éruptive explosive (écoulements pyroclastiques) ou de la déstabilisation des flancs (avalanches de débris). Les écoulements pyroclastiques sont des suspensions concentrées partiellement fluidifiées non turbulentes (écoulements pyroclastiques denses) ou diluées et turbulentes (déferlantes). Les avalanches de débris volcaniques sont des écoulements granulaires concentrés non turbulents très mobiles et rapides. Ces écoulements présentent tous une mobilité remarquable.

CHAPITRE 4

Les laves torrentielles

Philippe Coussot et Maurice Meunier

Les laves torrentielles sont des coulées boueuses et rocailleuses qui surviennent dans le lit des torrents de montagne après de fortes pluies. Ces écoulements se distinguent des autres mouvements de terrain sur forte pente (glissements de terrains, transport solide) par le fait que le matériau constitutif des laves peut en première approximation être considéré comme un fluide visqueux. Deux voies

principales (modèle viscoplastique, modèle de Bagnold) ont été suivies pour modéliser le comportement mécanique des laves suivant la prédominance respectivement de la fraction fine (argileuse) ou de la fraction granulaire.

CHAPITRE 5

Les avalanches

Christophe Ancey et Olivier Marco

Les avalanches sont des écoulements d'une masse de neige sur une pente de montagne consécutifs à une rupture du manteau neigeux. Il est commode de distinguer deux types d'écoulement typiques : (i) l'avalanche en aérosol, qui est un écoulement de particules de glace en suspension dans l'air sous forme d'un aérosol, et (ii) l'avalanche coulante, qui est le déplacement d'une masse de neige le long du sol. La modélisation des avalanches bute contre de nombreux problèmes épineux, ce qui peut expliquer la grande variété des approches développées ces dernières années, dont le présent chapitre tente de dresser un panorama.

CHAPITRE 6

Transport solide par charriage torrentiel

Didier Richard

Le charriage torrentiel est un mode de transport de sédiments que l'on rencontre dans les cours d'eau à fortes pentes. Il présente certaines analogies, mais aussi beaucoup de différences caractéristiques, avec le transport solide par charriage dans les rivières à faible pente. L'établissement de formules, permettant d'évaluer ces transports solides torrentiels intenses, est relativement récente. Ces formules, établies dans le prolongement des formules de transport solide en rivière, comportent encore une marge d'incertitude importante.

CHAPITRE 7

Rhéologie et structure des suspensions concentrées, aspects généraux

Daniel Quemada

Les principes de base de la modélisation rhéologique des dispersions concentrées sont rappelés. Après avoir souligné l'importance de l'analyse dimensionnelle pour identifier les variables pertinentes devant être utilisées dans tout modèle, les différents types de comportement rhéologique, à la fois en régime stationnaire et instationnaire, sont interprétés en termes de changements de structure induits par l'écoulement. L'utilisation du concept de fraction volumique effective des particules (basée sur l'existence d'Unités Structurelles, USs) et des dépendances avec l'écoulement des temps caractérisant la cinétique des USs, complète la modélisation. Différents exemples de comportement sont discutés et comparés aux données expérimentales.

CHAPITRE 8**Sédimentation de particules macroscopiques****Robert Blanc**

On commence par délimiter le sujet traité dans ce chapitre en explicitant ce que le mot "macroscopique" apporte comme spécificité. On rappelle quelques données relatives à la sédimentation d'objets isolés. On s'intéresse ensuite à la sédimentation d'un ensemble d'objets et on montre comment les interactions hydrodynamiques et le volume fini du récipient contribuent à donner aux objets une vitesse de sédimentation collective différente de celle qu'ils ont lorsqu'ils sont seuls dans le fluide. Cependant, la vitesse instantanée d'une particule présente des fluctuations importantes qui donnent naissance à un phénomène de diffusion, la dispersion hydrodynamique, dont on examine la nature et l'influence. On termine par une brève revue des méthodes expérimentales de mesure de la vitesse de sédimentation.

CHAPITRE 9**Sédimentation et agrégation dans les suspensions colloïdales****Catherine Allain et David Senis**

Le terme "colloïdal" s'applique en général à des objets dont la taille caractéristique est inférieure au micron. Il en résulte que les particules d'une suspension colloïdale sont sensibles d'une part à l'agitation thermique, d'autre part aux interactions de nature essentiellement dipolaire et électrostatique. Sous certaines conditions, ces interactions peuvent être attractives, conduisant ainsi à un processus d'agrégation des particules. En présence de gravité, agrégation et sédimentation sont fortement couplées, et il apparaît différents types de comportement en fonction de la fraction volumique en particules.

CHAPITRE 10**Physico-chimie et rhéologie des mélanges argile-eau****Philippe Coussot et Henri Van Damme**

Les particules d'argiles possèdent des caractéristiques particulières : elles sont anisotropes, colloïdales, électriquement chargées et, pour certaines, déformables. Les mélanges eau-argiles sont fondamentalement des suspensions colloïdales dont l'organisation au niveau de la microstructure et le comportement mécanique varient en fonction de nombreux paramètres : type d'argile, concentration solide, concentration en électrolyte, pH, etc. En outre ces mélanges possèdent les propriétés rhéologiques (complexes) des dispersions en général : seuil de contrainte, rhéofluidification, thixotropie, etc.

CHAPITRE 11**Introduction générale aux milieux granulaires****Daniel Bideau**

Les principales caractéristiques des milieux granulaires sont présentées, avec un regard particulier à celles qui concernent leurs propriétés d'écoulement. On insiste sur leur caractère dissipatif, qui est la cause de l'essentiel des instabilités observées. Les différents régimes d'écoulement sont analysés. Une part importante est laissée à la description des mécanismes de ségrégation, qui constituent un des grands sujets actuels dans ce champ scientifique.

CHAPITRE 12

L'hydrodynamique des milieux granulaires

Jean Rajchenbach

On passe en revue les travaux expérimentaux et les résultats théoriques concernant les écoulements de matériaux granulaires secs. On aborde successivement le régime de déformations lentes, qui est principalement régi par les interactions stériques et les forces de friction, le régime d'écoulement rapide, qui met en jeu les collisions inélastiques, et le régime d'écoulement par avalanches intermittentes.

CHAPITRE 13

La mécanique du sable mouillé

Pierre Evesque et Christophe Lanos

Une modélisation du comportement mécanique des milieux granulaires saturés est proposée. Quelques notions élémentaires (frottement, cohésion...) sont rappelées et les interactions entre l'ossature granulaire du milieu et le fluide interstitiel sont analysées et illustrées. La présentation des différents résultats obtenus dans des conditions expérimentales variées, à l'aide des essais œdométrique et triaxial, sert à la construction progressive d'un modèle de comportement. Ce modèle simple permet de comprendre les relations entre le caractère dilatant-contractant du matériau, l'état initial de l'échantillon et l'évolution de son état de contrainte.