

ETUDES

Montagne

n°5



**Rhéologie des boues et laves torrentielles
Etude de dispersions
et suspensions concentrées**

Philippe COUSSOT

**CEMAGREF**

**LABORATOIRE
de
RHÉOLOGIE
(UJF, INPG, CNRS)**

**RHÉOLOGIE DES BOUES
ET LAVES TORRENTIELLES**
**ETUDE DE DISPERSIONS ET
SUSPENSIONS CONCENTRÉES**

P. COUSSOT



CEMAGREF

**CENTRE NATIONAL
DU MACHINISME AGRICOLE
DU GÉNIE RURAL
DES EAUX ET DES FORÊTS**

GROUPEMENT DE GRENOBLE
2, rue de la Papeterie BP 76
38402 St-Martin-d'Hères Cedex
Tél. : 76 76 27 27 - Téléc. : 980 679 F
Télécopie : 76 51 38 03

Les *ÉTUDES* du CEMAGREF

Série : Ressources en eau

N° 1 - Potentiel d'électrode de platine en épuration biologique - 1990, 164 pages - 200 F

N° 2 - Le phosphore et l'azote dans les sédiments du fleuve Charente : variations saisonnières et mobilité potentielle - 1990, 228 pages - 250 F

N° 3 - Typologie aquacole des marais salants de la côte atlantique - 1991, 232 pages - 200 F

N° 4 - Pêche, biologie, écologie des aloses dans le système Gironde-Garonne-Dordogne - 1991, 392 pages - 350 F

N° 5 - La pêche professionnelle fluviale et lacustre en France - 1992, 290 pages - 300 F

N° 6 - Les mono-oxygénases de poissons, un outil pour la caractérisation des pollutions chroniques - 1992, 232 pages - 250 F

Série : Hydraulique agricole

N° 1 - Étude de la qualité des eaux de drainage. Diagnostic de risque de lessivage d'azote en fin de campagne culturale. La tranchée de drainage. Une nouvelle expression de la hauteur équivalente. A propos des coefficients de forme de la nappe libre drainée - 1986, 21 x 29,7 - 182 pages - 200 F

N° 2 - Hydraulique au voisinage du drain. Méthodologie et premiers résultats. Application au diagnostic du colmatage minéral des drains - 1987, 21 x 29,7 - 220 pages - 200 F

N° 3 - Secteurs de références drainage. Recueil des expérimentations - 1988, classeur 20 x 26 - 92 fiches - 150 F

N° 4 - Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA - 1989, 334 pages - 250 F

N° 5 - Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement - 1989, 322 pages - 250 F

N° 6 - Réseaux collectifs d'irrigation ramifiés sous pression. Calcul et fonctionnement - 1989, 140 pages - 150 F

N° 7 - Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions - 1992, 144 pages - 200 F

N° 8 - Estimation de l'évapotranspiration par télédétection. Application au contrôle de l'irrigation - 1990, 248 pages - 250 F

N° 9 - Hydraulique à l'interface sol/drain - 1991, 336 pages - 250 F

N° 10 - Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique - 1991, 248 pages - 200 F

N° 11 - Mise en valeur des sols difficiles. Drainage et après-drainage des argiles vertes - 1991, 140 pages - 150 F

N° 12 - Colmatage des drains et enrobages : état des connaissances et perspectives - 1991, 152 pages - 200 F

N° 13 - Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens - 1992, 100 pages - 150 F

Série : Équipement des IAA

N° 1 - Carbonisateur à pailles et herbes pour les pays en développement - 1990, 56 pages - 100 F

Série : Forêt

N° 1 - Annales 1988 - 1989, 126 pages - 150 F

N° 2 - Le Massif Central Cristallin. Analyse du milieu - Choix des essences - 1989, 104 pages - 150 F

N° 3 - Les stations forestières du pays d'Othe - 1990, 174 pages - 150 F

N° 4 - Culture d'arbres à bois précieux en prairies pâturées en moyenne montagne humide - 1990, 120 pages - 150 F

N° 5 - Annales 1989 - 1991, 196 pages - 150 F

N° 6 - Annales 1990 - 1991, 268 pages - 200 F

N° 7 - Les stations forestières du plateau nivernalis - 1991, 164 pages - 150 F

N° 8 - Les types de stations forestières de Lanmezean, Ger et Moyen Adour - 1991, 436 pages - 250 F

N° 9 - Annales 1991 - 1992, 190 pages - 200 F

Série : Production et économie agricoles

N° 1 - GEDE Logiciel d'aide à la décision stratégique pour l'exploitation agricole - 1992, 206 pages - 200 F

N° 2 - A GREGEDE : méthode de simulation de la production agricole d'une région - Application en Ardèche - 1992, 232 pages - 250 F

Série : Gestion des services publics

N° 1 - Économie et organisation à l'échelle départementale du financement du renouvellement des réseaux d'eau potable - 1991, 76 pages - 150 F

Série : Montagne

N° 1 - Éléments d'hydraulique torrentielle - 1991, 280 pages - 300 F

N° 2 - Aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels - 1992, 152 pages - 150 F

N° 3 - Éléments de pastoralisme montagnard - Tome 1 : Végétation - équipements - 1992, 168 pages - 200 F

N° 4 - Le développement touristique local - Les stations de sports d'hiver - 1993, 344 pages - 350 F

N° 5 - Rhéologie des boues et laves torrentielles - Étude de dispersions et suspensions concentrées - 1993, 416 pages - 400 F

*A commander au CEMAGREF - DICOVA, BP 22, 92162 ANTONY CEDEX - Tél. : (1) 40 96 61 32
Joindre votre paiement à la commande*

Photo de couverture (P. Coussot, CEMAGREF) : Rhéomètre de grande taille. Prototypage destiné à l'étude des lois de comportement de suspensions contenant des particules grossières. Tests *in situ* de dépôts de laves torrentielles.

THESE

présentée par

Philippe COUSSOT

Pour obtenir le titre de DOCTEUR

**de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
GRENOBLE**

(Arrêté ministériel du 23 novembre 1988)

Spécialité : Mécanique

Rhéologie des boues et laves torrentielles Etude de dispersions et suspensions concentrées

Date de soutenance : 9 septembre 1992

Composition du jury :

M. ATTANE	Président
M. POCHAT	Rapporteurs
M. BLANC	
M. PIAU	
M. COMBARNOUS	
M. LUCIUS	
M. MEUNIER	

Le CEMAGREF est un organisme de recherches dans les domaines de l'eau, de l'équipement pour l'agriculture et l'agro-alimentaire, de l'aménagement et de la mise en valeur du milieu rural et des ressources naturelles.

En contact permanent avec les agents économiques et les collectivités, il cherche à constituer des outils mieux adaptés dans différents secteurs d'activités :

- eau, hydrologie, hydraulique agricole, qualité des eaux
- risques naturels et technologiques
- montagne et zones défavorisées
- forêts
- machinisme et équipement agricoles
- équipement des industries agro-alimentaires
- production et économie agricoles.

Le CEMAGREF est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique sous la tutelle des ministères de la Recherche et de l'Espace, de l'Agriculture et du Développement Rural.

Il emploie 970 agents dont 420 scientifiques répartis en 10 groupements : Aix-en-Provence, Antony, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, La Martinique, Montpellier, Nogent-sur-Vernisson, Rennes.

Avant-propos

Ce travail, initié par le CEMAGREF, a été réalisé au sein du Laboratoire de Rhéologie (INPG-UJF-CNRS). (La construction du rhéomètre de grande taille et les expériences sur le terrain ont été réalisées avec l'aide du CEMAGREF.)

Monsieur Jean-Michel PIAU a assuré la direction de ce travail. Je le remercie vivement de la confiance qu'il m'a accordée, de sa rigueur et de ses conseils scientifiques remarquables qui m'ont permis d'élever considérablement le niveau de mon travail, et enfin d'avoir su rester philosophe et transiger face à mon indépendance d'esprit.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur ATTANE, Professeur à l'UJF, pour le plaisir qu'il m'a fait en acceptant la Présidence de mon jury.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur BLANC, Professeur d'Université (IUSTI, Marseille), de m'avoir fait l'honneur d'être membre de mon jury et d'avoir accepté la lourde tâche d'être rapporteur de ce travail.

Je suis particulièrement reconnaissant et heureux que Monsieur Rémy POCHAT (MRT, Dépt. Recherche pour le Développement) ait accepté d'être membre du jury et rapporteur de ce travail. Il a été le premier à me suggérer de faire cette thèse et, depuis mon passage à l'ENGREF, m'a toujours apporté tous ses encouragements.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur COMBARNOUS, Professeur à l'Université de Bordeaux, et à Monsieur LUCIUS, Professeur à l'INPL qui, malgré leurs nombreuses responsabilités, m'ont fait l'honneur d'être membres de mon jury.

Je dois beaucoup à Monsieur Maurice MEUNIER, Ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et Forêts (CEMAGREF), qui, après avoir compris l'importance de la rhéologie pour les écoulements naturels, a eu l'idée du sujet cette thèse, m'a permis de la réaliser au sein d'un laboratoire de recherche fondamentale, et, par les mille et une questions qu'il m'a soumises au début de ce travail, m'a fait mieux percevoir les nombreux aspects du problème.

Les longues heures du jour et de la nuit passées à travailler avec Arkadii LEONOV, Chercheur à l'Université d'Akron (Ohio, U.S.A), m'ont été très profitables et ont donné lieu au chapitre III. Je le remercie ici grandement de son aide.

Merci aux deux stagiaires du CEMAGREF, Pierre CHOLIN et Jérôme JOST, qui m'ont aidé à réaliser les expéditions rhéométriques en montagne, et

sont restés relativement stoïques face à mon mauvais caractère et face à la boue dans laquelle nous baignions parfois.

Une partie de cette thèse doit beaucoup à Monsieur Raymond MURA, ancien Chef de la Division Protection contre les Erosions, qui a très rapidement accepté d'amputer le budget de la Division pour financer la construction du rhéomètre de grande taille.

Merci aux employés de la société SCHIPPERS (Le Touvet) qui ont su mettre mes idées boueuses sous forme métallique, et ont souvent proposé des solutions technologiques astucieuses.

Merci à Madame Hélène GALLIARD, (Ingénieur de Recherche), pour laquelle aucun problème pratique n'est insurmontable, et qui m'a fait profiter de ses innombrables idées, entre autres pour la construction du rhéomètre de grande taille.

Merci à MM. GIROUTRU et BLANC-BRUDE, qui ont toujours été prêts à me fournir leur aide précieuse et sympathique, même quand ma voiture était en panne (ce qui, soit dit en passant, arrive assez souvent).

Les deux stagiaires précédemment cités et moi-même devons beaucoup à Nicole et Alain JAN qui nous ont permis, l'espace de quelques nuits, de ne pas dormir le nez dans la boue. Je n'oublierai pas non plus la colle miracle d'Alain qui a ramené à la raison une jauge de contrainte rebelle, alors que nous divaguions, tels des chercheurs aborigènes, à plusieurs torrents et montagnes du Laboratoire, autour d'une machine rhéométrique récalcitrante.

Merci enfin à tous les membres du Laboratoire de Rhéologie et de la Division Protection contre les Erosions du CEMAGREF, qui m'ont sorti ou mis dans la boue à un moment ou à un autre pendant cette thèse. J'espère que chacun se reconnaîtra car je n'oserai citer personne de peur d'oublier quelqu'un. J'espère aussi que tous me pardonneront d'avoir été pendant ces trois ans aussi peu disponible pour autre chose que du travail.

A celle qui, bien que n'ayant pas choisi de vivre avec les laves torrentielles, n'a pas craqué, A V. Mon A. V.

Résumé.

La rhéologie des laves torrentielles, coulées boueuses et rocailleuses qui surviennent dans le lit des torrents de montagne, est la base nécessaire aux progrès dans la connaissance de ces écoulements et dans la prévention et la protection contre les catastrophes qu'ils provoquent. Les matériaux étudiés, mélanges d'eau, d'argiles, et de grains solides de toutes tailles, sont des fluides très visqueux et complexes. La présente étude fournit d'une part une approche des lois de comportement des suspensions et dispersions concentrées en général, des mélanges boueux fins ou grossiers, et des mécanismes microstructurels qui permettent de les expliquer ; et d'autre part, propose une méthode d'étude et une classification des lois de comportement des laves torrentielles.

Après avoir passé en revue les connaissances acquises concernant les laves torrentielles il apparaît raisonnable de les considérer, à une certaine échelle d'observation, comme des fluides, qui sont en l'occurrence des suspensions et dispersions concentrées. La rhéométrie de ce type de fluides, qui possèdent un seuil de contrainte et sont éventuellement thixotropes, est délicate. De nombreuses précautions doivent être prises et des procédures spéciales doivent être mises en oeuvre.

Un premier type de fluide modèle, les dispersions très concentrées dans un fluide de faible poids moléculaire, a été étudié. Un modèle fondé sur les évolutions de la microstructure, tenant compte de la formation et des ruptures de flocs élastiques de particules, est proposé pour décrire le comportement de ces mélanges. Ce modèle s'applique bien entre autres aux mélanges eau-bentonite, prédit et explique le minimum de la loi de comportement (instabilité) en cisaillement simple de ces mélanges, et décrit le passage du régime statique à l'écoulement par une transition continue. Ce modèle est susceptible d'expliquer les caractéristiques particulières des écoulements de fluides hyperconcentrés observés en Chine.

Un second type de fluide modèle, les suspensions très concentrées, a été étudié. Un modèle tenant compte des interactions au niveau de la microstructure, frottements secs et dissipations visqueuses au sein du fluide interstitiel, et des évolutions de la configuration des particules, est proposé pour décrire le comportement de ces mélanges. Ce modèle s'applique bien à des mélanges d'eau, d'argiles et de billes de polystyrène, et prédit et explique aussi le minimum de la loi de comportement (instabilité) de certains de ces fluides en cisaillement simple.

La rhéologie des mélanges boueux fins naturels est étudiée. On montre que la loi de comportement en cisaillement simple peut être très bien décrite par un modèle de Herschel-Bulkley avec une puissance du gradient

de vitesse inférieur à 0,5. Pour étudier directement la rhéologie de mélanges boueux plus grossiers, un rhéomètre de grande taille, avec une géométrie cylindres coaxiaux (diamètre extérieur 1,2 m, diamètre intérieur 0,8 m), a été construit. Des expériences de rhéométrie sur des dépôts de laves torrentielles ont permis de montrer que le comportement de ces mélanges pouvait être stable (suivant une loi de Herschel-Bulkley), ou instable.

Un complément d'expériences en laboratoire sur des mélanges d'eau, de particules fines et de grains permet d'estimer le supplément de contrainte créé par l'addition de particules grossières dans un mélange boueux. On peut ainsi approcher la loi de comportement des laves complètes. Deux types de laves sont alors mis en évidence : les laves essentiellement boueuses au comportement stable, du type Herschel-Bulkley, et les laves essentiellement granulaires au comportement instable. Les caractéristiques particulières des laves (transport des blocs dans la masse, formation du front, écoulement par bouffées) sont finalement étudiées à la lumière des connaissances acquises sur la rhéologie.

Sommaire

Avant-propos	7
Résumé	9
Sommaire	11
Observation d'une lave	21
INTRODUCTION GENERALE	27
I Première approche des lois de comportement des laves torrentielles - Programme d'étude -	33
Introduction	35
I.1 Délimitation du problème	36
I.2 Caractéristiques générales des laves torrentielles	37
I.3 Travaux antérieurs concernant la rhéologie des laves torrentielles	38
I.3.1 Classification	38
I.3.2 Modèles proposés pour décrire le comportement des laves torrentielles	41
I.3.2.1 Modèle de Bingham	41
I.3.2.2 Modèle viscoplastique généralisé	44
I.3.2.3 Modèle de Bagnold	44
I.3.2.4 Commentaires	46
I.3.3 Rhéologie du béton frais	46
I.3.4 Rhéométrie dans le domaine des laves torrentielles	47
I.3.5 Conclusion	53
I.4 Approximation des milieux continus	54
I.5 Lois de comportement	56
I.6 Importance des constituants des laves torrentielles	58
I.6.1 Les constituants des laves torrentielles	58
I.6.2 Propriétés des constituants au sein du mélange	59
I.6.3 Paramètres importants	60
I.6.3.1 Concentration	60
I.6.3.2 Granulométrie	61
I.6.3.3 Type des argiles	61
I.6.3.4 Commentaires	61
I.7 Les interactions au sein d'un mélange boueux	62
I.7.1 Forces de Van der Waals	62
I.7.2 Forces répulsives entre molécules d'eau	63
I.7.3 Le mouvement brownien	65
I.7.4 Interactions entre particules d'argiles en présence d'eau	65
I.7.5 Interactions entre grains	70

I.7.6 Conclusion : interactions dans la masse	70
I.8 Quelques conséquences sur le comportement	72
I.8.1 Viscosité	72
I.8.2 Seuil de contrainte	73
I.8.3 Propriétés temporelles	73
Conclusion : Programme d'étude des lois de comportement des mélanges boueux	75
Bibliographie	76
II Techniques de rhéométrie en cisaillement simple de fluides à seuil : dispersions et suspensions concentrées	81
Introduction	83
II.1 Les appareils utilisés	84
II.1.1 Rhéomètre à contrainte contrôlée	84
II.1.2 Rhéomètre à vitesse contrôlée	84
II.2 Avantages et inconvénients des différentes géométries de mesure pour la rhéométrie en cisaillement simple des suspensions et/ou dispersions concentrées	84
II.2.1 Capillaire	84
II.2.2 Cylindres coaxiaux	85
II.2.3 Plans parallèles	86
II.2.4 Cône-plan	86
II.2.5 Plan-cône troué	87
II.3 Phénomènes perturbateurs des écoulements	88
II.3.1 Glissement aux parois	88
II.3.2 Fracturation	89
II.3.3 Contrôle du glissement ou de la fracturation	90
II.3.4 Creusement	91
II.3.5 Evaporation	94
II.3.6 Sédimentation	94
II.3.7 Conclusion	95
II.4 Procédures expérimentales	96
II.4.1 Reproductibilité des mesures	96
II.4.2 Détermination du seuil de contrainte	97
II.4.3 Régime permanent	99
II.4.4 Thixotropie	99
II.4.5 Oscillations	102
II.4.6 Mesures des contraintes normales	102
Conclusion	103
Bibliographie	104
Annexe II.1 : Calculs de rhéométrie	105
A.II.1.1 Capillaire	105
A.II.1.2 Cône-plan	106

A.II.1.3 Plan-cône troué	106
A.II.1.4 Plans parallèles	107
III Rheology of concentrated dispersed systems in low molecular weight matrix	109
Summary	112
1. Introduction	113
2. Theoretical	114
2.1 Qualitative considerations	114
2.2 Formulation of simplified constitutive equations for simple shearing	116
2.3 Shear deformation regimes	120
2.3.1 Gel (elastic) behaviour of dispersed systems	120
2.3.2 Steady shear flows	120
2.3.3 Deformation regimes under given shear rate	125
2.3.4 Deformation regimes under given shear stress	129
3. Experimental	139
3.1 Materials	139
3.2 Instruments	140
3.3 Experimental problems	141
3.4 Experimental procedure	144
4. Experimental results and comparison with the theory	147
4.1 Model parameters evaluation	147
4.2 Results for the grease	147
4.3 Results for BWM	150
5. Conclusions	158
Appendix 1 : 3D formulation of the constitutive equations	159
Appendix 2 : A sketch of thermodynamics for dispersed systems	160
References	163
Main notations	166
IV Rhéologie des suspensions très concentrées en particules solides non interactives	169
Introduction	171
IV.1 Schéma physique	178
IV.1.1 Matériau étudié	178
IV.1.2 Schéma physique général	179
IV.2 Description de la configuration instantanée	186
IV.2.1 Nombre de contacts	186
IV.2.2 Evolution de la configuration	187
IV.3 Expression générale du tenseur des contraintes	189

IV.4 Cinématique	197
IV.5 Calcul du tenseur des contraintes	201
IV.5.1 Forces intervenant lors des contacts lubrifiés	202
IV.5.2 Forces intervenant lors des contacts directs	202
IV.5.3 Expression du tenseur des contraintes	204
IV.6 Etude du cisaillement simple	206
IV.6.1 Equations régissant l'écoulement en cisaillement simple	206
IV.6.2 Régime permanent	208
IV.6.3 Etude de la stabilité des écoulements à contrainte contrôlée	209
IV.6.4 Etude de la stabilité des écoulements à vitesse contrôlée	210
IV.6.5 Régime transitoire à vitesse imposée	210
IV.7 Nombre de contacts en régime permanent et temps caractéristique	214
IV.8 Expériences	215
IV.8.1 Les fluides testés	215
IV.8.2 Préparations des mélanges	216
IV.8.3 Appareils utilisés	216
IV.8.3.1 Rhéomètres	216
IV.8.3.2 Géométrie de mesure	216
IV.8.4 Procédure expérimentale	217
IV.8.5 Problèmes et précautions lors des expériences	217
IV.8.6 Résultats et comparaison avec le modèle	220
IV.8.6.1 Fluides A et B	221
IV.8.6.2 Fluides I et II	224
IV.8.7 Réflexions sur d'éventuels effets parasites pouvant laisser croire à une instabilité	233
IV.8.8 Commentaires	234
Conclusion	236
Annexe IV.1	238
Annexe IV.2	238
Principales notations	239
Bibliographie	241
V Rhéologie des suspensions boueuses fines	245
Introduction	247
V.1 Travaux antérieurs	248
V.2 Les fluides étudiés	250
V.2.1 Origine et caractéristiques des matériaux	250
V.2.2 Préparation des mélanges	251
V.3 Procédure expérimentale	252
V.3.1 Appareils utilisés	252
V.3.2 Procédure et problèmes expérimentaux	253
V.4 Résultats expérimentaux	254

V.4.1 Mélange eau-kaolinite	254
V.4.1.1 Propriétés générales	254
V.4.1.2 Comportement des mélanges eau-kaolinite à différentes concentrations	256
V.4.2 Principales propriétés des autres mélanges	257
V.4.3 Influence de certains paramètres	259
V.4.3.1 Influence du mode de préparation	259
V.4.3.2 Influence de la composition	260
V.4.3.3 Influence de la concentration	261
V.4.3.4 Influence de la température	261
V.4.3.5 Influence du pH et de la salinité	268
V.4.2.6 Modélisation	269
V.5 Comparaison avec les mesures de mécanique des sols	274
Conclusion	276
Bibliographie	277
VI Rhéométrie à grande échelle pour l'étude directe des lois de comportement de suspensions grossières	279
Introduction	281
VI.1 Détermination d'un rhéomètre de grande taille adapté	283
VI.1.1 Choix de la géométrie	283
VI.1.2 Dimensions du rhéomètre construit	286
VI.1.3 Etat des surfaces	287
VI.1.4 Motorisation	287
VI.1.5 Contrôle du système	288
VI.1.6 Mesure du couple	288
VI.1.7 Mesure de la vitesse	289
VI.1.8 Commentaire	289
VI.2 Calculs de rhéométrie dans le cas d'un écoulement entre cylindres coaxiaux avec un grand intervalle	289
VI.2.1 Equations générales	289
VI.2.2 Hypothèses principales	291
VI.2.3 Gradient de vitesse et contrainte tangentielle	292
VI.2.4 Contraintes normales	294
VI.2.5 Equation de la surface libre	294
VI.3 Problèmes théoriques posés par la géométrie cylindres coaxiaux avec un grand intervalle dans le cas d'expériences avec des fluides contenant des particules grossières	295
VI.3.1 Compatibilité du champ des vitesses	295
VI.3.2 Existence d'une relation univoque entre la contrainte tangentielle et le gradient de vitesse	296
VI.3.2.1 Cas des matériaux ayant un comportement stable	296
VI.3.2.2 Cas des matériaux ayant un comportement instable	297
VI.3.3 Perturbations de l'écoulement dues au fond fixe	297

VI.3.4 Perturbations du cisaillement dues à la surface libre	298
VI.3.5 Ecoulements secondaires	299
VI.3.6 Inhomogénéité du matériau	299
VI.3.7 Contrôle du cisaillement	302
VI.4 Etalonnage du rhéomètre - Expériences avec des fluides modèles	302
VI.5 Expériences sur le terrain	303
VI.5.1 Organisation des expériences	303
VI.5.1.1 Choix du dépôt	303
VI.5.1.2 Prélèvement	304
VI.5.1.3 Tamisage	304
VI.5.1.4 Mélange	305
VI.5.1.5 Autres concentrations	305
VI.5.1.6 Mesure de la concentration	305
VI.5.1.7 Granulométrie de la fraction solide	306
VI.5.2 Procédure expérimentale	307
VI.5.3 Problèmes expérimentaux	307
VI.5.3.1 Sédimentation aux faibles concentrations solides	307
VI.5.3.2 Fracturation aux fortes concentrations solides	308
VI.5.3.3 Migration horizontale des particules	308
VI.5.4 Contrôle du cisaillement interne	308
VI.5.5 Effets de bord	311
VI.6 Résultats expérimentaux	311
VI.6.1 Généralités	311
VI.6.2 Matériaux au comportement instable	312
VI.6.3 Matériaux au comportement stable	313
VI.6.4 Commentaires	318
Conclusion	320
A.VI.1 Etalonnage de l'appareil	322
A.VI.1.1 Les frottements	322
A.VI.1.2 Etalonnage du capteur de vitesse	323
A.VI.1.3 Etalonnage du capteur de couple	323
A.VI.1.4 Incertitudes de mesures	324
A.VI.2 Mesures réalisées avec le rhéomètre de terrain	326
Bibliographie	329
VII Rhéologie des laves torrentielles	331
Introduction	333
VII.1 Analyse des résultats précédents	334
VII.2 Importance de la fraction de particules très grossières (diamètre > 2 cm) sur le comportement des laves torrentielles	335
VII.3 Modifications de la loi de comportement d'un mélange boueux par un ajout de particules	338
VII.3.1 Schéma physique	338

VII.3.2	Modélisation	346
VII.3.3	Cas d'une granulométrie suivant une loi de puissance	352
VII.3.4	Expériences	353
VII.3.4.1	Variation de la concentration de particules ajoutées	353
VII.3.4.2	Variation de la granulométrie	359
VII.3.5	Validité des hypothèses concernant les termes de contrainte dus à l'inertie des différents éléments de la suspension	363
VII.3.5.1	Turbulence au sein du fluide interstitiel	363
VII.3.5.2	Fluctuations locales du mouvement des éléments de fluide	363
VII.3.5.3	Les chocs	365
VII.3.6	Conclusion	365
VII.4	Classification des écoulements de matériaux naturels saturés sur forte pente	366
VII.4.1	Réflexions qualitatives	366
VII.4.2	Résultats expérimentaux	367
VII.4.3	Classification	370
VII.5	Estimation de la loi de comportement d'une lave naturelle	372
VII.5.1	Rhéologie du corps des laves torrentielles	372
VII.5.2	Méthode pratique d'estimation de la loi de comportement d'une lave torrentielle complète (type et niveau de contrainte)	373
VII.5.3	Rhéologie du front des laves torrentielles	375
VII.6	"Comportement équivalent" des laves torrentielles complètes	376
	Conclusion	378
	Bibliographie	380
Annexe VII.1	Calcul de la granulométrie complète d'un dépôt de lave	382
	Principales notations	384
VIII	Explications des caractéristiques particulières des laves torrentielles	387
	Introduction	389
VIII.1	Ecoulement d'une lave torrentielle dans un canal de pente positive	390
VIII.1.1	Rhéologie des boues et laves torrentielles	390
VIII.1.2	Régime d'écoulement	390
VIII.1.3	Écoulement d'une lave dans un canal	391
VIII.2	Transport des blocs à la surface ou dans le corps de la lave	393
VIII.2.1	Approche générale du problème	393
VIII.2.2	Transport d'un bloc dans une coulée de lave torrentielle : tentative d'explication par la loi de comportement du fluide environnant	395
VIII.2.2.1	Support des blocs au repos	396

VIII.2.2.2	Transport d'un bloc dans le fluide en écoulement	396
VIII.2.2.3	Explication du transport des blocs dans les laves	400
VIII.3	Formation du front	401
VIII.4	L'écoulement des laves par bouffées	406
	Conclusion	409
	Bibliographie	410
 CONCLUSION GENERALE		 413
	Publications	416