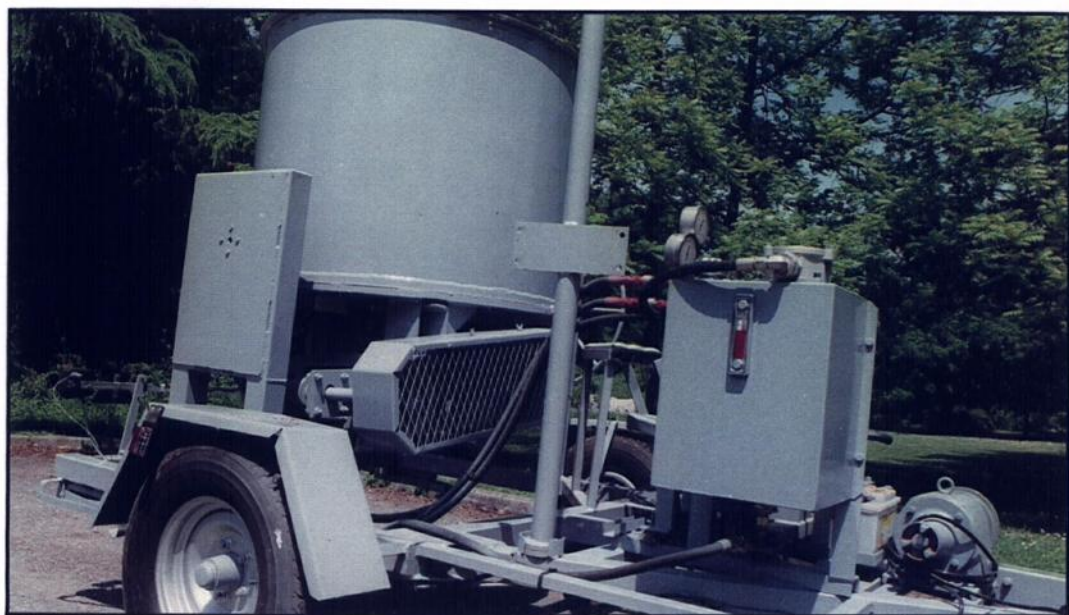


ETUDES

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. Prototypé 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 |