

Ecole Centrale de Nantes

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR, GÉOSCIENCE, ARCHITECTURE

Année 2012

Thèse de DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par :

YACINE SAIL

le 25 juin 2012
à l'IUT de Saint Nazaire

TITRE

**CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DE L'ÉROSION DE VOLUME
DE MATÉRIAUX PULVÉRULENTS**

JURY

Rapporteurs : EL YOUSOUFI Moulay Said
FAURE Yves-Henri

Professeur, LMGC, Université Montpellier 2
Maître de Conférences (HDR), LTHE, Université Joseph Fourier, Grenoble

Examineurs : HICHER Pierre Yves
MAROT Didier
NAAIM Mohamed
SIBILLE Luc

Professeur, GeM, Ecole Centrale de Nantes
Maître de Conférences (HDR), GeM, Université de Nantes
Directeur de Recherches, IRSTEA Grenoble
Maître de conférences, GeM, Université de Nantes

Invité : FRY Jean Jaques

Ingénieur Expert EDF CIH, Bourget du Lac

Directeur de thèse : Pierre Yves HICHER

Laboratoire : GeM

Co-encadrants : Didier MAROT et Luc SIBILLE

Laboratoire : GeM

Table des matières

Introduction générale.....	1
1. Cadre général de l'étude et problématique scientifique	1
2. Objectifs de l'étude et démarche scientifique	2
I. Etude bibliographique.....	5
I.1. Terminologie et définitions.....	5
I.1.1. Terminologie à l'échelle des ouvrages.....	6
I.1.2. Terminologie à l'échelle des échantillons.....	11
I.1.3. Terminologie à l'échelle des grains	13
I.1.4. Analyse sur la terminologie	14
I.2. Initiation de la suffusion.....	14
I.2.1. Critères granulométriques	14
I.2.2. Analyse synthétique des critères granulométriques	22
I.2.3. Critères géométriques	22
I.2.4. Analyse synthétique des critères géométriques.....	25
I.2.5. Critères hydrauliques	25
I.2.5.1. Critères hydrauliques basés sur le gradient hydraulique critique.....	25
I.2.5.2. Critères hydrauliques basés sur la contrainte de cisaillement critique.....	31
I.2.5.3. Critères hydrauliques basés sur la vitesse de pore	33
I.2.6. Analyse synthétique des critères hydrauliques.....	34
I.2.7. Combinaison des critères géométriques et hydrauliques	35
I.2.8. Approche énergétique	39
I.3. Paramètres influençant le développement de la suffusion	43
I.3.1. Effet de la teneur en fines	44
I.3.2. Synthèse sur l'effet de la teneur en fines	49
I.3.3. Effet de l'état de contrainte :	49
I.3.4. Synthèse sur l'effet de l'état des contraintes.....	51
I.4. Effets induits de la suffusion sur le comportement hydraulique et mécanique.....	51
I.4.1. Effets induits sur le comportement hydraulique	51
I.4.2. Effets induits sur le comportement mécanique	53
I.5. Conclusion	54
II. Dispositif expérimental, matériaux et protocole	56
II.1. Descriptif du montage et précision des mesures	56
II.1.1. Principe général	56
II.1.2. Cellule oedo-perméamétrique	57
II.1.3. Système de récolte de l'effluent.....	59
II.1.3.1. Premier dispositif	59
II.1.3.2. Amélioration du dispositif avec échantillonnage	60

II.1.4.	Dispositif de chargement axial.....	61
II.1.5.	Dispositif hydraulique.....	62
II.1.6.	Dispositif gamma-densimétrique	63
II.1.6.3.	Principe général.....	63
II.1.6.4.	Quantification de la précision de mesure	65
II.1.7.	Ensemble de pilotage et d'acquisition.....	67
II.1.8.	Tableau de commande	69
II.2.	Matériaux testés	70
II.2.1.	Billes de verre	70
II.2.2.	Sol naturel	72
II.3.	Procédure expérimentale et validation	73
II.3.1.	Préparation de l'échantillon	73
II.3.1.1.	Modes de préparation pour les mélanges de billes de verre	73
II.3.1.2.	Modes de préparation pour le sol naturel	75
II.3.2.	Consolidation.....	76
II.3.3.	Chargement hydraulique.....	76
II.3.4.	Analyse granulométrique	77
II.3.4.1.	Analyse de l'état initial.....	77
II.3.4.2.	Analyse après érosion.....	77
II.3.5.	Validation de la procédure expérimentale.....	78
II.3.6.	Validation des mesures de masse érodée, tassement et variation de densité.....	79
II.3.6.1.	Confrontation de la masse érodée avec la déformation axiale et la densité.....	79
II.3.6.2.	Discussion des mesures	82
II.4.	Programme d'essais.....	85
III.	Analyse phénoménologique	88
III.1.	Caractérisation de la suffusion sur le mélange de billes de verre contenant 40% de fines.....	88
III.1.1.	Principe et objectif.....	88
III.1.2.	Identification des processus.....	88
III.1.3.	Evolution des propriétés hydrauliques.....	96
III.1.4.	Confrontation avec des essais de la littérature	100
III.1.5.	Quantification de l'érosion	100
III.2.	Caractérisation de la suffusion sur le mélange de billes de verre contenant 20% de fines.....	104
III.2.1.	Analyse des propriétés hydrauliques et géotechniques.....	104
III.2.2.	Quantification de l'érosion	114
III.3.	Comparaison phénoménologique entre 40 et 20% de fines	115
IV.	Sensibilité à la suffusion et conséquences mécaniques.....	118
IV.1.	Introduction.....	118

IV.2.	Définition des grandeurs caractérisant le chargement hydraulique	118
IV.3.	Représentation du taux d'érosion surfacique en fonction du chargement hydraulique.....	123
IV.4.	Prise en compte de perturbations expérimentales	125
IV.5.	Analyse à l'aide du traitement des données A.....	125
IV.5.1.	Influence de la longueur de l'échantillon	128
IV.5.2.	Calcul du taux d'érosion \dot{m}_p par unité de surface porale.....	133
IV.5.3.	Prise en compte de la longueur de l'échantillon et étude de l'influence du pourcentage de fines sur la suffusion	138
IV.5.4.	Influence de la contrainte axiale.....	141
IV.5.5.	Influence de l'historique de chargement sur le développement de la suffusion et l'initiation du débouillage localisé	147
IV.6.	Analyse à l'aide du traitement des données B.....	147
IV.6.1.	Influence de la longueur de l'échantillon	147
IV.6.2.	Influence du pourcentage de fines	149
IV.6.3.	Influence de la contrainte axiale.....	151
IV.6.4.	Prise en compte de l'historique de chargement	152
IV.7.	Synthèse de la caractérisation à la sensibilité à la suffusion	158
IV.8.	Analyse des conséquences de la suffusion sur le comportement mécanique de l'échantillon.....	160
IV.8.1.	Introduction	160
IV.8.2.	Influence du pourcentage de fines sur la porosité.....	160
IV.8.3.	Influence du pourcentage de fines sur les déformations axiales.....	161
IV.8.4.	Prévision du débouillage	166
IV.8.5.	Synthèse sur les conséquences mécaniques de la suffusion	167
V.	Application à l'étude d'un sol d'une digue	170
V.1.	Principe et objectifs.....	170
V.2.	Granulométrie du sol testé	170
V.3.	Résultats des essais.....	171
V.3.1.	Paramètres expérimentaux	171
V.3.2.	Débit injecté et perméabilité	171
V.3.3.	Masse érodée et tassement	172
V.3.4.	Variations de densité.....	173
V.3.5.	Variations de charge hydraulique locale	174
V.4.	Influence de la mise en place.....	176
V.5.	Confrontation des résultats obtenus avec deux appareillages différents.....	180
V.6.	Synthèse	182

<i>Conclusion</i>	184
<i>Perspectives</i>	188
<i>Références bibliographiques</i>	190
<i>Annexe 1 : Principe du fonctionnement des deux centrales de pilotage et d'acquisition</i>	198
<i>Annexe 2 : Résultats bruts de l'ensemble des essais effectués</i>	200