



HAL
open science

Influence des hétérogénéités granulaires sur la suffusion des sols

Mohamad Oueidat

► **To cite this version:**

Mohamad Oueidat. Influence des hétérogénéités granulaires sur la suffusion des sols. Génie civil. Normandie Université, 2022. Français. NNT : 2022NORMMLH14 . tel-04081877

HAL Id: tel-04081877

<https://theses.hal.science/tel-04081877v1>

Submitted on 26 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité GENIE CIVIL

Préparée au sein de l'Université Le Havre Normandie

Influence des hétérogénéités granulaires sur la suffusion des sols

Présentée et soutenue par
MOHAMAD OUEIDAT

Thèse soutenue le 25/10/2022
devant le jury composé de

MME NADIA SAIYOURI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE DE BORDEAUX	Rapporteur du jury
M. PASCAL VILLARD	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES	Rapporteur du jury
M. ABDELKRIM BENNABI	CHARGE DE RECHERCHE, ESTP PARIS	Membre du jury Co-encadrant
MME RACHIDA IDIR	CHARGÉE DE RECHERCHE, CEREMA	Membre du jury
M. TARIQ OUAHBI	MAÎTRE DE CONFERENCES (HDR), Université Le Havre Normandie	Membre du jury Co-encadrant
MME ANNE PANTET	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Le Havre Normandie	Membre du jury
M. ERIC VINCENS	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ECOLE CENTRALE LYON	Président du jury
M. AHMED BENAMAR	MAÎTRE DE CONFERENCES (HDR), Université Le Havre Normandie	Directeur de thèse

Thèse dirigée par AHMED BENAMAR (Laboratoire Ondes et Milieux Complexes)



LABORATOIRE ONDES
et MILIEUX COMPLEXES

Remerciements

Je profite de cette occasion pour exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce cette thèse.

Tout d'abord, ma reconnaissance et mes remerciements s'adressent tout particulièrement à mon directeur de thèse Mr. Ahmed Benamar, pour toute la confiance qu'il a placé en moi en acceptant de diriger cette thèse. Par sa rigueur scientifique, sa disponibilité sans limites, ses conseils pertinents, ses encouragements; travailler avec lui a été pour moi le moment le plus marquant que ce soit grâce à son aide scientifique, mais aussi par son apport humain. Je veux également remercier mes co-encadrants de thèse Mr. Tariq Ouahbi et Mr. Abdelkrim Bennabi, pour la disponibilité et l'aide précieuse. Votre patience, votre soutien, vos commentaires, vos remarques et votre engagement m'ont aidé à bien accomplir la thèse.

Mes remerciements vont également aux membres du jury Mme Nadia Saiyouri, professeur à l'Université de Bordeaux et Mr. Pascal Villard, professeur à l'Université de Grenoble Alpes qui ont accepté de lire, de commenter et de juger ce manuscrit en qualité de rapporteurs. Je remercie également Mme Rachida Idir, chargée de recherche à Cerema et Mr. Eric Vincens, professeur à l'Ecole centrale de Lyon et Mme Anne Pantet, professeur à l'université du Havre pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je suis également reconnaissant à l'équipe de personnels du laboratoire LOMC pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer cette thèse au sein de son équipe. En outre, je suis reconnaissant au groupe amical et joyeux des collègues que j'ai eu la chance de rencontrer dans mon travail quotidien, notamment : Mohammed, Hanan, Ahmad, Juliette, Joseph, Hussein, Mostafa, Asmar, pour tous les moments partagés et souvenirs inoubliables.

Enfin, je tiens à remercier ma famille, ma chère Farah, mes amis au Liban et en France pour m'avoir soutenu pendant mon séjour en France.

Merci à tous ceux et celles qui m'ont permis, de près ou de loin de mener à bien ce travail.

Merci à vous tous...

Sommaire

Introduction générale	1
<u>Partie I; Synthèse bibliographique</u>	
Chapter 1 : Approches expérimentales	7
1.1 Introduction	7
1.2 Typologie de l'érosion	8
1.3 Essai de suffusion en laboratoire	10
1.3.1 Dispositif d'essais	10
1.3.2 Charge hydraulique	11
1.3.3 Critères d'instabilité interne à la suffusion	12
1.3.4 Paramètres agissant sur la suffusion	21
1.3.5 Quantification de la suffusion	24
1.4 Les hétérogénéités induites dans le sol et leurs effets sur la suffusion	27
1.4.1 Processus de suffusion hétérogène induit	29
1.4.2 Hétérogénéité structurale du milieu	32
1.5 Conclusion	38
Chapter 2 : Approches numériques	41
2.1 Introduction	41
2.2-Méthode des éléments discrets (DEM)	41
2.2.1 Cycle de calcul	42
2.2.2 Loi de contacts	42
2.2.3 Conditions de stabilité	43
2.3 Couplage CFD-DEM	44
2.4 Simulation numérique de la suffusion	45
2.5 Modèle analytique	48
2.6 Conclusion	49
<u>Partie II; Etude expérimentale de la suffusion</u>	
Chapter 3 Essais sur colonne 1 (Petite échelle)	53
3.1 Introduction	53
3.2 Matériaux et méthodes	53
3.3 Résultats et discussions	60
3.4 Conclusion	70
Chapter 4 Essai sur colonne 2 (grande échelle)	73
4.1 Introduction	73
4.2 Matériaux et Méthodes	73
4.3 Résultats et discussions	81
4.4 Conclusion	92

4.5 Synthèse générale	93
Chapter 5 : Etude de la suffusion à l'échelle du pore	95
5.1 Introduction	95
5.2 Essai de suffusion sur un milieu granulaire modèle	95
5.2.1 Matériaux et méthodes	95
5.2.2 Résultats et discussions	102
5.3 Etude à l'échelle micro par tomographie X	107
5.3.1 Tomographe à rayons X	108
5.3.2 Traitement d'images	109
5.3.3 Profil vertical de la porosité	110
5.3.4 Microstructure pré/post suffusion	113
5.4 Conclusion	117
<u>Partie III; Modélisation numérique de la suffusion</u>	
Chapter 6 : Modélisation par éléments discrets (DEM) de la suffusion dans un milieu granulaire.....	121
6.1 Introduction	121
6.2 Modélisation de la suffusion par DEM-CFD	121
6.2.1 Paramètres du modèle	122
6.2.2 Modélisation de la phase solide	122
6.2.3 Modélisation de la phase fluide	126
6.2.4 Résultats et discussion	130
6.3 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux.....	143
6.3.1 Modélisation physique	143
6.3.2 Résultats et discussions	144
6.4 Conclusion	146
Conclusions générales et perspectives	149
Références bibliographiques	151

Liste des figures

Figure 1.1 Les conditions d'initiation de l'érosion interne (Garner et Fannin 2010)	8
Figure 1.2 Les différents mécanismes d'érosion interne (Bambara 2016)	9
Figure 1.3 Colonne de Suffusion (Benamar et al. 2019)	10
Figure 1.4 Oedo-perméamètre (Sail et al. 2011)	11
Figure 1.5 Schéma d'une cellule triaxiale modifiée (Bendahmane 2008)	11
Figure 1.6 Critère de Kezdi (1979)	13
Figure 1.7 Critère de Kenney et Lau (1985)	13
Figure 1.8 Critère de Lafleur (1989)	14
Figure 1.9 Critère de Burenkova (1993)	14
Figure 1.10 Méthode alternative d'évaluation de la stabilité interne des mélanges Limon-sable-gravier à granulométrie étalée (Wan et Fell 2008)	15
Figure 1.11 Analyse comparative des critères de Kezdi et Kenney & Lau (Li et Fannin 2008)	16
Figure 1.12 Critère de Adel (1988)	16
Figure 1.13 Evolution de la vitesse d'écoulement en fonction du gradient appliqué (Skempton et Brogan, 1994)	17
Figure 1.14 Critère de Skempton et Brogan (1994)	17
Figure 1.15 Enveloppe de rupture en fonction de la contrainte et du gradient (Li and Fannin, 2012) .	19
Figure 1.16 Comparaison du modèle avec les résultats expérimentaux (Moffat et Herrera, 2015)	20
Figure 1.17 Influence de la contrainte appliquée sur le gradient critique: (a) cas isotrope; and (b) cas anisotrope (Liang et al. 2019)	21
Figure 1.18 Variation de la masse érodée cumulée et la conductivité hydraulique (Seghir, 2012)	22
Figure 1.19 Variation de la masse érodée cumulée et la conductivité hydraulique des matériaux testés (Seghir, 2012)	23
Figure 1.20 Gradient hydraulique critique and déformation volumique en fonction de la teneur en fines initial (Prasomsri et al. 2021)	24
Figure 1.21 Evolution de (a) la concentration de l'effluent ; (b) la masse érodée cumulée en fonction du temps (Seghir et al. 2014)	24
Figure 1.22 Évolution de la conductivité hydraulique en fonction du temps (Rochim et al. 2017)	26
Figure 1.23 Evolution des gradients hydrauliques locales (Moffat et al. 2011)	27
Figure 1.24 Processus de suffusion ; (a) état initial ; (b) Hétérogénéités transversales ; (c) Hétérogénéités longitudinales et chemins préférentiels (Nguyen et al. 2019)	29
Figure 1.25 (a) Couche aval post suffusion (b) Courbe granulométrique des couches avales (pre/post suffusion) (Benamar et al. 2019)	30
Figure 1.26 Essai de suffusion dans une chambre à tomographie (Nguyen 2018)	31
Figure 1.27 Coupes médianes verticales de pendant l'essai de suffusion (Nguyen et al. 2019a)	31
Figure 1.28 Coupes transversales à la surface pendant l'essai de suffusion (Nguyen et al. 2019a)	32
Figure 1.29 Profils longitudinaux de la teneur en fines et de l'indice de vides (Nguyen et al. 2019)	32
Figure 1.30 Suffusion dans un sol sablo-graveleux présent une hétérogénéité localisée OFG (Luo et Huang 2020)	34
Figure 1.31 Évolution des gradients hydrauliques locaux (rouge : fort, orange : moyen, vert : faible) pendant l'essai de suffusion sans OFG (Luo et Huang 2020)	34
Figure 1.32 Évolution des gradients hydrauliques locales (rouge : fort, orange : moyen, vert : faible) pendant l'essai de suffusion avec OFG (Luo et Huang 2020)	35
Figure 1.33 Écoulements parallèle et perpendiculaire aux interfaces séparant les différentes couches (Pachideh et Hosseini 2019)	35

Figure 1.34 Configurations testées (F: fraction fine, G: fraction grossière) et comparaison entre la masse érodée pour les différents essais (Karoui 2015).....	36
Figure 1.35 Suffusion autour de la base du mur cut-off et filtration dans la fondation de sol alluviale bicouche (Luo 2020)	36
Figure 1.36 Influence du rapport (D_{c35}/d_{85SA}) sur les conditions hydrauliques critiques à l'initiation de la suffusion et à l'éruption Luo et al. (2020)	37
Figure 1.37 Dispositif de mise en place du sol par ségrégation (Karoui 2015)	38
Figure 1.38 Indice de ségrégation dans les différentes couches avant et après suffusion (Karoui 2015)	38
Figure 2.1 Cycle de calcul dans PFC.....	42
Figure 2.2 Loi d'interactions (Oda et Iwashita 2000)	43
Figure 2.3 Représentation numérique du couplage Solide-Fluide (Shafipour et Soroush 2008).....	45
Figure 2.4 Transport des particules dans un sol base-filtre (Huang et al. 2014)	45
Figure 2.5 Pourcentage d'érosion dans chaque couche (Zhang et al. 2020)	46
Figure 2.6 La perte en fines et l'indice de vides dans les différentes couches de l'échantillon (Hu et al. 2020)	47
Figure 2.7 Comparaison des courbes granulométriques numériques et expérimentales du sable de fontainebleau (Hama et al. 2016).....	47
Figure 2.8 Modélisation de la suffusion sur PFC3D (Hama et al. 2016).....	48
Figure 2.9 Evolution de la concentration et de la masse érodée cumulée en fonction du temps (Seghir et al. 2014)	49
Figure 3.1 (a) Matériaux utilisés A : sable Hostun , B : sable grossier, C :Kaolinite, D : Limon , E : Illite ; (b) Courbe granulométrique des matériaux utilisés.....	55
Figure 3.2 Schéma du dispositif expérimental	56
Figure 3.3 Etalonnage du Kaolinite	56
Figure 3.4 Mélange sable d'Hostun avec Limon	57
Figure 3.5 Courbe granulométrique des mélanges obtenus (a) Kaolinite (b) Illite (c) Limon.....	57
Figure 3.6 Les configurations d'hétérogénéité testées : Centrale, Avale, Référence, Distribuée.....	58
Figure 3.7 Evolution de (a) concentration (b) débit volumique (c) Cinétique d'érosion (d) masse érodée (K20D)	60
Figure 3.8 Evolution de la cinétique d'érosion en configuration d'hétérogénéité distribuée pour les différentes fines (kaolinite, illite, limon)	61
Figure 3.9 Evolution de la masse érodée cumulée du (a) Kaolinite (b) Illite (c) Limon.....	62
Figure 3.10 Masse érodée cumulée pour chaque configuration testée	63
Figure 3.11 Relation entre masse érodée cumulée et pourcentage d'hétérogénéité	66
Figure 3.12 Evolution de la conductivité hydraulique relative en fonction de la masse relative érodée (même durée dans tous les essais).....	68
Figure 4.1 Schéma du dispositif expérimental	74
Figure 4.2 Couvercle et grille de la colonne de suffusion	75
Figure 4.3 Colonne de suffusion et disposition des couches de sol	75
Figure 4.4 Capteur de pression	75
Figure 4.5 Récupération des particules érodées	76
Figure 4.6 Acquisition des données.....	76
Figure 4.7 Courbe granulométrique du sol de référence	77
Figure 4.8 Mélange du sol de référence	78
Figure 4.9 Remplissage de la colonne en configuration de référence	78
Figure 4.10 Courbes granulométriques de (a) la couche fine et (b) de la couche grossière	79
Figure 4.11 Matériaux constituant les configurations hétérogènes	80

Figure 4.12 Configurations d'hétérogénéité (a) Aval (b) Centrale	80
Figure 4.13 Gradient globale appliqué par paliers pendant l'essai.....	81
Figure 4.14 Masse érodée cumulée des différentes configurations	82
Figure 4.15 Evolution des pressions locales pour la configuration de référence	83
Figure 4.16 Evolution des pressions locales pour la configuration hétérogène centrale.....	84
Figure 4.17 Evolution des pressions locales pour la configuration hétérogène aval	85
Figure 4.18 Processus d'aspiration dans la configuration d'hétérogénéité aval	85
Figure 4.19 Evolution des gradients hydrauliques locaux pour la configuration homogène	86
Figure 4.20 Evolution des gradients hydrauliques locaux pour la configuration centrale.....	87
Figure 4.21 Evolution des gradients hydrauliques locaux pour la configuration aval	88
Figure 4.22 Evolution de la conductivité hydraulique dans toutes les configurations.	89
Figure 4.23 Courbes granulométriques de la configuration de référence	90
Figure 4.24 Courbes granulométriques de la configuration centrale	90
Figure 4.25 Couche centrale de la configuration centrale	91
Figure 4.26 Courbe granulométrique de la configuration aval.....	91
Figure 4.27 Couche aval de la configuration aval	92
Figure 5.1 (a) Colonne de suffusion (b) les différents composants de la colonne	96
Figure 5.2 Schéma de la colonne de suffusion	97
Figure 5.3. Différentes billes de verre	97
Figure 5.4 Courbe granulométrique des couches reproduites	98
Figure 5.5 Courbe de constrictions des configurations de sol testés	100
Figure 5.6 Matériaux constituant chaque sous couche pour la configuration d'hétérogénéité centrale	100
Figure 5.7 Remplissage de la colonne	101
Figure 5.8 Colonne de Suffusion après mise en place de l'échantillon.....	101
Figure 5.9 Masse érodée cumulée selon les différentes configurations testées.....	103
Figure 5.10 Courbes granulométriques pré/post suffusion dans la configuration de Référence (R) ..	104
Figure 5.11 Courbes granulométriques pré/post suffusion dans la configuration d'hétérogénéité centrale (c)	105
Figure 5.12 Courbes granulométriques pré/post suffusion dans la configuration d'hétérogénéité aval (A).....	106
Figure 5.13 Evolution de la conductivité hydraulique en fonction du gradient appliqué	107
Figure 5.14 Installation de la colonne de suffusion dans la chambre de tomographie	109
Figure 5.15 Transformation d'une image brute (a) en image binaire (b)	110
Figure 5.16 Profil de porosité vertical pour chacune des configurations : Référence (R), Centrale (C), Aval (A).....	112
Figure 5.17 Coupes transversales de l'échantillon de référence (R) au milieu de chaque couche, avant et après essai.	114
Figure 5.18 Coupes transversales de l'échantillon d'hétérogénéité centrale (C) au milieu de chaque couche, avant et après essai.	115
Figure 5.19 Coupes transversales de l'échantillon d'hétérogénéité aval (A) au milieu de chaque couche, avant et après essai.	116
Figure 6.1 Modèle de contacts.....	123
Figure 6.2 Echantillon généré par PFC3D.....	124
Figure 6.3 (a) Courbe granulométrique et (b) courbe des constrictions des différentes couches.....	125
Figure 6.4 Vue des échantillons générés pour les différentes configurations testées	126
Figure 6.5 Bilan des forces agissantes sur les particules.....	128
Figure 6.6 Cycle de calcul pour PFC3D	128

<i>Figure 6.7</i>	<i>Domaine fluide discrétisé en 3D avec écoulement descendant</i>	130
<i>Figure 6.8</i>	<i>Masse érodée cumulée pour toutes les configurations (a) Aval et (b) Central</i>	132
<i>Figure 6.9</i>	<i>Evolution de la porosité pour toutes les configurations d'hétérogénéité simulées</i>	134
<i>Figure 6.10</i>	<i>Masse relative érodée dans chaque couche en fonction de la configuration d'hétérogénéité</i>	135
<i>Figure 6.11</i>	<i>Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche pour la configuration de référence</i>	137
<i>Figure 6.12</i>	<i>Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche avec un pourcentage d'hétérogénéité 60%</i>	138
<i>Figure 6.13</i>	<i>Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche avec un pourcentage d'hétérogénéité 40%</i>	139
<i>Figure 6.14</i>	<i>Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche pour les configurations avec un pourcentage d'hétérogénéité 60%</i>	140
<i>Figure 6.15</i>	<i>Efficacité de rétention dans chaque couche selon la configuration testée</i>	141
<i>Figure 6.16</i>	<i>a) Chaîne de force post-érosion, b) nombre de contacts ($i=3$)</i>	143
<i>Figure 6.17</i>	<i>Vue de la colonne de suffusion</i>	144
<i>Figure 6.18</i>	<i>Résultats expérimentaux et numériques</i>	145
<i>Figure 6.19</i>	<i>Coupe médiane des configurations testées</i>	146

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 Paramètres influençant la susceptibilité à la suffusion (Sail, 2012)</i>	21
<i>Tableau 1.2 Evaluation de la susceptibilité à la suffusion selon différents critères (Wan et Fell 2008)</i> 28	
<i>Tableau 1.3 Incidents sur quelques barrages dus à la présence des hétérogénéités</i>	33
<i>Tableau 3.1 Propriétés physiques et chimiques du sable d'Hostun HN34 (Sifrac)</i>	53
<i>Tableau 3.2 Propriétés physiques et chimiques des fines utilisées</i>	54
<i>Tableau 3.3 Les différentes configurations d'hétérogénéité testées</i>	58
<i>Tableau 3.4 Conductivité hydraulique des mélanges testés</i>	64
<i>Tableau 3.5 Propriétés physiques des sols testés</i>	69
<i>Tableau 3.6 Classification des sols testés</i>	69
<i>Tableau 3.7 Critère de filtre pour les sols hétérogènes testés</i>	70
<i>Tableau 4.1 Classification des sols testés</i>	79
<i>Tableau 4.2 Récapitulatif des résultats des essais sur les colonnes de suffusion à deux échelles</i>	93
<i>Tableau 5.1 Caractéristiques des couches reproduites dans cette étude</i>	99
<i>Tableau 5.2 Evaluation de la susceptibilité du sol selon les critères de la littérature</i>	99
<i>Tableau 6.1 Paramètres du modèle</i>	122
<i>Tableau 6.2 Composition des différentes configurations simulées</i>	126
<i>Tableau 6.3 Sollicitations hydrauliques appliquées</i>	129
<i>Tableau 6.4 Evaluation de la précision de deux essais de suffusion pour chaque configuration testée</i>	144
<i>Tableau 6.5 Evaluation de la précision de deux essais de suffusion pour chaque configuration testée</i>	145

Résumé

Les pathologies contre lesquelles les ouvrages hydrauliques sont conçus se manifestent de différentes façons dans différentes zones de l'ouvrage, et parmi elles l'érosion interne reste la cause principale de la rupture des ouvrages en terre. La suffusion (érosion interne de volume) est le détachement puis le transport des particules à travers les pores du milieu granulaire. De nombreuses études sur la suffusion ont été réalisées avec des sols homogènes et peu ont été dédiées aux sols présentant des hétérogénéités. Ce travail de recherche a pour but de caractériser les mécanismes de suffusion dans les sols présentant une hétérogénéité structurale par couches (centrale, avale) et de mettre en évidence leur influence sur l'initiation et le développement de la suffusion. Deux approches ont été adoptées: l'une expérimentale et l'autre numérique (éléments discrets). L'étude expérimentale a été menée avec des colonnes soumises à un écoulement vertical descendant sous charge hydraulique contrôlée, en utilisant différents types de sols et différentes échelles d'investigation. Les essais de suffusion ont été menés sur un sable moyen et un sol grossier (graves du Rhin-France) provenant d'une digue, puis sur des billes de verre pour établir une comparaison avec les résultats numériques. Le développement de la suffusion et ses conséquences ont été analysés en utilisant la masse érodée cumulée, la granulométrie post-suffusion, la variation du gradient hydraulique local et de la perméabilité. L'effet de la typologie des hétérogénéités sur la suffusion a été mis en évidence, montrant que la configuration d'hétérogénéité avale à un taux de 60% est la plus vulnérable. La présence d'une hétérogénéité centrale conduit à l'augmentation de l'efficacité de rétention des particules érodées en aval. Cependant, la complexité des processus engendrés ne permet pas de dissocier leurs effets. Il est alors nécessaire de mener une étude complémentaire qui tient compte du transport et de la rétention des particules fines dans le sol. Ainsi, le transfert des particules dans un sol hétérogène sous l'effet de la suffusion a été exploré à l'échelle du pore en utilisant la tomographie à rayons X. Les résultats ont montré que l'hétérogénéité dans la couche avale joue un rôle important dans le contrôle du processus de suffusion. La partie numérique, basée sur une modélisation CFD-DEM a permis de simuler des essais de suffusion en utilisant le logiciel PFC^{3D} afin de caractériser l'influence des hétérogénéités granulaires sur la vulnérabilité des sols à la suffusion et d'évaluer le rôle de chaque couche et leur interaction vis-à-vis de ce processus. La confrontation des résultats numériques à ceux obtenus par un essai de suffusion montre une concordance et valide l'approche numérique.

Mots clés : Suffusion, Particule, Fluide, Hétérogénéité, Eléments Discrets (DEM), Tomographie.

Abstract

The pathologies against which hydraulic structures are designed manifest in different ways at different zones of the structure, and among them internal erosion remains the main cause of failure of earthen structures. Suffusion (internal volume erosion) is the detachment and subsequent transport of particles through the pores of the granular medium. Many studies on suffusion have been carried out on homogeneous soils and few have been dedicated to soils with heterogeneities. The aim of this research work is to characterize the suffusion mechanisms in soils with structural heterogeneity by layers (central, downstream) and to highlight their influence on the initiation and development of suffusion. Two approaches were adopted: one experimental and the other numerical (discrete elements). The experimental study was conducted with columns subjected to vertical downward flow under controlled hydraulic load, using different types of soils and different scales of investigation. Suffusion tests were conducted on medium sand and coarse soil (Rhine gravel) from a dike, and then on glass beads for comparison with numerical results. The development of suffusion and its consequences were analyzed using cumulative eroded mass, post-suffusion granulometry, variation of local hydraulic gradient and permeability. The effect of heterogeneity typology on suffusion was highlighted, showing that the downstream heterogeneity configuration at a rate of 60% is the most vulnerable. The presence of a central heterogeneity leads to an increase in the retention efficiency of the eroded particles downstream. However, the complexity of the processes generated does not allow to dissociate their effects. It is therefore necessary to conduct a complementary study that takes into account the transport and retention of fine particles in the soil. Thus, the transfer of particles in a heterogeneous soil under the effect of suffusion was explored at the pore scale using X-ray tomography. The results showed that heterogeneity in the downstream layer plays an important role in controlling the suffusion process. The numerical part, based on a CFD-DEM modeling, allowed to simulate suffusion tests using the PFC3D software in order to characterize the influence of granular heterogeneities on the vulnerability of soils to suffusion and to evaluate the role of each layer and their interaction towards this process. The comparison of the numerical results with those obtained by a suffusion test shows a concordance and validates the numerical approach.

Key words: Suffusion, Particle, Fluid, Heterogeneity, Discrete Elements (DEM), Tomography.

Introduction Générale

Contexte et problématique

Les structures hydrauliques en remblai peuvent être affectées par l'érosion interne, qui se développe si deux conditions sont réalisées : le détachement et la migration des particules sous l'effet d'un écoulement. Ce transfert de masse est un processus insoupçonné et lent, qui a pour conséquence une perte importante de matériau et peut conduire à l'état ultime à la ruine de ces ouvrages. La vulnérabilité de l'ouvrage à l'érosion peut être due au vieillissement, à l'apparition d'une défaillance pendant la phase de compactage, au choix des matériaux, à un défaut géologique, au tassement qui engendre des fissures.

Bien que l'érosion interne des sols homogènes ait été largement étudiée, la suffusion dans les sols hétérogènes est peu abordée dans la littérature. L'hétérogénéité peut provenir de la matrice du sol elle-même ou induite par le processus de suffusion. L'hétérogénéité structurale se produit si les remblais sont réalisés en plusieurs couches ou avec des matériaux qui deviennent hétérogènes au cours de la construction par leur mise en œuvre entraînant l'apparition des hétérogénéités locales ou d'une ségrégation.

Selon une étude réalisée par EDF en 2006 concernant l'état de ses barrages hydrauliques en France, environ 200 barrages sur 447 ouvrages répartis sur le territoire français présentent des risques liés à leur état de vétusté et à des défaillances telles que des fissures ou des dégradations de l'ouvrage, qui entraînent des risques de rupture non négligeables. Selon **Foster et al (2000)** la présence d'une zone graveleuse localisée était l'un des facteurs initiateurs de la suffusion. D'autre part, un grand nombre de particules fines sont érodées dans cette zone au cours de l'évolution de la suffusion, ce qui peut induire une déformation inacceptable des fondations et éventuellement l'endommagement des dispositifs de filtration des barrages. Dans la première retenue du barrage de Tarbela au Pakistan, la déformation induite par la suffusion a été observée dans la couverture en amont, qui a pour fonction de contrôler les infiltrations dans le barrage, entraînant 360 trous et 140 fissures sur la couverture. Les investigations réalisées par **Ul Haq et Haq (1996)**, et **Fell et al (2005)** ont montré que l'accident du barrage de Tarbela était principalement attribué à la suffusion autour des zones de graviers localisées dans les fondations profondes des alluvions sableuses. En outre, les accidents du barrage de Three Sisters au Canada et du barrage de Mogoto en Afrique du Sud sont également dus à la suffusion autour de ces zones de matériau grossier (**Foster et al 2000**). Une étude statistique française (**Royet 2005**) a montré que l'hétérogénéité du sol est l'une des principales causes de la rupture des barrages en terre et des digues.

Objectifs de la thèse :

L'objectif principal de ces travaux de recherche est d'étudier l'effet des hétérogénéités granulaires sur la suffusion des sols. Pour cela, deux approches, numérique et expérimentale, sont développées afin de:

- Quantifier le détachement des particules et leur progression dans le milieu poreux en fonction des paramètres de contrôle (granulométrie, structure du sol, gradient hydraulique)

- Quantifier l'impact des discontinuités granulaires sur la susceptibilité à la suffusion des sols grossiers
- Caractériser l'effet des hétérogénéités à deux échelles d'observation au laboratoire
- Proposer une modélisation qui tient en compte le transport des particules fines dans le sol en présence des hétérogénéités
- Dédire éventuellement un effet d'échelle sur la suffusion des sols hétérogènes

Ainsi, plusieurs configurations des hétérogénéités en couches sont envisagées et testées, les résultats obtenus doivent permettre de répondre à plusieurs interrogations telles que:

- L'effet de chaque configuration d'hétérogénéité sur la stabilité du sol
- Le comportement structural et hydraulique du milieu hétérogène sous l'effet d'un écoulement
- Une hétérogénéité peut-elle être un facteur déclenchant de la suffusion

Organisation du rapport:

Ce manuscrit est organisé en six chapitres regroupés sous trois parties :

- La première partie présente une revue bibliographique sur les principaux résultats des études antérieures concernant l'érosion interne et plus particulièrement la suffusion. Elle est composée de deux chapitres :
 - Le chapitre 1 comprend les approches expérimentales, axées sur l'étude en laboratoire de la suffusion, et sur les différentes approches concernant l'hétérogénéité et ses effets.
 - Le chapitre 2 présente les études numériques utilisant la méthode des éléments discrets et son couplage fluide-solide (CFD-DEM) pour modéliser la suffusion. Ce chapitre se termine par la présentation de quelques résultats obtenus des simulations numériques sur la suffusion.
- La deuxième partie est dédiée à la présentation des essais expérimentaux réalisés sur des échantillons présentant des hétérogénéités par couches. Elle comprend trois chapitres :
 - Dans le chapitre 3, l'étude est réalisée sur une petite colonne afin d'examiner l'effet de la configuration de l'hétérogénéité (avale, centrale et distribuée) sur la suffusion et l'influence du type de particules fines et du taux d'hétérogénéité sur l'initiation et le développement de la suffusion à petite échelle. Ce processus est étudié en utilisant des échantillons de sable reconstitués au laboratoire. L'analyse des résultats est effectuée à travers les mesures de la masse érodée cumulée et de la conductivité hydraulique.
 - Dans le chapitre 4, des essais de suffusion sont effectués sur un sol naturel grossier prélevé sur les digues du Rhin (VNF, Strasbourg). Cette étude est menée sur l'effet de la présence d'une hétérogénéité et sa configuration par couche (Centrale, Avale) à une échelle plus grande que celle présentée dans le chapitre 3. La susceptibilité à la suffusion est évaluée en se basant sur les mesures des pressions interstitielles, de la masse érodée cumulée, et de la granulométrie post-suffusion

- Le chapitre 5 est dédié à l'étude de la suffusion sur un échantillon de sol modèle constitué de billes de verre présentant des configurations d'hétérogénéités similaires à celles testées dans le chapitre 2 (Hétérogénéité centrale, Hétérogénéité avale). En parallèle, des images de tomographie aux rayons x sont prises avant et après l'essai pour identifier la cinématique de la microstructure. L'analyse est faite selon deux échelles : l'échelle de l'échantillon en se basant sur l'évolution de la masse érodée cumulée et sur l'évolution de la perméabilité, et à l'échelle des pores par analyse d'images.
- La partie 3 intitulée « modélisation numérique de la suffusion » est composée d'un seul chapitre :
 - Le chapitre 6 introduit le modèle numérique basé sur la méthode des éléments discrets couplée avec un modèle de dynamique des fluides (DEM-CFD) afin d'étudier les mécanismes de suffusion dans le cas d'hétérogénéités par couches. Après la description de la méthode numérique, la simulation de la suffusion est présentée et développée, puis les résultats obtenus sont rapportés et discutés. À la fin de la simulation de l'écoulement dans le milieu granulaire, le déplacement des particules a été étudié vis-à-vis de la porosité et la variation granulaire. Une confrontation à des résultats expérimentaux est menée afin de valider le modèle numérique.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus et propose des recommandations ainsi que les perspectives pour les futurs travaux de recherche sur le sujet.

Partie I : Synthèse Bibliographique

Chapter 1 : Approches expérimentales

1.1 Introduction

Le phénomène d'érosion interne se produit lorsque les particules constitutives de l'ouvrage ou de sa fondation sont détachées et transportées sous l'effet d'un écoulement hydraulique. Ce phénomène est largement observé dans les structures hydrauliques en remblais telles que les barrages et les digues de protection, impliquant de graves conséquences économiques, humaines et environnementales. Les investigations à l'échelle mondiale ont montré que presque la moitié des ruptures de barrages est due à d'érosion interne (**Foster et al, 2000**).

Les recherches dédiées à ce sujet sont menées des décennies. Plusieurs critères ont été proposés afin d'évaluer la susceptibilité des sols à l'érosion en se basant sur la distribution granulométrique (**Kenney et Lau 1986, Li et Fannin 2008; Wan et Fell, 2008**), les conditions hydrauliques (**Terzaghi 1939, Skempton et Brogan, 1994, Li & Fannin 2008**) et l'état des contraintes (**Bendahmane et al. 2008, Ke et Takahashi 2014**). Cependant, la plupart de ces études ont été réalisées sur des sols présentant une distribution granulométrique globale homogène. L'étude de la stabilité interne des sols hétérogènes reste moins étudiée, même s'il y a des études antérieures sur les hétérogénéités par ségrégation ((**Kenney et Westland 1993**)), par couches (**Luo et al. 2020**), et localisées (**Luo et Huang 2020**). L'hétérogénéité en plusieurs couches (plus que deux couches) n'était pas abordée.

Pour que la suffusion se développe, trois conditions doivent être satisfaites (**Wan et Fell 2008**) :

- 1) Les particules fines doivent être plus petites que la taille des constriction formées par les particules grossières pour permettre le transport des particules fines détachées (critères géométriques).
- 2) Les contraintes hydrauliques exercées par l'écoulement doivent être suffisantes pour assurer l'arrachement et le déplacement des particules fines (critères hydrauliques).
- 3) La fraction grossière doit être dominante et constituer la structure primaire du sol. Cela signifie que la fraction fine doit être inférieure à une valeur seuil au-delà de laquelle les particules grossières flottent dans la matrice de particules fines.

Selon **Fell et Fry (2013)**, l'instabilité interne d'une matrice de sol est régie par trois critères : géométrique, hydraulique et mécanique. Ces critères permettent d'évaluer la susceptibilité à la suffusion (**Figure 1.1**). Le premier critère décrit la possibilité géométrique des fines de migrer à travers le squelette du sol. Il doit y avoir un nombre suffisant de constriction plus grandes que la taille des fines. Ceci peut être estimé empiriquement en utilisant la courbe granulométrique du sol. Le deuxième critère indique que les sollicitations hydrauliques doivent être suffisamment importantes pour assurer le transport des particules à travers la porosité du sol. Le troisième critère (de contrainte) implique que la contrainte appliquée sur le sol doit être suffisamment faible pour que les fines se détachent de la matrice du sol. La suffusion est encore gouvernée par d'autres paramètres tels que : la densité, la porosité, l'angularité des particules, le type des fines et les effets physico-chimiques...

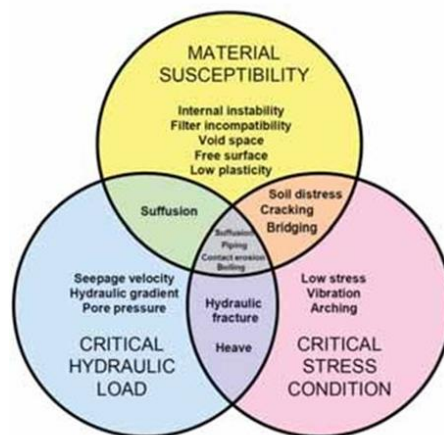


Figure 1.1 Les conditions d'initiation de l'érosion interne (**Garner et Fannin 2010**)

Dans cette partie, une revue bibliographique est faite sur les différents mécanismes d'érosion interne en particulier la suffusion, ainsi que les critères élaborés pour évaluer la susceptibilité des sols à la suffusion, et l'impact de la suffusion sur le comportement du sol. L'accent est mis sur les études menées sur le processus de suffusion hétérogène, et les sols présentant des hétérogénéités structurales. Enfin, une synthèse des principales conclusions de la littérature est présentée en fin de ce chapitre.

1.2 Typologie de l'érosion

Selon le Comité International des Grands Barrages (CIGB), la définition générale de l'érosion interne est « le transport des particules de sol dans un barrage en remblai ou sa fondation sous l'effet de l'écoulement ». Les sols présentant un potentiel d'érosion interne sont appelés "instables". Ce phénomène est défini en plusieurs mécanismes dont le développement et les conséquences sur le sol sont complètement différents. **Fell et Fry (2013)** distinguent quatre types d'érosion interne : l'érosion de conduit, l'érosion de contact, l'érosion régressive, et la suffusion (**Figure 1.2**)

L'érosion de conduit est initiée dans les zones présentant des points faibles dans l'ouvrage en raison d'un mauvais compactage, des fissures, zones perméables non identifiées... Elle aboutit à la génération des sollicitations hydrauliques supérieures à celles prévues, ce qui favorise le développement d'un chemin préférentiel dans ces zones. Cette évolution, si elle n'est pas arrêtée, donne naissance à une conduite entre l'amont et l'aval de l'ouvrage.

L'érosion de contact est définie par le détachement des particules sous l'effet d'un écoulement hydraulique parallèle à l'interface entre deux couches de matériaux différentes. Les particules de la couche fines sont détachées et transportées à travers les pores de la couche la plus grossière.

L'érosion régressive se déclenche de la partie aval d'ouvrage, où l'écoulement remonte à la surface, et s'étend de façon régressive vers l'amont. Ce processus aboutit à l'augmentation du gradient hydraulique local et la vitesse d'écoulement qui provoque le transport progressif des matériaux vers l'aval, et par conséquent la rupture de l'ouvrage.

La Suffusion est définie par le détachement et le transport des particules à travers les pores du milieu granulaire sous l'action d'un écoulement interne dans le sol. Elle se produit lorsque les pores et les constriction sont suffisamment grands afin de permettre le mouvement des particules fines. Un milieu granulaire est composé de particules de différentes tailles telles que : gravier, sable, argile, et Limon... Sa courbe granulométrique peut être divisée en deux parties : la fraction grossière et la fraction fine. Les particules grossières constituent le squelette du sol et transmettent la majorité des contraintes. Les particules fines peuvent se déplacer au sein de la matrice granulaire grossière sous l'effet de l'écoulement hydraulique.

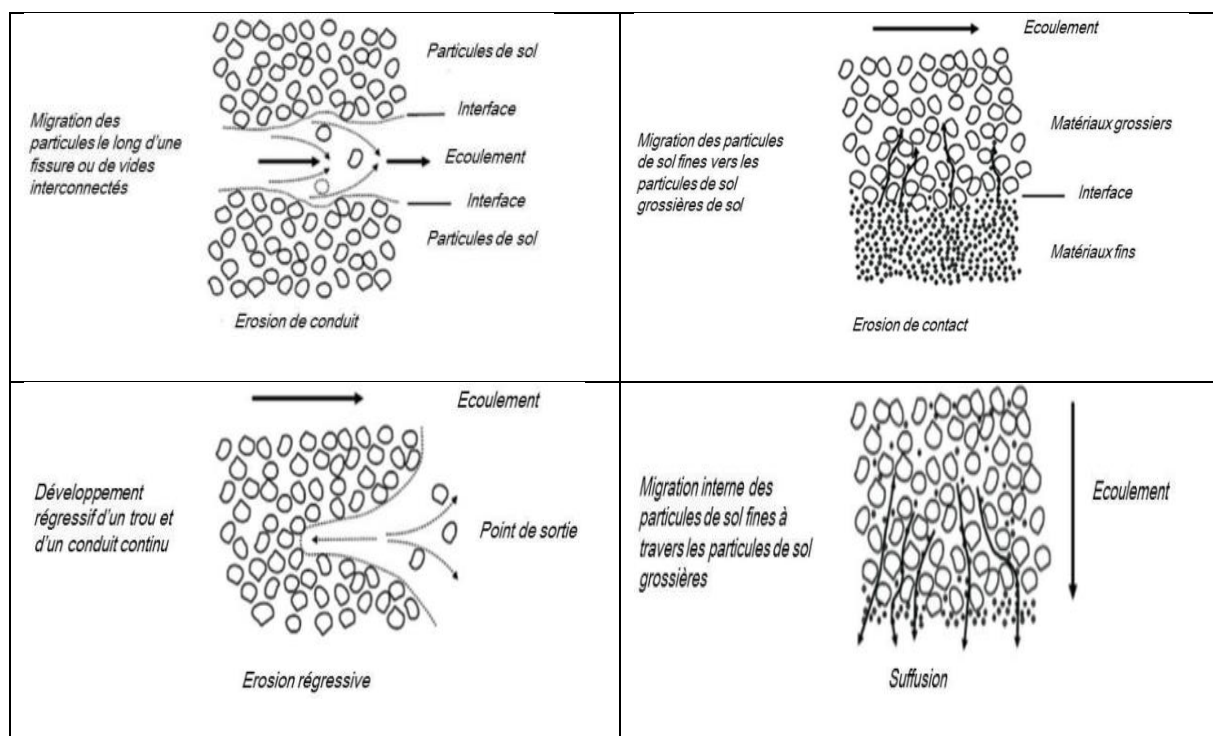


Figure 1.2

Figure 1.2 Les différents mécanismes d'érosion interne (Bambara 2016)

La suffusion est décrite dans la littérature par deux termes : la suffusion et la suffosion. **Moffat et al. (2011)** ont fait une distinction entre les phénomènes de suffusion et de suffosion pour décrire la progression spatiale et temporelle de l'instabilité interne dans un essai en laboratoire. Ils ont défini la "suffusion" comme un phénomène où la fraction la plus fine d'un sol intérieurement instable se déplace à l'intérieur de la fraction la plus grossière sans aucune perte d'intégrité de la matrice ou de changement dans le volume total, tandis que la "suffosion" est le processus où la migration des particules produit une réduction du volume total et un potentiel conséquent de tassement de la matrice de sol.

En résumé, les termes suffusion, suffosion, et instabilité interne ont tous été utilisés pour décrire la migration des particules fines d'un sol à travers la porosité du milieu granulaire. Afin de réduire toute confusion, la "suffusion" est considérée dans cette thèse pour décrire les sols intérieurement instables tels que définis par **Wan et Fell (2008)** même dans le cas où il y a un changement de volume ou une déformation du squelette granulaire.

1.3 Essai de suffusion en laboratoire

1.3.1 Dispositif d'essais

La susceptibilité du sol à l'instabilité interne induite par la suffusion a été testée pour la première fois dans des perméamètres simples à paroi rigide avec un contrôle limité des écoulements. La susceptibilité est évaluée notamment en se basant sur la perte de masse et de l'analyse granulométrique de l'effluent à la fin de l'essai, sans prendre en compte la mesure du débit, des pressions d'eau interstitielle ou des déformations axiales (**Kenney et Lau 1985**). Une deuxième génération de perméamètres à parois rigides (colonne de suffusion) a été conçue avec des systèmes de contrôle de l'écoulement, du suivi de la pression interstitielle, et la mesure du débit (**Figure 1.3**), afin de déterminer conductivité hydraulique (**Skempton and Brogan 1994; Ke and Takahashi 2012; Benamar et al. 2019**). Ces mesures sont souvent combinées avec la mesure la masse érodée et l'analyse granulométrique (**Lafleur et al. 1989; Sterpi 2003; Cividini et al. 2009**). La plupart de ces études n'ont pas simulé un état de contraintes, bien que certaines ont appliqué une charge supérieure nominale (**Kenney et Lau 1985; Åberg 1993**). La troisième génération actuelle de perméamètres à paroi rigide intègre désormais un système de chargement axial (**Figure 1.4**) avec mesure de la charge (**Suits et al. 2006; Li 2008; Sail et al. 2011**). Ces perméamètres modifiés, ont des diamètres supérieurs à dix fois la taille de la plus grande particule afin de minimiser l'effet de paroi qui favorise l'écoulement préférentiel. Les perméamètres à paroi rigide ont généralement un rapport hauteur/diamètre de 2:1 (**Kenney et Lau 1985; Suits et al. 2006**). En outre, il existe également des eodo-perméamètres à section rectangulaire avec chargement en surface qui permettent de générer un écoulement parallèle à la stratification de mise en place (Beguin 2011)

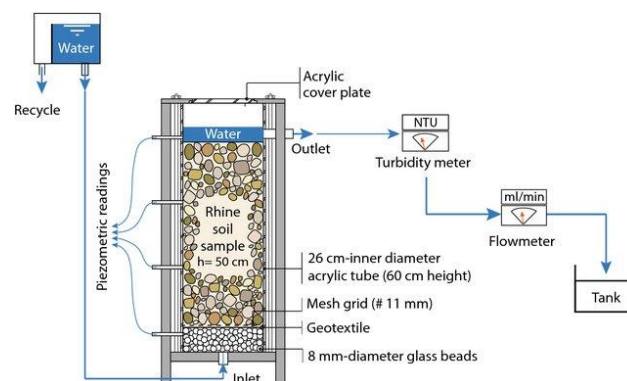


Figure 1.3 Colonne de Suffusion (**Benamar et al. 2019**)

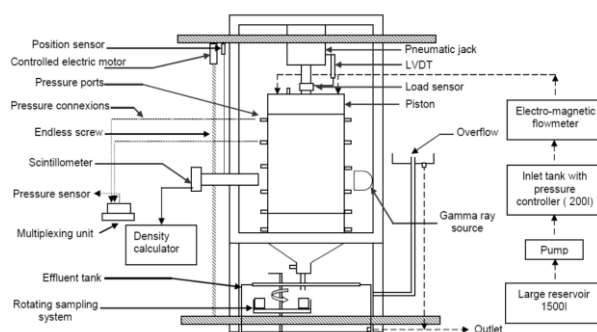


Figure 1.4 Oedo-perméamètre (Sail et al. 2011)

Dans une étude complémentaire, des perméamètres à paroi flexible (cellule triaxiale modifiée) ont été utilisés pour examiner l'instabilité interne induite par la suffusion (**Sanchez 1983**). La paroi flexible permet de réduire l'effet de paroi qui favorise de développement des chemins préférentiels, et ainsi évaluer avec plus de confiance la susceptibilité des matériaux. La possibilité de contrôler la contrainte sur l'éprouvette a été intégré, récemment, dans ces perméamètres à paroi flexible (**Bendahmane 2008; Chang et Zhang 2011; Sibille 2016**), qui ont tous cherché à étudier les conditions d'initiation de la suffusion, et à développer des modèles hydromécaniques (**Figure 1.5**). Ces cellules à paroi flexible sont utilisées pour les sols à cohésion moyenne tandis que les perméamètres à paroi rigide sont utilisés pour tester les sols non cohésifs (**Bendahmane 2008**). Les techniques de damage humide (**Suits et al. 2003**), et le compactage (**Moffat 2005**), ont été employés pour minimiser la ségrégation des particules fines pendant le compactage des sols non cohésifs et cohésifs.

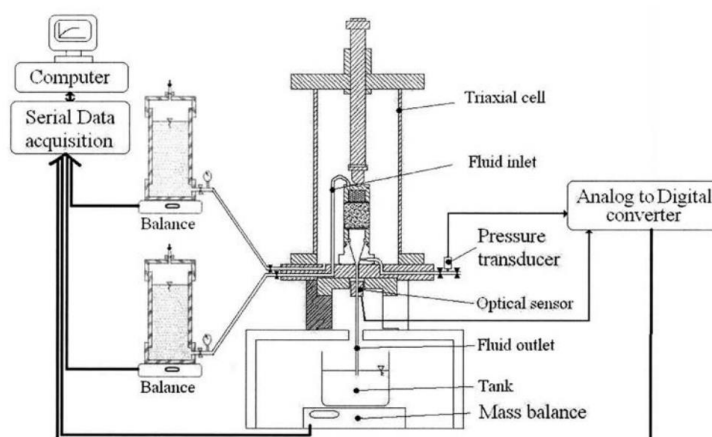


Figure 1.5 Schéma d'une cellule triaxiale modifiée (**Bendahmane 2008**)

1.3.2 Charge hydraulique

Les essais d'écoulement unidirectionnel reposent généralement sur l'une des trois conditions limites hydrauliques: à gradient hydraulique constant, par palier de gradient et à débit contrôlé. La première consiste à appliquer un gradient hydraulique globale constant à travers l'échantillon jusqu'à ce que l'effluent atteigne un état de non-érosion (**Wan et Fell 2008; Ke et Takahashi 2012**). Les essais à gradient constant utilisent généralement des gradients extrêmes de l'ordre de 10 ou plus pour atteindre l'état de non-érosion dans un délai raisonnable.

Avec cette condition hydraulique, l'initiation de l'instabilité ne peut être identifiée. Le gradient hydraulique par palier utilise des gradients hydrauliques constants par paliers appliqués sur des intervalles de temps souhaités pour simuler un modèle de chargement hydraulique proche du processus de remplissage d'un barrage sur la durée totale de l'essai. La durée de chaque palier, de l'ordre de 20 à 30 minutes, a été choisie sur la base des observations de l'état de non-érosion pour différents types de sol (**Chang et Zhang 2011; Suits et al. 2006**). La nature des matériaux testés influe fortement sur la durée d'un essai. Généralement, le gradient hydraulique critique à l'érosion est plus élevé pour les sols cohésifs par rapport aux sables. La troisième condition expérimentale consiste à contrôler le débit à travers l'échantillon de sol pendant toute la durée de l'expérience (**Marot 2012; Sterpi 2003**). Les essais à débit contrôlé ne reproduisent pas les conditions hydrauliques réelles dans les ouvrages, ils sont des essais rares qui permettent d'explorer l'influence de la vitesse d'écoulement (paramètre de contrôle)

1.3.3 Critères d'instabilité interne à la suffusion

1.3.3.1 Critères granulométriques

Au long des années, un grand nombre de chercheurs ont mené des interprétations sur la suffusion, en se basant sur des résultats expérimentaux et des considérations théoriques. Des méthodes empiriques ont été proposées afin d'évaluer le potentiel d'instabilité interne. Elles s'appuient sur la forme de la courbe granulométrique et, plus particulièrement, sur la variation de la taille des particules sur une partie précise de la courbe, ainsi que sur des singularités qui peuvent y exister, discontinuités granulométriques par exemple. L'accent est mis dans cette partie sur les critères les plus utilisés dans la littérature.

- **Critère d'Istomina**

Tout d'abord, **Istomina (1957)** a proposé un critère d'instabilité interne à la suffusion du sol sableux-graveleux en se basant sur le coefficient d'uniformité C_u :

$C_u < 10$: Stable

$10 < C_u < 20$: Zone de transition

$C_u > 20$: Instable

- **Critère de Kezdi (1979) et Sherard (1979)**

Kezdi (1979) a développé une méthode qui consiste à diviser la courbe en ses deux parties, grossière et fine, selon un diamètre de particule arbitraire (**Figure 1.6**). Cette méthode reprend le concept de filtration du critère de **Terzaghi (1939)**. Le sol est instable intérieurement s'il satisfait $(D_{15}/d_{85})_{\max} > 4$, avec D_{15} est le diamètre à 15% des passant dans la partie grossière d_{85} est le diamètre à 85% passant dans la partie fine. La complexité du critère de Kezdi est la localisation du point de coupure (d_n). Terzaghi définit ce diamètre à 80 μm . **Sherard (1979)** a utilisé la méthode de coupure de la courbe granulométrique et a considéré qu'un sol est classé instable si $(D_{15}/d_{85})_{\max} > 5$

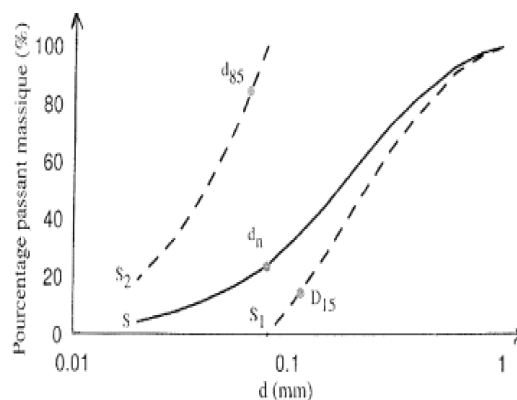


Figure 1.6 Critère de Kezdi (1979)

- **Critère de Kenney et Lau (1985)**

Selon les résultats obtenus des essais sur 16 échantillons de sol, **Kenney et Lau (1985)** ont proposé une méthode moins directe que celle de **Kezdi (1979)** pour évaluer l'instabilité interne du sol. Cette méthode est basée sur la forme de la courbe granulométrique. **Kenney & Lau** ont défini le rapport H/F ; avec F représente la fraction massique inférieure au diamètre D des particules, et H est la fraction massique entre D et $4D$ (**Figure 1.7**). La valeur seuil d'instabilité a été fixé pour $(H/F) = 1$. Les sols dont le rapport $(H/F) < 1$ sont définis comme des sols instables à $F < 0,2$ dans les sols présentant une granulométrie étalée ($C_u > 3$), et à $F < 0,3$ dans les sols présentant une granulométrie étroite ($C_u < 3$).

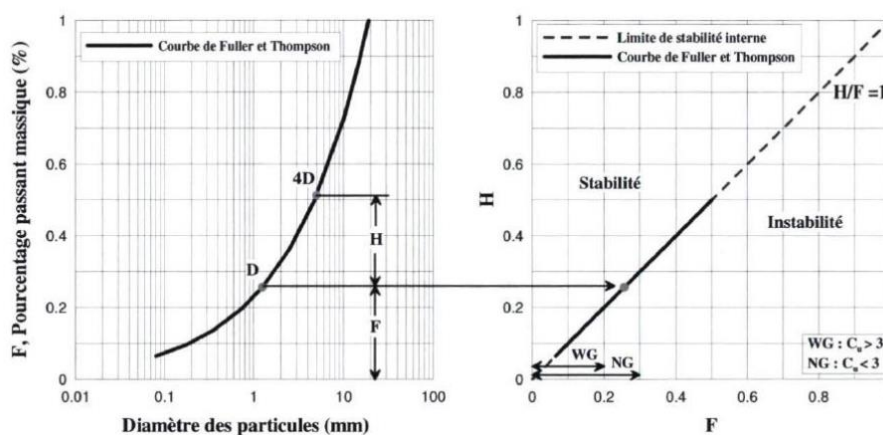


Figure 1.7 Critère de Kenney et Lau (1985)

- **Critère de Lafleur (1989)**

Pour bien connaître le comportement de la filtration et la susceptibilité à la suffusion dans un sol sans cohésion, **Lafleur et al (1989)** ont réalisé des essais sur des matériaux artificiels (billes de verre) présentant trois distributions granulométriques différentes : linéaire, étalée, et discontinue (**Figure 1.8**). Les résultats obtenus ont montré que les sols à granulométrie linéaire sont stables, alors que les sols avec une courbe granulométrique étalée ou discontinue sont classés instables. Cette classification, basée sur la forme de la courbe granulométrique, permet de donner une interprétation qualitative primaire sur le comportement des matériaux testés vis-à-vis de l'érosion.

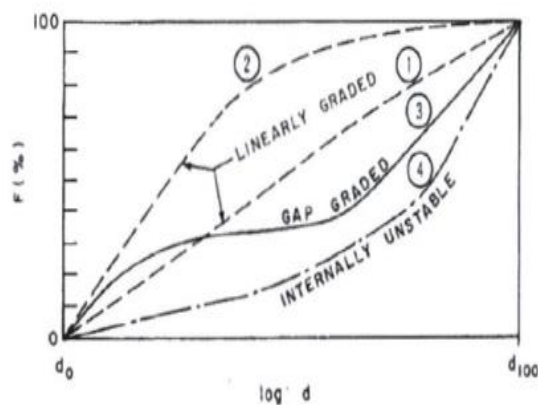


Figure 1.8 Critère de Lafleur (1989)

- **Critère de Burenkova (1993)**

La méthode Burenkova 1993 est basée sur les facteurs conditionnels d'uniformité $h' = d_{90}/d_{60}$ et $h'' = d_{90}/d_{15}$, où d_{90} est le diamètre des particules correspondant à 90% des passants en masse. Le rapport d_{90}/d_{60} représente la pente de la partie grossière de la courbe granulométrique. Le rapport d_{90}/d_{15} nous donne une indication sur la capacité de filtration entre la fraction grossière et la fraction plus fine.

Burenkova (1993) classe les matériaux dans 4 zones avec une limite séparant les sols « suffusifs » des sols « non-suffusifs » (**Figure 1.9**). Les matériaux stables sont localisés dans la zone II, alors que les zones I et III correspondent aux matériaux classés instables. La zone IV représente les matériaux artificiels, qui n'existe pas dans la nature. Cette méthode n'est pas adaptée pour identifier l'instabilité interne des sols à granulométrie discontinue.

Les limites de la zone stable vérifient l'inégalité suivante :

$$\text{Condition de stabilité : } 1 + 0.76 \log(h'') \leq h' \leq 1 + 1.86 \log(h'')$$

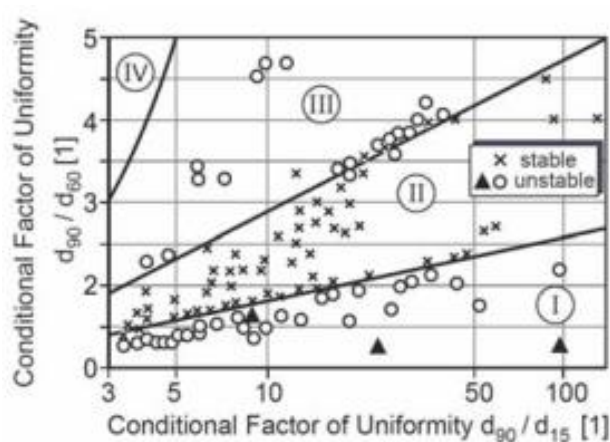


Figure 1.9 Critère de Burenkova (1993)

- **Critère de Wan et Fell (2008)**

Des méthodes améliorées, basées sur la distribution granulométrique, ont été proposées pour prédire l'instabilité interne des sols sablo-graveleux avec des fines (Limon et argile). L'utilisation de la méthode de Burenkova modifiée, a montré que les sols avec une forte pente sur la fraction grossière (d_{90}/d_{60}) et une pente plate sur la fraction fine (d_{20}/d_5) présentent une instabilité interne à la suffusion. Après quelques essais, **Wan et Fell (2008)** ont conclu que ces sols peuvent être représentés par d_{90}/d_{60} et d_{20}/d_5 , ce qui a conduit à l'élaboration de la méthode alternative de Burenkova. Cette méthode classe les sols en trois catégories : stable, en transition et instable (**Figure 1.10**). Cependant, cette méthode n'est pas appropriée pour les sols ayant une fraction fine inférieure à 15%. De même, elle ne permet pas d'identifier l'instabilité interne des sols à granulométrie discontinue, mais des sols classés à granulométrie étalée.

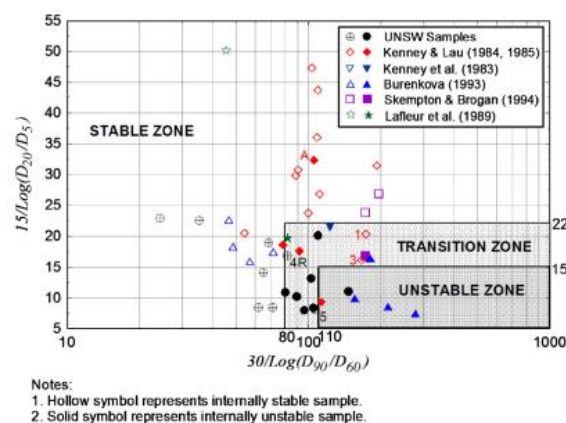


Figure 1.10 Méthode alternative d'évaluation de la stabilité interne des mélanges Limon-sable-gravier à granulométrie étalée (**Wan et Fell 2008**)

- **Approche de Li & Fannin (2008)**

Li et Fannin (2008) ont effectué une analyse comparative entre les deux critères de **Kezdi (1979)**, et **Kenney et Lau (1985)**, pour élaborer une méthode plus conservative (**Figure 1.11**). Les deux méthodes se basent sur une approche similaire qui consiste à quantifier la pente de la courbe granulométrique sur un intervalle précis, mais elles se différencient dans la détermination de la taille de cet intervalle. Il en résulte un point de convergence entre les deux méthodes qui correspond à $F = 15\%$. Les conclusions suivantes sont établies à partir de cette analyse comparative qui prend en compte les aspects des deux critères étudiés :

- Dans le cas des sols à granulométrie discontinue, la méthode de **Kezdi (1979)** est relativement plus efficace pour distinguer les sols stables et instables.

- Dans l'évaluation des sols à granulométrie étalée, la méthode de **Kenney et Lau (1985)** s'avère relativement plus performante. Cependant, en appliquant la méthode de Kezdi au point de la courbe jugé le plus critique par la méthode de **Kenney et Lau (1985)**, elle réussit tout aussi bien à distinguer les sols stables et instables.

- La méthode de **Kezdi (1979)** est relativement plus conservative pour $F < 15\%$, alors que la méthode de **Kenney et Lau (1985)** est plus conservative pour $F > 15\%$.

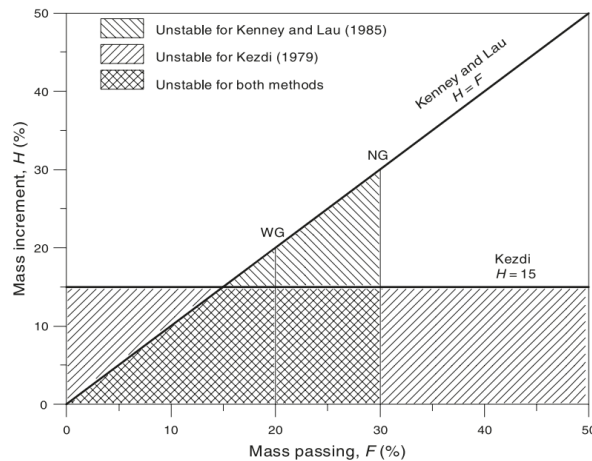


Figure 1.11 Analyse comparative des critères de Kezdi et Kenney & Lau (Li et Fannin 2008)

1.3.3.2 Critères hydrauliques

Terzaghi (1939) a proposé une théorie classique de rupture par écoulement ascendant dans une colonne de sable homogène. Il a défini un état critique à partir duquel il y a migration des particules par phénomène de boullance. Le gradient hydraulique critique ($i_c=I$), correspond à la valeur pour laquelle la contrainte appliquée par le poids du sol est égale à la force d'écoulement ascendant. Ce critère a été initialement introduit pour décrire la boullance hydraulique et non l'érosion interne du sol.

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = (1 - n)(G_s - 1) \quad (1.1)$$

où G_s est le poids volumique solide, n la porosité, γ' le poids volumique déjaugé du sol, et γ_w le poids volumique de l'eau.

Adel et al. (1988) ont mené trois essais sur des pierres sous à un écoulement horizontal. Le spécimen avait une longueur de 105 cm. La masse érodée des particules les plus fines a été collectée à la sortie. Le taux d'érosion, défini à un seuil égal à $1\text{g/m}^2\text{s}$, a été utilisé pour déterminer le gradient hydraulique critique. Une relation linéaire a été obtenue entre le gradient hydraulique critique (i_{cr}) et le critère de Kenney et Lau $(H/F)_{\min}$ (Figure 1.12).

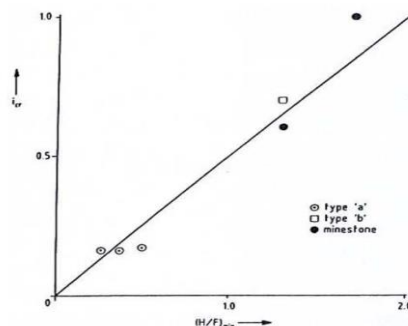


Figure 1.12 Critère de Adel (1988)

Skempton et Brogan (1994) ont effectué des essais d'érosion interne sur des configurations similaires à celles testées par **Terzaghi (1939)**, dans un perméamètre avec application d'un

écoulement ascendant. Ils ont remarqué que le gradient hydraulique critique des matériaux instables est de l'ordre 1/5 à 1/3 du gradient hydraulique critique de **Terzaghi (1939)**. Ils ont également trouvé que la différence entre la contrainte totale et la pression de l'eau interstitielle n'est pas nulle. Pour expliquer cette observation, **Skempton et Brogan (1994)** ont montré qu'une majorité de particules fines occupaient l'espace poreux généré par le squelette grossier et qu'elles ne transféraient qu'une fraction de la contrainte effective. Ainsi, un facteur de réduction (α) a été proposé pour estimer la fraction de la contrainte effective portée par ces particules fines. La rupture par érosion est initiée par une augmentation brusque de la vitesse d'écoulement sous une faible augmentation du gradient hydraulique (**Figure 1.13**).

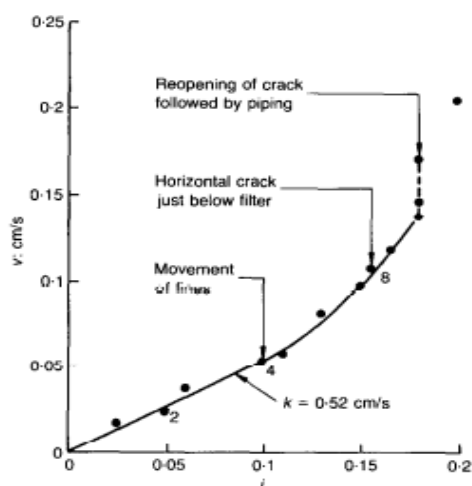


Figure 1.13 Evolution de la vitesse d'écoulement en fonction du gradient appliqué (**Skempton et Brogan, 1994**)

Les résultats obtenus ont montré une relation non linéaire entre $(H/F)_{\min}$ et le gradient critique (**Figure 1.14**), contrairement à celle obtenue par **Adel et al. (1988)**. Ce qui peut être expliqué par le sens de l'écoulement, et la définition du gradient hydraulique critique.

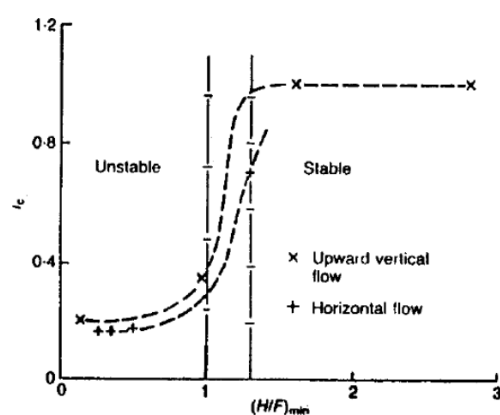


Figure 1.14 Critère de Skempton et Brogan (1994)

Mao (2005) a développé une relation entre le gradient hydraulique critique i_c et la teneur en fines, en se basant sur les résultats obtenus des essais expérimentaux sur des sols non cohésifs. Cette relation empirique est exprimée par l'équation suivante :

$$i_c = \frac{7d_5}{d_f} [4P_f(1 - n)]^2 \quad (1.2)$$

avec i_c le gradient critique ; d_5 le diamètre correspondant à 5% des passants ; $d_f = \sqrt{d_7 d_{10}}$; P_f le pourcentage des passants au diamètre d_f ; et n la porosité.

Concernant la définition du gradient hydraulique critique (qui déclenche l'érosion), il n'y a pas une définition unique dans la littérature. **Kovacs (1981)** a défini le gradient correspondant au début des mouvements des particules fines comme le gradient hydraulique critique. **Skempton et Brogan (1994)** ont défini le gradient hydraulique critique comme celui auquel se produit un entraînement des particules fines et une augmentation rapide du débit. **Moffat et Fannin (2011)** ont utilisé la variation du gradient hydraulique local pour déterminer la valeur du gradient critique. D'autres études récentes ont suggéré certains critères plus spécifiques. **Chang et Zhang (2013)** ont défini un gradient d'initiation de l'érosion interne, un gradient de déformation du squelette correspondant à l'augmentation brusque de la masse de sol érodée, et un gradient de rupture pour une déformation significative de l'échantillon de sol. **Fleshman et Rice (2014)** ont proposé trois gradients critiques pour identifier les différentes étapes de la progression de la conduite. Ces trois gradients correspondent aux premiers mouvements des particules, au « bouillonnement » de sable dans les spécimens, et au soulèvement total du sol. Bien que ces définitions diffèrent, elles conduisent à un consensus sur le fait qu'un spécimen atteint plusieurs états critiques au cours du processus de suffusion en augmentant le gradient hydraulique. Le premier état critique des particules fines est un état d'équilibre local de la force critique à un stade précoce de l'érosion. Ces particules sont sensibles à l'érosion car elles supportent moins de contraintes effectives que les autres particules, qui forment le squelette majeur de la matrice du sol. Cet état critique local est basé sur l'observation du mouvement des particules dans les expériences, comme le suggèrent **Chang et Zhang (2013)** et **Fleshman et Rice (2014)**. La discussion ci-dessus indique que la définition du gradient hydraulique critique diffère dans la littérature. Cela est dû au fait qu'il n'y a pas de preuve évidente dans certaines expériences, comme les points d'inflexion sur les courbes de vitesse-gradient, correspondant au gradient critique. En outre, certains critères reposent sur l'observation de particules érodées, ce qui dépend en partie de la subjectivité des observateurs. Les critères récemment proposés, tels que les définitions de **Chang et Zhang (2013)** et de **Fleshman et Rice (2014)**, sont plus précis car ils impliquent plus de détails sur l'initiation de la suffusion.

I.3.3.3 Conditions hydromécaniques

Le couplage des critères hydrauliques et mécaniques, qui conditionnent directement l'initiation et la progression de l'érosion interne, ont retenu moins d'attention dans la littérature par rapport aux critères géométriques de l'instabilité interne. Bien que des études antérieures ont souligné leur importance vis-à-vis de l'instabilité interne, ce couplage hydromécanique n'a pas pu être étudié simultanément dans les investigations expérimentales jusqu'à une période récente en raison de limitations techniques (**Moffat and Fannin 2011; Chang and Zhang 2011**).

Moffat and Fannin (2011) ont établi une relation hydromécanique gouvernant la stabilité interne des sols sans cohésion. Les résultats ont montré que le gradient hydraulique critique

augmente avec l'augmentation de la contrainte effective moyenne en effectuant des tests d'érosion sur des spécimens à différentes contraintes de consolidation. Cette relation s'est avérée être linéaire, et l'initiation de l'instabilité interne peut être déclenchée soit par une augmentation du gradient hydraulique, soit par une diminution de la contrainte effective. En d'autres termes, il existe un effet combiné des contraintes hydrauliques et effectives qui déclenchent l'érosion interne. **Li and Fannin (2012)** ont développé une enveloppe théorique pour évaluer l'instabilité interne des sols sans cohésion sous un écoulement ascendant (**Figure 1.15**). Le gradient critique d'un sol soumis à une contrainte effective verticale est décrit par l'expression suivante :

$$i_c = \frac{\alpha}{1-0.5\alpha} (\bar{\sigma}'_{vm} + \frac{0.5(G_s-1)}{(1+e)}) \quad (1.3)$$

où α est le coefficient de transformation des contraintes ; G_s est le poids spécifique du sol ; e est l'indice de vide; et $\bar{\sigma}'_{vm}$ est la contrainte verticale effective du sol.

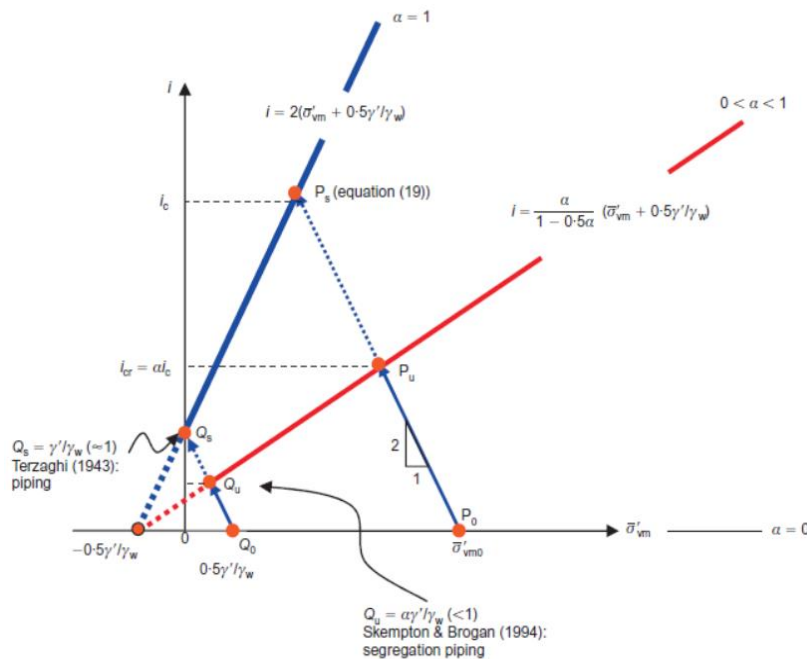


Figure 1.15 Enveloppe de rupture en fonction de la contrainte et du gradient (**Li and Fannin, 2012**)

La notion d'enveloppe d'instabilité interne est conceptuellement similaire au critère de défaillance de Mohr-Coulomb. En effet, le chemin hydromécanique est défini comme l'histoire des gradients hydrauliques locaux et des contraintes effectives sur des distances finies de l'échantillon. En utilisant cette conception, **Moffat et Herrera (2015)** ont développé un modèle linéaire pour estimer le gradient critique pour les sols cohésifs en prenant en compte le facteur de réduction de contrainte (G^*), la contrainte déviatorique ($\Delta\sigma'_v$), l'angle de frottement du sol (ϕ'), la contrainte effective verticale (σ'_v), les poids volumiques du sol et de l'eau (γ_s et γ_w respectivement), le rapport entre les fines et la fraction grossière (n^f), et la densité des fines (ρ^f) (**Figure 1.16**) :

$$\text{En flux ascendant : } i_c = \frac{G^*}{\gamma_w \Delta z} (\sigma'_v \tan(\phi') + \Delta\sigma'_v) + \frac{n^f \rho^f g}{\gamma_w} \quad (1.4)$$

$$\text{En flux descendant : } i_c = \frac{G^*}{\gamma_w \Delta z} (\sigma'_v \tan(\phi') - \Delta\sigma'_v) - \frac{n^f \rho^f g}{\gamma_w} \quad (1.5)$$

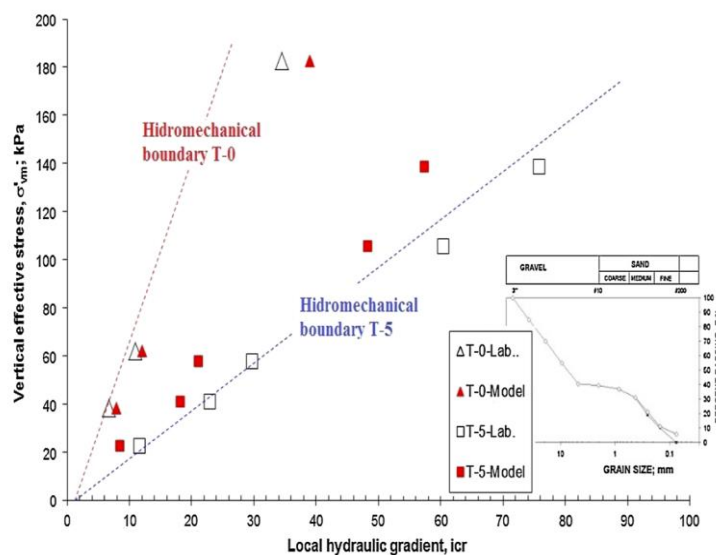


Figure 1.16 Comparaison du modèle avec les résultats expérimentaux (Moffat et Herrera, 2015)

Le deuxième terme des équations représente l'effet de la direction de l'écoulement. D'après les résultats obtenus, l'effet de la direction du flux sur le gradient hydraulique critique est inférieur à 5 %, ce qui est cohérent avec l'hypothèse de **Moffat and Fannin (2011)** selon laquelle l'enveloppe hydromécanique est indépendante de la direction de l'écoulement. En outre, **Ahlinhan and Achmus (2012)** ont montré qu'une augmentation de l'instabilité des sols diminue les effets de la direction de l'écoulement. Par conséquent, la négligence de la deuxième partie de ces équations n'a pas un effet significatif sur le gradient hydraulique critique, en particulier pour les sols ayant un potentiel d'instabilité interne plus élevé.

Le modèle discuté par **Moffat et Herrera (2015)** a été développé en utilisant un perméamètre à paroi rigide sans tenir compte de l'effet des contraintes de confinement. Ils ont supposé que la pression de confinement, la contrainte déviatorique et la contrainte effective augmentaient de manière identique. Le modèle n'a pas été calibré pour les conditions anisotropes où la contrainte effective était différente de la contrainte de confinement. En utilisant un perméamètre à paroi flexible, il a été montré que le gradient hydraulique critique (i_c') correspondant au déplacement observable des particules fines, augmente linéairement dans des conditions de contrainte isotrope (**Liang et al. 2019**). Mais dans des conditions de contraintes anisotropes, le gradient hydraulique critique (i_c') diffère de cette tendance. Il augmente avec la contrainte effective pour atteindre un pic maximal, puis diminue au-delà d'une certaine contrainte effective (**Figure 1.17**). Cette observation remet en cause les résultats expérimentaux précédents puisqu'une majorité d'entre eux ne pouvaient pas simuler physiquement des conditions de contraintes anisotropes. La divergence entre les deux gradients hydrauliques critiques est le résultat de la ségrégation locale des fines, qui se produit dans des conditions de contrainte anisotrope.

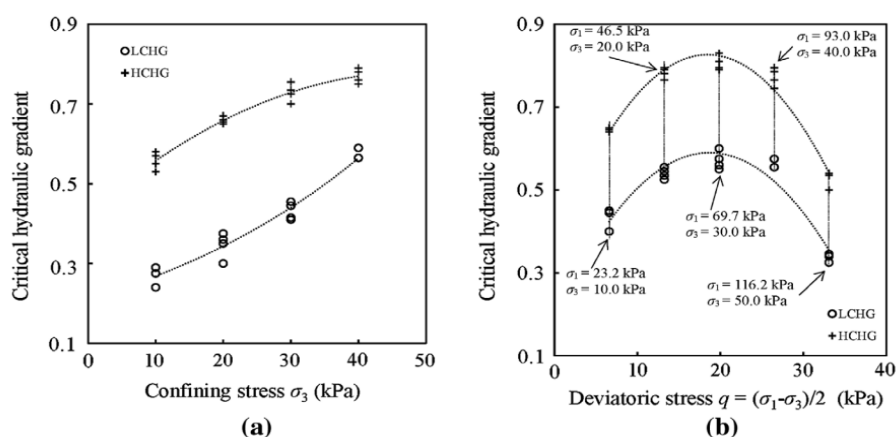


Figure 1.17 Influence de la contrainte appliquée sur le gradient critique: (a) cas isotrope; and (b) cas anisotrope (Liang et al. 2019)

1.3.4 Paramètres agissant sur la suffusion

En complément des paramètres pris en compte dans l'élaboration des critères granulométriques, hydromécaniques pour évaluer la susceptibilité d'un sol à la suffusion, il existe d'autres facteurs qui interviennent dans ce processus tels que la densité (Wan and Fell 2004), le type de fines (Benamar et al. 2012), la physico-chimie du fluide (Benamar, 2014), la forme des particules (Marot et al, 2012) ... En effet, deux sols ayant la même distribution granulométrique et soumis aux mêmes conditions hydromécaniques peuvent présenter une susceptibilité à l'érosion différente s'ils n'ont pas le même état de compaction. Le **Tableau 1.1** récapitule les principaux paramètres qui influent sur la suffusion (Sail, 2012).

Tableau 1.1 Paramètres influençant la susceptibilité à la suffusion (Sail, 2012)

Principaux paramètres	Paramètres secondaires
Géométrie des grains	- La taille des grains et leurs distributions - La forme des grains
Géométrie des pores	- La taille des pores et leurs distributions - La forme des pores
Propriétés mécaniques	- L'état de compaction - L'angle de frottement φ - La cohésion C - La rugosité de la forme des grains
Conditions hydrauliques	- Le gradient hydraulique - La vitesse d'écoulement - L'angle entre la direction de l'écoulement et la gravité - Les propriétés physiques du fluide

La suffusion est associée au transport des particules fines dans le milieu poreux. Ces particules possèdent des caractéristiques qui peuvent agir sur leur processus de transport et de détachement. Cette partie est consacrée à la présentation de l'effet des particules fines et des interactions physico-chimiques sur la suffusion.

- **Types de fines**

Dans le but d'étudier l'effet du type des particules fines sur la suffusion, (**Seghir et al, 2014**) ont mené des expériences avec des mélanges composés de sable de Fontainebleau (NE34) avec 5 % de fines en utilisant soit de la Kaolinite, de l'Illite, ou du Limon. L'Illite est moins dispersive que la Kaolinite (**Pham 2008**). Les deux types d'argile sont constitués de feuillets, tandis que le Limon est constitué de quartz de forme arrondie irrégulière. Comme les caractéristiques physico-chimiques des fines utilisées ne sont pas similaires, il était attendu un comportement différent au regard de la suffusion. Les résultats ont montré que la Kaolinite est le plus susceptible à la suffusion, alors que l'Illite est la plus résistante (**Error! Reference source not found.**). Cette différence a été expliquée par la différence de dispersivité des matériaux testés.

En termes de conductivité hydraulique, la **Figure 1.18** montre que la conductivité hydraulique des mélanges diminue avec l'augmentation du gradient hydraulique. Cette réduction est plus importante pour la Kaolinite et le Limon et atteint 50 % de sa valeur initiale. Cependant, pour le mélange sable-Illite où l'érosion n'intervient pas de manière importante, la conductivité hydraulique reste globalement constante pour les gradients hydrauliques appliqués. Ce résultat indique que le processus de suffusion, impliquant le détachement des particules et leur transport ultérieur dans la matrice du sol, peut également être accompagné par une redéposition de ces particules et le colmatage probable.

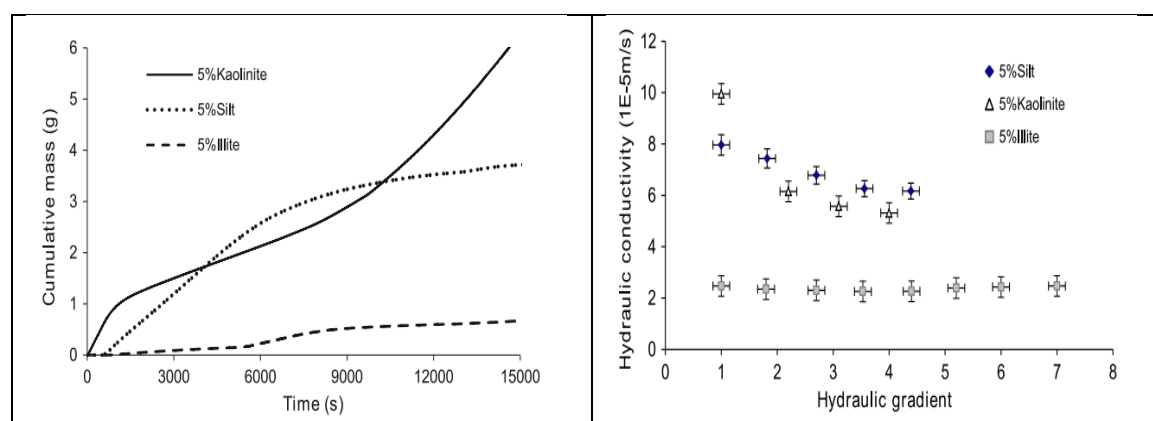


Figure 1.18 Variation de la masse érodée cumulée et la conductivité hydraulique (**Seghir, 2012**)

- **Teneur en fines**

Afin d'étudier l'effet de la teneur en fines sur la suffusion du mélange, trois essais ont été réalisés par **Seghir et al. (2014)** en utilisant de la Kaolinite comme fines à des teneurs de 5, 10 et 20 %. Les résultats obtenus exprimés en termes de masse érodée cumulée et de conductivité hydraulique sont présentés dans la **Figure 1.19**. L'augmentation de la teneur en fines dans le mélange entraîne une diminution de la porosité, résultante du remplissage des pores par les fines. Les résultats montrent que plus les fines sont ajoutées dans le mélange, moins il est susceptible à la suffusion. Il est évident que l'augmentation de la teneur en fines dans les mélanges conduit à une résistance plus importante à la suffusion. La masse érodée cumulée du mélange avec 20 % de Kaolinite-sable est très faible par rapport à celle du mélange avec 5 % de Kaolinite-sable. Lorsque la charge hydraulique appliquée a été fortement augmentée afin de forcer l'érosion du mélange Kaolinite-sable à 20 % la matrice du sol a été endommagée, ce qui

a provoqué le lavage des particules de sable. En analysant la variation de la conductivité hydraulique (**Figure 1.19**), on peut déduire qu'à faibles gradients hydrauliques, le mélange composé de 5 % de Kaolinite est plus perméable que les mélanges à 10% et 20 % de Kaolinite-sable, en raison d'une plus grande porosité. Les valeurs de conductivité hydraulique diminuent rapidement lors de l'application des premiers gradients hydrauliques, en particulier pour le mélange Kaolinite-sable à 20 %.

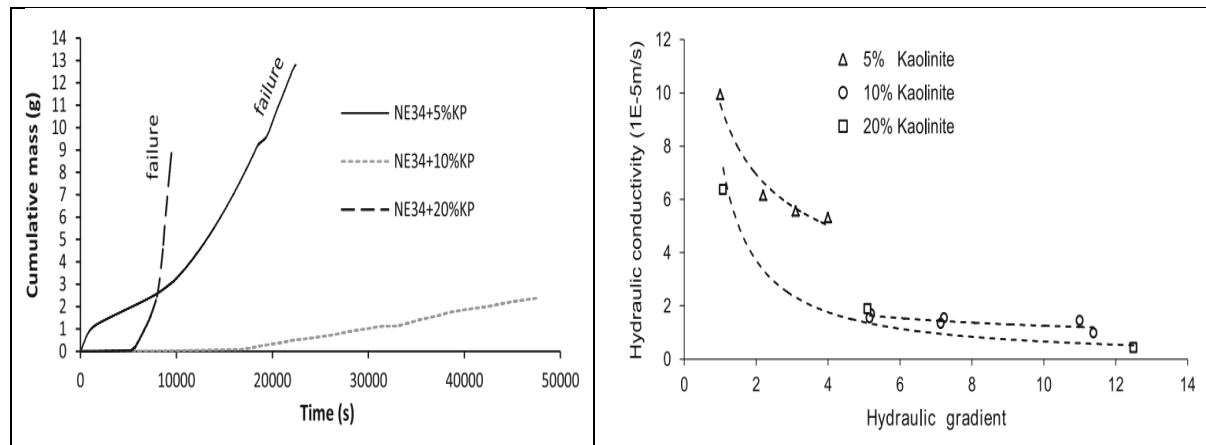


Figure 1.19 Variation de la masse érodée cumulée et la conductivité hydraulique des matériaux testés (Seghir, 2012)

De plus, **Prasomsri et al. (2021)** ont étudié l'effet de la teneur en fines sur l'instabilité interne des sols sableux. Lors de l'étude de la stabilité interne, sept mélanges avec teneur en fines = 0, 15, 20, 25, 30, 32.5, 35, et 40% (en masse) sont testés dans cette étude (**Figure 1.20**). Les résultats indiquent que la teneur en fines a une influence significative sur le gradient hydraulique critique lié à la détection des particules érodées. Le sol avec une teneur en fines inférieure à 30% est susceptible à la suffusion à un gradient hydraulique relativement faible. Le sol de transition, dont la teneur en fines est comprise entre 30% et 35%, présente également un phénomène de suffusion, mais le gradient hydraulique critique augmente significativement avec l'augmentation de la teneur en fines. Le sol avec une teneur en fines supérieure à 30% présente une stabilité interne à un gradient hydraulique plus important. Les résultats soulignent également la nécessité de prendre en compte plusieurs paramètres, tels que la densité, effet du gap, et la contrainte de confinement.

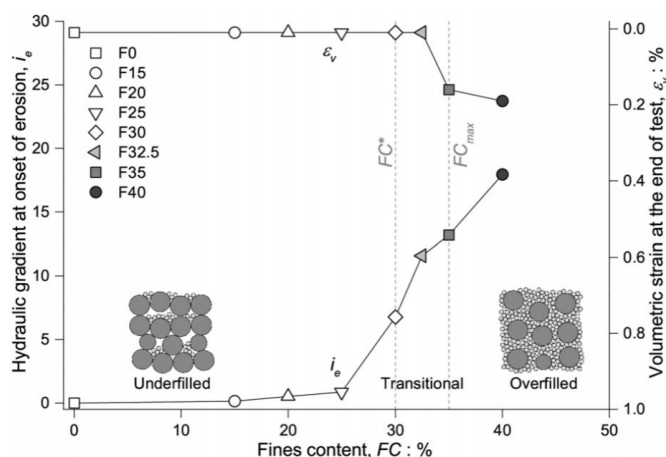


Figure 1.20 Gradient hydraulique critique and déformation volumique en fonction de la teneur en fines initial (Prasomsri et al. 2021)

1.3.5 Quantification de la suffusion

1.3.5.1 Calcul de la masse érodée

Pendant les essais de suffusion sur des sols cohésifs (argileux, Limoneux), la couleur de l'effluent est généralement un indicateur de la migration des fines, et peut servir dans la détermination de la durée de l'essai. Un effluent transparent indique qu'il n'y a plus des fines dans le flux sortant (état de non-érosion) (Chang et Zhang 2011). La quantification de la concentration des fines dans l'effluent est effectuée en utilisant un turbidimètre qui permet de mesurer instantanément la turbidité (sortie en NTU ou intensité). Cette mesure est basée sur la mesure de l'intensité lumineuse, et la corrélation avec la concentration correspondante nécessite un étalonnage avec le type de fines utilisé par exemple : Kaolinite, Illite, Limon (Seghir et al.2014; Elandaloussi et al. 2019). Par conséquent, ce dispositif ne peut être utilisé que pour une fraction fine constituée de particules Limoneuses ou argileuses, mais pas pour des particules de sable. L'intégrale du produit de la concentration et du débit volumique dans le temps permet de calculer la masse érodée cumulée (Figure 1.21).

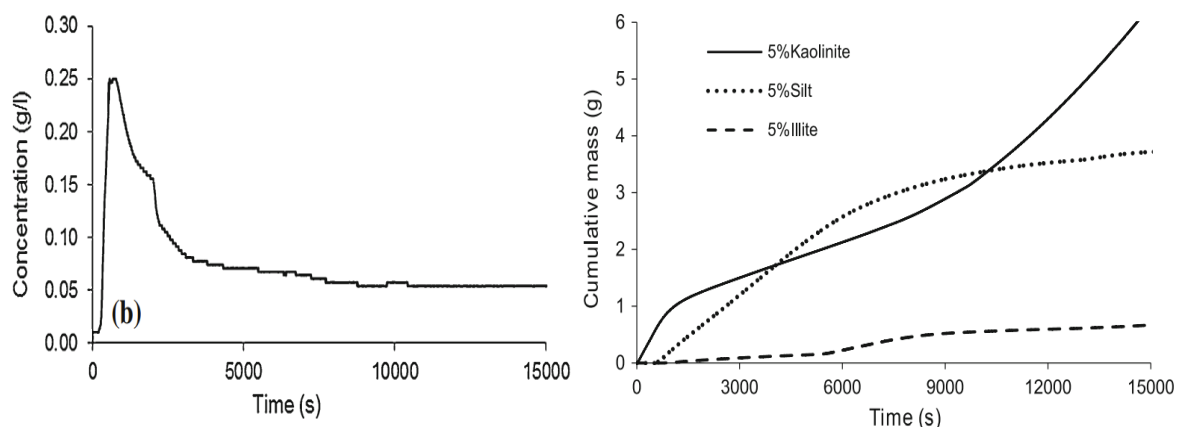


Figure 1.21 Evolution de (a) la concentration de l'effluent ; (b) la masse érodée cumulée en fonction du temps (Seghir et al. 2014)

Dans le cas des sols plus grossiers et peu cohésifs, le calcul de la masse cumulée est effectué par analyse granulométrique de la masse sèche des particules érodées dans l'effluent. Plusieurs systèmes ont été développés afin de suivre l'évolution de la masse érodée pendant l'essai (**Sail et al. 2011, Ke et Takahashi 2014**). Cependant, dans ce cas le temps de détection de l'initiation de la suffusion est retardé, du fait que la mesure est réalisée à la fin du palier hydraulique. Par conséquent, la masse est mesurée de façon retardée par rapport à la mesure du débit ou de la pression interstitielle.

1.3.5.2 Conductivité hydraulique globale

L'évolution de la conductivité hydraulique peut servir comme un indicateur sur le processus de transport des particules dans l'échantillon. Cette conductivité hydraulique est évaluée en mesurant le gradient hydraulique ($\Delta H/L$) le long de la colonne de suffusion. Pendant l'essai, des variations de pression se développent dans la matrice granulaire. Cette variation est fonction de la granulométrie, et des propriétés physiques du sol et du fluide, et, ceux-ci peuvent contribuer à divers régimes d'écoulement (laminaire ou turbulent). En outre, le dépôt de particules et la morphologie du dépôt dépendent des caractéristiques du milieu poreux et la nature de la sollicitation hydraulique (**Mays et Hunt 2005**).

Dans la littérature, plusieurs types de charge hydraulique ont été appliqués : gradient constant (**Dikinya 2008; Seghir 2014**), gradient par palier (**Chang et Zhang 2011, Benamar et al. 2019**), débit constant (**Marot 2012, Sterpi 2003**). **Rochim et al. (2017)** ont mené des essais en appliquant les trois types de chargement hydraulique, afin d'évaluer l'effet de la nature de la charge hydraulique sur l'évolution de la conductivité hydraulique. Les résultats ont montré que l'évolution de la conductivité hydraulique dépend de l'historique de charge hydraulique (**Figure 1.22**). Pour un gradient hydraulique incrémenté par palier, une évolution de la conductivité hydraulique se présente en trois phases prédominantes : filtration, processus d'érosion et enfin défaillance (valeur constante de la conductivité hydraulique). Avec ce type de chargement, la possibilité de suivre toutes les évolutions telles que l'initiation et le développement de la suffusion est plus facile. Par contre, ce suivi est difficile avec un gradient hydraulique constant ou avec un débit contrôlé. Dans ces derniers cas, la filtration qui induit le colmatage se produit pendant l'essai, ce qui aboutit à la diminution de la conductivité hydraulique. La diminution de la conductivité hydraulique, dans le cas du gradient constant, a été observée dans d'autres études (**Moghadasi et al. 2004; Mays et Hunt 2005; Dikinya 2008**). Par conséquent, on ne peut pas savoir si l'apparition de l'érosion est juste retardée au-delà de la durée des tests, ou si elle ne se produira jamais.

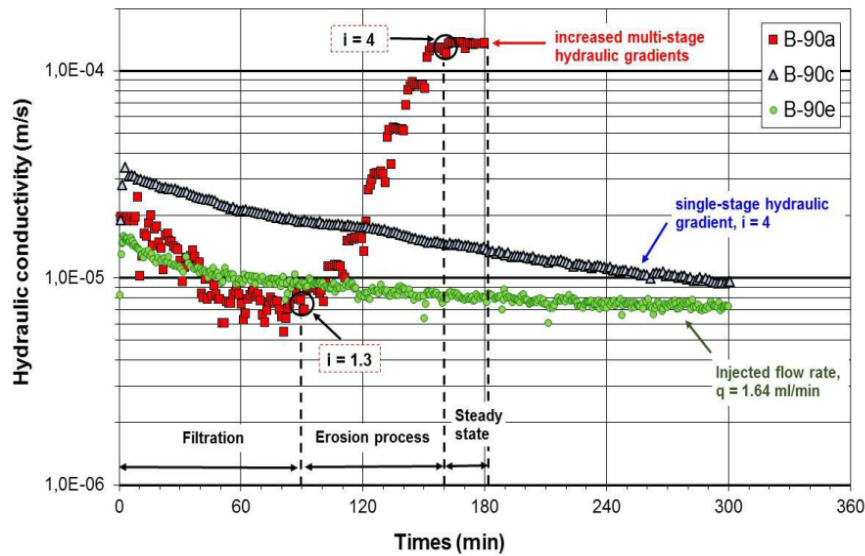
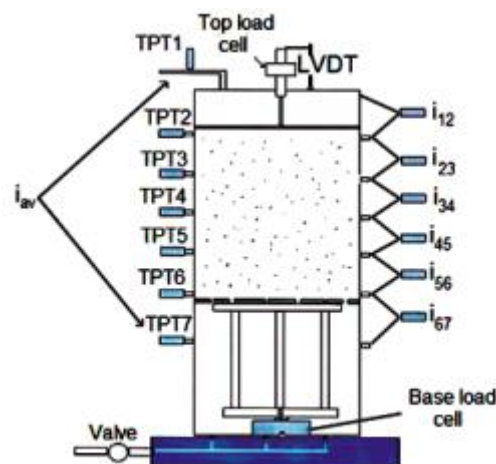


Figure 1.22 Évolution de la conductivité hydraulique en fonction du temps (Rochim et al. 2017)

Dans tous les cas, il est évident que la susceptibilité des sols à la suffusion dépend de l'historique de la charge hydraulique. Pour la nécessité de la classification de la susceptibilité à la suffusion, l'application d'un gradient hydraulique par palier semble plus adaptée parce qu'elle permet de déterminer le gradient d'initiation de la suffusion. Elle peut également être la plus représentative de l'histoire de la charge hydraulique subie par une digue, où les gradients hydrauliques locaux augmenteront progressivement en raison de l'augmentation du niveau d'eau derrière la structure de rétention d'eau.

1.3.5.3 Gradient hydraulique local

Le gradient hydraulique local permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des pressions locales dans l'échantillon, et de détecter l'initiation de l'instabilité. Moffat et al (2011) ont préconisé d'utiliser le gradient hydraulique local afin de bien détecter l'instabilité par la brusque variation du gradient hydraulique (Figure 1.23).



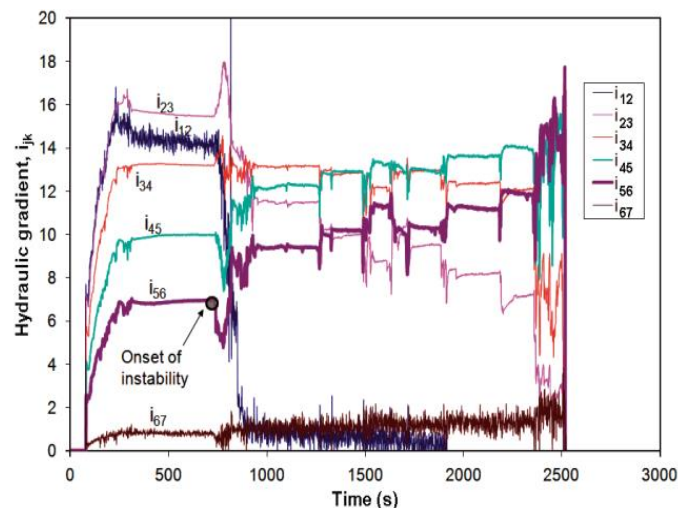


Figure 1.23 Evolution des gradients hydrauliques locales (Moffat et al. 2011)

Sail et al. (2011) ont interprété la variation de la charge hydraulique locale mesurée à l'initiation et au développement de l'érosion dans une conduite. Ils ont observé une augmentation de la charge locale au milieu de l'éprouvette due à la filtration induisant un colmatage qui génère une surpression interstitielle. Enfin, une chute du gradient hydraulique local apparaît comme une conséquence du développement rapide et important du chemin préférentiel.

De même, les résultats obtenus par **Benamar et al. (2019)**, pour la variation du gradient hydraulique local, indiquent une forte augmentation de ce paramètre du côté aval de l'échantillon de sol, causée par l'accumulation de particules érodées dans la partie avale de la cellule. Ce résultat indique une grande migration des fines érodées de l'échantillon vers l'exutoire, mais, à cause de la filtration dans le sol, une grande partie des fines est retenue dans la matrice du sol. Par conséquent, la porosité diminue et les pressions interstitielles augmentent dans la partie avale de l'échantillon.

1.4 Les hétérogénéités induites dans le sol et leurs effets sur la suffusion

Dans la construction des barrages, les matériaux de construction sont mis en place de manière aléatoire. Par conséquent, la méthode de préparation contrôlée des échantillons en laboratoire ne peut pas être utilisée sur les sites, même si l'hypothèse d'homogénéité est satisfaite. En contrôlant la résistance au cisaillement du sol, le tassement, la perméabilité, l'érosion interne et beaucoup d'autres aspects, le critère de l'homogénéité dans le sol reste important. Il n'existe pas de technique de mise en place pour les travaux sur site qui puisse garantir une homogénéité du matériau compacté. La raison est que le mécanisme de mouvement des particules n'est pas toujours évident, il n'existe pas de méthode standard concise pour bien quantifier l'homogénéité du sol sur le terrain. Alors que dans le laboratoire il y a des outils qui permettent de la vérifier en utilisant la gamma densimétrie par exemple, mais cela est coûteux. Les études récentes ne sont pas en mesure de considérer l'homogénéité du sol de manière quantitative. Il n'existe pas de méthode standard pour la production d'un spécimen parfaitement homogène pour les essais expérimentaux.

Les différents critères de classification des sols ont été élaborés en supposant que le sol est homogène sans vérification de cette hypothèse. Selon **Ripley (1986)**, le potentiel d'instabilité interne d'érosion d'un sol peut être significativement sous-estimé au laboratoire par rapport au site, si le matériau du sol est susceptible à la ségrégation. Deux sols ayant la même distribution granulométrique globale et même densité, peuvent donner différentes susceptibilités à la suffusion. En effet, les critères basés sur ces études présentent une divergence dans l'évaluation de la susceptibilité interne. Le **Tableau 1.2** montre que la classification des résultats des critères de suffusion pour différents sols à granulométrie étalée varie de manière significative, sachant que ces critères ont été établis pour le même type de sol.

Tableau 1.2 Evaluation de la susceptibilité à la suffusion selon différents critères (**Wan et Fell 2008**)

Test sample	Percentage of kaolin	Wan et Fell (2008)	Sherard (1979)	Kenney et Lau (1985, 1986)	Burenkova (1993)
1, 1A	0	S	U	U	S
2R	0	S	U	U	U, M
3R	0	S	U	S, M	S
4R	0	S	U	U	S
5	5.9	S	U	U	U, M
6	11.2	S	U	U	U, M
7	21.8	S	U	U	S
9	0	S	U	U	S
10	0	U	U	S	U
11	0	S	U	U	S
13	5.5	S	U	U	S
14A	10.9	U, M	U	U	U
15	21.5	U	U	U	U
RD	0	S	U	U	S
A2	0	U	U	U	U
A3	0	U	U	U	U
B1	0	U	U	U	S
B2	0	U	U	U	U
C1	0	U	U	U	U
D1	0	U	U	U	S

S : stable; U : Unstable; M : marginal.

Il est nécessaire donc de bien prendre en compte l'hétérogénéité induite par la procédure de préparation de l'échantillon, et son effet sur la susceptibilité à la suffusion. De plus, tous ces critères ont été développés en se basant sur des essais sur des sols ne présentant pas des hétérogénéités structurales. D'après la littérature, il est nécessaire de distinguer entre deux types d'hétérogénéités, induite (suite à l'érosion) et structurale (intrinsèque au sol). Des études expérimentales récentes ont montré que l'hétérogénéité du sol due au processus d'érosion apparaît même avec un échantillon comportant une distribution granulométrique uniforme **Aboul Hosn et al. (2019)**. Ce phénomène a été identifié en termes de variation du gradient hydraulique local (**Sail et al. 2011**), l'apparition de chemins préférentiels (**Benamar et al. 2019**), la distribution spatiale non-uniforme des fines et des vides observés par tomographie à

rayons X (Nguyen et al. 2019). En ce qui concerne l'hétérogénéité structurale, elle peut être présente sous plusieurs formes : localisée, par couches, par ségrégation. Cette partie est consacrée à la présentation des différentes études menées sur les hétérogénéités induites par la suffusion.

1.4.1 Processus de suffusion hétérogène induit

1.4.1.1 A l'échelle macroscopique

La plupart des tests de suffusion dans la littérature ont abordé le processus hétérogène de suffusion à l'échelle macroscopique en se basant sur l'observation visuelle, et l'évolution des gradients hydrauliques locaux.

1.4.1.1.1 Observation visuelle

La suffusion s'initie à certains endroits spécifiques où des écoulements préférentiels se produisent fortement sur la paroi du perméamètre, où la porosité est plus grande, et progresse ensuite dans plusieurs zones de l'échantillon de sol. Ce développement des écoulements préférentiels aboutit à l'apparition des hétérogénéités transversales et longitudinales, perpendiculaires et parallèles à la direction de l'écoulement. Ces hétérogénéités induites par la suffusion ont été observées par Sail et al. (2011), Luo et al. (2013), Nguyen et al. (2019).

Nguyen et al. (2019) ont montré que le chemin préférentiel s'initie à partir de plusieurs canaux locaux d'écoulement, et se développe progressivement en s'élargissant au cours de l'essai (Figure 1.24). Une migration des particules fines peut être observée à travers les parois transparentes de la cellule d'érosion. Bien que l'échantillon ait été préparé approximativement homogène, il aboutit d'une manière complexe à la formation aléatoire de ces canaux d'écoulement dans l'échantillon. Concernant l'hétérogénéité transversale, la zone d'érosion est plus importante au niveau du bord de l'échantillon qu'au centre. Ces observations visuelles valident l'hétérogénéité du processus d'érosion avec des écoulements préférentiels localisés au niveau de la paroi latérale, et peut aboutir à un tassement différentiel.

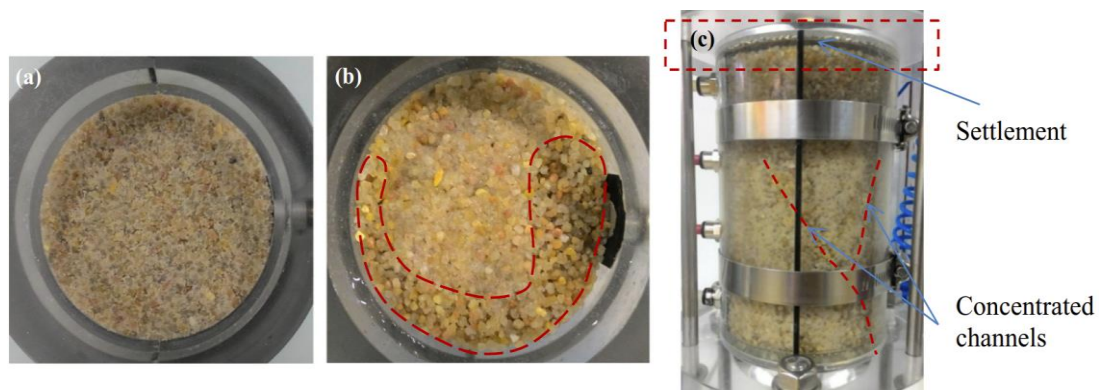


Figure 1.24 Processus de suffusion ; (a) état initial ; (b) Hétérogénéités transversales ; (c) Hétérogénéités longitudinales et chemins préférentiels (Nguyen et al. 2019)

1.4.1.1.2 Analyse granulométrique post-érosion (échelle macroscopique)

La suffusion aboutit au réarrangement et à la perte des particules. On distingue entre particules mobiles non érodables et particules fines susceptibles à l'érosion. L'analyse granulométrique des différentes couches permet de bien comprendre le processus de migration et d'échange des

particules inter-couches. Par conséquent, elle peut nous donner une indication sur le processus de filtration au sein de l'échantillon. **Benamar et al. (2019)** ont étudié la granulométrie post-suffusion des deux couches en aval (chacune 10 cm) d'un échantillon de graves du Rhin (hauteur = 50 cm) soumis à un écoulement ascendant. Les résultats montrent que les particules érodées proviennent principalement de la couche en aval proche de l'exutoire, comme l'illustre la **Figure 1.25a**, ce qui est expliqué par un phénomène de migration de fines vers la partie avale, mais la matrice granulaire résiste et agit comme un filtre par rapport aux particules érodées en amont de l'échantillon. L'analyse granulométrique des deux dernières couches en aval montre que les particules qui ont migré par suffusion vers ces couches ont une taille inférieure à 1 mm (**Figure 1.25.b**). Les distributions granulométriques montrent également que la couche avale 1 est appauvrie en fines, alors que la couche sous-jacente (couche 2) est enrichie en fines qui sont retenues par auto-filtration. Des résultats similaires ont été obtenus par **Fannin et Moffat (2006)**, et **Sadaghiani et Witt (2011)**. Ces résultats mettent en évidence le processus complexe de suffusion où le détachement des particules et la filtration du transport sont couplés.

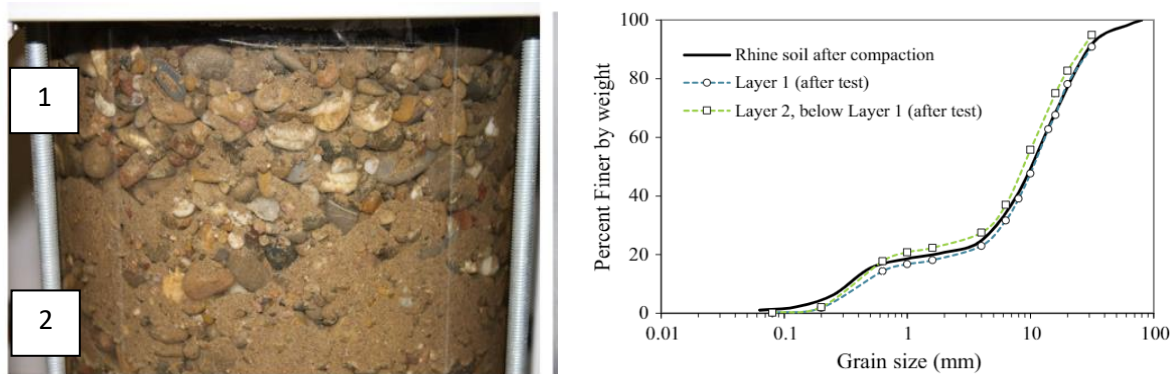


Figure 1.25 (a) Couche aval post suffusion (b) Courbe granulométrique des couches avals (pre/post suffusion) (**Benamar et al. 2019**)

Outre les analyses granulométriques, le développement de l'hétérogénéité longitudinale a été quantifié par les mesures du gradient hydraulique local. Ces résultats obtenus montrent que les différentes couches de l'échantillon se comportent différemment vis-à-vis de la suffusion même dans un échantillon considéré approximativement homogène, ce qui demande une investigation plus affine à l'échelle de la microstructure (par tomographie X par exemple).

1.4.1.2 Analyse à l'échelle de la microstructure (par tomographie x)

La tomographie à rayons X (X-ray) permet de suivre la microstructure d'un matériau pré et post érosion, et, en particulier, le réarrangement local des particules grossières. En effet, elle vise à quantifier un champ 3D d'atténuation des rayons X par émission sous différents angles. Ce champ est discrétisé en éléments de volume 3D (voxel = pixel³), avec des résolutions allant d'un millimètre à quelques micromètres par pixel, en fonction de la taille de l'échantillon, de la résolution du détecteur et du pas de rotation. Une résolution spatiale supérieure à 1 mm a été utilisée pour la première fois dans l'étude des bandes de cisaillement dans les sols granulaires par **Desrues et al. (1996)**. Par la suite, l'imagerie à l'échelle de la particule avec une résolution de quelques microns a récemment commencé à être mise en œuvre en mécanique des sols (**Hall et al. 2010**, **Hasan et Alshibli 2010**). Pour les études de l'érosion interne, la tomographie à

rayons X a été utilisée par exemple par **Fonseca et al. (2014)**, ou plus **Bianchi et al. (2018)**, et **Mehdizadeh et Disfani (2018)**. Récemment, **Nguyen et al. (2019)** ont mené des essais de suffusion sur un sol naturel fin (HN34, HN1/25). La cellule a été installée dans la chambre à tomographie au laboratoire 3SR afin de suivre la progression de la suffusion pendant l'essai, dans un échantillon soumis à un écoulement descendant (**Figure 1.26**).

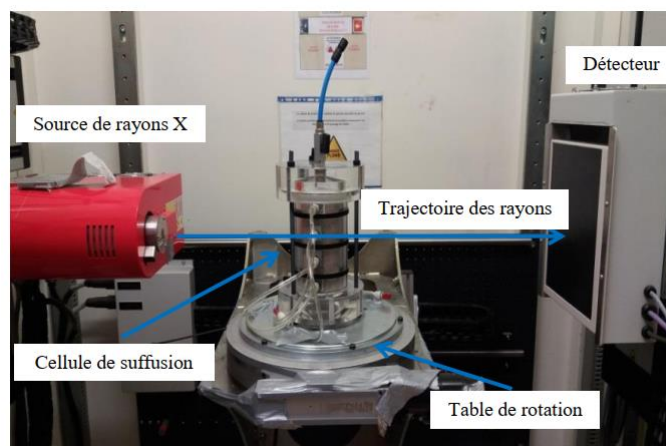


Figure 1.26 Essai de suffusion dans une chambre à tomographie (**Nguyen 2018**)

Les images obtenues sont traitées par analyse d'images, en utilisant un logiciel OpenSource ImageJ afin de distinguer entre les différentes phases (particules, eau, air), en se basant sur la nuance de gris. Cette analyse permet d'étudier l'effet de la suffusion sur la microstructure d'une façon quantitative et qualitative. Les résultats sont présentés par des coupes médianes longitudinales (**Figure 1.27**), et transversales à la surface (**Figure 1.28**). Ils ont montré que l'échantillon préparé n'est pas à parfaitement homogène. En outre, la suffusion s'initie sur la périphérie de la partie supérieure et se progresse aléatoirement le long de l'échantillon pour former un chemin préférentiel. Elle est plus forte sur la périphérie qu'au centre de l'échantillon à cause de l'effet de la paroi qui joue un rôle important dans le contrôle de la suffusion.

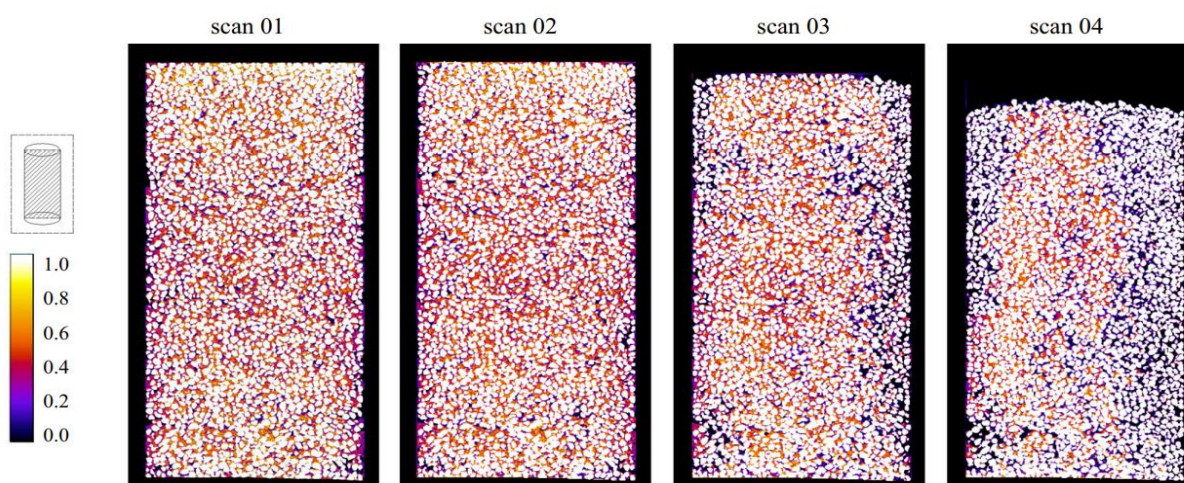


Figure 1.27 Coupes médianes verticales de pendant l'essai de suffusion (**Nguyen et al. 2019a**)

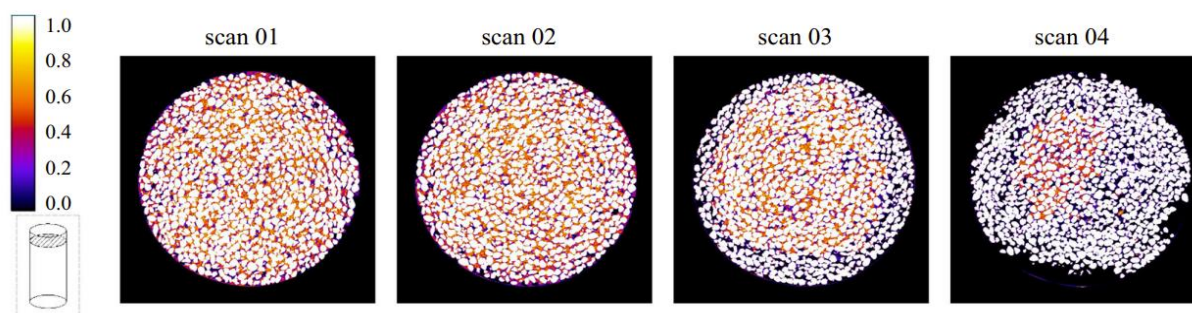


Figure 1.28 Coupes transversales à la surface pendant l'essai de suffusion (Nguyen et al. 2019a)

Pour obtenir des résultats quantitatifs supplémentaires sur les propriétés physiques locales (teneur en fines, et l'indice de vides), des méthodes de moyennage spatial sont appliquées. Ces propriétés physiques locales sont calculées par la détermination de la moyenne des voxels dans chaque coupe, afin de déterminer les profils correspondants. Il a été démontré, d'après les profils longitudinaux, que la méthode de bourrage humide ne produit pas un échantillon parfaitement homogène surtout sur les interfaces de différentes couches compactés, ce qui est cohérent avec **Frost et Park (2003)**.

En ce qui concerne la teneur en fines (**Figure 1.29**), il y a une concentration sensiblement plus faible dans la couche supérieure due à la migration des fines lors de la mise en place de l'échantillon vers la couche inférieure, expliqué par la perte des fines sur le front de saturation. De manière cohérente, l'augmentation de l'indice de vides est plus significative dans les couches supérieures en raison du tassement et de la perte des fines. A l'exception des discontinuités sur les interfaces dues à la mise en place de l'échantillon entre les différentes couches de sol, la perte en fines est presque homogène le long de l'échantillon.

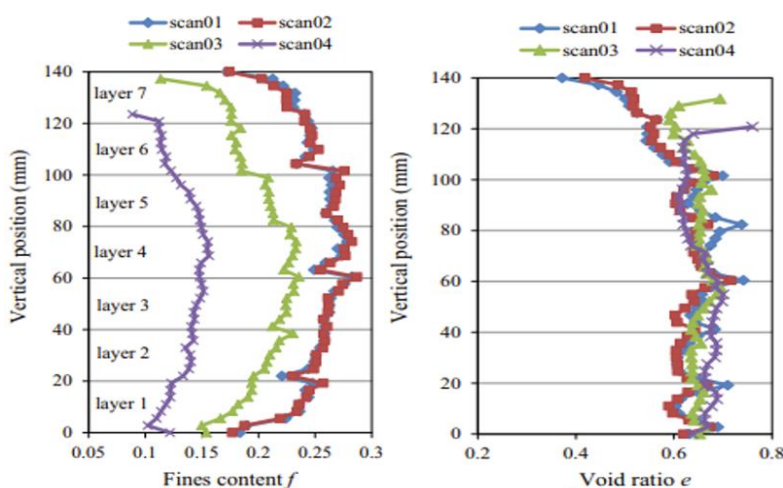


Figure 1.29 Profils longitudinaux de la teneur en fines et de l'indice de vides (Nguyen et al. 2019)

1.4.2 Hétérogénéité structurale du milieu

Les barrages en remblais sont construits par des matériaux de différentes granulométries, grossiers (graviers) et fins (Limon, argile...). La mise en place de ces matériaux se fait par couches de façon aléatoire, ce qui peut générer des hétérogénéités localisées, par couches, et

par ségrégation. Les hétérogénéités, surtout localisées, peuvent également apparaître pendant la mise en service du barrage suite au vieillissement, ou la croissance racinaire par exemple. Récemment, des différentes études ont été menées afin d'investiguer l'effet de quelques types d'hétérogénéité. Un grand nombre de particules fines sont érodées dans la zone au cours de l'évolution de la suffusion, ce qui peut induire une déformation inacceptable des fondations et éventuellement endommager les mesures anti-infiltration des barrages. Dans la première retenue du barrage de Tarbela au Pakistan, la déformation induite par la suffusion a été observée dans la couverture en amont, qui a pour fonction de contrôler les infiltrations dans le barrage. 360 trous et 140 fissures ont été découverts sur la couverture (**Tableau 1.3**). Les investigations réalisées par **Ul Haq et Haq, (1996)**, et **Fell et al (2005)** ont montré que l'accident du barrage de Tarbela était principalement attribué à la suffusion autour des zones de gravier localisées dans les fondations profondes des alluvions sableuses et graviers. En outre, les accidents du barrage de Three Sisters au Canada et du barrage de Mogoto en Afrique du Sud sont également dus à la suffusion autour de ces zones (**Foster et al 2000**). Dans cette partie, on va aborder ces différents travaux de la littérature sur les différents types d'hétérogénéité.

Tableau 1.3 Incidents sur quelques barrages dus à la présence des hétérogénéités

Nom du barrage	Pays	Hauteur	Année de construction	Année de l'incident	Description de l'incident
Mogoto	Afrique du Sud	76	1924	1976	Conduite dans La fondation constituée des matériaux de remblai à granulométrie étalée
Three Sisters	Canada	21	1952	1974	Apparition des conduits dans les fondations, due à l'érosion interne des couches de sable et de Limon sableux dans les zones graveleux
Tarbela	Pakistan	145	1974	1974	Formation de quatre cents trous dans la couche d'argile en amont en raison de l'érosion interne du matériau dans la fondation

1.4.2.1 Hétérogénéité localisée

Certains accidents de barrages ont été attribués à la suffusion autour de zones hétérogènes localisées (Open Framework Gravel: OFG comme les conduits présentant une forte conductivité hydraulique par rapport à leur entourage, qui apparaissent surtout dans des alluvions sablo-graveleux (**Figure 1.30**). Cette conductivité hydraulique est due à la faible teneur en fines dans l'espace poreux. Ces zones peuvent être connectées pour former des chemins d'écoulement (**Klingbeil et al. 1999, Lunt et al. 2004**), et par la suite modifier les conditions d'initiation de la suffusion.

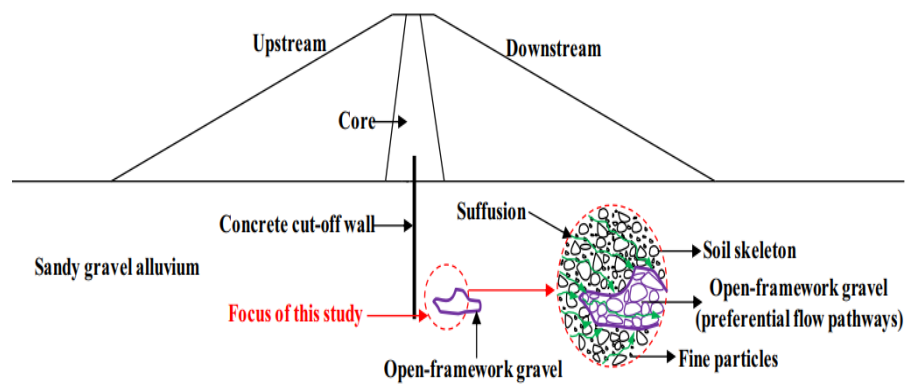


Figure 1.30 Suffusion dans un sol sablo-graveleux présent une hétérogénéité localisée OFG (Luo et Huang 2020)

Luo et Huang (2020) ont effectué des essais de suffusion sur des alluvions de gravier sableux avec et sans hétérogénéité localisée (OFG). En se basant sur le gradient hydraulique local, les résultats ont montré que la suffusion commence d'abord du côté aval dans l'essai sans OFG (Figure 1.31), tandis que dans les essais avec OFG, elle s'initie du côté amont de l'OFG (Figure 1.32), puis les deux progressent principalement en arrière vers le côté amont. La présence de l'OFG diminue de manière significative les gradients hydrauliques d'initiation de la suffusion. En outre, les résultats expérimentaux confirment également que cette zone permet la migration des particules, et augmente considérablement le tassement induit par la suffusion. Il est nécessaire de mentionner que dans ce cas la suffusion est accompagnée par l'érosion de contact sur l'interface séparant les deux matériaux.

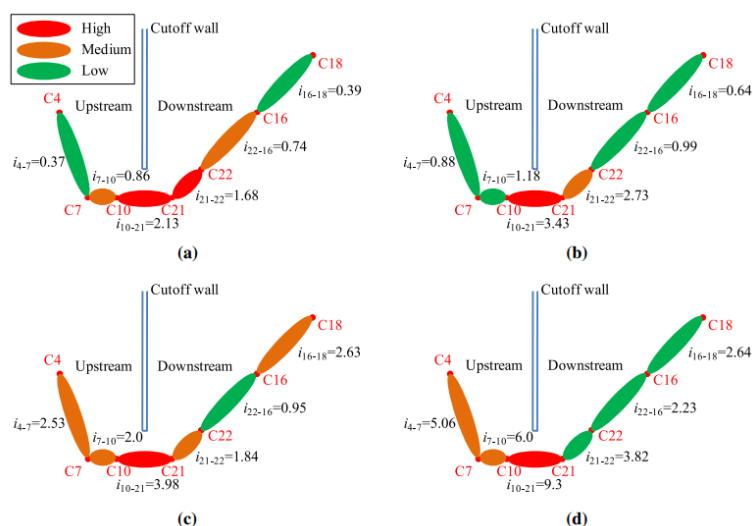


Figure 1.31 Évolution des gradients hydrauliques locaux (rouge : fort, orange : moyen, vert : faible) pendant l'essai de suffusion sans OFG (Luo et Huang 2020)

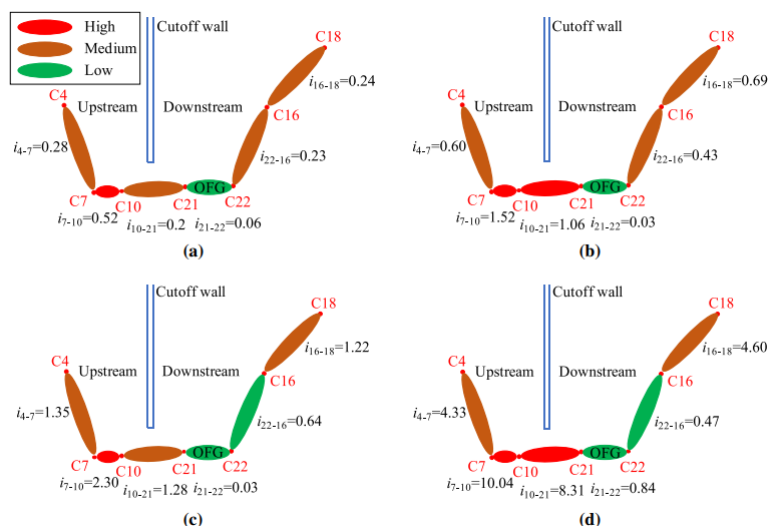


Figure 1.32 Évolution des gradients hydrauliques locales (rouge : fort, orange : moyen, vert : faible) pendant l'essai de suffusion avec OFG (Luo et Huang 2020)

1.4.2.1 Hétérogénéité par couches

Pachideh et Hosseini (2018)

L'hétérogénéité par couches peut apparaître sur les interfaces des différentes couches compactées, même avec un sol constitué d'un même matériau. En effet, **Pachideh et Hosseini (2018)** ont réalisé des essais sous un écoulement vertical (ascendant ou descendant) et horizontal dans un appareil rotatif, afin d'étudier l'effet de compactage sur la susceptibilité à la suffusion. De plus, ce dispositif permet à l'écoulement d'être parallèle ou perpendiculaire par rapport à l'interface des couches de sol compactées (**Figure 1.33**).

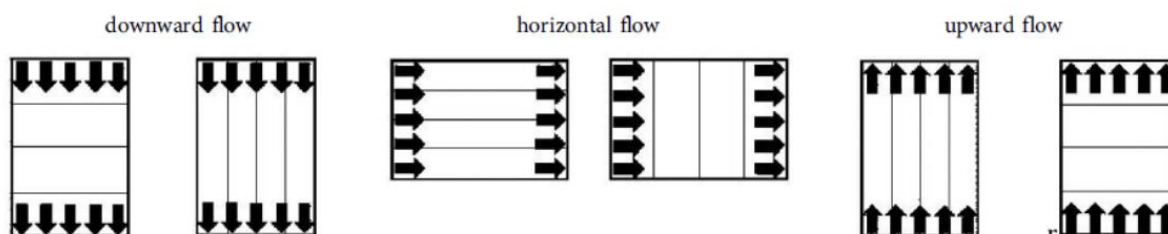


Figure 1.33 Écoulements parallèle et perpendiculaire aux interfaces séparant les différentes couches (Pachideh et Hosseini 2019)

Les résultats ont montré que le débit volumique et la susceptibilité à l'érosion dans le cas d'écoulement parallèle est plus grand que ceux dans le cas d'écoulement perpendiculaire aux interfaces de compactage. De plus, tous les spécimens réalisés sont assez homogènes, alors que sur le site, les sols peuvent être hétérogènes à cause des conditions de terrain.

Karoui (2015) a testé plusieurs configurations d'hétérogénéité par couches, sous un écoulement ascendant. La reconstitution des sols bicouches est faite par coupure granulométrique d'un sol homogène à partir d'un diamètre de coupure précis, en conservant le même pourcentage massique (**Figure 1.34**). Trois configurations sont obtenues : Reference, Filtre (Fines en amont et grossiers en aval), et ségrégué (l'inverse de la configuration filtre). En

autre terme, il y a réarrangement des particules tout en conservant la distribution granulométrique globale initiale par rapport au sol homogène. Les résultats montrent que la configuration homogène est la plus érodable, alors que les configurations Ségréguée et Filtre présentent une susceptibilité à l'érosion plus faible et similaire. La filtration est plus efficace dans le cas de faible épaisseur d'un filtre à une coupure de 2,5 mm.

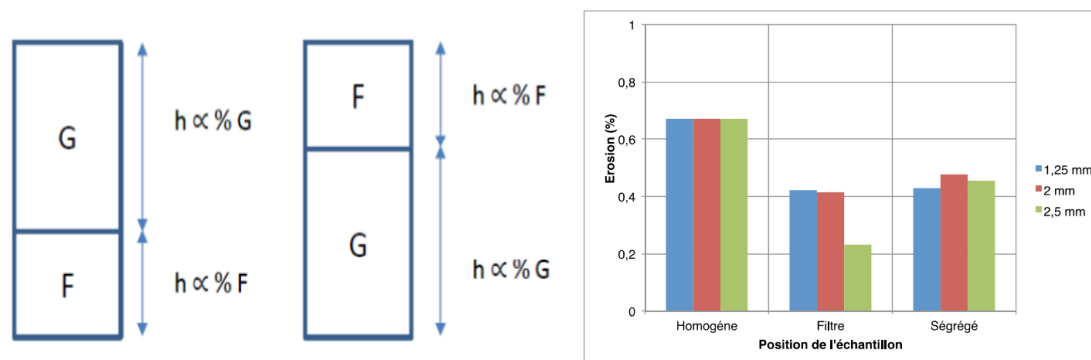


Figure 1.34 Configurations testées (F: fraction fine, G: fraction grossière) et comparaison entre la masse érodée pour les différents essais (Karoui 2015)

Luo et al. (2020)

Une série de tests a été effectuée par Luo et al. (2020) afin d'étudier la suffusion près de la base d'une paroi étanche (cut-off) dans des fondations alluviales composées d'une couche, ou d'une double-couche dont la couche supérieure et inférieure servent comme filtre et sol de base, respectivement (Figure 1.35). Un critère basé sur les constriction a été adopté pour évaluer la rétention de la couche supérieure. La suffusion dans le sol de fondation à double couche est différente de celle dans le sol de fondation à simple couche. En effet, dans le sol de fondation à double couche, la suffusion s'initie près de la base du mur cut-off ou du côté amont, puis elle progresse vers l'aval. Alors que dans le sol de fondation monocouche, la suffusion s'initie du côté aval du mur cut-off, puis elle progresse vers le côté amont.

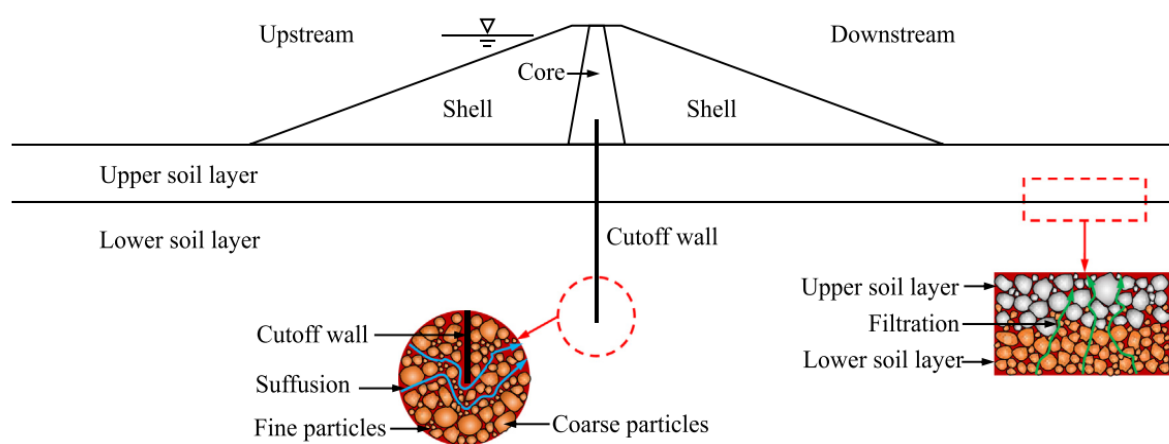


Figure 1.35 Suffusion autour de la base du mur cut-off et filtration dans la fondation de sol alluviale bicouche (Luo 2020)

Les résultats montrent que la couche de sol supérieure a un effet sur la suffusion dans la couche inférieure. Elle affecte également les gradients hydrauliques critiques à l'initiation de la suffusion et à l'éruption. En effet, le gradient hydraulique critique diminue exponentiellement avec l'augmentation du rapport de rétention (D_{c35}/d_{85SA}) entre les deux couches, proposé par **Indraratna (2007)**. Ce rapport prend en compte la taille des constriction à 35% dans le sol filtre (D_{c35}) et la taille des particules à 85% dans le sol de base (d_{85SA}). Si la couche supérieure du sol est un filtre effectif ($D_{c35}/d_{85SA} < 1$), elle peut augmenter de manière significative les gradients hydrauliques critiques (**Figure 1.36**).

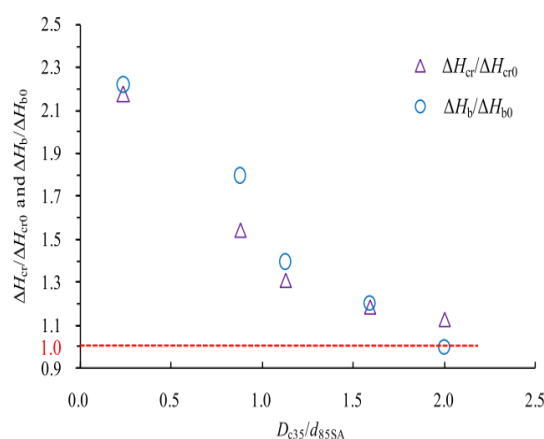


Figure 1.36 Influence du rapport (D_{c35}/d_{85SA}) sur les conditions hydrauliques critiques à l'initiation de la suffusion et à l'éruption **Luo et al. (2020)**

1.4.2.1 Hétérogénéité par ségrégation

Le sol peut subir une ségrégation pendant la mise en place, le compactage ainsi que sous d'autres impacts dynamiques d'origine humaine. La ségrégation aboutit à un tri granulométrique du sol en fraction grossière constituant la couche inférieure, et en fraction plus fines au-dessus. L'arrangement des particules dépend fortement des paramètres de mise en place pendant la construction telles que la teneur en eau du sol, la hauteur de chute, la granulométrie des particules, les vibrations dynamiques. Plusieurs études ont été effectuées afin d'évaluer la susceptibilité d'un sol à la ségrégation. **Sutherland et Grabinsky (2003)** proposent un module de taille des particules S_m (Size Modulus) pour évaluer la susceptibilité de ségrégation d'un filtre ou d'un sol de transition. **Milligan (2003)** montre que le potentiel de ségrégation est affecté par la taille des particules, du coefficient d'uniformité, et la teneur en eau avant la mise en place.

Récemment, **Karoui (2015)** a réalisé des essais de suffusion sur des échantillons de sable de Balloy ayant subi une ségrégation contrôlée par chute sous l'effet de la gravité. La méthode de ségrégation utilisée permet de se rapprocher des conditions de mise en place sur site. Par conséquent, les particules sont réarrangées de façon que la fraction grossière se retrouve au fond de la colonne (**Figure 1.37**).

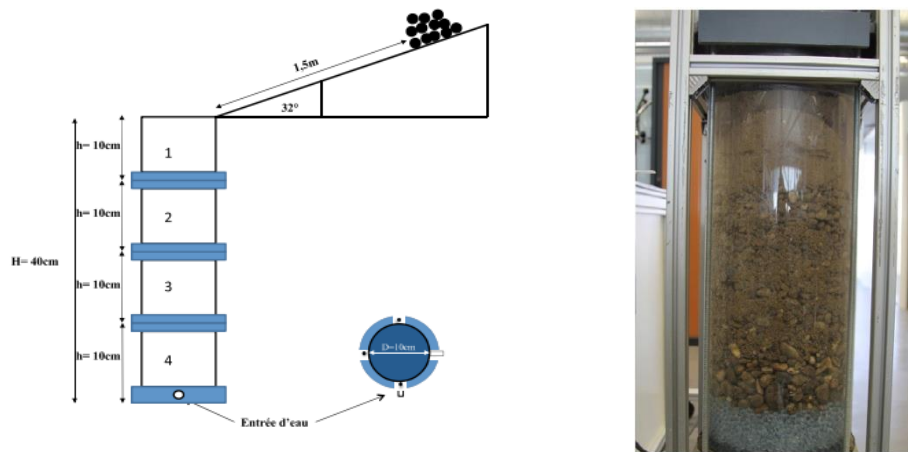


Figure 1.37 Dispositif de mise en place du sol par ségrégation (Karoui 2015)

La susceptibilité à la ségrégation a été quantifiée par l'indice de ségrégation I_s qui est égal au rapport de D_{50} du sol ségrégué sur D_{50} du sol de référence. Cet indice a été appliqué afin d'évaluer le mouvement entre les différentes couches du sol après l'essai de suffusion sous un écoulement ascendant. Les résultats ont montré qu'il y a une diminution de l'indice de ségrégation dans les différentes couches, ce qui a été traduit par le départ des fines vers les couches supérieures accompagné d'un réarrangement des particules (**Figure 1.38**). Donc, l'hétérogénéité par ségrégation induit à l'apparition de l'hétérogénéité dans le processus de suffusion dans les différentes couches de l'échantillon.

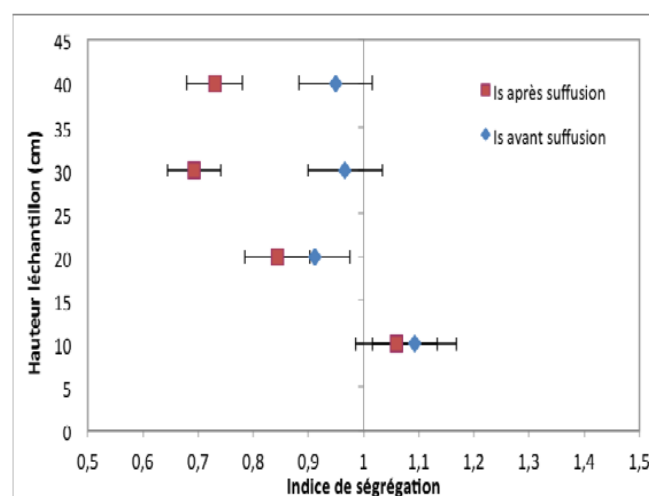


Figure 1.38 Indice de ségrégation dans les différentes couches avant et après suffusion (Karoui 2015)

1.5 Conclusion

Ce chapitre présente les différents travaux effectués sur les sols hétérogènes afin de bien caractériser l'instabilité des sols à la suffusion. Ces études ont donné naissance à des critères d'évaluation basés sur les conditions granulométriques, hydrauliques, et hydromécaniques. La plupart des critères géométriques ont été élaborés pour évaluer l'instabilité interne des sols sous des gradients hydrauliques extrêmes (valeurs supérieures à 10). Un effort minimal a été investi dans la simulation des conditions de terrain. Les structures hydrauliques ne sont pas soumises

généralement à un tel gradient au cours de leur service. Par conséquent, les critères classiques ont tendance à « sous-estimer » (car évalués à sollicitation plus défavorable) la stabilité interne des sols dans des conditions normales d'exploitation et fournissent donc des mesures conservatives.

En outre, il y a une divergence entre les différents critères dans la classification des sols. En effet, la principale raison des variations de résultats obtenus par différentes études dans le cas de sols est l'hétérogénéité des échantillons (échelle expérimentale). On peut également affirmer que les problèmes de transport de particules ne se produisent pas en cas de mauvaise conception, mais qu'ils se produisent typiquement à l'échelle du terrain en raison de problèmes locaux comme la ségrégation.

En réalité, la mise en place des matériaux sur le site n'est pas contrôlée comme au laboratoire, ce qui génère des hétérogénéités structurales. On distingue entre deux types d'hétérogénéités : par évolution granulaire lors du processus de suffusion ou inhérente à la structure du sol. Ces hétérogénéités peuvent se trouver dans un barrage ou sa fondation, et constituer un facteur déclenchant de la suffusion. Les études récentes ont mis l'accent sur le processus de suffusion hétérogène en se basant sur des analyses à l'échelle macro (observation visuelle, gradient hydraulique, analyse granulométrique), et à l'échelle micro par analyse en tomographie X afin de déterminer les modifications microstructurales post-érosion. Le deuxième type des hétérogénéités microstructurales est abordé sous plusieurs formes : localisée, par couches, et par ségrégation. Même si toutes les études récentes ont focalisé sur l'effet de quelques hétérogénéités, il reste un gap dans l'étude des hétérogénéités par plusieurs couches par exemple : la présence d'une couche centrale hétérogène entre deux couches. Dans ce travail, nous effectuons une étude multi-échelle pour étudier l'effet des hétérogénéités par couches sur la susceptibilité du sol à la suffusion.

Chapter 2 : Approches numériques

2.1 Introduction

Les études expérimentales sont principalement basées sur l'évolution temporelle du gradient hydraulique local, de la conductivité hydraulique, de la masse érodée, et sur la distribution granulométrique post-suffusion, ce qui nécessite un recours à d'autres outils complémentaires. Grâce au développement informatique au cours des dernières décennies, de nouveaux outils numériques ont été développés afin de mieux comprendre ce processus. L'érosion interne est généralement modélisée à l'aide d'approches numériques telles que la méthode des éléments finis (**Bi et al. 2021; Zhou et al. 2018**), Smoothed particle Hydrodynamics (SPH) (**Bui et al. 2008**), et la méthode des éléments discrets DEM (**Cundall 1971**).

La méthode des éléments finis (FEM) est basée sur la discrétisation du milieu granulaire en mailles, en considérant les particules comme des nœuds reliés par des segments et situés aux sommets des mailles contenant à l'intérieur le fluide. L'avantage de cette méthode est que seuls les paramètres obtenus des essais en laboratoire, tels que le module d'élasticité, l'angle de frottement interne du matériau et la cohésion, sont utilisés dans les simulations numériques. Cependant ce modèle continue est incapable de reproduire les problèmes de discontinuités des matériaux granulaires réels (**Crosta et al. 2009**). En outre, comme la FEM est une technique basée sur la grille, elle montre parfois une grande déformation de la grille, ce qui peut conduire à des erreurs dans la solution calculée (**Bui et al. 2008**).

Outre cette méthode, la méthode SPH est l'une des approches Lagrangienne sans maillage où les nœuds sont remplacés par des nuages de points dont la répartition est indépendante de la forme du domaine. Elle est utilisée pour simuler les grandes déformations d'un milieu continu ou discret. Par contre, les simulations SPH peuvent être confrontées au problème des particules sur la frontière (**Bui et al. 2008**). Cette contribution unilatérale conduit à des solutions inexacts.

La méthode des éléments discrets (DEM) couplée avec Computational Fluid Dynamic (CFD) est utilisée dans le logiciel PFC^{3D} (Particles Flow Code) (**Cundall et Strack 1979; Itasca, (2008)**). Elle est basée sur le couplage direct de la méthode DEM avec son option fluide. Cette partie est dédiée à détailler la méthode DEM-CFD, et à présenter les différentes études numériques faites sur la suffusion,

2.2-Méthode des éléments discrets (DEM)

La méthode des éléments discrets a été développée par **Cundall (1971)** pour les problèmes liés à la mécanique des roches, puis appliquée aux sols par **Cundall et Strack (1979)**. La première application de la méthode DEM dans la simulation des écoulements des milieux granulaires a été effectuée par **Campbell et al. (1995)**. Grâce à sa flexibilité, Cette méthode est intervenue également dans l'étude des chargements, des glissements de terrain, et aux propriétés physiques des particules solides.

Le modèle est composé de particules rigides qui se déplacent indépendamment et n'interagissent qu'au niveau des contacts ou des interfaces entre les particules. Le comportement des contacts de ces particules rigides est caractérisé par une approche de contact souple, dans laquelle une rigidité normale finie est considérée comme représentant la rigidité mesurable existant au niveau d'un contact, le comportement mécanique d'un tel système est décrit en termes de mouvement de chaque particule et de forces inter particules agissant à chaque point de contact.

Le logiciel PFC^{3D} utilise un modèle DEM en prenant en compte les hypothèses suivantes :

- Les particules sont considérées comme des sphères rigides.
- Les contacts se produisent sur une surface infiniment petite (c'est-à-dire en un point).
- Le comportement au niveau des contacts utilise une approche de contact souple où les particules rigides peuvent se chevaucher aux points de contact.
- Toutes les particules sont sphériques.

2.2.1 Cycle de calcul

Les calculs effectués dans le DEM alternent entre l'application de la deuxième loi de Newton aux particules et la loi force-déplacement au niveau des contacts (**Figure 2.1**). La deuxième loi de Newton est utilisée pour déterminer le mouvement de chaque particule résultant des forces de contact et des forces extérieures qui agissent sur elle, tandis que la loi force-déplacement est utilisée pour mettre à jour les forces de contact résultant du mouvement relatif à chaque contact. La présence d'une paroi exige seulement que la loi force-déplacement tienne compte des contacts balle-mur.

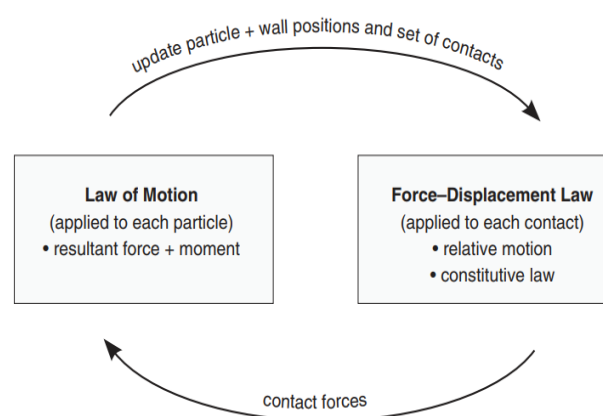


Figure 2.1 Cycle de calcul dans PFC

2.2.2 Loi de contacts

L'efficacité de la modélisation DEM dépend fortement des modèles de contacts utilisés pour la détermination des interactions entre les particules sphériques. Ce sujet a été abordé par les chercheurs en géotechnique, comme **Jiang et al. (2005)** et **Belheine et al. (2009)**. Il existe plusieurs modèles de contacts qui ont été développées afin de bien décrire les différentes interactions, tels que le modèle de contact élastique non linéaire de Hertz-Mindlin (**Mindlin 1953, Hertz 1882**) et le modèle de contact élastique linéaire (**Zhang et Whiten 1996**). Des simulations numériques faites par **Zhao (2014)** sur l'effondrement d'une colonne, en utilisant

ces deux modèles de contacts, ont montré des résultats identiques. Le modèle de contact classique a été défini, au point de contact, suivant deux composantes : la force normale F_n , la force tangentielle F_s (Cundall et Strack 1979). Ainsi, une troisième force de contact a été ajoutée: le moment de rotation M_r (Figure 2.2). Les valeurs de ces composantes dépendent du déplacement relatif entre les deux particules (Oda et Iwashita 2000) .

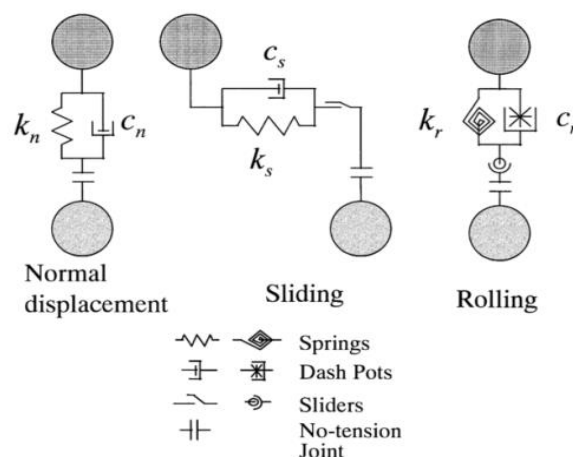


Figure 2.2 Loi d'interactions (Oda et Iwashita 2000)

Les constantes de raideur normale (K_n) et tangentielle (K_s), relient les forces de contact et les déplacements relatifs dans les directions normale et tangentielle, respectivement. Ces relations sont présentées selon les équations suivantes :

$$F_n = K_n \cdot U_n \quad (2.1)$$

$$F_s = K_s \cdot U_s \quad (2.2)$$

avec F_n et F_s sont les forces de contacts, K_n et K_s sont les rigidités élastique pour le contact normal et de cisaillement, U_n et U_s sont les déplacements relatifs.

En cas de rotation entre les deux particules, il y a apparition d'un moment de rotation (M_r) :

$$M_r = K_r \theta_r \quad (2.3)$$

avec K_r est la rigidité de rotation, et θ_r l'angle de rotation.

2.2.3 Conditions de stabilité

Afin de trouver le pas de temps critique, le système est considéré comme une suite infinie de masses ponctuelles et de ressorts. La plus petite période de ce système se produit lorsque les masses se déplacent dans un mouvement opposé synchronisé, de sorte qu'il n'y a pas de mouvement au centre de chaque ressort. La condition de stabilité implique une discrétisation fine du temps en définissant un pas critique (t_{crit}) qui correspond à la période minimale de toutes les particules :

$$t_{crit}^{trans} = \sqrt{\frac{m}{k^{trans}}} \quad (2.4)$$

$$t_{crit}^{rot} = \sqrt{\frac{I}{k^{rot}}} \quad (2.5)$$

où m la masse du particule, k^{trans} et k^{rot} sont les rigidités de chacun des ressorts en translation et en rotation, et I le moment d'Inertie des particules.

Le système modélisé dans PFC3D est un ensemble tridimensionnel de corps discrets (particules et ressorts). Chaque corps peut avoir une masse différente, et chaque ressort peut avoir une rigidité différente. Un pas de temps critique est trouvé pour chaque corps à chaque degré de liberté, et en supposant que les degrés de liberté soient découplés. Le pas de temps critique final est considéré comme le minimum de tous les pas de temps critiques de translation et de rotation, calculés pour tous les degrés de liberté de tous les corps.

2.3 Couplage CFD-DEM

Plusieurs approches numériques basées sur le couplage Solide-Fluide pour modéliser le processus d'érosion dans un milieu granulaire, ont été développées afin d'étudier l'effet micromécanique de l'érosion interne. On distingue entre trois approches pour simuler le couplage solide-Fluide : continue-continue, discrète-décrète, continue-décrète.

La première, appelée continue-continue ou multi-fluid, considère les deux phases comme des milieux continus interpénétrés. Parmi les méthodes, on cite La méthode Two Fluids Modelling (TFM) qui est la plus connue dans cette approche (**Kuipers et van Swaaij, 1997**). Néanmoins, (**Yu et Xu 2003**) montrent que cette approche dépend fortement des relations constitutives de la phase solide et de l'échange de forces entre les phases, qui sont souvent difficiles à obtenir dans ce cadre.

Pour l'approche discrete-discrete, plusieurs méthodes sont utilisées telles que la méthode de Lattice-Boltzmann LBM (**Lominé et al. 2013**) et Pseudo-Particle method (PPM) (**Ge et Li 2001**). Cependant, ces méthodes peuvent être une option pour la modélisation de l'écoulement des fluides à l'échelle du pore (**Catalano et al. 2014; Fan et al. 2018**), mais ont des difficultés à s'adapter aux limites de certains modèles réels et demande beaucoup de temps de calcul et d'espace de stockage des données. Il en résulte que la méthode LBM-DEM a été rarement appliquée pour étudier l'évolution dynamique de l'érosion interne.

D'autres méthodes sont utilisées dans le logiciel YADE pour calculer les forces hydrodynamiques sur les particules en utilisant le réseau de pores développé par **Chareyre et al. (2012)**, afin de d'étudier les forces appliquées par le fluide sur les particules. La méthode de triangulation de Delaunay est appliquée pour définir les pores et leurs connexions, et les équations d'écoulement visqueux sont mises à l'échelle au niveau des pores. **Catalano et al. (2014)** ont utilisé une approche similaire pour simuler l'écoulement dans les milieux granulaires.

Outre ces méthodes citées, la modélisation à l'échelle des particules basée sur l'approche continue-discrete (CFD-DEM), permet d'analyser le réarrangement de la structure, le mouvement des particules, les contacts inter-particules, et les contraintes (**Figure 2.3**). Le mouvement des particules discrètes est évalué en résolvant la deuxième loi du mouvement de Newton telle qu'elle est utilisée en DEM, et l'écoulement du fluide en résolvant les équations

de Navier-Stokes par CFD (Computational Fluid Dynamics). La force est calculée en fonction de la vitesse moyenne du fluide et de la vitesse de la particule solide, en utilisant des équations semi-empiriques (**Zhou et al. 2010**). Il est nécessaire de mentionner que dans cette approche CFD-DEM, l'interaction entre la particule et le fluide est basée sur le comportement sur un élément fluide, et ne peut pas décrire avec précision la variation de la conductivité hydraulique et l'écoulement du fluide à l'échelle du pore en raison du mouvement des particules (**Cui et al. 2016**).

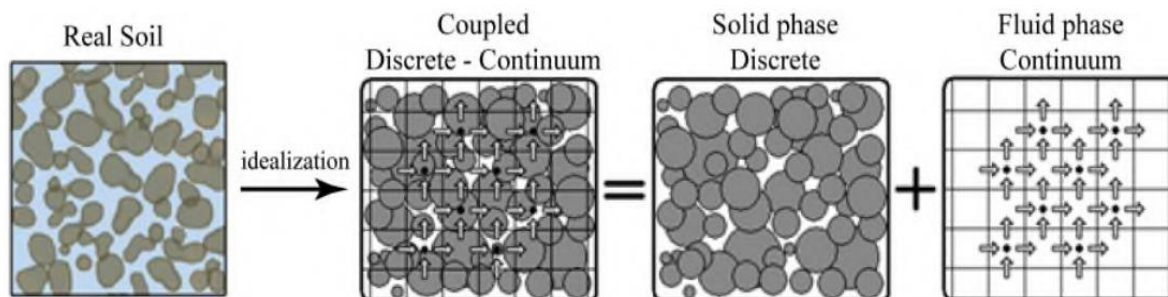


Figure 2.3 Représentation numérique du couplage Solide-Fluide (**Shafipour et Soroush 2008**)

2.4 Simulation numérique de la suffusion

Afin d'étudier l'écoulement des fluides dans un milieu granulaire, plusieurs études numériques de couplage fluide-solide ont été menées. Nous présentons quelques simulations effectuées afin de modéliser le phénomène de suffusion.

Dans l'étude de **Huang et al. (2014)**, le mécanisme de transport et de rétention des particules dans un sol multicouche (base-filtre) a été étudié par approche numérique basée sur l'approche (DEM-CFD), en appliquant un écoulement ascendant. On peut dire dans ce cas qu'il y a hétérogénéité par couche (**Figure 2.4**). Ce mécanisme a été évalué à partir des paramètres obtenus tels que la masse totale du sol de base érodé, la distribution des particules érodées dans le filtre, la porosité, la pression de l'eau interstitielle et le débit. Plusieurs sols sont testés en changeant à chaque fois la granulométrie du sol filtre. Les résultats montrent que les évolutions temporelles des paramètres mentionnés ci-dessus dépendent de la granulométrie du filtre. L'augmentation de la granulométrie du sol filtre conduit à la diminution de son efficacité, et de sa capacité de rétention.

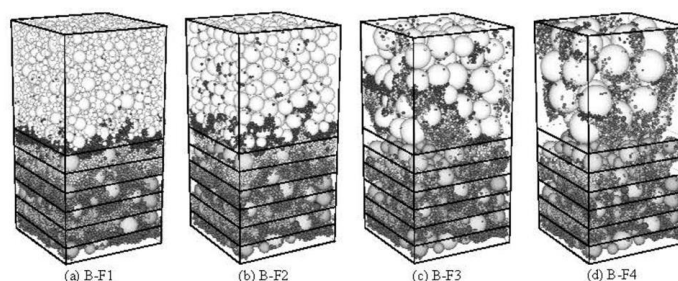


Figure 2.4 Transport des particules dans un sol base-filtre (**Huang et al. 2014**)

Kawano et al. (2018) ont étudié l'effet de la densité relative et de la teneur en fines sur l'initiation de la suffusion dans des sols à granulométrie discontinue, par des simulations CFD-

DEM. Cet effet est exploité en termes de nombre de contacts, de la distribution des contraintes dans les échantillons générés. Les résultats ont montré que les sols présentant une faible connectivité et transmettant moins les contraintes, sont plus susceptibles à l'érosion. La transmission des contraintes dans le sol est hétérogène, en plus, la suffusion aboutit à la diminution de la connectivité entre les particules dans l'échantillon érodée.

Dans l'étude de **Zhang et al. (2020)**, une nouvelle approche numérique de couplage fluide-solide, combinant la méthode de maillage dynamique des fluides et la méthode des éléments discrets (DEM), a été appliquée pour simuler la suffusion. Le maillage fluide est généré en fonction du squelette du sol formé par des particules grossières et mis à jour à intervalles réguliers afin de prendre en compte des changements de perméabilité et de porosité dus à la déformation du squelette du sol et à la suffusion. Un modèle d'échantillon de sol sous condition de contrainte triaxiale est généré pour simuler le processus de suffusion, sous un écoulement descendant. Les résultats montrent que l'augmentation du gradient hydraulique et de la taille des particules grossières aboutit à l'augmentation de la masse des particules érodées. Cependant, une contrainte de confinement élevée diminue la masse de particules érodées. La suffusion se fait d'une façon hétérogène, et il est montré que la couche avale est la plus érodable parmi les différentes couches de l'échantillon (**Figure 2.5**).

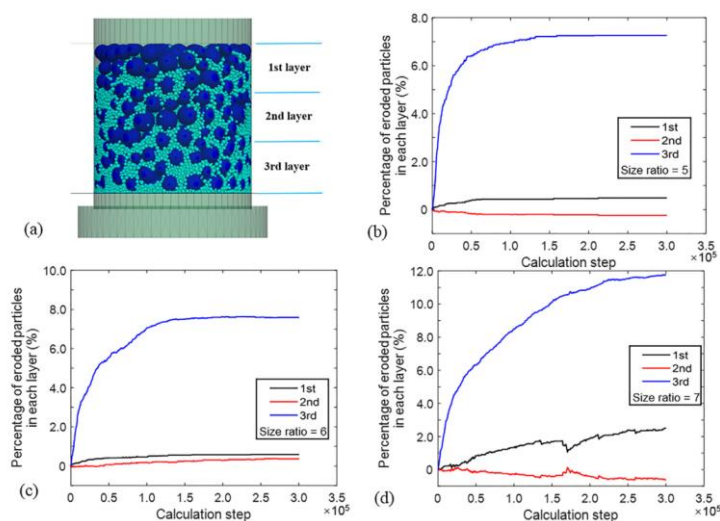


Figure 2.5 Pourcentage d'érosion dans chaque couche (Zhang et al. 2020)

Hu et al. (2020) ont étudié l'évolution des propriétés mécaniques et microstructurales des sols granulaires induite par la suffusion en utilisant la méthode de couplage (CFD-DEM). Le processus complet de suffusion est reproduit en imposant un écoulement ascendant sur un spécimen à granulométrie discontinue sous une contrainte de confinement effective. Les résultats révèlent que la suffusion conduit à une grande quantité de perte de fines et à une contraction volumétrique considérable, accompagnée de changements substantiels dans le sol. Les altérations de la microstructure à l'intérieur de l'échantillon, telles que la formation des chemins locaux et l'évolution spatiale de la concentration en fines, sont suivies et quantifiées pendant les simulations. On constate que la distribution des fines et de l'indice de vide est non uniforme dans l'échantillon, la perte de fines augmente dans les couches proches de l'exutoire, comme montré dans la (**Figure 2.6**).

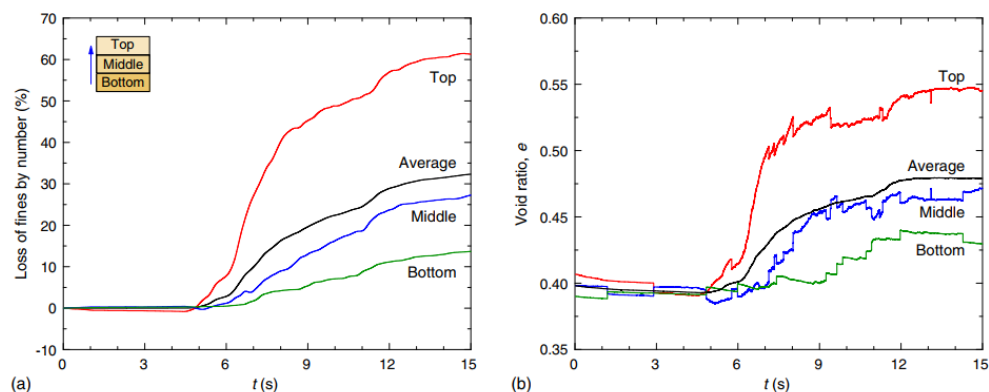


Figure 2.6 La perte en fines et l'indice de vides dans les différentes couches de l'échantillon (Hu et al. 2020)

Hama et al. (2016) ont effectué des essais de suffusion et des essais triaxiaux consolidés drainés afin d'étudier le comportement mécanique des matériaux granulaires suite à la suffusion. Le code numérique (langage de programmation FISH) utilisé a été développé par Hama (2016, 2019). Il a été validé par la modélisation d'un échantillon de sable naturel de Fontainebleau (France) (Figure 2.7). Les résultats obtenus ont montré une précision de 0,1% entre les deux courbes granulométriques, avec des porosités similaires (précision de 0,01%) pour les échantillons expérimentaux et numériques, respectivement. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel PFC3D avec son option fluide incorporée basée sur la méthode DEM développée à l'origine par Cundall (1971) couplée avec le fluide selon le schéma d'écoulement des fluides discrétisé sur une géométrie rectangulaire fixe, régulière, et alignée avec les cartésiens (Figure 2.8).

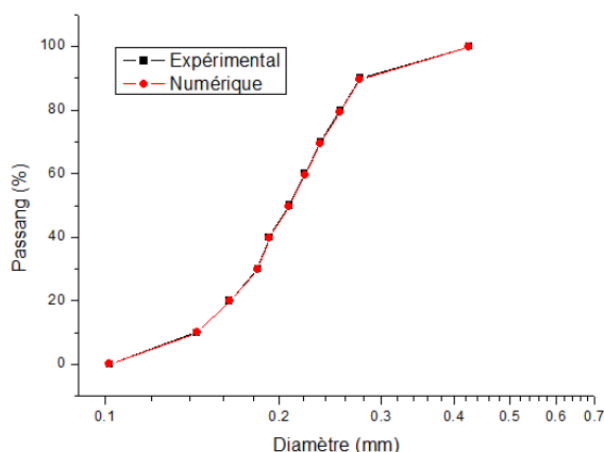


Figure 2.7 Comparaison des courbes granulométriques numériques et expérimentales du sable de fontainebleau (Hama et al. 2016)

Les critères géométriques de Kenney et Lau et de Kezdi ont été appliqués pour l'étude de la stabilité interne des tranches. Les résultats ont montré que montre l'apparition d'instabilité locale due au réarrangement et /ou migration des particules fines même les matériaux granulaires classés stables par les critères traditionnels peuvent perdre des particules fines et

présenter une instabilité locale sans que celle-ci n'affecte la stabilité globale de l'échantillon. Toutefois, ils ont tendance à identifier certains sols considérés stables comme instables.

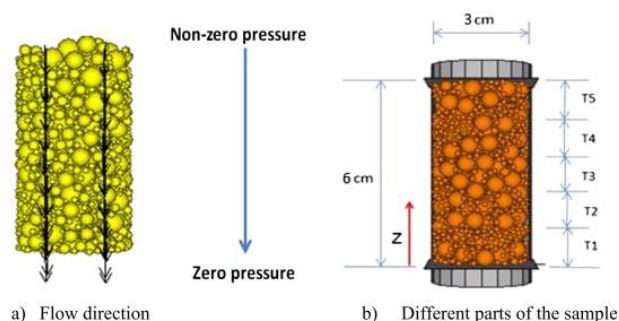


Figure 2.8 Modélisation de la suffusion sur PFC3D (Hama et al. 2016)

2.5 Modèle analytique

Le transport de particules à travers des milieux poreux homogènes est principalement affecté par trois processus physiques : l'advection, la dispersion hydrodynamique, et le dépôt. Le modèle analytique décrit ci est basé sur l'intégration temporelle de l'équation différentielle régissant la conservation de la masse des particules érodées dans un milieu poreux unidimensionnel. Selon **Govindaraju et al. (1995)**, cette équation est exprimée comme suit :

$$\frac{\partial(\eta c)}{\partial t} + \frac{d(cq)}{dx} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D\eta \frac{\partial c}{\partial x} \right) = R_{(c)} \quad (2.6)$$

Où $c(x, t)$ est la concentration des particules fines dans l'écoulement, D le coefficient de dispersion, $\eta(x, t)$ la porosité du sol et $q(x, t)$ est le débit traversant l'échantillon de sol.

Au-delà d'une valeur seuil, la charge de particules en suspension dans les pores dépasse la capacité de transport de l'écoulement, provoquant un dépôt et une réduction de la concentration. La constante de proportionnalité σ est un coefficient de la détachabilité des particules d'argiles de densité ρ_s . Le terme $R_{(c)}$ représente le taux de détachement des particules, il est exprimé en fonction de la différence entre la capacité de transport de l'écoulement T_c et la quantité de fines en suspension dans l'écoulement.

$$R_{(c)} = \sigma \left(\frac{T_c}{\rho_s} - cq \right) \quad (2.7)$$

Dans l'étude de **Seghir et al. (2014)**, les solutions analytiques de ce modèle mathématique ont été utilisées pour simuler les courbes de suffusion du sol testé, et pour évaluer la performance du modèle. Les comparaisons entre les résultats numériques et expérimentaux ont indiqué une cohérence, et ont permis de valider ce modèle de transport des particules pendant le processus de suffusion (**Figure 2.9**).

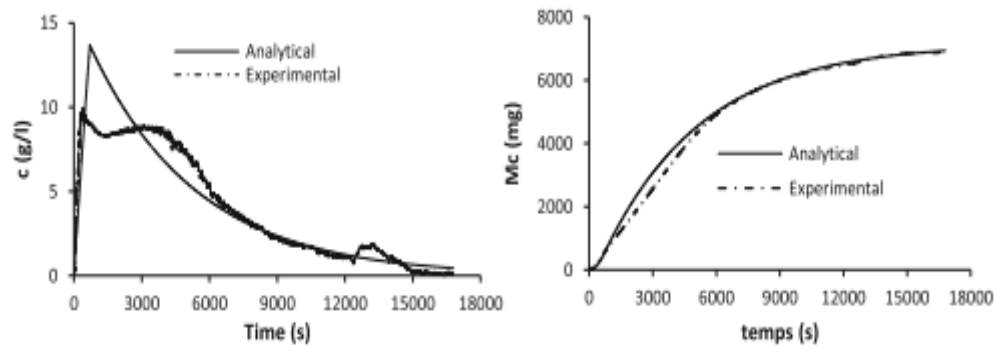


Figure 2.9 Evolution de la concentration et de la masse érodée cumulée en fonction du temps (Seghir et al. 2014)

2.6 Conclusion

Les techniques numériques peuvent servir comme outil complémentaire à l'approche expérimentale pour simuler la migration des particules à l'échelle du pore et les contraintes mécaniques inter-particules qui en résultent. Les observations expérimentales réalisées à l'aide d'images de tomographie à rayons X ont confirmé la grande précision de ces simulations. Ces méthodes numériques ont subi un grand développement pour simuler les écoulements dans un milieu granulaire. En effet, elles permettent d'analyser la microstructure à l'échelle des particules après la suffusion.

Cette partie de ce chapitre a présenté la modélisation en DEM-CFD des écoulements dans un milieu granulaire en utilisant des particules sphériques et les lois de contact. Cependant, le cas des sols hétérogènes reste rarement étudié par cette approche. Dans cette thèse, le modèle CFD-DEM appliqué par Hama et al. (2016) sera utilisé pour analyser la microstructure des sols présentant des hétérogénéités par couches soumis à la suffusion.

Partie II : Etude expérimentale de la suffusion

Chapter 3 Essais sur colonne 1 (Petite échelle)

3.1 Introduction

Cette étude est réalisée sur une petite colonne afin d'examiner l'effet de la configuration de l'hétérogénéité (aval, centrale et distribuée), et l'effet du type de particules fines et du taux d'hétérogénéité sur l'initiation et le développement de la suffusion. Ce processus est étudié en utilisant des échantillons de sol reconstitués, soumis à un écoulement horizontal unidirectionnel dans une colonne de suffusion. Différents types de fines (Kaolinite, Illite, Limon) sont utilisés et trois configurations (centrale, aval, et distribuée) impliquant différents taux d'hétérogénéité par l'introduction de sable grossier dans un mélange de sable fin et de particules fines sont testées. Deux taux d'hétérogénéité de 20% (faible hétérogénéité) et 60% (forte hétérogénéité) ont été utilisés, et les résultats sont comparés à ceux obtenus avec le sol homogène pris comme référence (sable fin + fines). L'analyse des résultats est effectuée à travers les mesures de la masse érodée cumulée et de la conductivité hydraulique.

3.2 Matériaux et méthodes

3.2.1 Matériaux

Dans le cadre de cette étude à échelle réduite, les essais de suffusion sont réalisés sur des matériaux reconstitués au laboratoire pour reproduire les différentes configurations d'hétérogénéité : aval (A), centrale (C), distribuée (D) le long de la colonne, et un essai homogène de référence (R). Le sol homogène est un mélange de 93% sable Hostun HN34 (Sifracco, France) représentant la matrice du sol avec 7% des fines (Illite, Kaolinite, ou Limon).

Dans les configurations de sol hétérogène, on remplace une partie du sable d'Hostun (HN34) par du sable grossier (400 μ m/800 μ m), selon plusieurs pourcentages (20%, 60%) et selon différentes configurations (Distribuée, centrale, avale). Le **Tableau 3.1** présente les caractéristiques physico-chimiques du sable d'Hostun. Ce sable est composé des particules fines de silice, de forme arrondie avec une granulométrie qui s'étale de 100 μ m à 400 μ m.

Tableau 3.1 Propriétés physiques et chimiques du sable d'Hostun HN34 (Sifracco)

Minéralogie	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O
(%)	>98	<0.15	<1	<0.1	<0.7
Granulométrie	D _{max}	< 100 μ m	> 400 μ m	> 160 μ m	C _u
(Malvern)	400 μ m	3.5%	0%	87.5%	1.5
Densité	Solide: 26.5kN/m ³				
Autre	pH 7				

Le **Tableau 3.2** présente les principales propriétés physico-chimiques des particules fines utilisées : Kaolinite, l'Illite, et le Limon. Il est nécessaire de mentionner que la pesanteur joue un rôle secondaire dans le mouvement des particules argileuses, et que les forces dominantes qui conditionnent le mécanisme de transport sont les forces électrostatiques de surface. Les particules fines sont décrites comme suit :

Kaolinite : Chaque particule argileuse est composée de 30 feuillets. Chaque feuillet est constitué d'une superposition d'une couche de silice avec une couche d'alumine qui sont en

contact par des liaisons hydroxyles (OH^-) avec oxygène (O^{2-}). La liaison entre les différents feuillets est faite par des liaisons hydrogènes et de Van der Waals. L'épaisseur de chaque feuillet est de 0,1 mm avec une largeur de 1mm.

Illite : La structure de l'Illite est composée de 10 feuillets. Chacune est composée d'une couche d'alumine entre deux couches de silice. La liaison entre les différentes couches est assurée par les ions Si^{4+} avec les ions Al^{3+} . La compensation entre ces des charges est faite grâce au ions K^+ qui renforcent les liaisons entre les différents feuillets. Cette liaison rend l'Illite plus stable et moins dispersive.

Limon : Ce matériau est principalement composé de quartz, un peu de feldspaths, avec une petite partie argileuse qui contient dans sa majorité de l'Illite-muscovite et de la montmorillonite avec quelques particules de Kaolinite. Il présente une faible cohésion avec un comportement peu plastique.

Tableau 3.2 Propriétés physiques et chimiques des fines utilisées

	Minéralogie (%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
Illite	49.5	14.3	5.6	0.74	8.8	2.2	<0.2	3.69
Limon	55	18	9	0.74	2	2	-	10
Kaolinite	56.4	28.7	1.4	1.2	0.3	0.3	0.1	0.8
	Granulométrie (Malvern)					Densité (kN/m^3)		
	D_{\max}	$D < 2 \mu\text{m}$	$D > 2 \mu\text{m}$	$D > 50 \mu\text{m}$	$D < 80 \mu\text{m}$	Solide		
Illite	20 μm	40%	54%	6%	100%	26		
Limon	100 μm	5%	95%	20%	92%	27		
Kaolinite	100 μm	54%	27%	19%	100%	26		
	Limite d'Atterberg			MBV	Sa			
	W_l (%)	W_p (%)	I_p	(g/100g)	(m ² /g)			
Illite	62	38	24	5	180			
Limon	32	13	19	2	-			
Kaolinite	57	32	25	3.5	70			

D diamètre, Sa surface spécifique, MBV valeur de bleu de méthylène

La distribution granulométrique de ces matériaux est présentée dans la

. L'Illite (I) avec une granulométrie plus petite est fourni par Argiletz (France), et la Kaolinite (K) de granulométrie intermédiaire est produite par Ceratera (France). La Kaolinite est plus dispersive que l'Illite (**Pham 2008**). Le Limon (L) collecté à Jossigny (Paris) présente les plus grosses particules parmi les fines utilisées. L'analyse granulométrique des particules fines est effectuée en utilisant un granulomètre laser Multisizer. Tous les mélanges ont été réalisés avec 7% de fines.

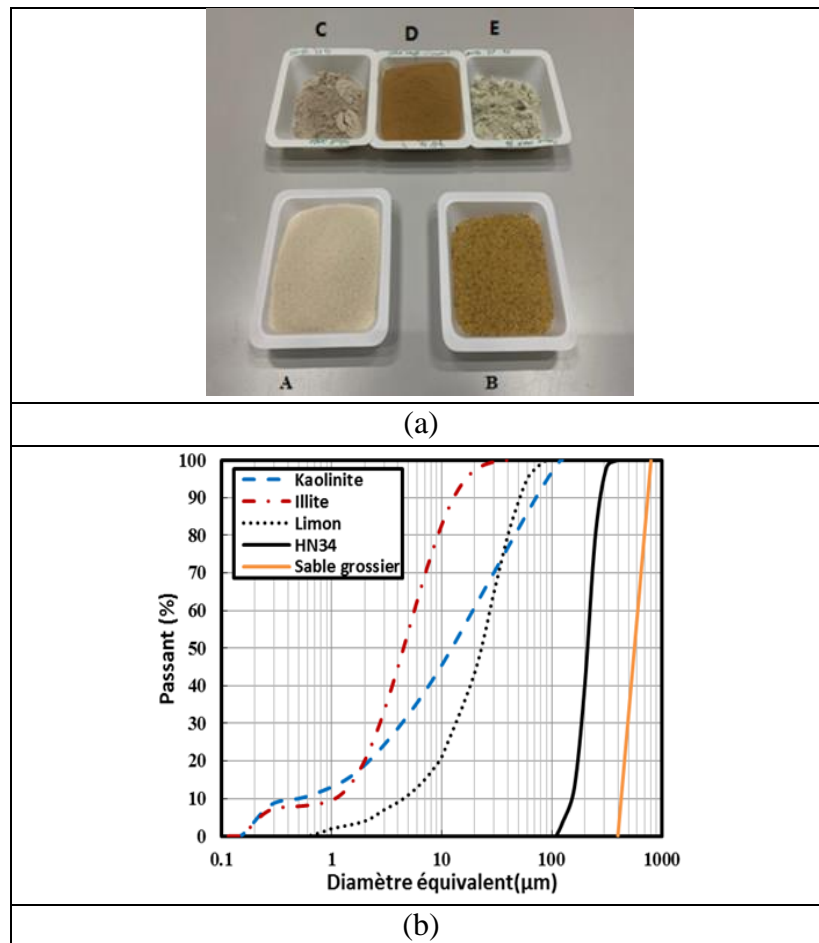


Figure 3.1 (a) Matériaux utilisés A : sable Hostun , B : sable grossier, C :Kaolinite, D : Limon , E : Illite ; (b) Courbe granulométrique des matériaux utilisés

3.2.2 Colonne de suffusion

Les essais sont réalisés dans une colonne transparente en plexiglass de 12 cm de longueur et de 4,5 cm de diamètre, marquée par 3 lignes pour assurer une répartition en 3 couches lors de son remplissage (**Figure 3.2**) selon les configurations à tester. La colonne (perméamètre) est positionnée horizontalement, elle est reliée à un réservoir dont le niveau d'eau est constant (1,5 m). En amont de l'échantillon, une couche de billes de verre permet d'assurer la diffusion uniforme de l'écoulement, et repose sur un filtre géotextile destiné à retenir et séparer les particules de l'échantillon de sol des billes de verre. En aval, une grille métallique de 100 μm d'ouverture permet de retenir les particules grossières qui constituent le squelette granulaire et de laisser passer les fines. Les particules érodables dans notre étude sont les particules fines (Kaolinite , Illite, Limon).

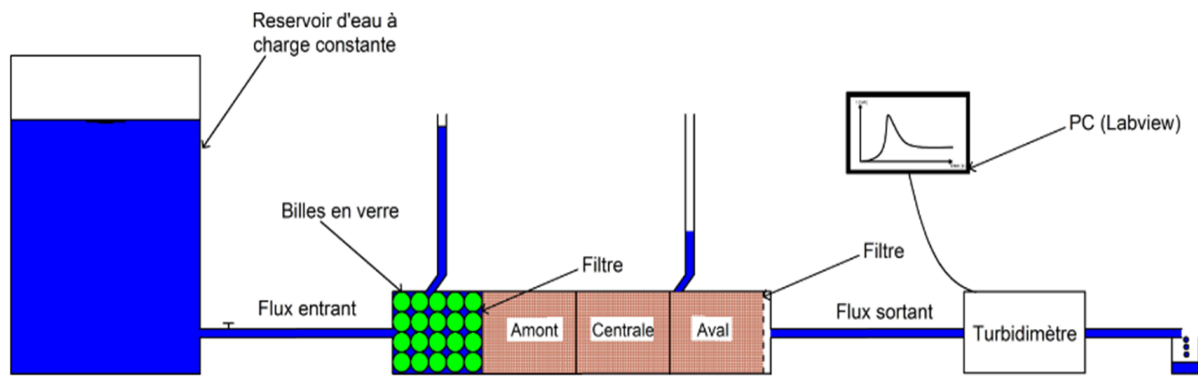


Figure 3.2 Schéma du dispositif expérimental

Cette colonne est équipée de deux tubes piézométriques permettant de mesurer les niveaux piézométriques à l'entrée et sur l'interface des couches centrale-avale de l'échantillon. Ces mesures interviennent dans le calcul du gradient hydraulique et de la conductivité hydraulique. Elle est reliée à un réservoir d'eau de charge constante (1.5 m) en utilisant un trop plein.

La quantification des particules érodées (Kaolinite, Illite, ou Limon) dans le flux sortant est obtenue à l'aide d'un turbidimètre installé à la sortie. Le turbidimètre, de marque Kobold, mesure la turbidité en se basant sur le principe de l'émission et de la réception des rayons lumineux. Il est connecté au système d'acquisition, dont les valeurs sont corrélées à la concentration des particules par un étalonnage préalable. La **Figure 3.3** présente la courbe d'étalonnage pour la Kaolinite.

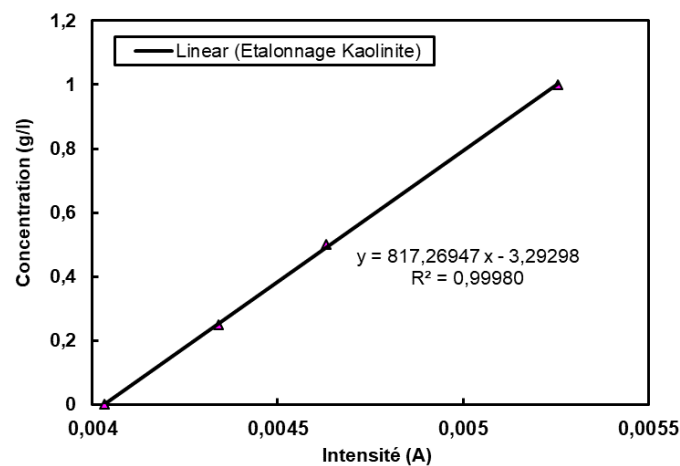


Figure 3.3 Etalonnage du Kaolinite

Carte d'acquisition des données : La transmission du signal de sortie du turbidimètre se fait avec le logiciel LabVIEW qui assure la connexion entre l'ordinateur et le dispositif expérimental par l'intermédiaire de la carte d'acquisition. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 1.

3.2.3 Procédure d'essais

Le matériau homogène est un mélange de 93% de sable Hostun HN34 (Sifrac, France), représentant la matrice du sol, et 7% de fines (Illite, Kaolinite, ou Limon), humidifié à une

teneur en eau de 6% en utilisant la technique de damage humide (**Figure 3.4**). Cette technique a été utilisée dans plusieurs études surtout pour les sols présentant une discontinuité granulaire (**Chang et Zhang 2011, Ke et Takahashi 2012, Benamar 2014**). Elle permet de créer une cohésion capillaire entre les particules, éviter le phénomène de ségrégation locale, et assurer l'homogénéité de l'échantillon.

Pour créer l'hétérogénéité de l'échantillon, une fraction de sable grossier (400/800 μm) est introduite. L'échantillon de sol hétérogène est alors un mélange de sable grossier-sable Hostun (93%) et de fines (7%). La matrice représentant 93% du sol est composée d'un mélange de sable d'Hostun (80% et 40%) et de sable grossier (20% et 60%) pour étudier respectivement l'effet d'une faible et d'une forte hétérogénéité. Après la préparation du sol dans ces deux configurations, il est conservé 24h dans un sac fermé hermétiquement afin d'assurer une teneur en eau homogène du matériau. Les mélanges sont déposés ensuite par couches successives dans la colonne.



Figure 3.4 Mélange sable d'Hostun avec Limon

La distribution granulométrique des sols reconstitués est présentée sur la **Figure 3.5**. L'effet des hétérogénéités apparaît sur la forme de la courbe granulométrique. L'introduction d'hétérogénéités conduit à l'apparition d'une discontinuité granulométrique entre 315 μm et 400 μm et augmente la concavité de la courbe granulométrique. La différence entre les courbes de sols présentant 20% et 60% d'hétérogénéité apparaît sur la forme de la courbe granulométrique. En effet, plus de particules sont affectées avec une hétérogénéité de 60%. De plus, l'effet du type des fines apparaît dans la partie gauche de la courbe de 0 à 100 μm dont le tamisat cumulé correspond à la teneur en fines (7%). Il est également nécessaire de prendre en compte le type des particules fines qui intervient dans le mécanisme de suffusion.

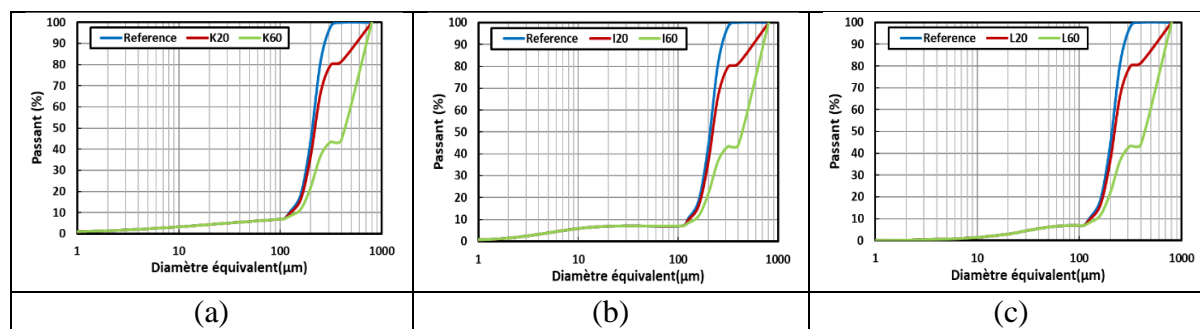


Figure 3.5 Courbe granulométrique des mélanges obtenus (a) Kaolinite (b) Illite (c) Limon

Remplissage de la colonne

Après la préparation des différents mélanges, une couche de billes de verre (fixée entre 2 géotextiles) est mise en place pour assurer la diffusion uniforme de l'écoulement. La colonne est remplie soigneusement, en position verticale en 3 couches compactée avec un dameur gradué. La densité sèche cible est fixée à 1,6.

Dans tous les essais, la même procédure de remplissage est suivie en gardant la densité comme paramètre constant, mais en changeant les matériaux constituant chaque couche en fonction de chaque configuration. En effet, l'échantillon reconstitué est divisé en 3 parties, amont, centre et aval. Pour la configuration d'hétérogénéité distribuée (D) et la configuration de référence (R), toute la colonne est remplie avec le même mélange. Pour la configuration d'hétérogénéité aval (A), seule la couche aval de l'échantillon de référence est remplie d'un mélange hétérogène (à un pourcentage de 20% ou 60% de sable grossier). Pour la configuration d'hétérogénéité centrale (C), la couche centrale du sol homogène de référence (R) est remplacée par une couche hétérogène (*Figure 3.6*).

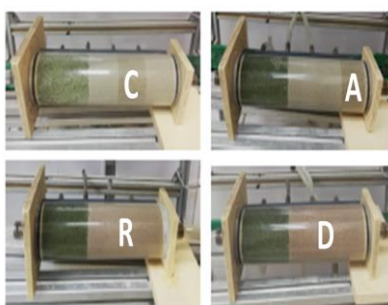


Figure 3.6 Les configurations d'hétérogénéité testées : Centrale, Avale, Référence, Distribuée

Pour chaque type de fines (Kaolinite, Illite, Limon), 7 essais sont réalisés : 2 essais (pourcentage d'hétérogénéité de 20% et 60%) pour chaque configuration (A, C, et D), et 1 essai de référence homogène (R). Le **Tableau 3.3** ci-dessous fournit un récapitulatif de toutes les configurations testées avec les matériaux constituant chaque compartiment (amont, milieu, aval).

Tableau 3.3 Les différentes configurations d'hétérogénéité testées

Test	Amont			Centrale			Aval		
	7%	93%	Sable grossier	7%	93%	Sable grossier	7%	93%	Sable grossier
	Fines	HN34		Fines	HN34		Fines	HN34	
IR, KR, LR	7%	93%	0%	7%	93%	0%	7%	93%	0%
I20A, K20A, L20A	7%	93%	0%	7%	93%	0%	7%	74.4%	18.6%
I60A, K60A, L60A	7%	93%	0%	7%	93%	0%	7%	37.2%	55.8%
I20C, K20C, L20C	7%	93%	0%	7%	74.4%	18.6%	7%	93%	0%
I60C, K60C, L60C	7%	93%	0%	7%	37.2%	55.8%	7%	93%	0%
I20D, K20D, L20D	7%	74.4%	18.6%	7%	74.4%	18.6%	7%	74.4%	18.6%
I60D, K60D, L60D	7%	37.2%	55.8%	7%	37.2%	55.8%	7%	37.2%	55.8%

I Illite, K Kaolinite, L Limon, 20 and 60: taux d'hétérogénéité, D: distribué, C: central, A: Aval, R: référence

Saturation de l'échantillon

L'échantillon est saturé en position verticale, sous une charge hydraulique très faible en contrôlant le niveau d'eau dans le réservoir, de façon à ne pas perturber la structure et ne pas créer de mouvement de particules dans l'échantillon avant le début de l'essai.

On vérifie durant cette étape, qu'il n'y a pas de particules fines qui sortent de l'échantillon. La réalisation de cette phase est importante pour évacuer l'air et empêcher la migration des particules avant de commencer l'essai (**Liang et al. 2019**). Généralement, elle prend deux heures et elle est effectuée par un réservoir dédié. Le robinet d'eau qui sature l'échantillon est fermé quand l'eau sort de la colonne, pour commencer les essais.

Essai d'érosion

Après la saturation de l'échantillon, la colonne est placée en position horizontale pour commencer l'essai en maintenant la saturation du sol. Le chargement hydraulique consiste à appliquer un gradient constant de 12.5, correspondant à un niveau d'eau égale à 1.5 m, pendant toute la durée de l'essai. La température de l'eau est supposée constante pendant l'essai (23°C). La durée de l'essai qui est de 3 heures et 30 minutes, est suffisante pour atteindre une érosion complète (turbidité de l'effluent très faible). L'évaluation de la susceptibilité à la suffusion des différentes configurations est basée sur deux paramètres : la masse érodée cumulée et la conductivité hydraulique.

L'érosion est quantifiée par un nombre de paramètres fondamentaux dont le plus important est la cinétique d'érosion $q(t)$ (**Figure 3.7.c**) représentant la masse érodée des particules fines par unité de temps. Cette cinétique (g/s) est le produit de la concentration de l'effluent (g/l) déduite de la turbidité (**Figure 3.7.a**) et du débit (l/s) (**Figure 3.7.b**), qui sont enregistrés en continu. La masse érodée cumulée de particules fines $m(t)$ (**Figure 3.7.d**) est obtenue en intégrant la cinétique d'érosion $q(t)$ au cours du temps. Cette masse cumulée est utilisée pour évaluer la susceptibilité à la suffusion des différentes configurations testées: $m(t) = \int_0^t q(t)dt$

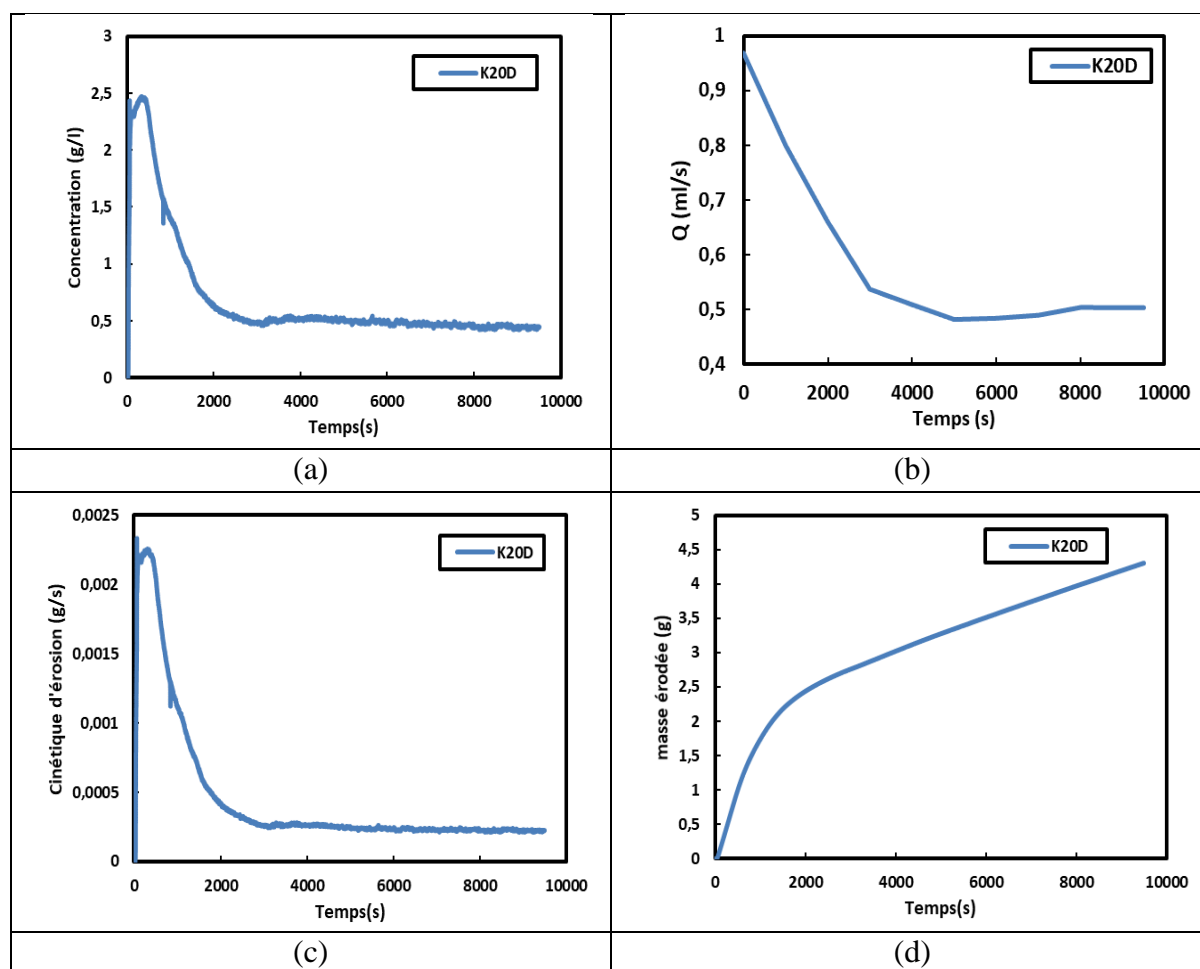


Figure 3.7 Evolution de (a) concentration (b) débit volumique (c) Cinétique d'érosion (d) masse érodée (K20D)

La conductivité hydraulique (k) est calculée en appliquant la loi de Darcy :

$$\frac{Q}{A} = k \cdot \frac{\Delta H}{L}$$

avec Q le débit (l/s), A la section de l'échantillon, k la conductivité hydraulique (m/s), ΔH la perte de charge (m), L la longueur de l'échantillon (m).

La perte de charge est déterminée à l'aide des deux tubes piézométriques installés en amont et à l'interface des couches central-aval de l'échantillon. Le suivi de l'évolution de la conductivité hydraulique nous aide à mieux comprendre la cinétique d'érosion, notamment les mécanismes de transport et de dépôt (colmatage à l'état ultime) des particules érodées.

3.3 Résultats et discussions

3.3.1 Cinétique d'érosion et effet de la teneur en fines

Les particules fines sont érodées et transportées par l'écoulement en plusieurs étapes. Le détachement des particules fines du sol dépend de la charge hydraulique dont l'effet agit à travers la contrainte de cisaillement hydraulique appliquée par la vitesse d'écoulement sur les parois des pores. Lorsque la contrainte de cisaillement atteint la valeur seuil appelée contrainte de cisaillement critique, les particules commencent à se détacher de la matrice du sol. La

composition chimique des fines et les forces de surface sont impliquées dans le processus de détachement des particules de la matrice du sol, où les forces d'interaction électrique de surface sont prises en compte, et elles rendent la particule plus résistante au détachement (**McCarthy et Zachara 1989**). Ces particules détachées sont transportées par l'écoulement à travers la porosité du milieu granulaire. Au cours de ce transport, certaines particules arrivent à l'exutoire tandis que d'autres sont retenues par le squelette granulaire par filtration. Les particules colmatées peuvent être remobilisées suite à des modifications hydrauliques ou géométriques comme l'augmentation du gradient local ou le réarrangement des particules. La **Figure 3.8** montre un résultat de l'évolution de la cinétique d'érosion au cours du temps pour une configuration d'hétérogénéité distribuée (D) avec un taux de 20% pour chaque type de fines. La cinétique d'érosion pour les autres configurations est similaire à celle de la **Figure 3.8** mais avec différente amplitude.

L'allure de la courbe de la cinétique d'érosion montre trois phases : La première dans laquelle le spécimen est soumis à une pression hydraulique transitoire appliquée au début de l'essai. Le débit augmente rapidement après l'application du gradient hydraulique. Dans la deuxième phase, la cinétique d'érosion diminue une fois que la pression appliquée a atteint sa valeur maximale (palier). Dans la troisième phase, l'érosion atteint un état d'équilibre avec une valeur rémanente faible. A long terme, la cinétique d'érosion continue de diminuer jusqu'à zéro. Cette évolution est cohérente avec les résultats rapportés dans la littérature (**Govindaraju et al. 1995; Elandaloussi et al. 2019**).

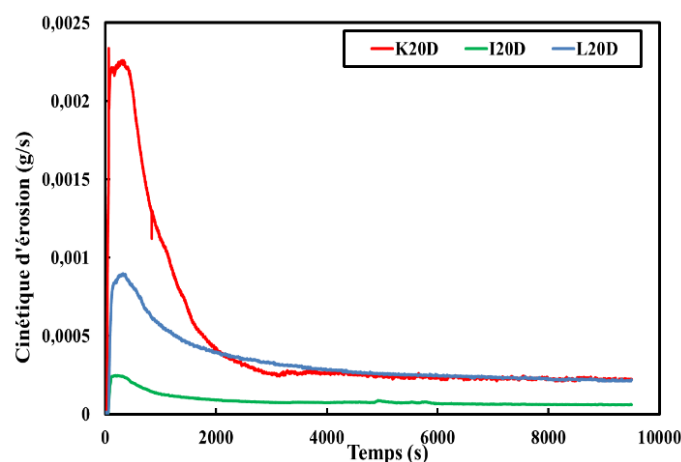


Figure 3.8 Evolution de la cinétique d'érosion en configuration d'hétérogénéité distribuée pour les différentes fines (kaolinite, illite, limon)

Masse érodée cumulée

En terme de masse érodée cumulée, les courbes (**Figure 3.9**) montrent la même allure pour toutes les sols testés, ce qui explique que l'évolution de l'érosion est indépendante de la configuration d'hétérogénéité et du type de fines. Cependant, l'amplitude de l'érosion est fortement affectée par ces deux paramètres : dans le cas d'une hétérogénéité distribuée avec un taux de 60%, la masse érodée cumulée atteint 8,6 g pour la Kaolinite (K60D) alors que les valeurs obtenues pour l'Illite (I60D) et le Limon (L60D) sont de 1,3 et 6, respectivement. Cette différence d'amplitude d'érosion est liée aux caractéristiques chimiques et physiques de ces

fines qui agissent différemment vis-à-vis de la suffusion. L'Illite est moins dispersive que la Kaolinite (**Pham 2008**) et cette dernière a été utilisée dans sa forme brute avec une distribution étalée de la taille des particules. Ces deux types d'argile sont constitués de feuillets dont la liaison est la plus forte dans l'Illite, alors que le Limon est constitué de particules de quartz arrondies, irrégulières et moins cohésives. Ces résultats valident que la Kaolinite est la plus susceptible à l'érosion, suivie par le Limon, et enfin l'Illite qui donne la plus grande résistance parmi ces particules fines testées.

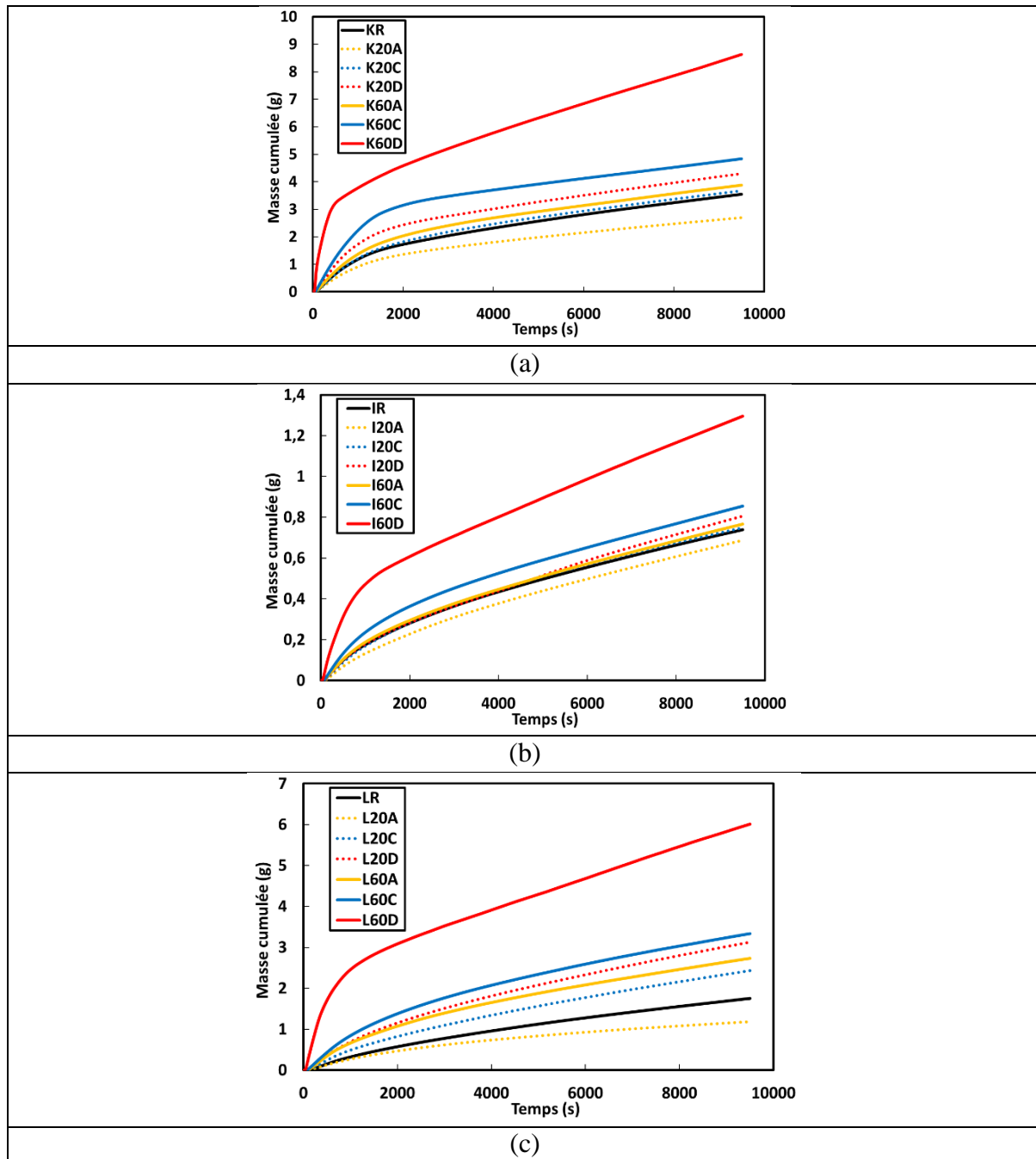


Figure 3.9 Evolution de la masse érodée cumulée du (a) Kaolinite (b) Illite (c) Limon

3.3.2 Influence des paramètres géométriques

a) Effet du taux d'hétérogénéité

Le taux d'hétérogénéité est représenté par le pourcentage massique de sable grossier dans le mélange sable grossier-sable d'Hostun. Afin d'étudier cet effet, deux taux (20% et 60%) sont choisis pour chaque configuration d'hétérogénéité. Les résultats sont analysés en comparant la masse érodée cumulée des essais impliquant la même configuration d'hétérogénéité avec différents taux d'hétérogénéité pour chaque type de fines. Ces résultats (**Figure 3.10**) montrent qu'en comparant la configuration de référence (taux d'hétérogénéité 0%) (R) avec les configurations de faible taux d'hétérogénéité (20%), nous observons que la masse érodée cumulée dans les configurations centrale (20C) et distribuée (20D) est plus importante, indiquant que le mouvement des particules est facilité par l'introduction d'une hétérogénéité dans tout le volume ou au centre de l'échantillon ($20C > R$; $20D > R$). Cependant, lorsque l'hétérogénéité est située en aval (20A), il y a moins de suffusion que dans la configuration de référence ($R > 20A$). Dans cette configuration d'hétérogénéité aval, la couche hétérogène aval agit comme un filtre, retenant les fines détachées des couches en amont. D'après la littérature (**Yazdchi et Luding 2013**), il a été rapporté pour la structure fibreuse que les petites constriction (milieu homogène) produisent plus de pertes de charge que les grandes constriction. Donc, les fortes pertes de charge produites dans les deux couches supérieures (sol de référence homogène) amoindrissent la force d'écoulement arrivant dans la couche aval qui fait office de filtre efficace. La **Figure 3.10** montre les résultats de la masse érodée cumulée pour chaque type de fines selon les différentes configurations.

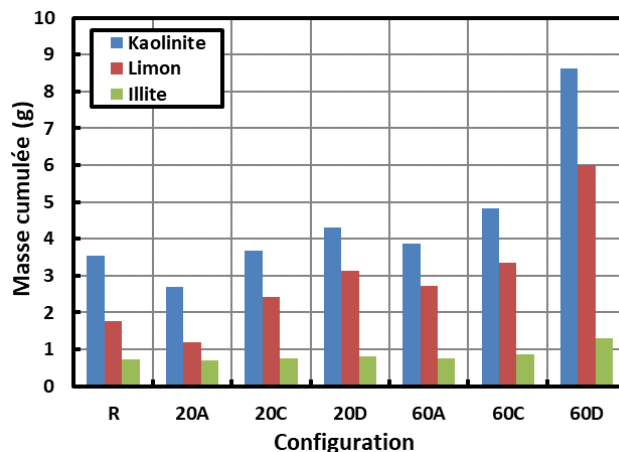


Figure 3.10 Masse érodée cumulée pour chaque configuration testée

En comparant, les configurations présentant une faible hétérogénéité (20%) à celles avec une forte hétérogénéité (60%), la masse érodée cumulée de cette dernière est plus importante, quel que soit le type de fines et la configuration de l'hétérogénéité ($60A > 20A$; $60C > 20C$; $60D > 20D$). Avec l'introduction d'une forte hétérogénéité, la taille des pores augmente et la conductivité hydraulique suit la même tendance. Le **Tableau 3.4** présente les valeurs de la conductivité hydraulique pour la configuration distribuée (D) (0% ; 20%, 60%) pour chaque type des fines. Avec l'augmentation de la conductivité hydraulique en gardant la même teneur en fines (7%), le mouvement de ces particules fines devient plus facile au sein du matériau granulaire, et il y a par conséquent une augmentation de la susceptibilité à l'érosion. Dans tous

les tests, le mélange de Kaolinite est le plus érodable et celui de l'Illite est le moins érodable. L'augmentation de la conductivité hydraulique est cependant plus prononcée à partir du taux d'hétérogénéité de 20%.

Tableau 3.4 Conductivité hydraulique des mélanges testés

Configuration	KR	K20	K60	LR	L20	L60	IR	I20	I60
Conductivité hydraulique K (x 10 ⁻⁵ m/s)	4.7994	5.4436	19.672	2.3691	2.4433	8.2566	3.3599	3.4955	9.2964

b) Effet de la localisation de l'hétérogénéité

L'influence de la position de la couche hétérogène est analysée en comparant l'effet induit par la configuration spatiale (localisation de l'hétérogénéité) pour chacun des taux d'hétérogénéité.

Cas de faible taux d'hétérogénéité (20%) :

Pour toutes les fines utilisées (Kaolinite, Illite, et Limon), les résultats (**Figure 3.10**) montrent que la susceptibilité à la suffusion (masse érodée cumulée) est classée suivant l'ordre : 20D > 20C > R > 20A. En effet, la configuration de l'hétérogénéité distribuée (20D) est la plus susceptible à la suffusion en raison de la large distribution de grandes constriction formées par l'introduction du sable grossier et l'absence d'une couche filtrante. En outre, ce résultat est corrélé avec les mesures de la conductivité hydraulique (**Tableau 3.4**) qui montrent une valeur plus grande pour le mélange de 20% (20D) de sable grossier par rapport au sol de référence (sans sable grossier). Dans cette configuration 20D, en comparant avec les autres configurations de faible hétérogénéité, l'absence d'une couche de sol plus fine (sol de référence) conduit à faciliter le transport des fines au sein de la matrice. Tous ces facteurs rendent la configuration distribuée (20D) la plus érodable.

En comparant la configuration centrale (20C) à la configuration de référence (R), les résultats révèlent qu'il y a plus de suffusion pour la configuration (20C) que pour la configuration de référence. D'une part, ce comportement peut être expliqué par la conductivité hydraulique plus importante avec 20% d'hétérogénéité (impliquée par de grandes tailles de constriction) dans la couche centrale, qui permet une plus grande migration des fines de l'amont vers l'aval le long de l'échantillon. D'autre part, dans la configuration de référence (R), les constriction sont plus petites et la perte de charge est plus grande, ce qui rend le transfert des fines de l'amont vers l'aval plus difficile.

En dernier lieu, l'ajout d'une faible hétérogénéité en aval (20A) rend cette configuration plus résistante que la configuration de référence (R), même si la conductivité hydraulique avec 20% d'hétérogénéité est bien plus grande. En réalité, la localisation d'une faible hétérogénéité au niveau de la partie aval de l'échantillon conduit à l'accumulation rapide de particules érodées à l'interface ou dans la couche aval, entraînant une faible érosion. Cette hypothèse est validée par analyse de l'évolution de la conductivité hydraulique relate dans la section 3.3.3

Cas d'une forte hétérogénéité (60%) :

Pour toutes les fines utilisées, les résultats (**Figure 3.10**) montrent que la susceptibilité à la suffusion (masse érodée cumulée) est dans cet ordre : 60D > 60C > 60A > R. Elle est similaire

à celle obtenue pour la faible hétérogénéité sauf que la configuration 60A présente plus d'érosion que celle de référence (R). En effet, l'hétérogénéité de la couche aval (60A) n'agit plus comme un filtre efficace et permet facilement le transfert des particules érodées vers l'exutoire. Par conséquent, il y a moins de rétention de particules à l'interface entre les couches centrale et aval.

En conclusion, l'effet de l'hétérogénéité sur la suffusion du sol est significatif pour la Kaolinite et le Limon, alors qu'il est moins prononcé pour l'Illite. Ces résultats sont corroborés par les mesures de dispersion des fines utilisées qui indiquent que l'Illite est moins dispersive (**Pham 2008**) que la Kaolinite. En outre, l'effet de l'hétérogénéité sur la suffusion est amplifié par l'érodabilité des particules fines, et la classification de l'érodabilité de ces types de fines est indépendante du taux et de la localisation de l'hétérogénéité. En plus, la configuration d'hétérogénéité distribuée montre la plus grande susceptibilité à la suffusion, ainsi, la configuration d'hétérogénéité centrale est plus érodable que l'aval. Enfin, l'augmentation du taux d'hétérogénéité aboutit à l'augmentation de la susceptibilité à la suffusion, à l'exception de l'introduction d'une faible hétérogénéité 20% en aval qui a montré un effet inverse.

c) Relation entre le taux d'hétérogénéité et l'érodabilité du sol

Afin de mieux quantifier l'effet des hétérogénéités sur la susceptibilité à l'érosion, on présente dans la **Figure 3.11** l'évolution de la masse érodée cumulée en fonction du taux d'hétérogénéité pour toutes les configurations testées. Le pourcentage (0%) correspond à la configuration de référence. Dans un premier temps, la configuration 20A (**Figure 3.11.a**) montre une masse érodée cumulée la plus faible par rapport à R et 60A, ce qui est déjà expliqué par l'effet inverse de l'introduction d'une faible hétérogénéité en aval. Cette relation entre la masse érodée et le taux d'hétérogénéité est représentée par une même fonction parabolique pour la Kaolinite ($y=0,0012x^2-0,0633x+3,5$) et le Limon ($y=0,0011x^2-0,0509x+1,75$) avec des valeurs à l'origine différentes (valeurs de la configuration de référence). Cet effet est beaucoup moins prononcé pour l'Illite qui n'est pas aussi affectée par le taux d'hétérogénéité.

Pour les configurations présentant une hétérogénéité centrale (C) (**Figure 3.11.b**) ou distribuée (D) (**Figure 3.11.c**), les résultats montrent qu'en augmentant le pourcentage d'hétérogénéité dans la couche centrale ou sur tout l'échantillon, la masse érodée cumulée augmente linéairement, pour toutes les fines testées. On note également une tendance similaire pour la Kaolinite et le Limon (droites presque parallèles). Cette tendance (pente de la droite) est plus forte pour la configuration distribuée, notamment pour la Kaolinite (KD).

Cette analyse de la masse érodée cumulée en fonction du taux d'hétérogénéité montre que l'augmentation de la susceptibilité à la suffusion suit une relation linéaire pour les configurations centrales et distribuées (**Figure 3.11.b**, **Figure 3.11.c**). Elle vérifie également que l'effet des hétérogénéités sur la susceptibilité à la suffusion est plus prononcé pour la Kaolinite que pour l'Illite.

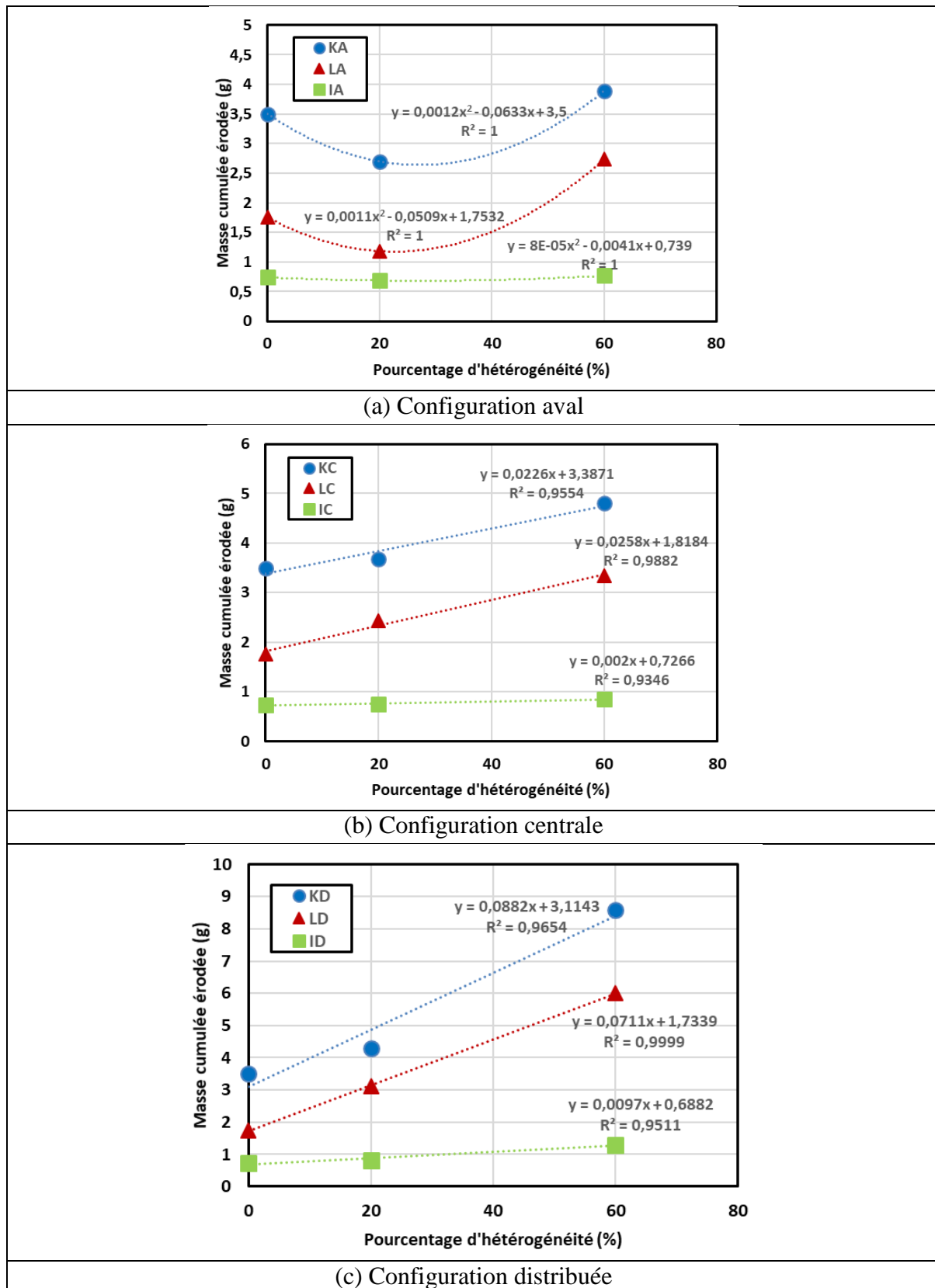


Figure 3.11 Relation entre masse érodée cumulée et pourcentage d'hétérogénéité

3.3.3 Évolution de la conductivité hydraulique relative avec l'érodabilité du sol

La conductivité hydraulique peut servir comme un indicateur essentiel dans l'étude du transport des particules à travers le milieu poreux, et dans l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion

interne. Le comportement de ces sols, au regard de la suffusion, dépend de la distribution granulaire et de la teneur en fines. La conductivité hydraulique est déduite du gradient hydraulique. La conductivité hydraulique relative (K/K_0) est le rapport de la conductivité hydraulique au temps t et celle mesurée au début de l'essai. Egalement, la masse érodée relative (M/M_0) est le rapport de la masse érodée cumulée et de la valeur initiale.

En comparant les résultats des différents tests, on trouve que la conductivité hydraulique relative diminue progressivement avec l'évolution de l'érosion, indiquant qu'il y a rétention de particules érodées pouvant mener dans la situation ultime au colmatage (**Dikinya et al. 2008**). Cette tendance ne dépend pas de la configuration de l'hétérogénéité et du type de fines. Lorsque la couche hétérogène se trouve au milieu de l'échantillon, la conductivité hydraulique chute rapidement pour les configurations Limon (L60C) et Illite (I60C), jusqu'à la moitié, tandis que la configuration Kaolinite (K60C) montre une tendance différente illustrée par une augmentation de la conductivité hydraulique après une étape de diminution. L'apparition d'une surpression hydraulique dans la zone colmatée peut déclencher un processus de décolmatage (claquage hydraulique), conduisant à cette augmentation de la conductivité hydraulique (**Figure 3.12**). Les essais réalisés avec une forte hétérogénéité distribuée (60D) fournissent la plus faible diminution de la conductivité hydraulique relativement au début de l'essai, ce qui est expliqué par l'apparition de pores de grande taille, réduisant l'effet de filtration. Cette diminution est la plus importante (50%) pour le mélange Limon en raison de la taille (relativement importante) des particules érodées qui peuvent facilement contribuer au colmatage de la matrice. Pour les mélanges argileux (Kaolinite, Illite), la diminution de la conductivité hydraulique est plus faible pour le mélange obtenu avec la Kaolinite. Ce résultat est corrélé à la plus grande susceptibilité à la suffusion de ces particules, conduisant à une faible diminution de la conductivité hydraulique, en raison d'un moindre colmatage des particules détachées. Le résultat principal est obtenu par comparaison entre la conductivité hydraulique relative de la configuration de référence (R) et celle de faible hétérogénéité en aval (20A) pour tous les types de fines testées. Les résultats montrent qu'une diminution plus importante de (K/K_0) s'est produite avec la configuration 20A, et ce comportement peut être lié à la formation d'une zone filtrante à l'interface entre la couche centrale et la couche aval, conduisant à une augmentation de la résistance à l'érosion.

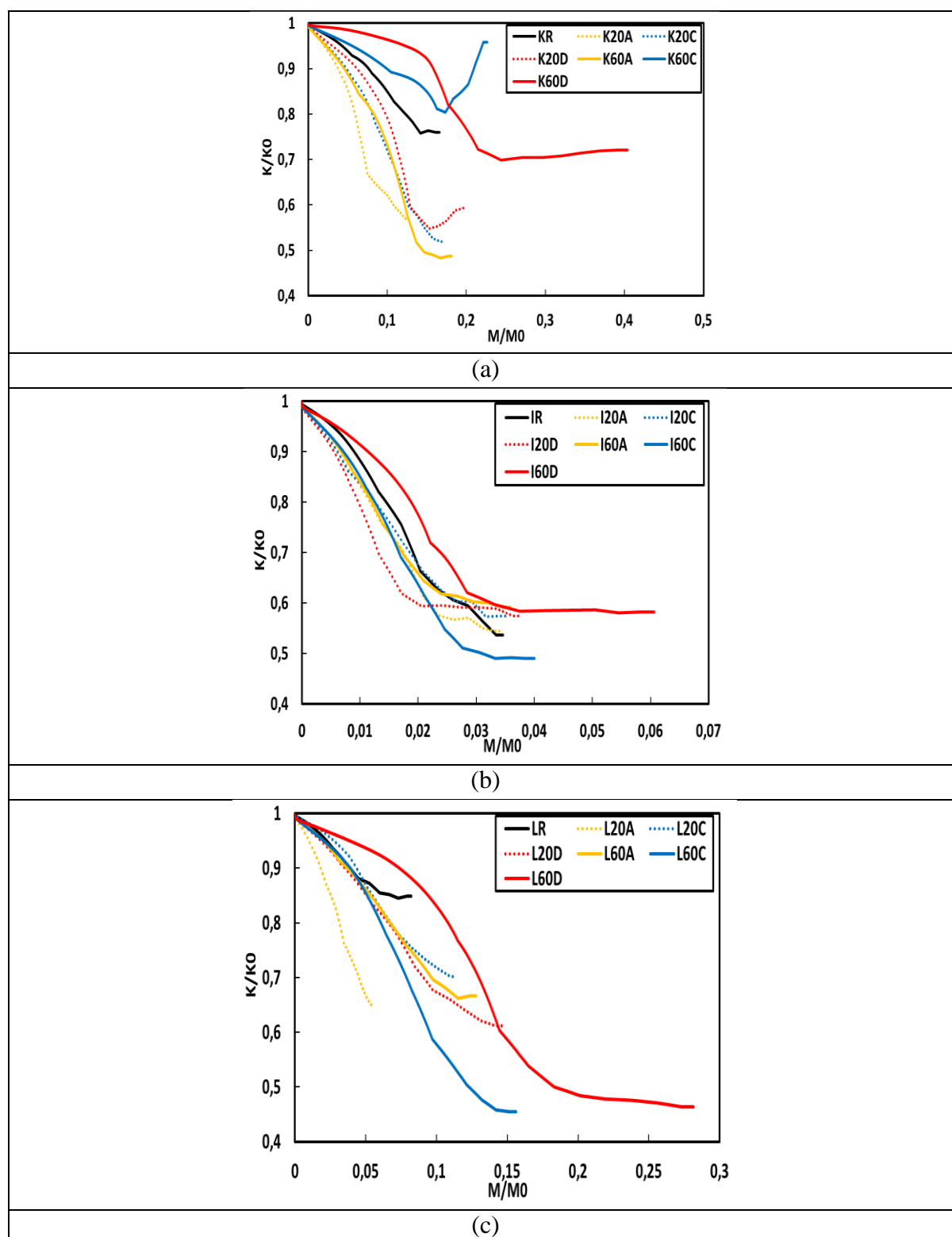


Figure 3.12 Evolution de la conductivité hydraulique relative en fonction de la masse relative érodée (même durée dans tous les essais)

3.3.4 Évaluation de la stabilité interne à l'aide des critères géométriques

La susceptibilité à la suffusion des sols testés est évaluée selon plusieurs critères granulométriques. Quatre critères de la littérature (**Ke et Takahashi 2012**) sont appliqués pour évaluer la stabilité du sol contre l'érosion interne. Ces critères ne concernent que les sols supposés homogènes. Une analyse quantitative couche par couche (**Tableau 3.5**) montre qu'en

augmentant le taux d'hétérogénéité, ces paramètres s'éloignent de la limite de stabilité. Le rapport ($D_{15\text{Grossier}}/d_{85\text{fines}}$) du critère de **Kezdi (1979)** augmente légèrement avec l'introduction des particules grossières mais reste inférieur à 4, indiquant la stabilité de l'échantillon. Le critère de **Burenkova (1993)** fournit une classification instable pour les sols contenant des particules grossières (

). Selon le critère de **Mao (2005)**, le sol se rapproche de la valeur seuil d'instabilité lorsque d'hétérogénéité est introduite. Cette évaluation montre que ces critères convergent vers la même conclusion que les résultats des essais (configuration distribuée-D). Par contre, les résultats révèlent que l'introduction de 20% d'hétérogénéité en aval augmente la résistance à la suffusion. Donc, l'introduction d'une couche ayant une classification moins stable selon les critères d'ingénierie n'aboutit pas toujours à la diminution de la stabilité globale du sol (cas des configurations à faible hétérogénéité aval).

Tableau 3.5 Propriétés physiques des sols testés

Propriétés physiques	Reference	20%	60%
Teneur en fines (%)	7	7	7
Porosité n	0.3	0.3	0.3
Diamètre D_{50} (μm)	207.79	222.2	441.57
Diamètre D_{10} (μm)	123.82	127.06	142.7
Coefficient C_u	1.78	1.88	3.59
Coefficient de courbure C_c	1.15	1.14	0.7
(D_{15c}/d_{85f})	-	1.79	1.82
Facteur conditionnel d'uniformité h'	1.28	2.44	1.41
Facteur conditionnel d'uniformité h''	1.95	3.81	4.2
P_f (%) (Li 2008)	82.4	79.9	43.4

Avec: n est la porosité

D_x est le diamètre correspondant à X% des passants.

F est la fraction massique ayant un diamètre plus petit que D; H est la fraction massique des particules ayant un diamètre entre d et 4d.

Un sol peut être divisé en une fraction grossière (c) et une fraction fine (f). D_{15c} et d_{85f} sont les diamètres correspondant à un pourcentage de 15% pour la fraction grossière et de 85% pour la fraction fine, respectivement.

$$h' = D_{90}/D_{60}$$

$$h'' = D_{90}/D_{15}$$

P_f est le pourcentage des fines correspondant à un diamètre $d_f = \sqrt{d_{70}d_{10}}$

Tableau 3.6 Classification des sols testés

Critère	Limite de stabilité	Reference	20% grossier	60% grossier
Istomina (1957)	$C_u \leq 20$	S	S	S
Kezdi (1979)	$(D_{15c}/d_{85f})_{\text{max}} \leq 4$	S	S	S
Burenkova (1993)	$0.76\log(h'')+1 < h' < 1.86\log(h'')+1$	S	U	U

Mao (2005)	$4Pr(1-n) \geq 1$	S	S	S
------------	-------------------	---	---	---

Un critère de filtre est utilisé afin d'évaluer la stabilité des sols hétérogènes. Selon Foster et Fell (2000) la stabilité du sol est assurée si $(d_{15F}/d_{85b}) < 7$. Avec d_{15F} et d_{85b} sont les diamètres correspondant à un pourcentage 15% pour le filtre et de 85% pour le sol de base, respectivement. Ce critère de filtre est appliqué pour deux couches consécutives (amont-centre, centre-aval) constituant le sol hétérogène. La couche centrale joue le rôle d'un filtre par rapport à la couche amont, et la couche aval constitue un filtre par rapport à la couche centrale. Le **Tableau 3.7** présente le rapport (d_{15F}/d_{85b}) entre les différentes couches constituant les sols hétérogènes. Ces couches successives sont classées stable si le critère $(d_{15F}/d_{85b} < 7)$ est vérifié. Cette évaluation indique que ce critère ne prend pas en compte le type de fines. Les résultats montrent que pour la même configuration la Kaolinite est la plus érodable, par contre, dans cette évaluation on trouve le même rapport (d_{15F}/d_{85b}) pour I20A, K20A, L20A (par exemple). Donc, il faudrait prendre en compte, en plus de la localisation des hétérogénéités, le type de fines dans la classification de la stabilité d'un sol.

Tableau 3.7 Critère de filtre pour les sols hétérogènes testés

Configuration	Amont-Centre	Centre-Aval
I20A, K20A, L20A	0.55	0.58
I20C, K20C, L20C	0.58	0.30
I60A, K60A, L60A	0.55	0.66
I60C, K60C, L60C	0.66	0.21

3.4 Conclusion

Cette étude a mis en évidence l'influence de la configuration et du taux d'hétérogénéité sur l'initiation de la suffusion. Dans ce but, des essais de suffusion sont réalisés sur colonne de laboratoire avec plusieurs types de fines, configurations et taux d'hétérogénéité. L'analyse des résultats a montré que la susceptibilité à la suffusion dépend simultanément de la configuration (position de la couche grossière) et du taux d'hétérogénéité.

Dans l'ensemble des configurations testées, la susceptibilité à la suffusion augmente lorsque le taux d'hétérogénéité augmente, à l'exception de la configuration impliquant un taux d'hétérogénéité de 20% en aval. Les résultats ont montré que la chute de la perméabilité était plus importante pour la configuration hétérogène (20A) que pour la configuration de référence (R), ce qui a amélioré l'efficacité du filtre en aval où l'accumulation de particules détachées augmente. Ces résultats suggèrent l'existence d'une valeur seuil du taux (entre 20% et 60%) d'hétérogénéité à laquelle l'effet inverse de l'hétérogénéité en aval apparaît.

La configuration distribuée montre la plus grande susceptibilité à la suffusion. Il est intéressant de noter que la configuration centrale est plus érodable que la configuration aval, quel que soit le taux d'hétérogénéité et le type de fines.

En outre, l'effet des hétérogénéités augmente lorsque l'érodabilité des particules fines devient plus forte. En ce qui concerne l'effet du type de fines sur la susceptibilité à la suffusion, les

résultats montrent que pour chaque configuration d'hétérogénéité, la Kaolinite est la plus susceptible à la suffusion, suivie par le Limon, et l'Illite montre la plus grande résistance à la suffusion parmi les particules fines testées.

En plus, la conductivité hydraulique diminue rapidement dans toutes les configurations testées à cause de la filtration des particules à travers les pores de la matrice. La chute de la conductivité hydraulique suit une tendance assez similaire sauf pour la Kaolinite avec un taux d'hétérogénéité centrale de 60%. Les configurations à forte hétérogénéité distribuée (60D) montrent la plus faible diminution de la conductivité hydraulique au début de l'essai. Enfin, la tendance de l'évolution de la conductivité hydraulique est assez similaire pour toutes les configurations testées pour l'Illite, indiquant que la position et le taux d'hétérogénéité affectent légèrement ce paramètre du sol dans le cas de l'Illite. En outre, les critères de classification des sols doivent prendre en compte le type des particules fines et les hétérogénéités présentes dans le sol.

Dans la partie suivante, une deuxième étude à une échelle plus grande est présentée afin d'établir une comparaison d'échelles et en déduire une similitude.

Chapter 4 Essai sur colonne 2 (grande échelle)

4.1 Introduction

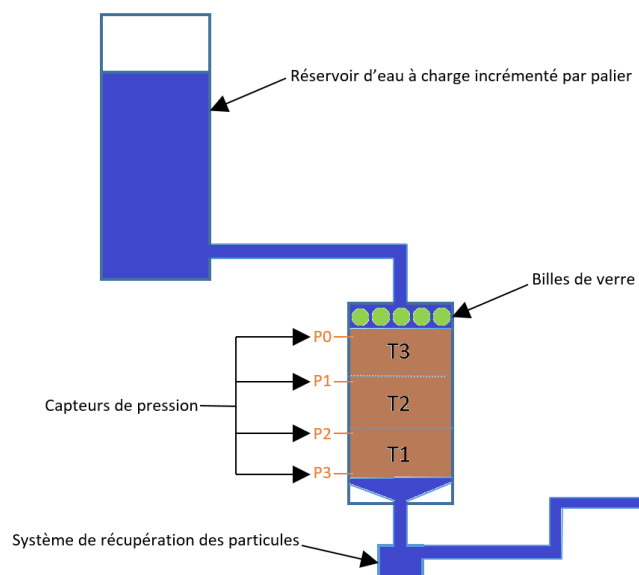
L'étude précédente a été effectuée à petite échelle sur plusieurs types de fines. Afin d'étudier l'effet des hétérogénéités à une échelle plus grande et déduire une similarité des processus, des essais de suffusion sont effectués sur un sol naturel grossier prélevé dans les digues du Rhin (VNF, Strasbourg). Cette étude est menée afin d'étudier l'effet des hétérogénéités par couche (Centrale, Aval) sur la suffusion. Les échantillons de sol sont reconstitués au laboratoire. Les hétérogénéités sont reproduites à partir du sol de référence par un réarrangement des particules (apport plus important des grosses particules). La fraction 12-16 mm a été le facteur d'ajustement (existe ou pas dans une couche) pour reproduire l'hétérogénéité. En effet, le sol hétérogène grossier est enrichi par cette fraction. La susceptibilité à la suffusion est évaluée en se basant sur les mesures des pressions interstitielles, de la masse érodée cumulée, et de la granulométrie post-suffusion.

On présente dans ce qui suit les matériaux constitutifs des échantillons testés, les techniques expérimentales utilisées, et les résultats obtenus selon les différentes configurations à partir des mesures de pressions locales et de la masse érodée cumulée.

4.2 Matériaux et Méthodes

4.2.1 Dispositif d'essai

Le dispositif expérimental, utilisé pour étudier le processus de suffusion, comprend une colonne de suffusion équipée de 4 capteurs de pression, et de différents dispositifs pour l'alimentation en eau, la collecte des particules érodées et l'acquisition de données (**Figure 4.1**).



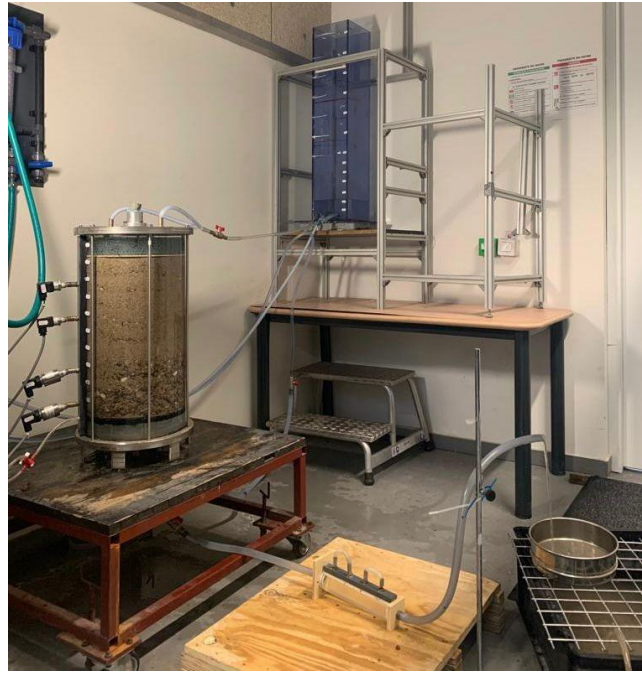


Figure 4.1 Schéma du dispositif expérimental

Colonne de suffusion

Les échantillons sont soumis à un écoulement descendant dans une colonne de suffusion de diamètre 30 cm et de hauteur 60 cm. La hauteur de l'échantillon est de 45 cm. Cette colonne est graduée pour faciliter la mise en place de l'échantillon de sol en 9 sous-couches (chacune d'épaisseur 5 cm). Sa paroi transparente en plexiglas permet de visualiser certaines modifications liées au détachement et au transport des particules ainsi que la formation de chemins préférentiels d'écoulement le long de la paroi. La face supérieure comporte deux entrées symétriques reliées au réservoir d'alimentation en eau. Une couche de billes de verre d'épaisseur 5 cm est placée à l'entrée de la colonne afin de permettre la diffusion uniforme de l'écoulement.

Une série de 4 capteurs de pression (P0, P1, P2, P3) est également installée sur la paroi latérale de l'échantillon. La position de ces capteurs est choisie de façon à couvrir l'enregistrement des pressions dans toutes les couches de l'échantillon, notamment à proximité des interfaces. Les gradients hydrauliques locaux sont calculés à partir des pressions mesurées par ces capteurs. Une grille métallique (d'ouverture 1 mm), installée sur la base de l'échantillon, permet le passage des particules fines de dimension plus petite que 1 mm (**Figure 4.2**). La face inférieure présente une forme d'entonnoir connecté au système de drainage. L'échantillon est composé de 3 couches (de même épaisseur) nommées T1, T2, et T3 correspondant aux parties amont, centrale, et aval, respectivement (**Figure 4.3**).



Figure 4.2 Couvercle et grille de la colonne de suffusion

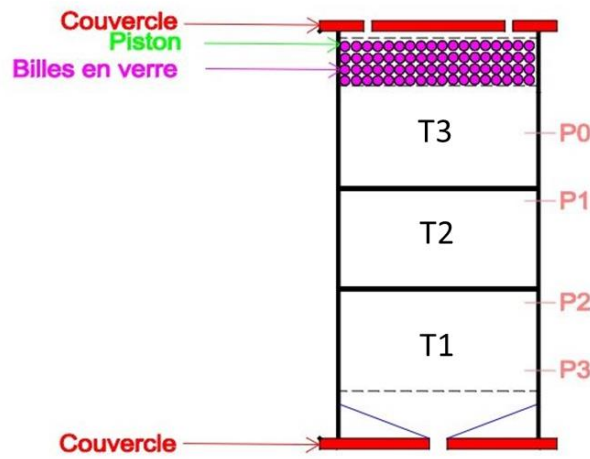


Figure 4.3 Colonne de suffusion et disposition des couches de sol

Capteurs de pression

Les capteurs de pression sont installés à 7 cm, 17 cm, 32 cm, 42 cm de la face supérieure de l'échantillon. Ces distances sont choisies afin de mesurer l'évolution des pressions dans la partie amont, centrale, et aval de l'échantillon. Les capteurs utilisés présentent une gamme de mesure entre 0 et 0,1 MPa bar et une précision de 0,25% (Figure 4.4). L'installation des capteurs sur les modules nécessite d'utiliser un système passe-paroi.



Figure 4.4 Capteur de pression

Système d'alimentation en eau

Un réservoir d'eau est utilisé pour alimenter la colonne ; il est connecté au réseau qui l'alimente et il est muni d'un trop plein pour maintenir un niveau d'eau constant. Une fois que le niveau d'eau souhaité est atteint, on règle l'alimentation à un débit constant pour maintenir le niveau

d'eau constant. La charge hydraulique appliquée est incrémentée par palier. On augmente ainsi le niveau d'eau de 10 cm dans le réservoir toutes les 30 minutes jusqu'à une hauteur maximale de 120 cm à la fin de l'essai.

Mesure de débit

Pendant l'essai, le débit liquide (l/s) est mesuré périodiquement (début, milieu, fin de chaque palier de chargement hydraulique) en utilisant une balance de précision. Les mesures de débit et de pressions sont utilisées dans le calcul de la conductivité hydraulique dans l'échantillon.

Système de récupération des particules érodées

Les particules érodées sont récupérées à la fin de l'essai en utilisant un tamis d'ouverture 20 μm . Comme les particules sableuses érodées possèdent un diamètre entre 0,2 mm et 1 mm, alors elles sont retenues par ce tamis. Après la récupération, la masse érodée cumulée est déterminée (**Figure 4.5**).



Figure 4.5 Récupération des particules érodées

Acquisition des données

L'évaluation de la suffusion est basée sur les paramètres hydrauliques et la masse érodée cumulée. Afin de bien présenter l'évolution des pressions locales, l'acquisition de ces données (à une fréquence 1 Hz) a été effectuée à l'aide d'un logiciel LabVIEW installé sur un ordinateur et connecté à une carte d'acquisition (**Figure 4.6**).

Afin de vérifier la calibration de l'ensemble des capteurs de pression, un essai hydrostatique à vide (sans échantillon de sol) a été réalisé en comparant les différentes pressions mesurées à différentes profondeurs avec les valeurs théoriques.

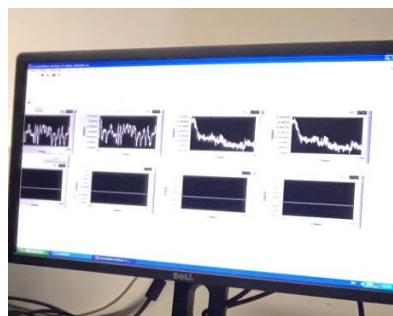


Figure 4.6 Acquisition des données

4.2.2 Matériaux

Les essais de suffusion sont réalisés sur des matériaux naturels prélevés des digues du Rhin (Strasbourg). Ces graves présentent une granulométrie étalée entre 0,02 mm et 16 mm. Dans cette étude, ce sol homogène de référence servira à reconstruire des sols hétérogènes. La procédure de reconstitution doit satisfaire les conditions d'homogénéité de chaque couche et doit être répétable.

Dans ce qui suit, on va présenter les essais sur chacune des trois configurations testées : Référence (R), Hétérogénéité avale (A), Hétérogénéité centrale (C).

a) Configuration de référence (Homogène):

La configuration de référence (R) correspond au sol naturel reconstitué par une répartition uniforme des grains. Cette sélection est basée sur la classification de stabilité du sol reconstitué selon les critères de **Sherard (1979)** et **Wan et Fell (2008)**. La reconstruction de cette granulométrie est effectuée par mélange de 9 fractions granulométriques :

0,2-0,5 / 0,5-0,63 / 0,63-0,8 / 0,8-1 / 1-1,6 / 1,6-4 / 4-8 / 8-12,5 / 12,5-16 (mm)

Le sol est identifié comme un mélange de graviers qui constituent la fraction grossière, avec du sable représentant la fraction fine. La courbe granulométrique du sol de référence présentée dans la **Figure 4.7**, montre que celle-ci est située dans la limite de la zone de stabilité selon les critères de **Sherard (1979)**, et de **Wan et Fell (2008)**. Donc, ce sol de référence est considéré stable selon ces deux critères.

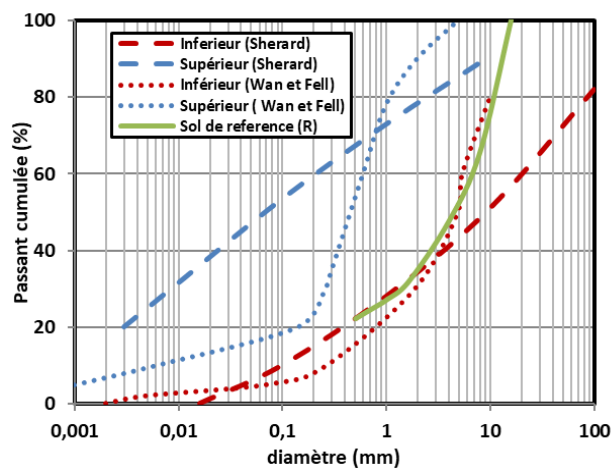


Figure 4.7 Courbe granulométrique du sol de référence

La préparation de l'échantillon et sa mise en place dans la colonne sont effectuées selon les étapes suivantes :

- La masse sèche des matériaux est calculée afin d'obtenir la densité visée (égale à 1.8) pour l'échantillon de diamètre 30 cm et de hauteur 45 cm. Ensuite, la masse totale est divisée en 9 parties égales afin de remplir la colonne en 9 couches de 5 cm d'épaisseur chacune.
- Ces 9 mélanges sont humidifiés à une teneur en eau égale à 6% afin de reconstituer la cohésion du sol et éviter la ségrégation locale des particules pendant la mise en place (**Figure 4.8**).

- Chaque mélange est ensuite déposé soigneusement avec une hauteur de chute très faible et compacté jusqu'à obtenir une épaisseur de 5 cm pour chaque sous-couche. Ensuite, la surface est scarifiée pour assurer la continuité avec la couche suivante. Cette procédure est répétée pour les 9 couches. Cette méthode permet d'obtenir des échantillons homogènes. La dernière couche est ajustée de manière à ce que sa surface soit horizontale. La **Figure 4.9** présente la configuration homogène avec les interfaces qui apparaissent entre les 9 couches compactés.



Figure 4.8 Mélange du sol de référence



Figure 4.9 Remplissage de la colonne en configuration de référence

b) Configurations hétérogènes

Dans cette étude, deux configurations d'hétérogénéité seront testées : Aval (A) et Centrale (C). La configuration d'hétérogénéité aval est décrite par la présence d'une couche grossière (T1) en aval surmontée par deux couches moins grossières (T2 et T3). La configuration centrale est définie par la présence d'une couche grossière (T2) située entre deux couches moins grossières (T1 et T3). Ces configurations sont reproduites par échange des particules entre les différentes couches du sol de référence, c'est-à-dire qu'on garde les mêmes fractions (avec même masse) granulaires que l'échantillon de référence mais on modifie les granulométries locales (des couches T1, T2, T3) par échange de particules entre couches comme détaillé ci-après :

-La partie grossière contient toute la fraction grossière (12.5 -16 mm) du sol de référence et diminuée d'une masse équivalente de la fraction fine (0.2 – 4 mm) pour compenser l'apport de la masse de la fraction grossière ajoutée (**Figure 4.10.b**).

- La partie fine est obtenue par substitution de la fraction grossière (12,5 - 16 mm) enlevée du sol de référence par une fraction fine (0.2 - 4 mm) équivalente en masse de façon à conserver la même densité (**Figure 4.10.a**).

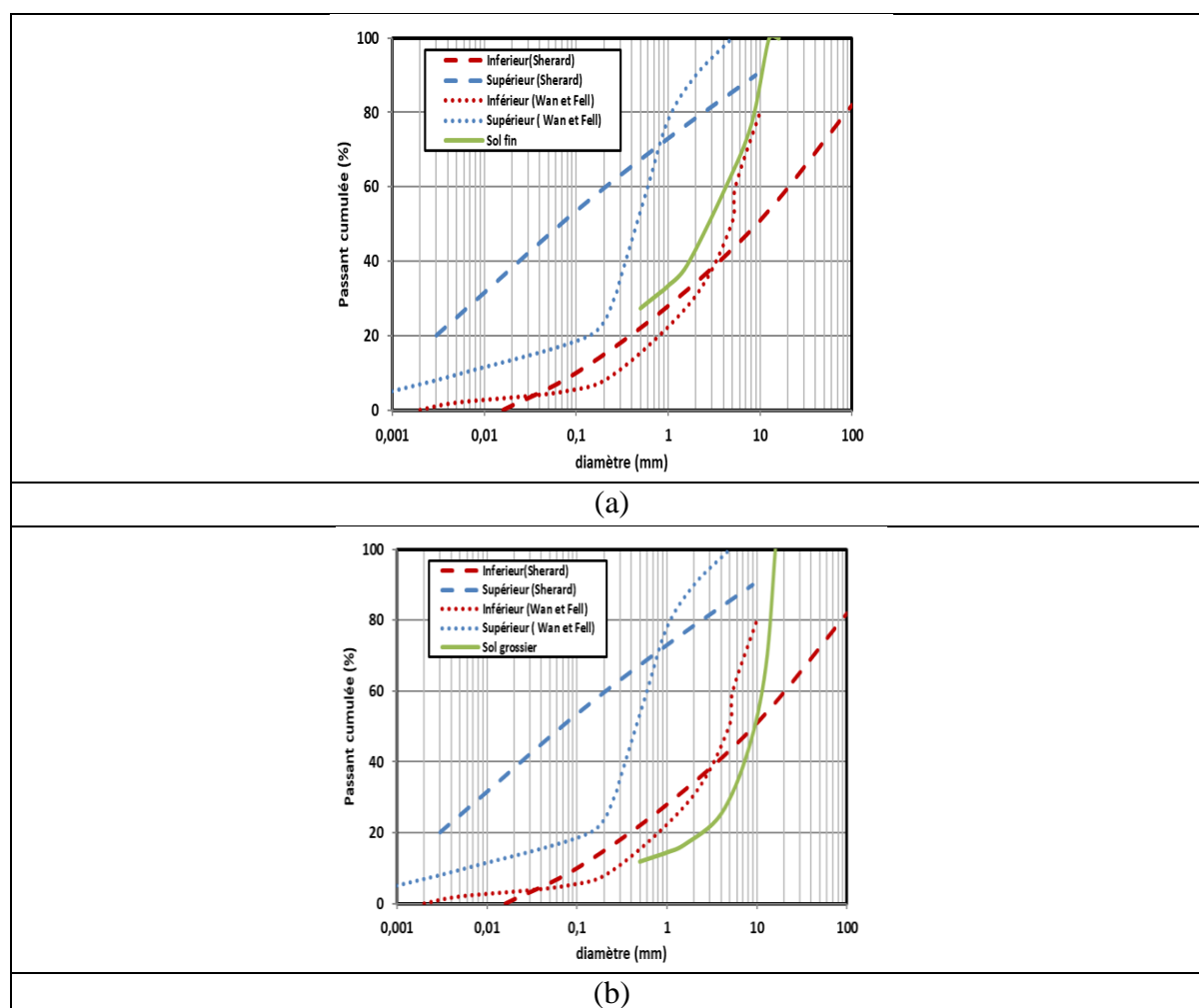


Figure 4.10 Courbes granulométriques de (a) la couche fine et (b) de la couche grossière

Cette méthode permet de créer des instabilités locales, en partant d'un sol de référence stable. Le sol constituant la couche fine devient plus stable par rapport au sol de référence (mieux encadré par le fuseau de stabilité) (**Figure 4.10.a**), alors que le sol de la couche grossière s'écarte du fuseau granulométrique de stabilité selon les critères de **Sherard (1979)** et **Wan et Fell (2008)** et deviennent instable (**Tableau 4.1**).

Tableau 4.1 Classification des sols testés

Critère	Limite de stabilité	Reference	Couche Fine	Couche Grossière
Istomina (1957)	$C_u \leq 20$	U	U	U
Kezdi (1979)	$(D_{15c}/d_{85f})_{\max} \leq 4$	S	S	U
Burenkova (1993)	$0.76 \log(h'') + 1 < h' < 1.86 \log(h'') + 1$	S	S	U
Wan et Fell (2008)		S	S	U

La méthode de mise en place des différents mélanges est similaire à celle utilisée pour la préparation de la configuration de référence (R), sauf que dans ce cas, on utilise 3 sous-couches pour la reconstitution de la couche grossière et 6 sous-couches pour les deux couches fines (**Figure 4.11**). Chaque mélange (préparé dans un bac) est utilisé pour la reconstitution d'une sous couche de 5 cm.

Pour la configuration d'hétérogénéité aval, la couche grossière aval (T1) de 15 cm est surmontée par les deux couches fines (centrale T2 et amont T3). Pour la configuration centrale, la couche grossière (T2) est déposée au milieu de l'échantillon. La **Figure 4.12** montre les configurations hétérogènes.



Figure 4.11 Matériaux constituant les configurations hétérogènes

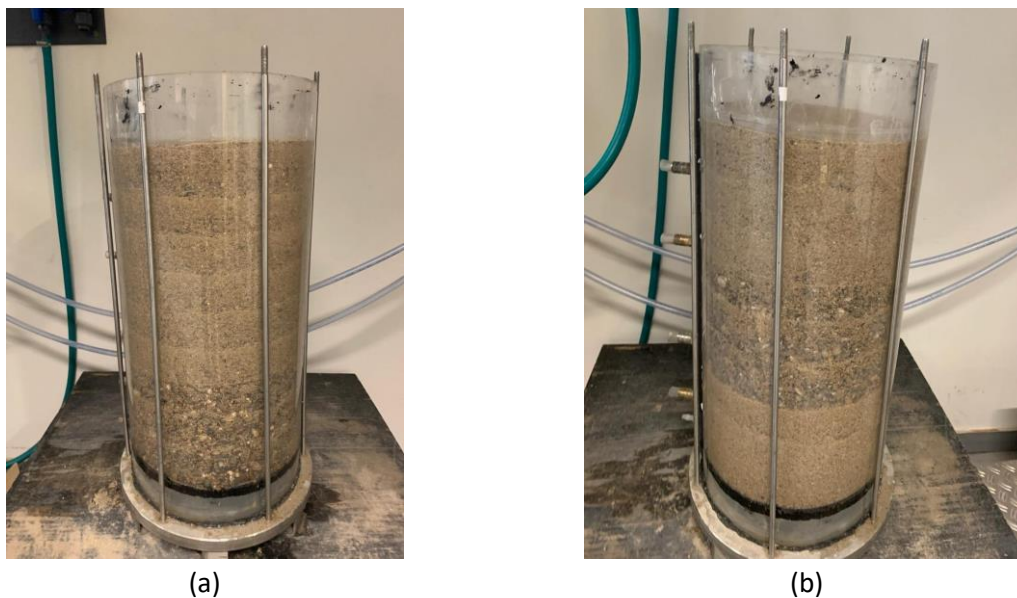


Figure 4.12 Configurations d'hétérogénéité (a) Aval (b) Centrale

4.2.3 Saturation de l'échantillon

Pour tous les essais, on applique un écoulement d'eau désaérée du bas de l'échantillon vers le haut sous un faible débit correspondant à un gradient hydraulique d'environ 0,05, afin d'éviter la perturbation de l'échantillon. Les capteurs de pression sont placés au fur et à mesure avec l'augmentation du niveau d'eau. Cette étape est effective avant le début de l'essai afin

d'éliminer l'air et de débiter l'essai en condition saturée. La saturation est arrêtée dès que l'eau apparaît au niveau de la face supérieure de la colonne.

4.2.4 Application de la charge hydraulique

On distingue entre 3 types de chargement hydraulique: à débit constant, à gradient constant, et à gradient par palier. Comme on l'a déjà mentionné, les essais à débit constant ne représentent pas la réalité, tandis que Les essais à gradient hydraulique par palier sont les plus proches des conditions sur site (remplissage d'un barrage). Dans notre étude, la procédure de chargement utilisée consiste à appliquer un écoulement d'eau avec chargement hydraulique par paliers successifs (**Figure 4.13**). La durée de chaque palier est fixée à 30 minutes choisie sur la base des observations de l'état de non-érosion pour différents types de sol (**Chang et Zhang 2011, Suits et al. 2006**). La durée de chaque palier hydraulique est un paramètre important dans les essais de suffusion. Dans cette étude, on commence avec le plus faible gradient égal à 1 et à chaque palier ce gradient est incrémenté de 0,18. Cette incrémentation est appliquée par augmentation du niveau d'eau dans le réservoir. Elle est choisie pour bien détecter les variations des pressions locales pour chaque petite augmentation du gradient hydraulique globale. Le processus d'érosion est considéré comme terminé lorsque la migration des fines n'est plus observée. Des mesures de débit sont effectuées périodiquement au début, au milieu, et à la fin de chaque palier. La durée totale des essais est de 6 heures et demie. En réalité, le processus de suffusion est lent et peut prendre plusieurs années, mais au laboratoire des limitations (temps d'ouverture) ne permettent d'effectuer l'essai qu'en une journée et ainsi on s'intéresse plus à la phase d'initiation de la suffusion.

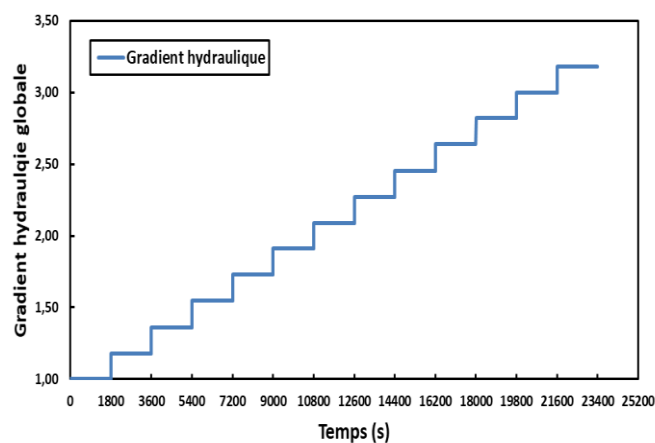


Figure 4.13 Gradient globale appliqué par paliers pendant l'essai

4.3 Résultats et discussions

Le développement de la suffusion est évalué en se basant sur la masse érodée cumulée, la granulométrie post-érosion des différentes couches, et sur la variation des paramètres hydrauliques locaux. Cette partie est dédiée à l'analyse des résultats des essais sur les trois configurations testées : Reference (R), hétérogénéité aval (A), hétérogénéité centrale(C).

4.3.1 Masse érodée cumulée

La masse érodée cumulée est définie par la masse totale des particules qui se retrouvent dans l'effluent à la fin de l'essai. En raison de la condition limite adoptée à la base de la cellule

(grille d'ouverture 1mm), les particules susceptibles à l'érosion constituent la fraction fine de diamètre inférieure à 1 mm. Le choix de cette condition à la limite est lié au fait que ce diamètre des particules fines se trouve dans la plage granulométrique qui correspond à 20% du pourcentage massique cumulé. La **Figure 4.14** présente la masse totale érodée pour les trois configurations testées. Les résultats montrent que la configuration de référence, correspondant au sol homogène, présente la plus faible susceptibilité à l'érosion, ce comportement peut être attribué à la distribution uniforme des particules et des constriction dans l'ensemble du volume de l'échantillon et l'absence d'une couche plus grossière qui faciliterait le transport des particules.

La configuration centrale (C) montre une susceptibilité plus forte à la suffusion, ce résultat est dû à la présence de la couche grossière centrale (T2) qui assure le transfert des fines de l'amont (T3) vers l'aval (T1), et le contraste de quantité de fines entre la couche amont (T3) et la couche centrale (T2).

La configuration avale (A) est la plus susceptible à l'érosion, ce résultat est attribué à la présence de la couche avale grossière (T3) proche de l'exutoire, où la rétention des particules est plus faible. Par conséquent, il y a un transport plus facile des fines de cette couche et des couches qui la surmontent.

Donc l'introduction d'une hétérogénéité (centrale, ou avale) aboutit à l'augmentation de la susceptibilité à l'érosion par rapport au sol homogène. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus dans les essais de la petite colonne dans le cas d'une forte hétérogénéité (60%) (section 3.3.2). Par contre, la divergence apparait entre les résultats des deux cellules dans la classification de la susceptibilité entre les deux configurations d'hétérogénéité (centrale et aval). Dans les essais sur la petite colonne, les résultats obtenus ont montré que la configuration centrale est plus susceptible à la suffusion que l'avale, par contre, dans ces essais en grande colonne un résultat inverse a été obtenu. Cette divergence peut être expliquée par la différence entre les conditions des deux essais, telles que la granulométrie des matériaux, le type et la taille de fines érodables, ainsi que l'effet d'échelle. Alors l'effet de la configuration de l'hétérogénéité dépend de ces paramètres. On peut conclure qu'une hétérogénéité est plus préjudiciable dans un sol grossier.

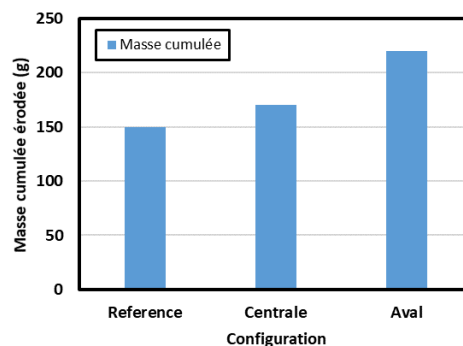


Figure 4.14 Masse érodée cumulée des différentes configurations

4.3.2 Pressions Locales

Les pressions locales sont obtenues à partir des capteurs placés à différentes positions le long de l'échantillon. Les capteurs P0, P1, P2, P3, fournissent l'évolution de la pression sur des positions proches des interfaces des couches successives (P0-P1 : couche amont ; P1-P2 : couche centrale ; P2-P3 : couche aval), respectivement. On analyse l'évolution de ces pressions dans chaque configuration testée afin de bien comprendre l'initiation et la progression du processus de suffusion.

Dans la configuration de référence (R), les valeurs de pression sont dans un ordre décroissant ($P0 > P1 > P2 > P3$), mais l'amplitude varie en fonction du gradient appliqué. Comme on peut le voir sur la **Figure 4.15**, les courbes sont très proches pour un gradient entre 1 et 1,54 avec des valeurs presque constantes dans chaque palier, indiquant qu'il n'y a pas de perturbation structurale ou du moins négligeable dans l'échantillon. Les courbes de pression commencent à diverger à partir d'un gradient égal à 1,54. Il est important de noter que la pression dans chaque palier est fluctuante avec une tendance croissante, en particulier sur (P0) avec une pression maximale de 10 kPa. Cette augmentation de pression dans chaque palier est plus prononcée dans les zones proches de l'entrée de la cellule. Le processus de filtration aboutit à l'apparition des zones de surpression ce qui explique l'augmentation de la pression dans chaque palier.

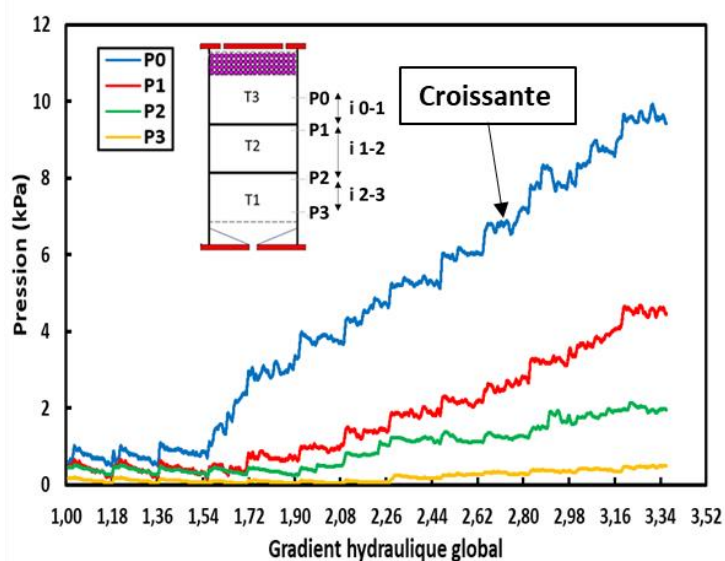


Figure 4.15 Evolution des pressions locales pour la configuration de référence

Pour la configuration d'hétérogénéité centrale (C), on trouve qu'il y a une diminution de la pression dans les couches fines en amont (T3) ($P0 > P1$) et en aval (T1) ($P2 > P3$), alors que, dans la couche grossière centrale il y a augmentation de la pression ($P2 > P1$) (**Figure 4.16**). En effet, l'écoulement traverse au début la couche fine en amont (T3) qui provoque une perte de charge conséquente qui conduit à une diminution de pression. Cette perte de charge est liée à la granulométrie fine et à la distribution des petites constriction dans cette couche. Par contre, la pression augmente en traversant la couche centrale grossière (T2) ce qui est montré par la valeur de la pression (P2) (à l'interface grossière-fine) plus grande que la pression (P1) (à l'interface fine-grossière). Cette observation montre qu'en passant d'une couche grossière à une couche fine, il y a création d'une zone de surpression due à la rétention des fines (effet de

filtre). Cette surpression est plus évidente pour un gradient global appliquée entre 1 et 1,9, où l'écoulement difficile génère un cumul de pression (P2) dans cette zone. En traversant la couche aval fine (T1), l'évolution est similaire à celle obtenue dans la couche amont (T3), présentée par la diminution de la pression de P2 (à l'interface) à P3 proche de l'exutoire. Ce comportement diffère de celui obtenu dans l'essai de référence où il y a une diminution monotone des pressions le long de l'échantillon. Egalement, Il est nécessaire de noter qu'il y a 3 tendances d'évolution de la pression dans chaque palier constant de gradient hydraulique:

$1 < i < 1,72$: Il y a une diminution de pression dans chaque palier due au détachement et au transport des particules. Ce détachement de fines conduit à rendre l'écoulement plus facile et par conséquent à la diminution des pressions générées.

$1,72 < i < 2,44$: Dans cette phase, la variation des pressions dans chaque palier est très faible. En effet, il y a rétention d'une partie des fines détachées. Un état d'équilibre entre les particules transportées et retenues est établi, ce qui explique la stabilité des pressions dans chaque palier.

$2,44 < i < 3,34$: Cette phase est caractérisée par une forte augmentation des pressions locales dans chaque palier, en particulier celle qui est à l'entrée de l'échantillon (P0). Le processus de filtration est dominant, ce qui se traduit par l'augmentation des pressions.

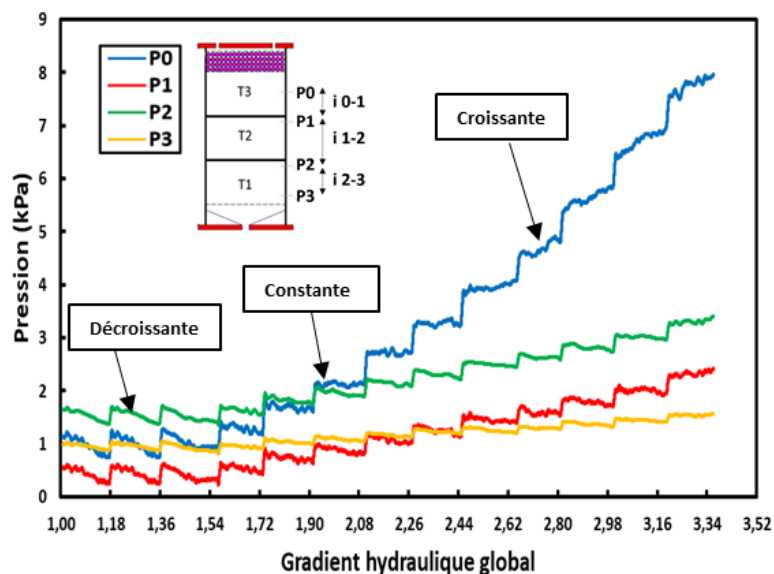


Figure 4.16 Evolution des pressions locales pour la configuration hétérogène centrale

Concernant la configuration aval (A), la **Figure 4.17** montre qu'il y a apparition des pressions négatives (suction) (P1) sur l'interface des couches amont-centrale, et (P2) sur l'interface des couches centrale-aval. L'effet d'aspiration en (P2) sur l'interface fin-grossier est le plus fort, puis il diminue en s'éloignant de cette zone avec la présence d'une forte pression (P3) à la sortie. La couche grossière est surmontée par deux couches fines, donc, l'écoulement passe d'un milieu granulaire peu perméable à un autre très perméable. Cette différence de perméabilité peut constituer un facteur donnant naissance à une pression négative (aspiration). Ce phénomène est expliqué par un déséquilibre entre le flux entrant et sortant en présence d'une couche perméable en aval (**Figure 4.18**). En effet, l'écoulement sortant doit être équilibré par

un écoulement entrant, or, la présence de deux couches peu perméables en amont crée une discontinuité hydraulique traduite par l'apparition de l'aspiration. Cette discontinuité disparaît en appliquant des gradients plus grands que 1,9. Il est également nécessaire de noter qu'il y a toujours conservation de masse (flux entrant = flux sortant).

L'évolution de la pression dans chaque palier suit la même tendance que dans les essais avec les autres configurations. On distingue trois phases : une phase décroissante ($i < 1,54$), une phase constante ($1,54 < i < 2,26$), et une phase croissante ($i > 2,26$). En outre, on trouve une augmentation très forte de la pression dans la partie fine (P0, P1), alors, qu'elle est plus faible dans la partie grossière (P3). L'effet de l'augmentation du gradient hydraulique est plus prononcé dans la partie amont et diminue en s'approchant de la sortie.

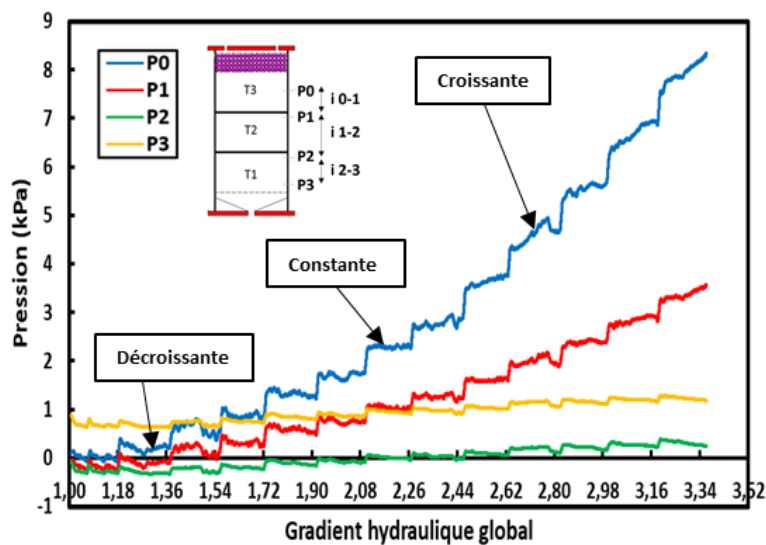


Figure 4.17 Evolution des pressions locales pour la configuration hétérogène aval

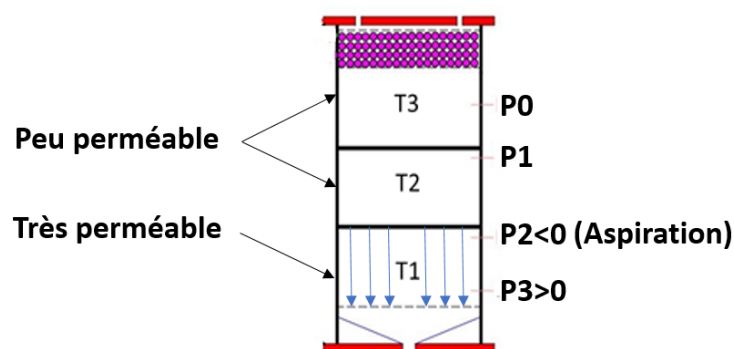


Figure 4.18 Processus d'aspiration dans la configuration d'hétérogénéité aval

La susceptibilité à la suffusion dans les configurations testées est liée à la distribution granulométrique, aux pressions générées dans l'échantillon, et à la pression P3 à la sortie. On trouve que la pression à la sortie pour l'essai de référence est plus faible que dans les autres configurations ($P3 \text{ référence} < P3 \text{ centrale} < P3 \text{ aval}$). En outre, l'effet de l'aspiration est pris en compte dans le processus de transport des particules fines dans la configuration hétérogène

aval. Ces pressions à la sortie favorisent le transport des particules en constituant un facteur poussant des particules.

Afin d'aller plus loin dans la discussion des résultats précédents, les gradients hydrauliques locaux dérivés des pressions seront utilisés dans l'étude de l'effet des processus de transport dans les différentes couches de l'échantillon, et dans la détermination du gradient hydraulique critique d'initiation de la suffusion.

4.3.3 Gradient Local

Les gradients hydrauliques locaux sont calculés à partir des relevés de mesures des pressions locales. On définit trois gradients hydrauliques locaux i_{0-1} , i_{1-2} , et i_{2-3} correspondants aux valeurs des gradients hydrauliques dans chacune des couches (T3, T2, T1) amont, central, et aval, respectivement.

Pour la configuration de référence homogène (R), Les valeurs initiales (au début de l'essai) du gradient hydraulique local sont proches d'une valeur approximative de 1 (**Figure 4.19**). A partir d'un gradient hydraulique global de 1,54, la divergence entre les différents gradients apparait par augmentation brutale du gradient hydraulique en amont (i_{0-1}). Les gradients au centre (i_{1-2}) et aval (i_{2-3}) restent proches avec une faible tendance croissante. Cette augmentation du gradient (i_{0-1}) est lié au mouvement des particules dans la même couche amont (T3). En effet, il y a déplacement et cumul des fines dans la zone située entre (P0) et (P1). Le gradient local maximal développé est de l'ordre de 6. Les couches centrale (T2) et aval (T1) sont moins affectées par l'augmentation du gradient appliqué. On peut dire que le processus de suffusion est hétérogène même avec un échantillon de référence ayant une distribution granulométrique globale uniforme. Cette hétérogénéité provenant du processus de suffusion a été déjà observée dans les essais (**Aboul Hosn et al. 2019, Sail et al. 2011**).

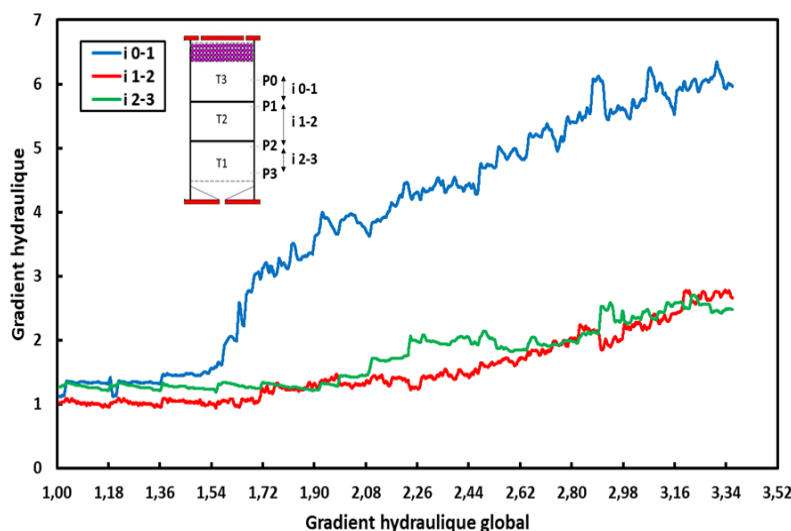


Figure 4.19 Evolution des gradients hydrauliques locaux pour la configuration homogène

Concernant la configuration centrale, les courbes d'évolution du gradient hydraulique local dans les couches fines (i_{0-1} , i_{2-3}) sont très proches pour les essais effectués jusqu'à un gradient global appliqué égale à 1,54 (**Figure 4.20**). A partir de ce gradient, on observe une divergence

et une augmentation plus rapide du gradient hydraulique de la couche amont. Ce gradient global appliqué ($i=1,54$) est considéré comme le gradient d'initiation de l'instabilité. Le gradient hydraulique dans la couche centrale (T2) est presque constant ($i(1-2) = 0,3$), ce qui est attribué à la granulométrie grossière qui laisse passer facilement les particules avec un faible potentiel de rétention. La couche centrale dans ce cas joue un rôle essentiel dans le transport des particules de la couche amont vers la couche aval sans subir de modifications hydrauliques. Malgré ce transport, la couche amont subit un gradient plus fort que celui de la couche aval qui reçoit toutes les particules détachées. Cette observation est expliquée au fait qu'une partie des fines qui se trouvent initialement en amont de (P0) sont transportées et retenues entre (P0) et (P1), l'autre partie est transportée vers les couches centrale et aval. Ces résultats sont corrélés avec l'analyse granulométrique des différentes couches (section 4.3.5).

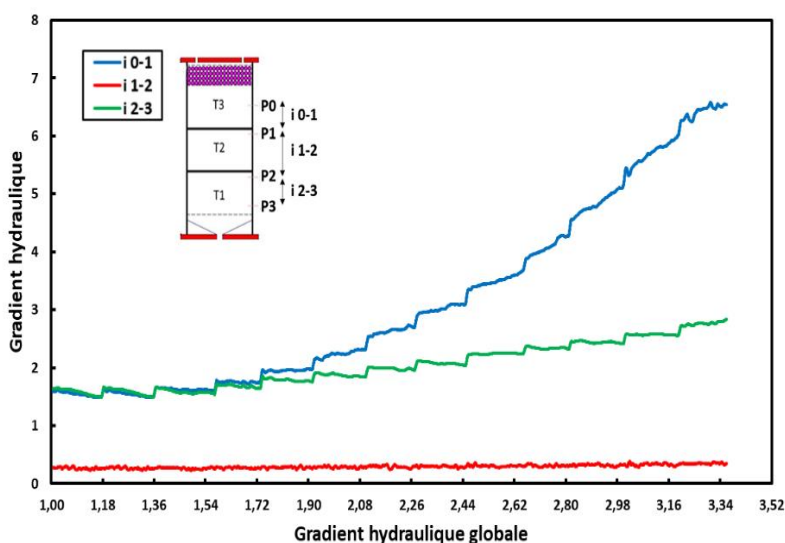


Figure 4.20 Evolution des gradients hydrauliques locaux pour la configuration centrale

Concernant la configuration aval (A), la **Figure 4.21** présente une tendance symétrique de celle obtenue dans la configuration centrale. Dans ce cas, le gradient le plus faible est dans la couche grossière aval (T1) et les couches centrale (T2) et amont (T3) présentent un gradient local globalement similaire, pour un gradient global appliqué plus petit que 1,54. Il est nécessaire de noter que le gradient local de la couche grossière de cette configuration aval (A) est plus faible que celui dans la couche grossière de la configuration centrale (C), ceci est lié à la proximité de l'exutoire dans cette configuration aval (A). Sa proximité immédiate à la sortie facilite la perte des fines vers l'exutoire.

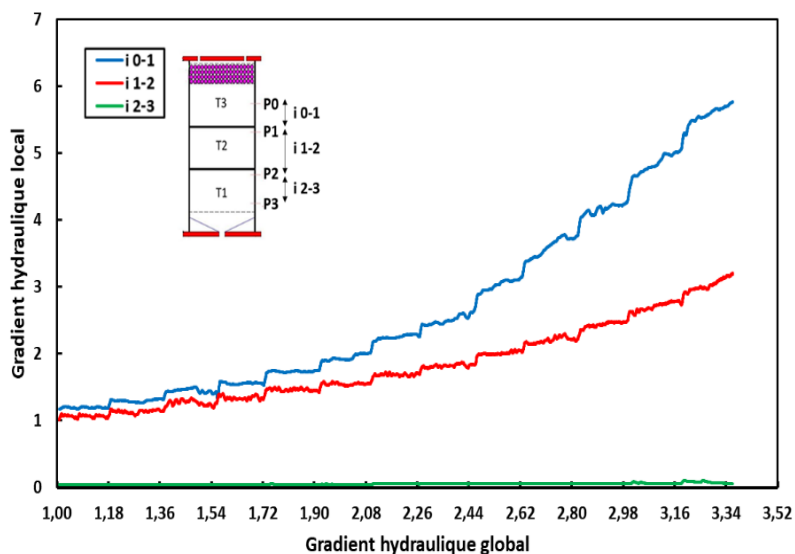


Figure 4.21 Evolution des gradients hydrauliques locaux pour la configuration aval

Donc, le comportement hydraulique et la susceptibilité à la suffusion sont affectés par les différentes hétérogénéités. La configuration d'hétérogénéité avale est la plus susceptible à la suffusion. En plus, il y a apparition des surpressions dans la configuration d'hétérogénéité centrale, alors que la configuration d'hétérogénéité avale présente un processus d'aspiration. La couche amont montre une forte augmentation du gradient hydraulique local, alors que la valeur dans la couche grossière est presque invariable, dans toutes les configurations testées. Finalement, La configuration centrale produit le gradient le plus fort dans la couche amont ($i_{0-1} = 7$) en raison de la faible pression (P1) sur sa partie inférieure, due à la présence de la couche grossière au centre.

4.3.4 Conductivité hydraulique

Les données obtenues à partir du gradient hydraulique global appliqué, et des mesures du débit, sont utilisées pour calculer la conductivité hydraulique (K) de l'échantillon pour un écoulement de Darcy (**Figure 4.22**). La conductivité hydraulique globale (K) est calculée pour chaque expérience pendant toute la durée de l'essai. Les résultats montrent une diminution de la conductivité hydraulique (K) avec le temps de la même façon pour toutes les configurations (Reference, Centrale, Aval), avant d'atteindre une valeur rémanente indiquant un état d'équilibre correspondant à la rétention maximale des particules détachées.

Au début de l'essai, il y a une diminution rapide avec l'augmentation du gradient hydraulique, atteignant des valeurs de conductivité plus basses. Cette diminution est attribuée au début du mouvement des particules et leur rétention dans l'espace poreux. A partir d'un gradient globale de 1,9 cette diminution devient plus faible avec des valeurs proches pour tous les sols testés. Ce résultat permet de considérer que chaque sol, après un certain temps, arrive à un état où la plupart des zones ont atteint leur limite de rétentions de particules. Cette tendance est cohérente avec les résultats d'autres recherches (**Moghadasi et al. 2004, Dikinya et al. 2008**)

En revanche, les configurations testées montrent des comportements différents en ce qui concerne les valeurs de la conductivité hydraulique. La configuration centrale (C) génère la

conductivité hydraulique la plus faible, alors que celle de la configuration de référence (R) est la plus forte. Ces différences de comportement sont expliquées par les propriétés structurales distinctes des configurations testées ainsi que les gradients locaux produits. La présence de deux couches fines aux extrémités de l'échantillon dans la configuration centrale (C) joue le rôle d'un filtre qui aboutit à un écoulement plus difficile, malgré la présence d'une couche grossière au centre, et par conséquent une conductivité hydraulique plus faible est générée. La configuration aval (A) présente une conductivité hydraulique plus forte qui peut être liée à la position en aval de la couche grossière et à la pression « d'aspiration » générée, constituant un facteur facilitant l'écoulement. Finalement, la configuration de référence (R) homogène est la plus perméable, ceci est attribué à l'absence de la couche fine qui peut causer une forte perte de charge.

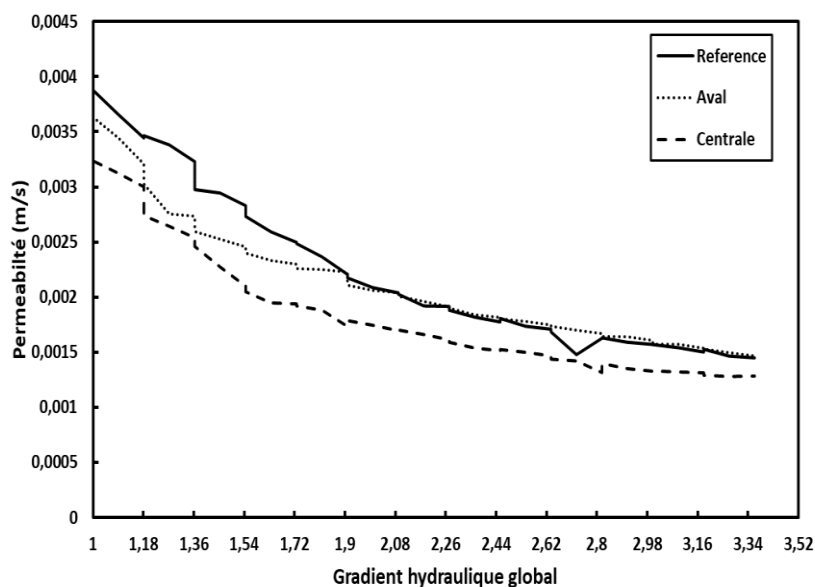


Figure 4.22 Evolution de la conductivité hydraulique dans toutes les configurations.

4.3.5 Granulométrie post-érosion

Les spécimens ont été divisés après essai en trois parties : couches supérieure amont (T3), couche centrale (T2), et couche inférieure avale (T1). A la fin de l'essai, les matériaux constituant chacune de ces couches sont prélevés séparément, puis séchés pour effectuer le tamisage afin de déterminer la granulométrie après l'essai. L'analyse granulométrique post-érosion des différentes couches permet de bien comprendre le processus de transfert des particules dans l'échantillon. En outre, elle permet de montrer le rôle de chaque couche dans la rétention des particules. Dans cette partie, on va présenter la courbe granulométrique avant et après essai pour chaque couche dans toutes les configurations testées.

Pour la configuration de référence (R), la **Figure 4.23** montre que toutes les courbes granulométriques des couches (amont, centrale et avale) sont au-dessous de la courbe granulométrique initiale surtout pour la partie fine. Donc les différentes couches subissent globalement une perte en fines. Les couches centrale (T2) et avale (T1) reçoivent certes des fines des couches supérieures, mais la perte est plus grande. Cette perte totale dans toutes les couches est traduite par la masse érodée cumulée.

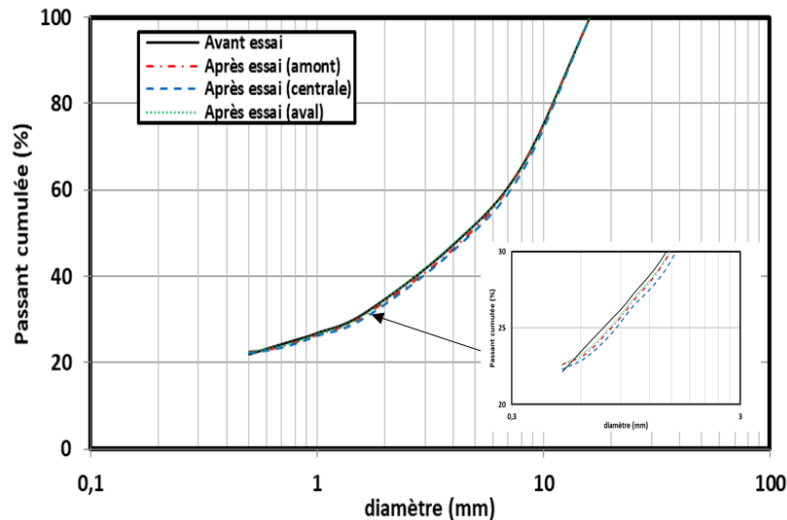


Figure 4.23 Courbes granulométriques de la configuration de référence

Concernant la configuration d'hétérogénéité centrale (C), la courbe granulométrique de la couche amont (T3) présente une teneur en fines plus faible, alors que la couche centrale grossière (T2) présente une teneur en fines plus grande après l'essai (**Figure 4.24**). La plus grande perte de particules fines s'est produite dans la couche supérieure amont (T3). Ces particules sont retenues dans la couche centrale grossière (T2) qui sera enrichie en fines. Il y a un déplacement des fines de la couche amont (T3) vers la couche centrale (T2), mais qui peuvent être retenues à l'interface des couches centrale et aval, qui peut conduire au colmatage. Une légère diminution de la fraction fine est obtenue dans la partie aval (T1), la majorité de la fraction érodée provient de cette couche et de plus, le processus de filtration s'intensifie dans cette couche qui reçoit des particules de la couche centrale grossière (T2). Donc, il y a un transfert des particules fines de la couche amont vers la couche aval par l'intermédiaire de la couche centrale grossière présentant également un potentiel de rétention. La **Figure 4.25** présente la couche centrale avant et après suffusion, montrant un apport de fines provenant de la couche amont.

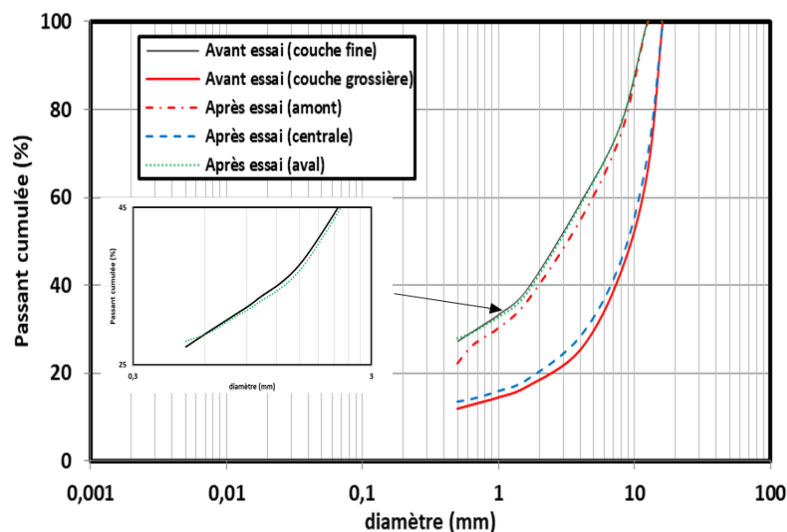


Figure 4.24 Courbes granulométriques de la configuration centrale



Figure 4.25 Couche centrale de la configuration centrale

La granulométrie post suffusion de la configuration aval (A), présentée dans la **Figure 4.26**, montre qu'il y a un faible changement dans la granulométrie des couches amont (T3) et centrale (T2), alors que dans la couche aval il y a augmentation de la teneur en particules ayant un diamètre compris entre 2 mm et 10 mm. Cette configuration est la plus susceptible à la suffusion. En plus, la couche aval (T1) joue le rôle le plus important dans le contrôle du processus de suffusion en raison de sa granulométrie grossière et de sa localisation proche de la sortie. Les particules érodées proviennent principalement des zones à proximité de la sortie de la colonne en aval, comme l'illustre l'image de la **Figure 4.27**, qui montre un lessivage relatif de la couche aval, mais la même couche résiste et agit comme un filtre par rapport aux particules érodées depuis la partie supérieure de la couche elle-même. Cette observation montre que la couche aval joue le rôle d'un filtre qui retient une partie des particules provenant de l'amont. L'effet d'aspiration intervient encore dans ce processus, ce qui explique la migration des particules de diamètre compris entre 2 mm et 10 mm. Ces résultats mettent en évidence le processus complexe de suffusion où le détachement des particules et la filtration du transport sont couplés.

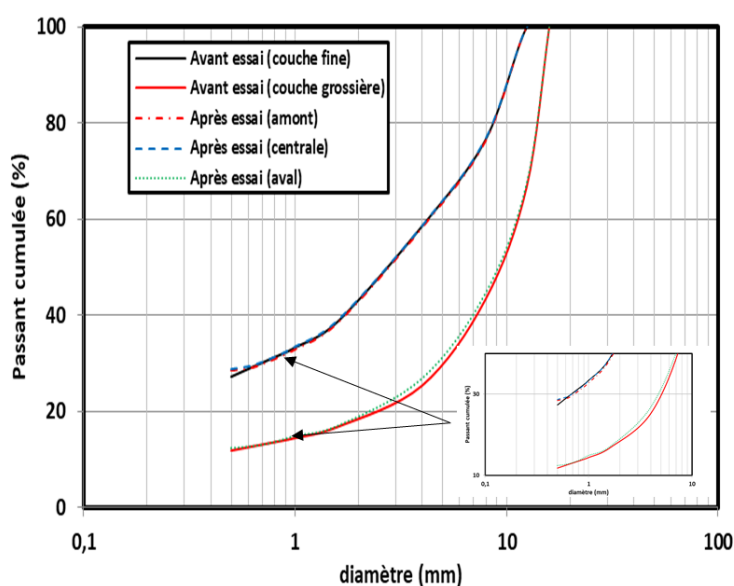


Figure 4.26 Courbe granulométrique de la configuration aval



Figure 4.27 *Couche aval de la configuration aval*

4.4 Conclusion

Dans la littérature, la plupart des essais de suffusion ont été réalisés sur un sol homogène. Dans les conditions de terrain, l'hétérogénéité peut être abordée par une approche géométrique par analogie avec la disposition des matériaux en plusieurs couches dans les ouvrages ou dans les alluvions des fondations. Des essais sur une colonne de suffusion ont été effectués afin d'étudier la susceptibilité à la suffusion des sols présentant une hétérogénéité centrale ou aval. Le sol testé a été prélevé des digues du Rhin et a été mis en place dans la colonne de suffusion sous forme de trois configurations : Reference (R), Centrale (C), et Aval (A).

La comparaison des pressions locales permet de constater que le processus de suffusion crée un milieu hétérogène même dans l'échantillon de référence considéré homogène. L'effet du gradient appliqué est plus prononcé dans la couche amont, il diminue en s'approchant de l'exutoire de la colonne. La configuration centrale présente l'apparition d'une surpression au niveau de l'interface des couche grossière - couche fine. Néanmoins, dans la configuration d'hétérogénéité avale, on met en évidence une pression négative liée à la présence d'une discontinuité hydraulique sur l'interface des couches fine et grossière.

Les résultats du gradient hydraulique montrent que la réponse hydraulique dépend de la configuration testée. La couche grossière présente un gradient local faible en comparaison avec celui de la couche fine.

L'analyse des granulométries post-suffusion avec les granulométries initiales montre que le changement de la granulométrie n'est pas uniforme dans les différentes couches. En outre, elle la couche grossière de la configuration centrale joue un rôle essentiel dans le transfert des fines de la couche amont vers la couche avale. La variation de la granulométrie de la couche avale est très faible dans toutes les configurations testées, ce qui est expliqué par la compensation de la perte de particules par l'arrivée des fines venant des couches situées en amont.

Pour conclure, la configuration homogène de référence est la plus résistante à la suffusion alors que la configuration d'hétérogénéité avale présente la plus forte susceptibilité à la suffusion. La présence d'une hétérogénéité centrale peut donner naissance à de fortes surpressions qui peuvent être très préjudiciables à l'échelle de la structure hydraulique qui risque de déclencher une rupture brutale. L'hétérogénéité avale peut entraîner un processus hydraulique de succion qui peut favoriser la perte des fines et augmenter la susceptibilité du sol à la suffusion.

4.5 Synthèse générale

Dans les chapitres 3 et 4, on a effectué des essais à deux échelles sur des sols naturels reconstitués au laboratoire. Les résultats ont montré quelques différences entre les résultats des essais effectués avec la petite et ceux de la grande colonne. Cette différence est expliquée par le type des fines, la granulométrie, et l'effet d'échelle. Il a été montré dans les deux études une augmentation de la susceptibilité à la suffusion lors de la présence d'une forte hétérogénéité, et une tendance de la conductivité hydraulique à décroître. La configuration d'hétérogénéité centrale semble plus susceptible à la suffusion que la configuration avale dans la petite colonne, alors que c'est l'inverse qui se produit dans la grande colonne. Ce comportement peut être lié au type de fines qui joue un rôle essentiel dans le processus de détachement et de transport, mais aussi à la taille des particules grossières. Le phénomène d'aspiration qui survient dans la grande colonne en configuration d'hétérogénéité avale peut favoriser le transport des particules vers l'exutoire. Le **Tableau 4.2** récapitule pour chacun des essais les conditions expérimentales avec les principaux résultats obtenus.

Tableau 4.2 Récapitulatif des résultats des essais sur les colonnes de suffusion à deux échelles

	Petite colonne	Grande Colonne
Taille échantillon	d=4,5 cm; h= 12 cm	d=30 cm, h=45 cm
Granulométrie	0-0,8 mm	0,2 - 16 mm
Fines érodables	Kaolinite, Illite, Limon	Sable
Granulométrie Fines	0 - 0,1 mm	0,2 - 1 mm
Gradient appliqué	Constant	Par palier
Susceptibilité à l'érosion	A < R < C (faible hétérogénéité)	R < A < C
	R < C < A (forte hétérogénéité)	
Conductivité hydraulique	Décroissante	Décroissante
Pressions locales	Pressions positives (toutes les configurations)	Configuration centrale: Surpression Configuration Aval: Aspiration

Dans le chapitre suivant, un modèle de sol, les billes de verre sera utilisé pour étudier l'effet des hétérogénéités sur la suffusion de la microstructure par analyse d'images en utilisant le tomographe à rayons X.

Chapter 5 : Etude de la suffusion à l'échelle du pore

5.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude faisant interface entre la petite et la grande colonne (chap. 2) et destinée à valider le modèle numérique (chap. 6). Le but est d'étudier le processus de suffusion à l'échelle du pore en présence des hétérogénéités induites par couches. Elle est menée en utilisant notamment l'analyse d'images obtenues par la tomographie à rayons X. C'est actuellement l'une des techniques d'imagerie non destructives les plus connues qui permet de visualiser la microstructure dans les milieux poreux (**Dong et Blunt 2009; Blunt et al. 2013**). Elle est basée sur l'étude de la variation des densités locales dans la structure granulaire, qui induit des atténuations de l'énergie du faisceau de rayons X traversant l'échantillon. Par conséquent, elle permet de bien déterminer les caractéristiques porales du sol avant et après l'essai, donnant accès à la modification de la structure après suffusion en présence des hétérogénéités par couches.

Les premiers travaux de tomographie en géomécanique expérimentale ont été effectués dans le cadre de l'étude des contraintes de cisaillement dans le milieu granulaire avec une résolution de l'ordre de 1 mm. Cette précision a évolué pour atteindre des valeurs de l'ordre de quelques microns (**Hasan et Alshibli 2010**). Pour l'application de cette technique en haute résolution dans le domaine de l'érosion interne, plusieurs études récentes ont été réalisées dans le cadre afin d'étudier de l'effet de l'érosion sur la microstructure (**Fonseca et al. 2014; Mehdizadeh et Disfani 2018; Nguyen et al. 2019**).

Ce chapitre est donc dédié à l'étude de la suffusion sur un échantillon constitué de billes de verre présentant des configurations d'hétérogénéités similaires à celles testées dans le chapitre 2 (Hétérogénéité centrale, Hétérogénéité aval), pour les comparer avec un essai de référence. Les billes de verre sont choisies à la place d'un sol naturel afin de bien visualiser la modification de la microstructure en utilisant le tomographe à rayons X installé dans le laboratoire LOMC. En plus, les billes de verre possèdent un diamètre précis donné par le fournisseur, ce qui permet de reconstituer un échantillon avec une granulométrie maîtrisée. La forme sphérique des billes les rend plus susceptibles à la suffusion qu'un sol naturel. L'analyse est faite selon deux échelles : à l'échelle de l'échantillon en se basant sur l'évolution de la masse érodée cumulée et sur l'évolution de la perméabilité, et à l'échelle des particules par analyse d'images en utilisant un logiciel open source spécifique (ImageJ).

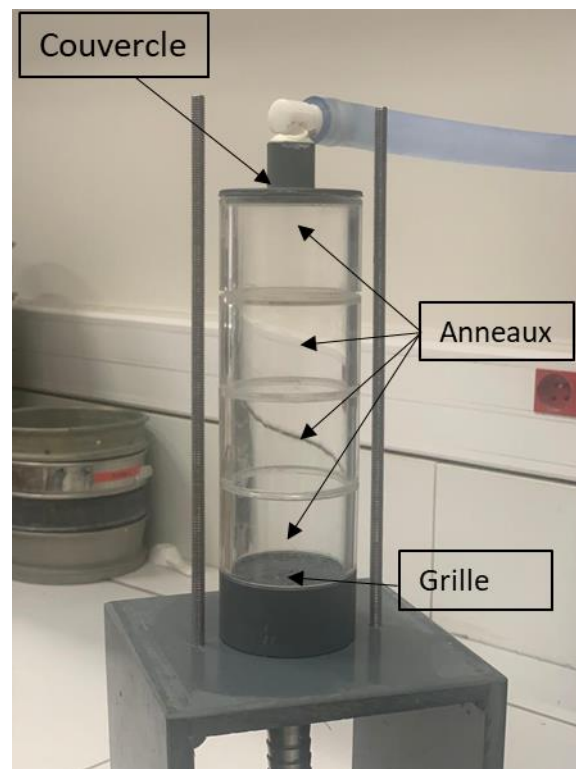
5.2 Essai de suffusion sur un milieu granulaire modèle

5.2.1 Matériaux et méthodes

5.2.1.1 Dispositif Expérimental

Les essais de suffusion sont réalisés dans une colonne en plexiglass de diamètre 50 mm, composée de 4 anneaux identiques de hauteur $h = 40$ mm (**Figure 5.1**). Les anneaux sont amovibles de façon à pouvoir extraire séparément les différentes couches après l'essai. L'échantillon est reconstitué dans 3 anneaux correspondant chacun à l'une des couches des

configurations d'hétérogénéité (amont, centrale, et avale). Le quatrième anneau (en entrée) contient des billes de verre de même diamètre (8 mm) afin d'assurer la diffusion uniforme du flux entrant. Ces anneaux sont montés sur une base équipée d'une grille d'ouverture 1 mm. Cette condition à la limite (sortie) implique que les particules susceptibles au détachement et au déplacement sont celles qui ont un diamètre plus petit que 1 mm. Ce choix est expliqué dans la partie suivante à partir des courbes granulométrique et des constrictions des matériaux testés. Cette colonne est installée sur un support équipé de deux tiges filetées avec un couvercle serré à l'aide d'écrous-papillons contre les anneaux.



(a)



(b)

Figure 5.1 (a) Colonne de suffusion (b) les différents composants de la colonne

La colonne est construite par superposition de ces anneaux. Elle est ensuite connectée à un réservoir qui permet d'appliquer un écoulement descendant sous un gradient hydraulique par palier (**Figure 5.2**). A la sortie, un système de récupération de particules est installé afin de déterminer la masse érodée cumulée à la fin de chaque palier hydraulique appliqué.

Une lame métallique mince est utilisée pour séparer le contenu de chaque anneau en fin d'essai. Cette séparation en plusieurs anneaux permet d'assurer une bonne mise en place de l'échantillon par couches afin de réduire la hauteur de chute (anneaux assemblés progressivement) et de déterminer la granulométrie post suffusion dans chaque couche. Ce dispositif est conçu afin d'évaluer la susceptibilité de l'échantillon de sol à la suffusion à l'échelle macro par la mesure de la masse érodée cumulée, la granulométrie post-suffusion, et l'évolution de la conductivité hydraulique globale dérivée des mesures périodiques du gradient hydraulique et du débit dans chaque palier.

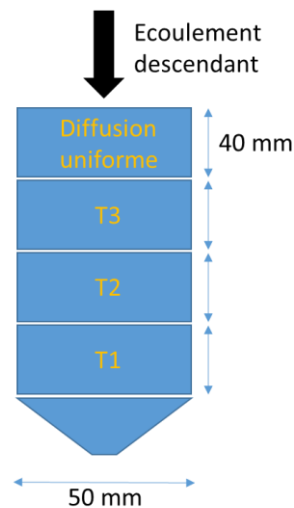


Figure 5.2 Schéma de la colonne de suffusion

5.2.1.2 Matériaux

Les essais sont effectués sur des billes de verre fournies par l'entreprise Sigmund-Lindner qui sont adaptées à des essais d'écoulement grâce à leurs caractéristiques. En effet, ces billes sont de forme sphérique, avec une surface homogène et lisse. Elles présentent également une résistance élevée à l'abrasion ainsi qu'une stabilité mécanique (indéformables) et chimique (non réactives). Le poids volumique solide de ces particules est égal à 2500 kg/m^3 , avec un diamètre précis donné par le fournisseur. L'échantillon est reconstitué avec des particules de diamètre : $0,5 - 0,75 - 1,5 - 2 - 3 - 3,9 - 4,7 \text{ mm}$ (**Figure 5.3**).



Figure 5.3. Différentes billes de verre

L'objectif est toujours d'étudier l'effet des hétérogénéités (centrale et avale) sur la suffusion. Trois configurations sont testées : référence (R), hétérogénéité centrale (C), et hétérogénéité avale (A). Le principe de reproduction des hétérogénéités est similaire à celui présenté pour les

essais avec la grande colonne (chapitre 2). La distribution granulométrique globale des échantillons s'étale entre 0,5 mm et 4,7 mm. Tous les essais sont réalisés avec une porosité cible égale à 0,3 et avec la même densité. La granulométrie originale est utilisée pour reconstituer la configuration de référence.

La granulométrie de l'échantillon de référence (**Figure 5.4**) est reconstituée à partir de 8 classes granulométriques de façon à obtenir une granulométrie stable selon les critères de stabilité. Les caractéristiques granulométriques des différentes couches sont présentées dans le **Tableau 5.1**. La reproduction des hétérogénéités aboutit à la création des instabilités internes locales selon le critère de **Burenkova (1993) (Tableau 5.2)**. La granulométrie de référence est linéaire et continue, et elle s'étale jusqu'à un diamètre 4,7 mm. Les sols fin et grossier sont reconstitués à partir du sol de référence. La configuration de référence est constituée d'un sol de référence sur toute la hauteur de l'échantillon. La configuration d'hétérogénéité avale est décrite par la présence d'une couche grossière (T1) en aval surmontée par deux couches fines (T2 et T3). La configuration centrale est définie par la présence d'une couche grossière (T2) située entre deux couches fines (T1 et T3). Il est nécessaire de noter que le pourcentage massique global est conservé dans toutes les configurations.

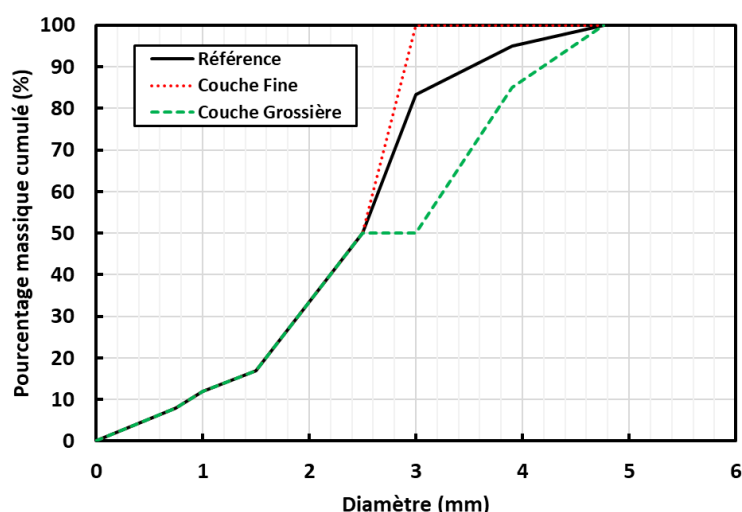


Figure 5.4 Courbe granulométrique des couches reproduites

Les configurations d'hétérogénéité sont reproduites par échange des particules entre les différentes couches de l'échantillon de référence, c'est-à-dire qu'on garde les mêmes fractions (avec la même masse) granulaires que l'échantillon de référence mais on modifie les granulométries locales (des couches T1, T2, T3) par échange de particules entre couches comme détaillé ci-après :

- La partie grossière est dépourvue de la fraction 3 mm et enrichie par la fraction grossière (3,9 - 4,7mm) du sol de référence pour compenser la masse de la fraction (3mm) perdue.
- La partie fine est obtenue par substitution de la fraction grossière (3,9 - 4,7 mm) enlevée du sol de référence par une fraction (3 mm) équivalente en masse de façon à conserver la même densité. Cette partie fine est donc dépourvue de la fraction grossière (3,9 - 4,7 mm). Par

conséquent, la granulométrie de la couche fine est plus serrée avec un diamètre maximal de 3 mm.

Cette méthode permet de créer des instabilités locales, en partant d'un échantillon de référence stable. Le transfert des particules est choisi de façon à obtenir une discontinuité granulaire dans le sol grossier sur la fraction 3mm, qui le rend plus susceptible à la suffusion.

Le sol constituant la couche fine devient plus stable par rapport au sol de référence, alors que le sol de la couche grossière présente une discontinuité granulaire à 3 mm.

Tableau 5.1 Caractéristiques des couches reproduites dans cette étude

	Reference (R)	Couche fine (F)	Couche grossière (G)
D10	0.88	0.88	0.88
D15	1.30	1.30	1.30
D30	1.89	1.89	1.89
D50	2.50	2.50	2.50
D60	2.65	2.60	3.69
D85	3.13	2.85	3.90
D90	3.51	2.90	4.19
Cu=D60/D10	3.01	2.95	4.19

Tableau 5.2 Evaluation de la susceptibilité du sol selon les critères de la littérature

Critères	Reference (R)	Couche fine (F)	Couche grossière (G)
Istomina (1959)	S	S	S
Kenney et lau (1985)	S	S	S
Burenkova (1993)	S	U	U
Wan et Fell (2008)	S	S	S

La courbe de distribution des constriction (CSD) a été déterminée sur MATLAB à partir de la courbe granulométrique et de la densité relative ($D_r = 0.45$) des sols testés (**Figure 5.5**) en se basant les modèles de Locke et al. (2001) et Indraratna et al (2007). Les résultats montrent que presque 90% des constriction ont une dimension inférieure à 1 mm, ce qui justifie le choix de ce diamètre pour l'ouverture de la grille en aval de la colonne. En plus, l'introduction des particules grossières aboutit à la formation de constriction plus grandes dans le cas de la couche grossière qui présente un diamètre maximal de constriction approximativement égale à 1,4 mm. Les petites constriction sont moins affectées par l'introduction des particules grossières.

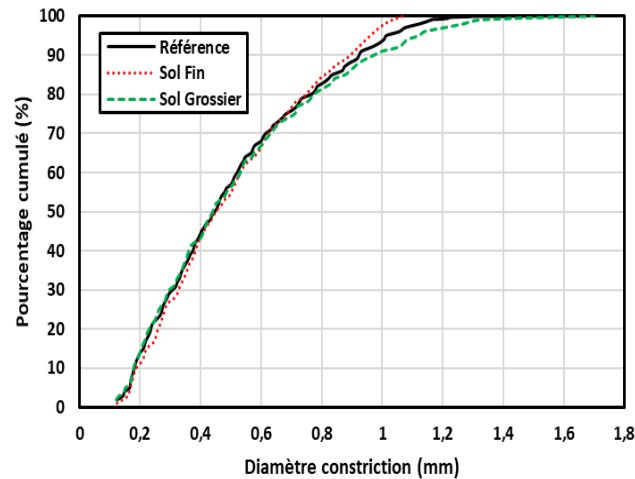


Figure 5.5 Courbe de constrictions des configurations de sol testés

5.2.1.3 Préparation de l'échantillon

L'échantillon est préparé selon les étapes suivantes :

- Calcul de la masse des matériaux constituant chaque couche à partir du volume de l'anneau correspondant, de la densité, et de la porosité cible fixée à 0,3.
- Division de chaque couche en 4 sous couches de 1 cm, afin d'assurer la mise en place d'une façon plus homogène. L'échantillon est alors mis en place en 12 sous couches (**Figure 5.6**).
- Humidification des particules (teneur en eau 6%) avant de les mettre dans la colonne, afin de diminuer le risque de ségrégation locale.

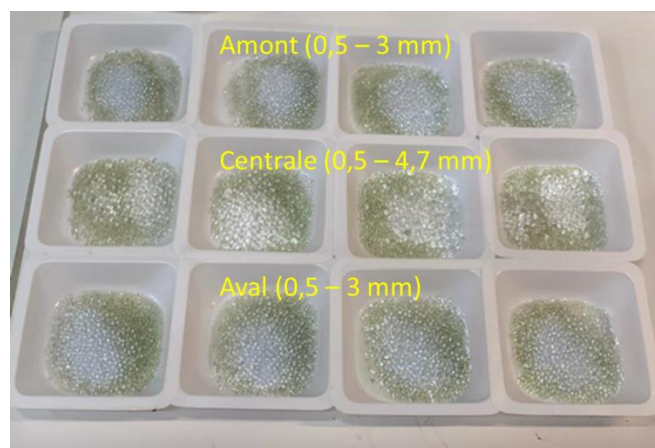


Figure 5.6 Matériaux constituant chaque sous couche pour la configuration d'hétérogénéité centrale

Après la préparation des mélanges, le premier anneau est installé sur la base de la cellule. On le remplit avec l'eau avant la mise en place des billes (**Figure 5.7**). Le dépôt des billes dans chaque anneau est effectué simultanément en sous couches de 1 cm. Cette opération est répétée 4 fois pour chaque anneau. Une fois un anneau rempli, on empile un nouvel anneau au-dessus et on répète la procédure pour chaque anneau. Les billes de verre sont plus susceptibles de ségréger que le sol naturel. La conception en anneaux en présence de l'eau permet de diminuer l'effet de ségrégation et d'obtenir une meilleure homogénéité de l'échantillon à l'état initial. La procédure de préparation est similaire dans toutes les configurations.



Figure 5.7 Remplissage de la colonne

Le quatrième anneau, contenant des billes de verre de 8 mm, est disposé en amont de la colonne afin de diffuser l'écoulement à l'entrée de la colonne. On effectue la saturation de l'échantillon par un faible débit d'écoulement ascendant ($i=0,05$) afin d'éliminer l'air tout en évitant le mouvement des fines. Cette phase est importante avant le lancement de l'essai. L'échantillon est déposé dans le tomographe afin de procéder au scan avant l'essai de suffusion (détails section suivante).

5.2.1.4 Essai de suffusion

L'essai de suffusion consiste à appliquer un écoulement descendant avec gradient hydraulique contrôlé appliqué par paliers (**Figure 5.8**). Le gradient initial appliqué est égale 1, il est incrémenté par paliers de 0,5 jusqu'à atteindre 3,5 à la fin de l'essai. La durée du palier a été prédéterminée selon la littérature, où il a été montré que cette durée (30 min) est suffisante pour l'évacuation des fines (**Chang et Zhang 2011**). Il est important de noter que **Nguyen (2018)** a montré que pour chaque palier de gradient, l'évacuation de la plupart des fines érodées à l'exutoire se fait au début du palier quel que soit le gradient.

Afin de bien suivre l'évolution de la suffusion à l'échelle de l'échantillon, plusieurs mesures sont effectuées au cours de l'essai :

- Mesure du débit périodiquement au début, au milieu, et à la fin de chaque palier. La conductivité hydraulique est ensuite calculée à partir du débit et du gradient appliqué. Elle nous donne une indication sur le processus de filtration dans chacune des configurations testées.
- Récupération des particules fines érodées à la fin de chaque palier afin de suivre la cinétique d'érosion en déterminant la masse érodée cumulée.

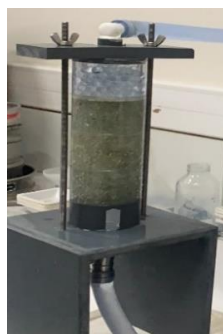


Figure 5.8 Colonne de Suffusion après mise en place de l'échantillon

A la fin de l'essai, le couvercle de la colonne est retiré minutieusement, puis on laisse sécher l'échantillon avant de faire un scan post-suffusion en tomographie X. Une fois le scan terminé, on retire à l'aide de la lame métallique fine les 3 anneaux constituant les différentes parties de l'échantillon (amont, centrale, et aval). Le contenu de chaque anneau (tranche) est récupéré, puis tamisé pour déterminer sa nouvelle courbe granulométrique. L'analyse et la comparaison des granulométries pré/post suffusion permet de bien comprendre les processus de transfert et d'échange des particules entre les couches.

5.2.2 Résultats et discussions

Dans cette partie, on présente les résultats des essais d'érosion pour toutes les configurations testées à l'échelle de l'échantillon en termes de masse érodée cumulée, de conductivité hydraulique globale et de variation granulométrique dans les différentes couches.

5.2.2.1 Masse érodée cumulée

La masse érodée est déterminée après récupération, collecte et séchage des particules érodées à la fin de chaque palier hydraulique appliqué. C'est un paramètre fondamental pour évaluer la susceptibilité à la suffusion des échantillons testés. Les fines érodables sont les particules de diamètre inférieur à 1 mm. Ce diamètre a été choisi en se basant sur la courbe de distribution des constrictions (CSD). Toutes les configurations sont testées en utilisant la même masse en fines (50 g) dans l'échantillon. La **Figure 5.9** présente la masse érodée cumulée de chacune des configurations testée en fonction du gradient hydraulique global appliqué. Chaque palier de gradient dure 30 minutes avant qu'il ne soit incrémenté de 0,5.

Les résultats montrent que la configuration de référence est la plus résistante à l'érosion avec la plus faible masse érodée cumulée (2,2 g), contrairement à la configuration d'hétérogénéité aval qui donne la plus forte susceptibilité avec une masse érodée cumulée (2,9 g). Ces observations sont liées à la distribution granulométrique dans l'échantillon. Pour expliquer ces résultats, on peut dire que la présence des particules grossières dans les configurations hétérogènes correspond à l'apparition de constrictions de taille plus grande que celles dans la configuration de référence, et par conséquent il y a un déplacement plus facile des particules fines. Cet effet est plus prononcé dans la configuration d'hétérogénéité aval où la couche grossière est située en aval de l'écoulement (exutoire).

On constate aussi que la plupart des fines sont érodées au début de l'essai, même si le gradient hydraulique est plus faible. Donc, la cinétique d'érosion est plus forte au début puis elle diminue avec le temps. Cette observation est liée au fait qu'au début de l'essai il y a plus de particules libres qui sont susceptibles de s'éroder avec un faible gradient hydraulique. A chaque augmentation du gradient par palier, on accède alors à une nouvelle population de particules érodables puisque les contraintes hydrauliques internes sont plus élevées, ce qui augmente la masse érodée mais avec une cinétique plus faible.

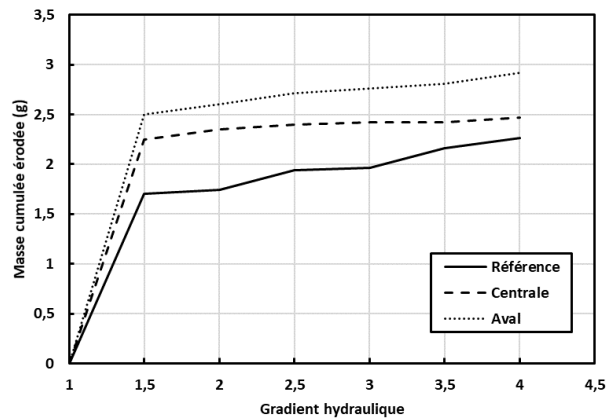


Figure 5.9 Masse érodée cumulée selon les différentes configurations testées

5.2.2.2 Granulométrie Post-suffusion

Après l'essai de suffusion, une modification de la granulométrie locale est provoquée suite au mouvement des fines et au réarrangement des particules formant le squelette granulaire. Nous présentons sur les **Error! Reference source not found.** la granulométrie pré et post suffusion dans les trois tranches de l'échantillon pour chacune des configurations testées. On s'intéresse surtout à la fraction granulaire qui constitue la partie fine dans la courbe granulométrique (≤ 1 mm).

Pour la configuration de référence, les résultats de la **Figure 5.10** montrent que la courbe granulométrique post-suffusion est légèrement au-dessous de celle pré-suffusion. Cette modification granulaire signifie qu'il y a perte de fines dans chaque couche (T1, T2, et T3). La plus grande variation se trouve dans la couche amont (T3). Les couches centrale (T2) et aval (T1) ont tendance à perdre plus de fines qu'à en recevoir des fines des couches sus-jacentes, et la couche amont (T3) en perd sans, bien sûr, en recevoir. Ces variations sont faibles mais elles sont corrélées avec les résultats de la masse cumulée (**Figure 5.9**) qui ont montré que cette configuration (référence) est la moins susceptible à la suffusion.

Pour la configuration centrale (**Figure 5.11**), les résultats montrent que la couche amont (T3) perd des fines, alors que les couches centrale (T2) et avale (T1) en gagnent. Cela indique qu'il y a un grand transport de fines de l'amont (T3) vers les couches situées en aval (T2 et T1). Cette grosse perte en amont (T3) est due à la présence de la couche grossière centrale (T2) qui facilite le transfert de ces particules. Une partie de ces fines est retenue dans la couche centrale grossière (T2) et l'autre passe à la couche avale (T1). Dans ce cas il y a un processus de filtration dans la zone située à l'interface des couches centrale-avale.

Pour la configuration d'hétérogénéité avale (**Figure 5.12**), l'analyse des courbes granulométriques montre une diminution de la teneur en fines dans chacune des couches (T1, T2, et T3). La présence de la couche grossière en aval (T1) favorise le transport des particules vers l'exutoire. La couche avale (T1) reçoit une grande partie des fines des couches en amont (T2 et T3), mais elle perd facilement les particules en raison de ses grandes constriction et de sa présence à l'exutoire de la colonne. Les fines perdues de la couche centrale (T2) sont presque toutes compensées par celles arrivant de l'amont (T3), ce qui explique la faible variation de

granulométrie de la couche centrale. Pour la couche amont (T3), le bilan est une perte des fines. Par conséquent, cette configuration est la plus susceptible à la suffusion.

En conclusion, la configuration de référence présente le changement le plus faible dans la granulométrie. Le processus de filtration est plus prononcé dans la configuration centrale, et la configuration avale est la plus susceptible à la suffusion. Cette analyse est complétée par l'étude par tomographie à l'échelle de la microstructure.

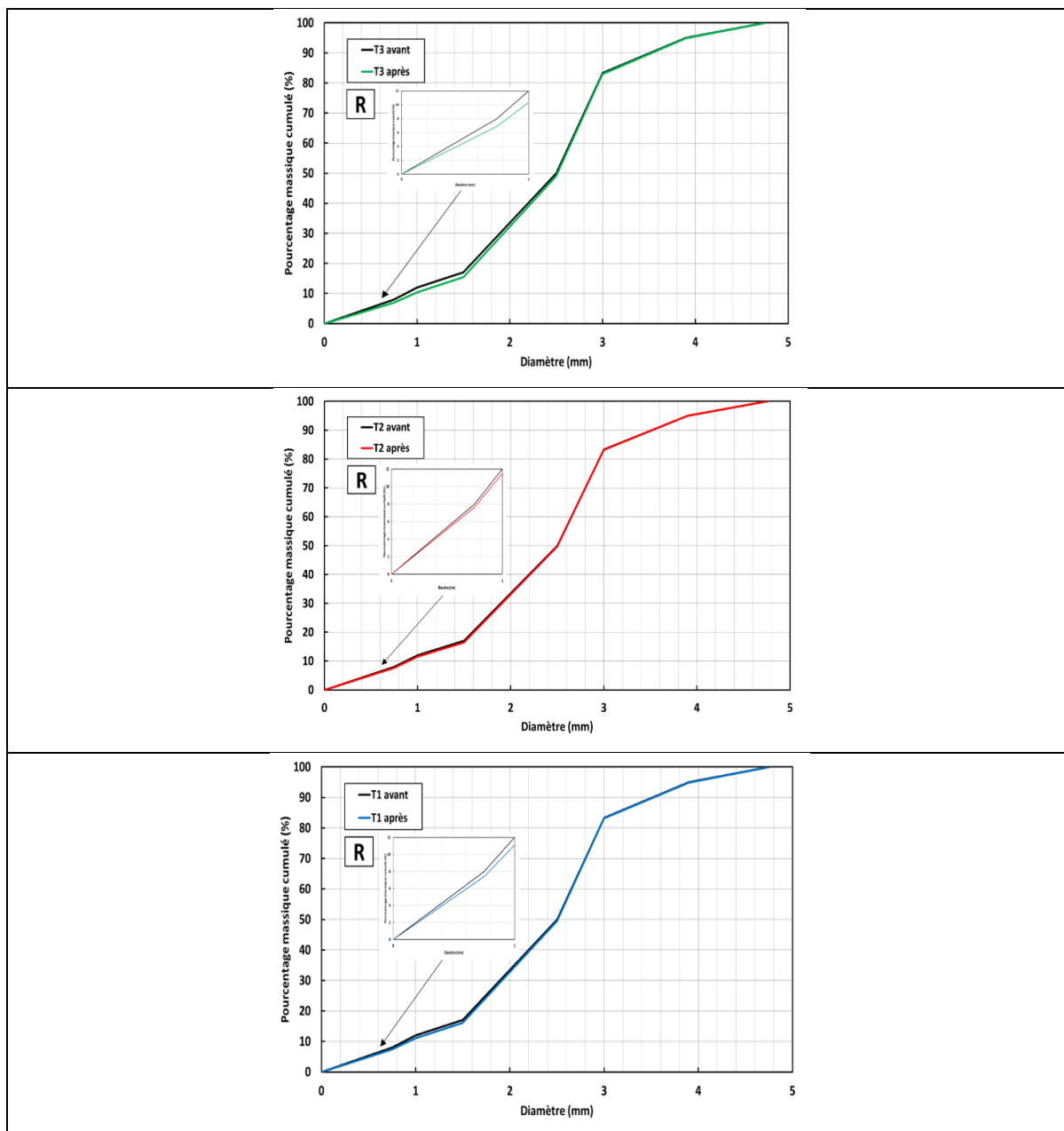


Figure 5.10 Courbes granulométriques pré/post suffusion dans la configuration de Référence (R)

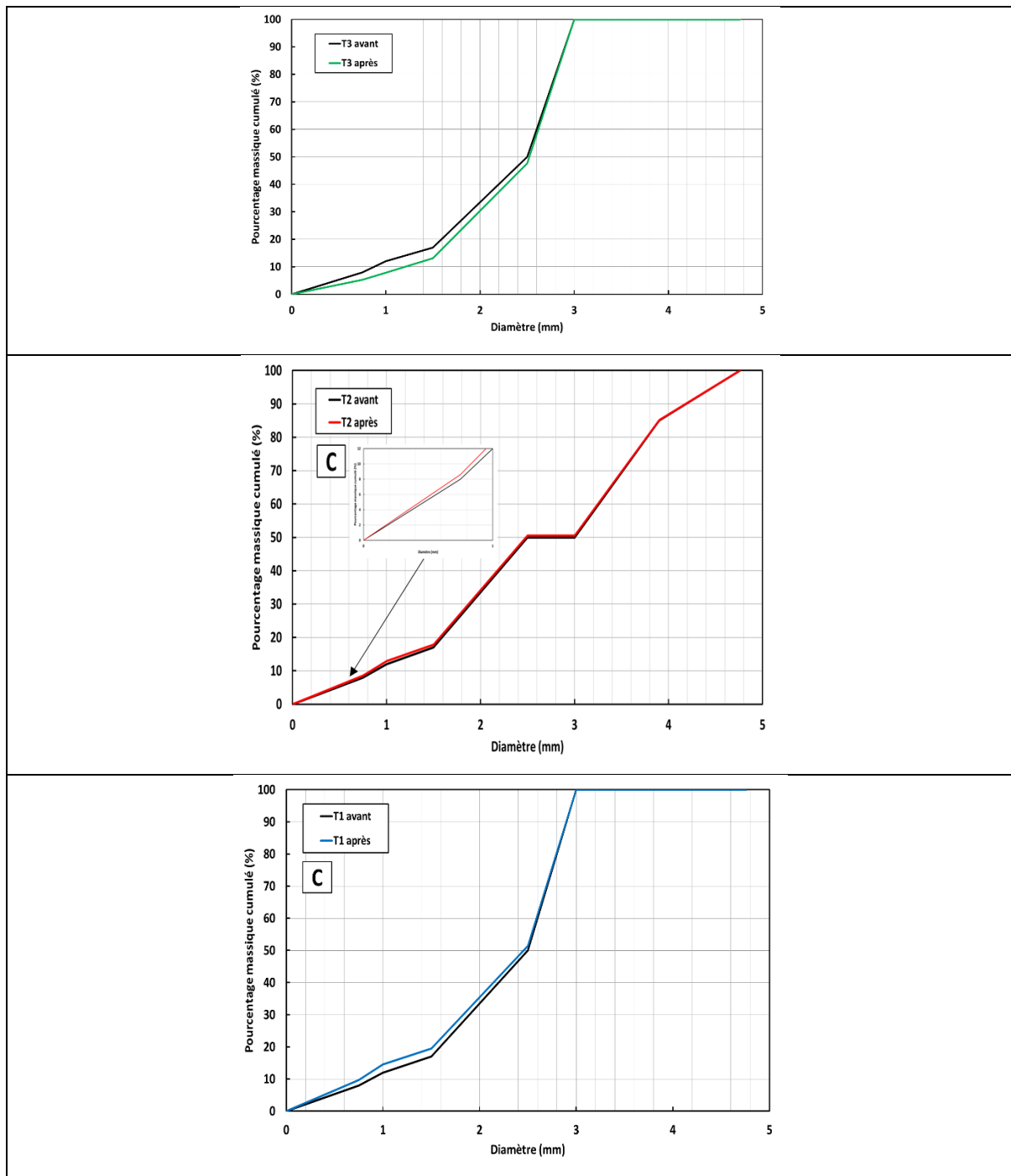


Figure 5.11 Courbes granulométriques pré/post suffusion dans la configuration d'hétérogénéité centrale (c)

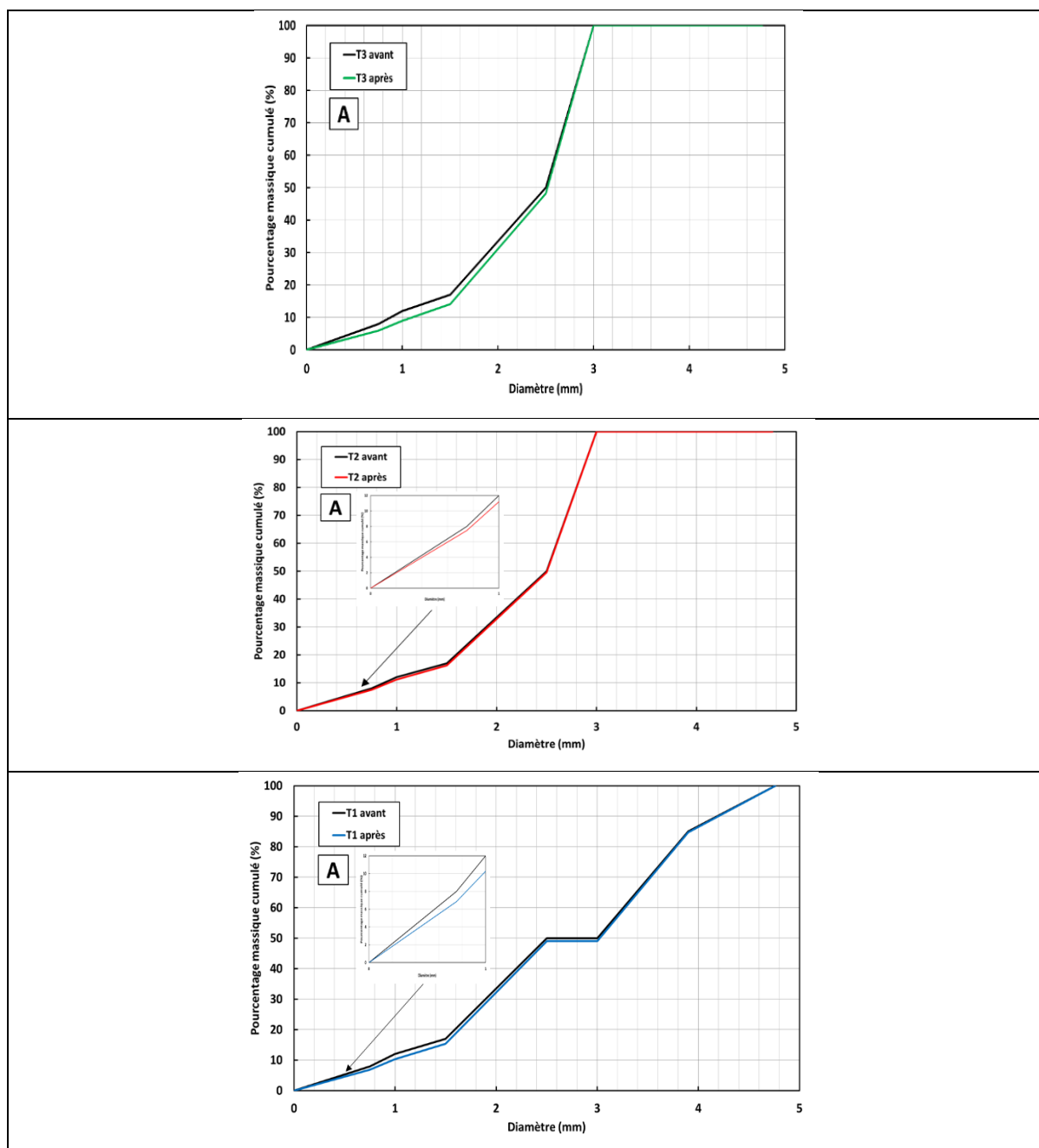


Figure 5.12 Courbes granulométriques pré/post suffusion dans la configuration d'hétérogénéité aval (A)

5.2.2.3 Conductivité hydraulique relative

La conductivité hydraulique relative (K/K_0) est définie comme le rapport de la conductivité hydraulique à un temps donné (K) sur la conductivité hydraulique initiale (K_0). L'évolution de la conductivité hydraulique constitue un indicateur permettant de mieux comprendre le processus de suffusion. La **Figure 5.13** présente l'évolution de la conductivité hydraulique relative dans chacune des configurations testées. Les résultats montrent une diminution de la conductivité hydraulique relative, même en augmentant le gradient global appliqué pendant l'essai. Cette diminution est systématiquement accompagnée d'une diminution du taux d'érosion qui correspond à la pente de la courbe de la masse érodée cumulée (**Figure 5.9**), ce qui signifie qu'une partie des particules détachées peut être retenue dans le sol. Ainsi, le

processus prédominant dans cette phase semble être le détachement et le transport de particules solides accompagnés d'un processus de filtration. Ensuite, la conductivité hydraulique relative tend à se stabiliser à partir d'un gradient égal à 3, ce qui peut s'expliquer par la présence éventuelle d'écoulements préférentiels créés par le processus d'érosion et conduisant à un état d'équilibre. Globalement, la conductivité hydraulique relative atteinte est presque égale au quart (réduction de 75%) de la conductivité hydraulique relative initiale à la fin de tous les essais.

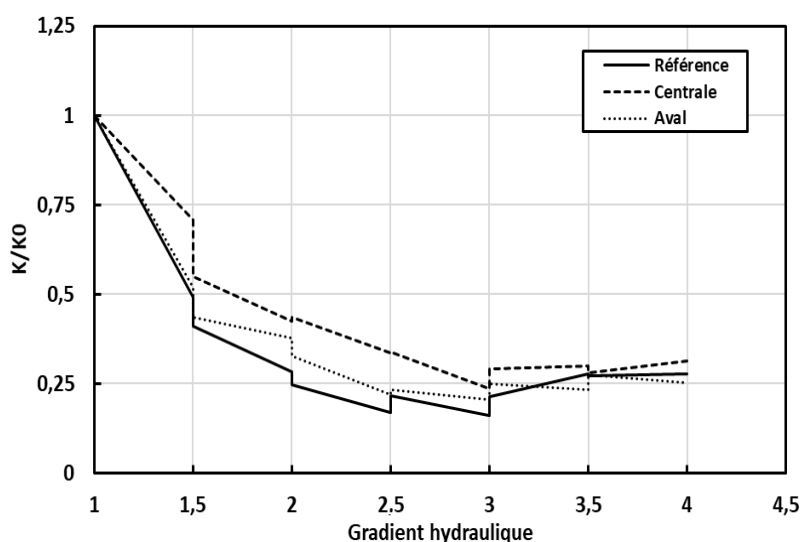


Figure 5.13 Evolution de la conductivité hydraulique en fonction du gradient appliqué

Donc, le phénomène complexe d'érosion par suffusion est décrit comme la combinaison de trois processus : détachement, transport et éventuellement filtration de la fraction fine. Cette combinaison conduit à un changement dans la granulométrie du sol et de la conductivité hydraulique. Le développement de ces processus couplés dépend de la configuration d'hétérogénéité, de la distribution granulométrique et de la densité, ainsi que de l'évolution de la charge hydraulique.

5.3 Etude à l'échelle micro par tomographie X

Comme on l'a déjà mentionné (section 2.2), les résultats en termes de masse érodée cumulée et de conductivité hydraulique ne montrent qu'une observation à l'échelle de l'échantillon au même titre que notre étude présentée au chapitre 2. Afin d'obtenir une information sur le processus d'érosion à l'échelle des particules, nous avons procédé à quantifier précisément, à l'aide d'un dispositif de tomographie à rayons X, la modification de la microstructure d'un sol érodé par suffusion. Les scans pré/post suffusion sont effectués pour chacune des configurations testées (Référence, hétérogénéité Centrale, hétérogénéité Aval). Ces images obtenues sont traitées en utilisant le logiciel commercial (imageJ), pour procéder aux analyses quantitatives et qualitatives de l'effet de la suffusion sur la microstructure.

5.3.1 Tomographe à rayons X

L'étude de la suffusion par tomographie consiste à réaliser un scan avant suffusion et un autre après suffusion. La comparaison entre les images obtenues permet de bien comprendre l'effet de la suffusion sur la modification de la microstructure en présence des hétérogénéités.

Pour ce but, une étude de la microstructure des échantillons pré et post suffusion est menée à l'aide d'un tomographe à rayons X tridimensionnel. Il s'agit d'une technique non destructive qui fournit des informations précieuses sur la structure interne des matériaux dont la taille est de l'ordre de quelques microns qui ne peut être observée à l'œil nu.

Ces scans sont réalisés à l'aide d'un scanner EasyTom 150 (RX Solutions, France) au laboratoire LOMC (**Figure 5.14**). Le générateur est un tube à rayons X en tungstène de 150 kV. Dans cette étude, les échantillons sont analysés avec une tension d'alimentation de 138 kV et une intensité de 447 μ A. Le système d'acquisition de données a enregistré 1120 projections réparties sur 360° le long de l'axe vertical avec une moyenne de 8,5 images par seconde. La résolution spatiale est de 80 μ m. La reconstruction des projections est réalisée avec un algorithme de rétroprojection implémenté dans le logiciel XAct (RX Solutions). Les projections sont reconstruites pour obtenir des coupes des plans horizontaux et verticaux.

Pour procéder au scan, l'échantillon est séché avant d'être déposé sur le plateau tournant dans la chambre du tomographe entre la source et le récepteur de rayons X. Une partie des rayons X émis par la source est absorbée par l'échantillon, et le reste est capté par le récepteur. Le pourcentage d'absorption dépend de la densité des matériaux. En effet, une densité très forte est traduite par une augmentation du degré d'absorption. On distingue dans notre étude entre deux matériaux : le verre et l'air, de potentiels d'absorption différents. Donc, ces deux constituants sont facilement identifiés par traitement d'images. Les rayons captés par le capteur permettent de donner des images numériques de l'échantillon.

Le scan est réalisé sur un plateau qui tourne de 360 degrés, ce qui permet d'obtenir un scan 3D complet sur tout l'échantillon. La précision du scan est liée à la taille du voxel qui est une unité d'information graphique représentant une valeur sur une grille régulière dans un espace tridimensionnel (1 voxel=1 Pixel³). La résolution étant de l'ordre de 80 microns dans notre étude, c'est la valeur optimale qu'on peut atteindre par le tomographe de façon à couvrir tout le volume de l'échantillon par le scan. La taille de la plus petite constriction est de l'ordre de 100 microns (**Figure 5.5**). Donc, cette résolution est suffisante pour bien visualiser la modification de la microstructure induite par le mouvement des particules. Cette phase comprend l'imagerie 2D par obtention des images (coupes transversale et longitudinale), la collecte de données, la reconstruction d'images, ainsi que l'analyse et l'interprétation des images.

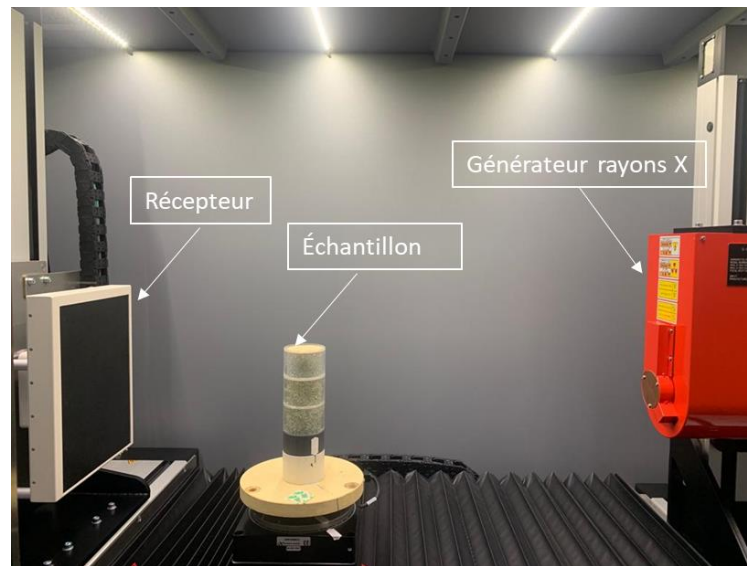


Figure 5.14 Installation de la colonne de suffusion dans la chambre de tomographie

5.3.2 Traitement d'images

Le traitement des images est réalisé à l'aide du logiciel ImageJ. Les images 2D reconstituées sont des images de 16 bits, qui correspondent donc à 65535 niveaux de gris. Elles représentent les coupes horizontales de l'échantillon cylindrique de sol de diamètre 50 mm et de hauteur 120 mm. Toutes les particules sont des billes en verre. Cela signifie qu'il y a le même potentiel d'absorption des rayons X par ces particules. Par conséquent, c'est difficile de trouver un seuil de niveau de gris pour distinguer entre les fines et les grossières.

Parfois, la luminosité d'une image n'est pas suffisante pour la visualiser en détail. Par conséquent, la qualité des images est améliorée manuellement en ajustant la luminosité et le contraste pour réduire le bruit. La zone située à l'extérieur du contour de la colonne est supprimée afin de permettre la visualisation de l'échantillon ainsi que la distribution des particules.

Le seuillage consiste à transformer une image brute de plusieurs niveaux de gris en une autre de deux niveaux (noir et blanc). Comme on l'a déjà mentionné, toutes les particules sont en verre, donc, il est possible de trouver un seuil entre les particules et le vide. Lorsque le seuil d'intensité est connu pour le matériau, les phases de vide et de particules peuvent être distinguées. Ainsi, une image binaire est générée. Plusieurs méthodes de seuillage disponibles dans le logiciel imageJ ont été testées sur toutes les images afin d'identifier une valeur de seuil globale représentative. La plupart de ces méthodes ont été vérifiées en comparant visuellement toutes les images traitées. Par conséquent, la méthode de seuillage manuelle par défaut semble la plus adaptée. Elle a donné les résultats les plus conservateurs par rapport à l'image brute. Une fois que ces images binaires sont générées, la visualisation et l'analyse quantitative qui mènent à l'extraction du réseau de pores suivent une procédure d'analyse d'image. Ce seuillage est ensuite appliqué à toutes les sections transversales afin de déterminer la fraction vide dans chaque coupe sur toute la hauteur de l'échantillon. La **Figure 5.15** montre la différence entre deux images : a) la brute et b) la binaire sur la même section transversale d'un échantillon érodé.

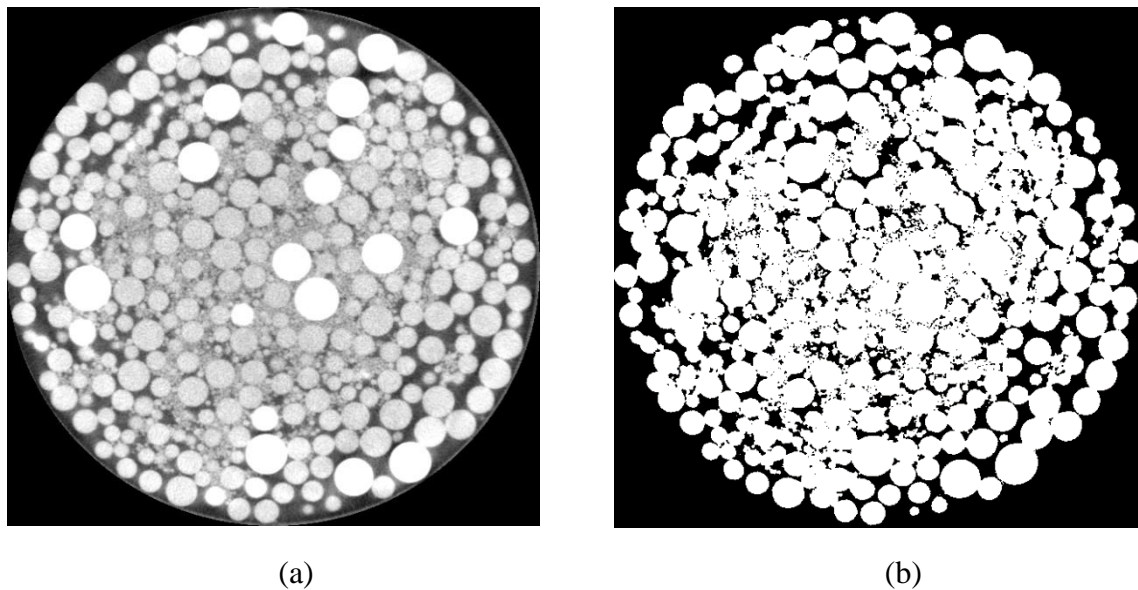


Figure 5.15 Transformation d'une image brute (a) en image binaire (b)

Trois configurations ont été testées dans la colonne de suffusion. Pour rappel, ces configurations sont celles de référence (R), d'hétérogénéité centrale (C), et d'hétérogénéité avale (A). Pour chaque essai, on procède à deux scans (pré et post suffusion). Par conséquent, on obtient un nombre important d'images pour chaque scan et qui sont utilisées pour la détermination du profil de porosité locale.

5.3.3 Profil vertical de la porosité

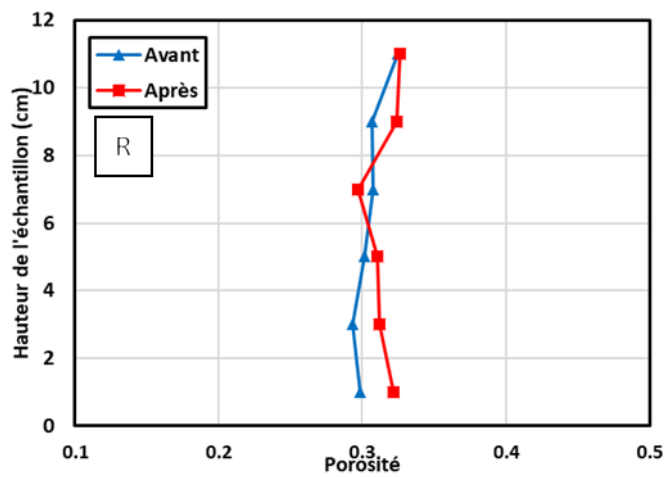
Une analyse fine de chaque coupe transversale permet de calculer la porosité à chaque position, puis de déterminer le profil de porosité vertical. La porosité dans chaque coupe est obtenu par calcul de la surface du vide par rapport à la surface totale en utilisant les outils d'analyse sur imageJ. Cette analyse est effectuée sur une image binaire après seuillage (**Figure 5.15**). Ces profils sont obtenus en effectuant une moyenne sur 6 volumes élémentaires de hauteur de 2 cm chacun, C'est-à-dire le profil couvrant toute la hauteur de l'échantillon (12 cm) est tracé à partir de 6 valeurs de porosité. Chaque valeur de porosité est déterminée par calcul de la porosité moyenne de 250 coupes. La porosité initiale à la mise en place de l'échantillon a été fixée à 0.3. La **Figure 5.16** montre les profils expérimentaux verticaux de porosité avant et après l'essai de suffusion. Les zones entre 0-4 cm, 4-8 cm, 8-12 cm correspondent aux couches avale (T1), centrale (T2), et amont (T3), respectivement. Globalement, on peut clairement distinguer que le profil de porosité avant essai, pour chaque configuration testée, n'est pas uniforme sur toute la hauteur de l'échantillon, notamment pour les configurations d'hétérogénéités, bien qu'il soit confirmé que la porosité globale (0.3) de l'échantillon reste inchangée. Cela est dû au réarrangement des particules et le mouvement des fines suite à la mise en place. Il est nécessaire de mentionner que la mise en place des billes de verre est réalisée avec une faible hauteur de chute, par voie humide pour diminuer la ségrégation locale, et en plusieurs couches. Même avec ces précautions appliquées, il y a apparition d'hétérogénéités locales. Ainsi, durant la saturation, quelques particules fines contenues dans les pores peuvent mouvoir sur une certaine distance. L'homogénéité est plus difficile à contrôler avec les billes de verre que dans les sols naturels. La différence entre la porosité fixée et celle mesurée par tomographie est plus

prononcée dans le cas des configurations d'hétérogénéités centrale (C) ou aval (A). En effet, la présence des particules plus grossières aboutit à un déplacement des particules fines avant le lancement de l'essai de suffusion ce qui peut créer des hétérogénéités dues à la ségrégation locale. Dans le paragraphe suivant, on procède à l'analyse des profils de porosité pour chacune des configurations.

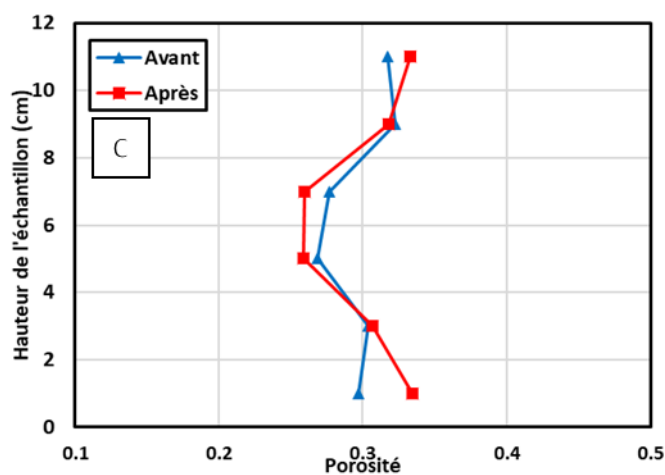
Pour la configuration de référence (R), l'analyse d'images montre que le profil vertical de porosité avant essai fluctue autour de la valeur théorique de 0,3, ce qui indique que la méthode de mise en place des matériaux a permis d'obtenir un échantillon quasi homogène. En comparant les deux profils avant et après essai, une faible différence correspondante à une légère augmentation de la porosité est observée dans la partie supérieure, sauf que dans la zone située entre 6 cm et 8 cm il y a une diminution attribuée à l'arrivée des particules de la couche amont et leur rétention dans cette partie. L'augmentation de la porosité devient plus forte en s'approchant de la couche en aval. Ces variations sont expliquées au fait que la couche amont perd des particules sans en recevoir et que la couche aval a plus tendance à perdre des particules fines qu'à en recevoir de la couche sus-jacente en raison de sa localisation proche de la sortie. La variation de porosité au centre est la plus faible, ceci est expliqué au fait que les particules perdues de cette couche sont peut être compensées par celles qui arrivent de la couche amont.

Pour la configuration centrale (C), il y a une augmentation de la porosité dans les parties amont (T3) et avale (T1), et une diminution dans la couche centrale (T2) de l'échantillon par rapport à la porosité initiale. Cette évolution est expliquée par le déplacement des particules de la couche amont (T3) plus fine et leur rétention dans la couche centrale grossière (T2). Ces particules sont retenues dans cette couche en raison de sa granulométrie grossière qui reçoit les fines et de la présence d'une couche fine en aval (T1) qui ne permet pas facilement d'apporter ces fines. Par contre, la couche avale (T1) présente une faible variation de porosité avec une valeur proche de l'initiale (0.3). On peut dire que le contrôle de la porosité est difficile en présence des hétérogénéités. Après l'essai d'érosion, une augmentation de la porosité dans les deux couches amont (T3) et avale (T1), et une diminution dans la couche centrale ont été mises en évidence. En effet, il y a transport des particules de la couche amont (T3) et sont retenues dans la couche centrale (T2). Cette dernière reçoit plus de particules qu'elle n'en perd en raison de sa granulométrie grossière et la présence d'une couche fine en aval qui joue le rôle de filtre. La zone proche de l'exutoire dans la couche avale présente la plus grande augmentation de la porosité en raison de la forte érosion des fines.

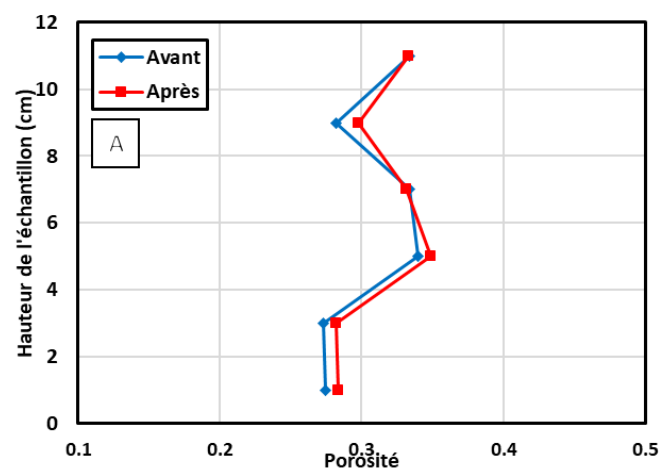
Enfin, la configuration avale (A) montre une augmentation de la porosité au centre (T2) et une diminution en aval (T1) lors de la mise en place des matériaux. Cette observation est liée au mouvement des particules de la couche centrale vers la couche avale grossière qui s'enrichit par des particules fines. La couche centrale (T2) reçoit aussi des particules fines venues de la couche amont (T1) mais elle perd plus de particules qu'elle n'en reçoit. Après application de l'écoulement, il y a augmentation de la porosité dans toutes les parties de l'échantillon, en particulier dans la couche avale (T1) qui présente une granulométrie plus grossière et se trouve de plus à l'exutoire. Donc, le processus de rétention est moins prononcé dans cette configuration et par conséquent les particules sont érodées des différentes couches de l'échantillon.



(a)



(b)



(c)

Figure 5.16 Profil de porosité vertical pour chacune des configurations : Référence (R), Centrale (C), Aval (A)

5.3.4 Microstructure pré/post suffusion

Afin de bien décrire le processus de transport des particules dans les différentes couches, plusieurs coupes transversales à des positions précises sont sélectionnées parmi des centaines d'images. Ces coupes représentent le milieu de chacune des couches : aval (T1), centrale (T2), amont (T3), et sont situées respectivement à 2 cm, 6 cm, 10 cm de la base inférieure de l'échantillon. Les **Figure 5.17**, **Figure 5.18**, **Figure 5.19** présentent ces coupes avant et après suffusion pour chacune des configurations testées. Avant essai, les figures montrent une distribution non uniforme des particules dans les différentes couches. Cette observation est plus claire dans les configurations hétérogènes surtout dans les couches grossières qui sont enrichies en fines. En plus, cette distribution est non homogène dans la même coupe et les particules fines sont plus localisées au centre. En effet, il y a une perte de fines dans les zones proches de la périphérie où la porosité est plus grande. Ceci est due à l'effet de paroi.

Pour la configuration de référence (R) (**Figure 5.17**), la comparaison entre les scans avant et après montre une faible érosion des fines qui se produit plus à la périphérie qu'au centre de l'échantillon. Les fines proches de la paroi latérale sont plus susceptibles à se déplacer à cause de l'effet de bord. Ce faible changement est cohérent avec les résultats de la susceptibilité à la suffusion de cette configuration qui est la plus résistante à la suffusion. Également, il valide la forme du profil vertical qui montre une faible augmentation de la porosité dans la plupart des couches de l'échantillon.

Concernant la configuration centrale, la **Figure 5.18** montre que la couche grossière centrale est presque remplie par des fines avec une teneur plus grande que dans les autres couches, même avant essai. Suite à la suffusion, il y a augmentation de la teneur en fines dans cette couche, contrairement aux couches amont et aval qui présentent une diminution de fines. Cette observation confirme et renforce l'idée d'un processus de filtration dans la couche centrale qui retient les particules fines, ce qui a été vérifié sur le profil vertical indiquant une diminution de la porosité au centre. La couche amont présente une grande perte des fines qui ont été transportées et retenues dans la couche centrale.

Pour terminer par la configuration aval (A) (**Figure 5.19**), la couche grossière en aval présente une grande teneur en fines avant suffusion, alors que la couche centrale montre une faible teneur en fines. Lors de la mise en place, les fines passent de la couche centrale à la couche avale, ce qui se traduit par la grande teneur en fines en aval contrairement à la couche centrale qui est dépourvue de fines surtout sur la périphérie. Après suffusion, une perte notable et hétérogène des fines, avec une évacuation majeure est observée principalement à la périphérie de l'échantillon notamment dans la couche avale grossière. Ceci est expliqué par les effets de bord, la présence des grosses constriction, et la localisation de cette couche à proximité de l'exutoire augmentent sa susceptibilité à l'érosion. Par conséquent, ce processus valide les résultats qui ont montré que cette configuration est la plus susceptible à la suffusion parmi les configurations testées, et que la plus grande perte des fines provient de la couche avale.

A part l'érosion des particules fines, ces résultats montrent que le réarrangement des particules grossières s'est aussi produit à cause de l'érosion interne. L'examen des particules grossières a indiqué que certaines particules grossières se sont déplacées légèrement pendant l'érosion interne pour former une nouvelle structure stable. Ces images confirment l'hypothèse proposée selon laquelle l'érosion des particules fines a conduit à un faible réarrangement des particules

grossières. Ces changements ont affecté la porosité, qui s'est avérée être un facteur important dans l'étude de l'effet des hétérogénéités sur la susceptibilité à la suffusion.

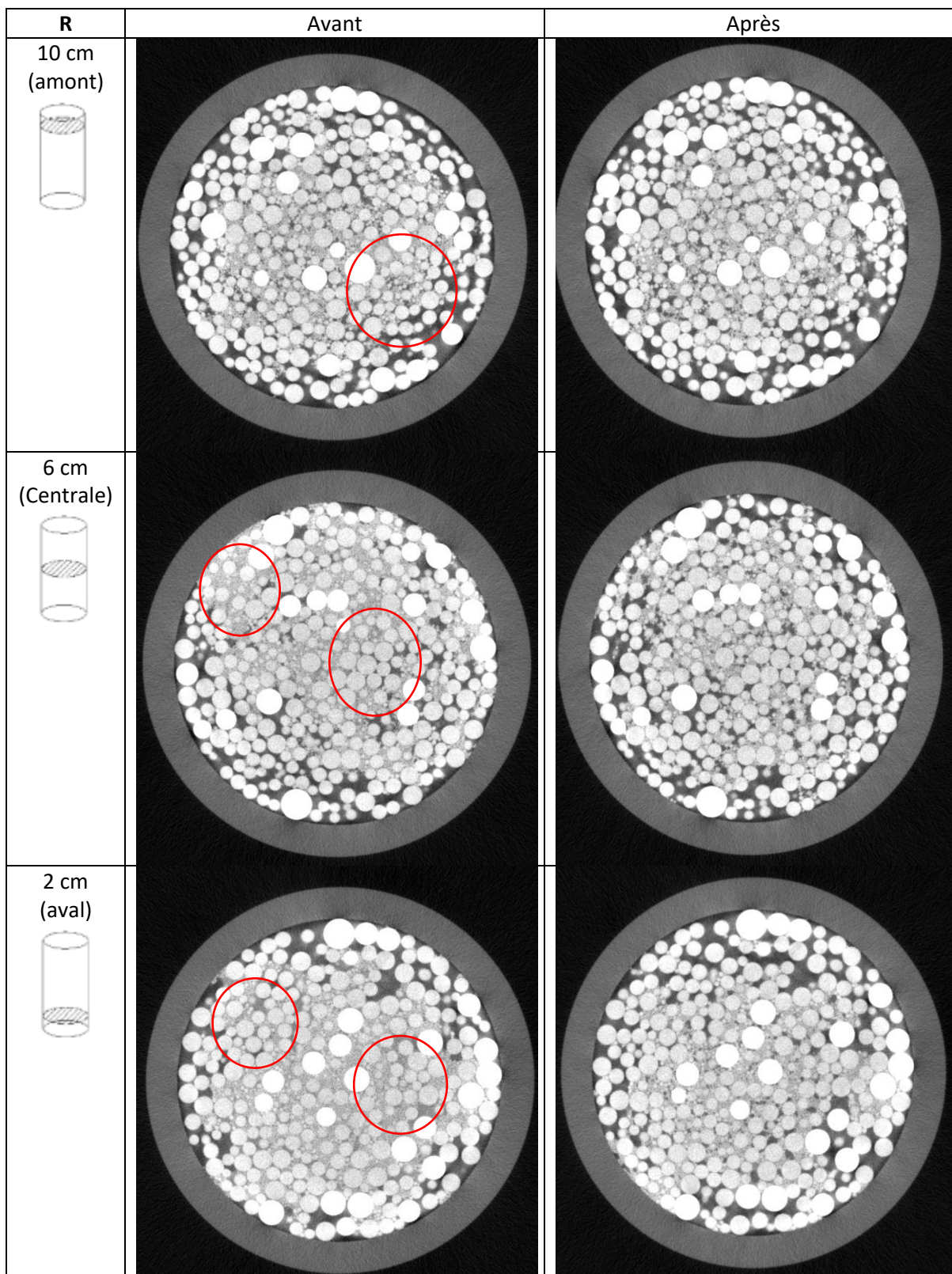


Figure 5.17 Coupes transversales de l'échantillon de référence (R) au milieu de chaque couche, avant et après essai.

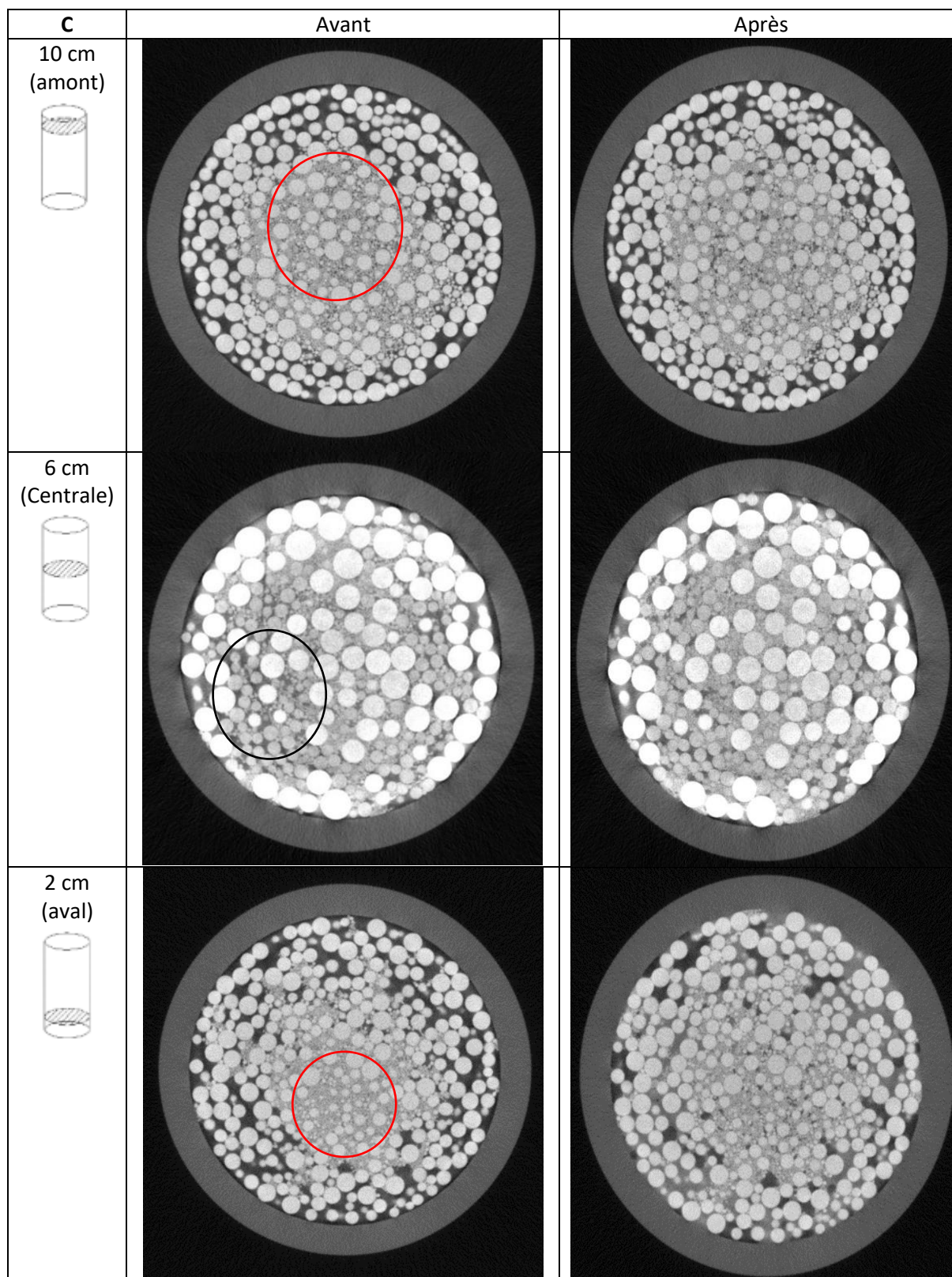


Figure 5.18 Coupes transversales de l'échantillon d'hétérogénéité centrale (C) au milieu de chaque couche, avant et après essai.

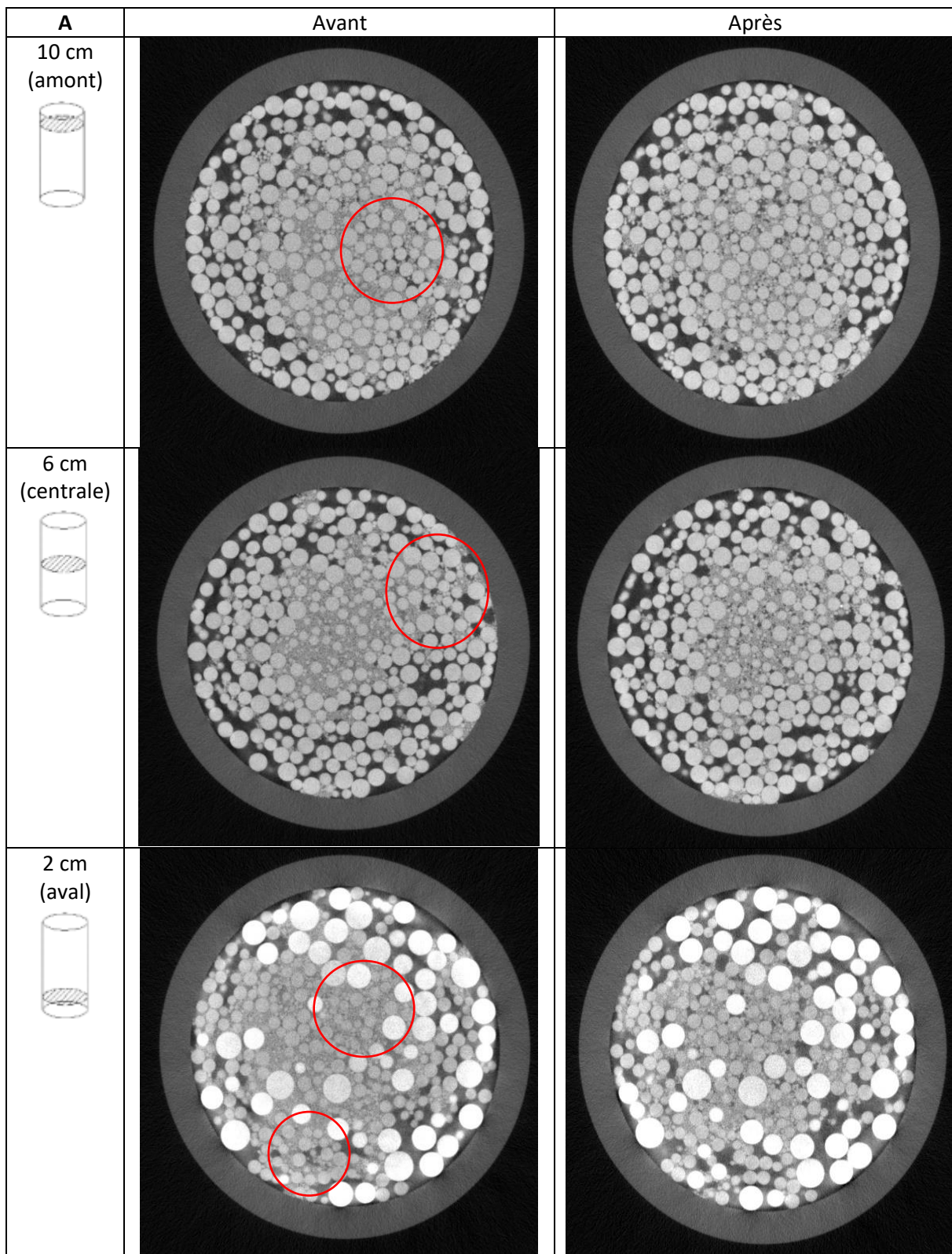


Figure 5.19 Coupes transversales de l'échantillon d'hétérogénéité aval (A) au milieu de chaque couche, avant et après essai.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'effet des hétérogénéités a été examiné à l'échelle du pore par tomographie à rayons X. Cette étude a permis d'avoir une meilleure compréhension du comportement du sol hétérogène vis-à-vis de la suffusion. Elle constitue une étude complémentaire à celles présentées dans les chapitre 2 et 3, et enrichit les résultats obtenus à l'échelle de l'échantillon. Les échantillons testés sont reconstitués par des billes en verre. Trois configurations sont testées : Référence (R), Hétérogénéité Centrale (C), et Hétérogénéité aval (A). Les observations faites à partir des essais de suffusion ont montré que la suffusion des particules fines a lieu majoritairement en début de l'essai et diminue avec le temps. La configuration de référence présente la plus faible susceptibilité à la suffusion et la configuration d'hétérogénéité aval est la plus érodable. Dans toutes les configurations testées, le phénomène de suffusion est accompagné d'une diminution de la conductivité hydraulique lié au processus de filtration.

L'utilisation de la tomographie par rayons X a permis de caractériser expérimentalement le développement de la suffusion à l'échelle des pores. Les résultats obtenus montrent qu'il y a apparition d'hétérogénéités en particulier sur les bords de l'échantillon. En effet, la perte des fines est sensiblement plus importante près de la paroi de la colonne qu'au centre, suggérant des écoulements préférentiels dans cette zone. Les changements microstructuraux au cours du processus de suffusion ont été étudiées à partir des profils verticaux de porosité. La tomographie aux rayons X d'un échantillon de sol avant et après érosion a montré que la méthode de remplissage par bourrage humide est incapable de produire un échantillon de sol uniforme sur toute sa hauteur. Il y a une ségrégation locale des particules lors de la mise en place. Les couches grossières s'enrichissent en fines même avant essai de suffusion.

En outre, le résultat le plus important de cette partie est clairement la mise en évidence de la présence d'une hétérogénéité centrale qui conduit à l'augmentation de l'efficacité de rétention des particules ce qui se traduit par la diminution de la porosité dans cette couche, et peut générer des surpressions. Alors que la présence d'une hétérogénéité en aval aboutit à l'augmentation de la susceptibilité à la suffusion. Dans ce cas la couche aval joue un rôle important dans le contrôle du processus de suffusion.

Une comparaison entre ces résultats avec ceux du chapitre 4 montre une concordance en termes de la susceptibilité à la suffusion et du rôle des différentes couches dans le processus de suffusion. La configuration d'hétérogénéité avale est la plus susceptible à la suffusion. La couche centrale dans la configuration centrale joue le rôle d'un filtre efficace dans le processus de filtration et s'enrichit par des fines. Donc, le choix des billes a permis de bien comprendre ce processus, de valider les résultats du chapitre 4, et de bien visualiser la modification de la structure à l'échelle du pore.

Enfin, la suffusion est un processus non uniforme, elle modifie les propriétés du sol différemment le long de l'échantillon. Par conséquent, considérer une valeur moyenne globale de porosité pour toute la hauteur des échantillons de sol pourrait être trompeur dans les applications d'ingénierie.

Partie III : Modélisation numérique de la suffusion

Chapter 6 : Modélisation par éléments discrets (DEM) de la suffusion dans un milieu granulaire

6.1 Introduction

Le processus d'érosion ne peut pas être complètement étudié par l'expérimentation qui est principalement basée sur l'évolution temporelle du gradient hydraulique local, de la conductivité hydraulique, de la masse érodée, et de la distribution granulométrique post-suffusion. Il est alors nécessaire d'utiliser l'outil numérique. Récemment, plusieurs approches numériques utilisant la DEM pour modéliser le processus d'érosion dans un milieu granulaire, ont été largement utilisées afin d'examiner l'effet de la suffusion à l'échelle des particules (Scholtès et al. 2010, Aboul Hosn et al. 2018, Cheng et al. 2018). Cependant, la revue de la littérature montre que si le processus de suffusion est largement étudié numériquement, l'effet des hétérogénéités sur la suffusion dans les sols multicouches reste moins abordé par une approche numérique.

Cette étude vise à apporter une contribution pour compléter ce gap en étudiant la suffusion dans un échantillon de sol présentant des hétérogénéités par couches (centre, aval) avec différents pourcentages (20%, 40%, 60%). Ce processus est étudié en utilisant la méthode des éléments discrets couplée avec un modèle de dynamique des fluides (DEM-CFD). Le milieu est modélisé en générant un échantillon de sol dans une colonne, soumis à un écoulement descendant. Globalement, L'hétérogénéité est générée par substitution de particules grossières à deux positions de l'échantillon (centre ou aval) et à trois pourcentages (20%, 40%, 60%). Son effet est évalué en termes de particules érodées, de la capacité de rétention des différentes couches, et des forces de contact inter-particules. Le logiciel PFC3D basé sur CFD-DEM, initialement développé par Cundall et Strack (1979), est utilisé dans cette étude, en générant un assemblage de particules représentant chaque couche de sol avec une distribution granulométrique donnée et une porosité cible. Un écoulement descendant est appliqué en utilisant l'option de fluide incorporé dans le logiciel.

Après la description de la méthode numérique, la simulation de la suffusion est présentée et développée, puis les résultats obtenus sont rapportés et discutés. Une confrontation à des résultats expérimentaux est menée afin de valider le modèle numérique.

6.2 Modélisation de la suffusion par DEM-CFD

Toutes les simulations de cette étude sont réalisées à l'aide du code commercial PFC3D (Itasca consulting Group, 2008). Cette modélisation basée sur l'approche DEM-CFD, permet d'analyser le réarrangement et le mouvement des particules, les contacts, et les contraintes. Les premiers travaux sur cette approche particule/fluide ont été réalisés par Tsuji (1992). La caractéristique principale de la modélisation CFD-DEM est la génération d'informations détaillées à l'échelle des particules, telles que la position et le bilan des forces agissant sur les particules individuelles. Ces données sont importantes pour comprendre les mécanismes de transport des particules (Z. Y. Zhou et al. 2010). Dans cette partie, on va détailler l'approche CFD-DEM utilisée dans le logiciel PFC3D afin d'exécuter après des simulations de suffusion sur plusieurs échantillons.

6.2.1 Paramètres du modèle

Le modèle consiste à générer des particules sphériques, sans cohésion, et qui n'interagissent que par leurs contacts. L'échantillon est généré dans une colonne de forme cylindrique afin de simuler le processus de suffusion dans un perméamètre à paroi rigide. Il est constitué d'une face supérieure, d'une face inférieure et d'une paroi latérale cylindrique.

Comme tout modèle numérique, la simulation avec PFC3D nécessite l'utilisation des paramètres d'entrée intrinsèques aux matériaux constituant l'échantillon. Afin d'obtenir un échantillon, un grand nombre des particules doit être généré. Un milieu granulaire est généralement constitué de particules qui forment la matrice et qui supportent les contraintes principales, et des fines qui se trouvent dans les pores constitués par la matrice. La déformation du milieu granulaire dépend de plusieurs paramètres qui sont le module de cisaillement (G), le coefficient de Poisson (ν), et le module de Young (E). Ces paramètres sont aussi liés à la distribution granulométrique et à la densité du sol. La phase solide est constituée de billes de verre dont la densité est proche de celle d'un sol naturel (2500 kg/m^3). La phase fluide est constituée d'eau (masse volumique 1000 kg/m^3). Une force de pesanteur agit sur les particules avec une accélération de ($9,8 \text{ m}^2/\text{s}$). Ces paramètres du modèle sont ajustés de façon à se rapprocher des conditions expérimentales. Selon Zhao (2014), la distribution granulométrique (PSD) est l'un des paramètres les plus importants dans l'étude des glissements de terrain ou de la perméabilité.

Le modèle comporte alors deux parties : une phase solide avec une distribution granulométrique définie et une porosité cible fixée à $n=0.4$, et une phase fluide. Le Error! Reference source not found.ci-dessous présente les différents paramètres d'entrée nécessaires pour exécuter la simulation.

Tableau 6.1 Paramètres du modèle

Paramètre	Particule	Paroi	Fluide
Densité des particules $\rho_s(\text{kg/m}^3)$	2500	-	1000
Porosité	0.4	-	-
Rigidité normale K_n (N/m)	10^8	10^8	-
Rigidité tangentielle K_s (N/m)	10^8	10^8	-
Coefficient de frottement (μ_f)	0.7	0.7	-
Coefficient de viscosité ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)	-	-	10^{-3}

6.2.2 Modélisation de la phase solide

6.2.2.1 Modèle de contact

Le comportement constitutif d'un matériau est simulé en associant un modèle de contact pour chaque liaison particule-particule, et particule-paroi. L'approche CFD-DEM fournit généralement deux modèles de contact standard: linéaire et **Hertz-Mindlin (1953)**. Le modèle de contact de Hertz-Mindlin est non linéaire, mais le modèle de contact linéaire est largement utilisé dans les simulations DEM en raison de la réduction du temps de calcul qu'il procure (Achmus et Abdel-Rahman 2003, Volk et al. 2017) .

Le modèle de contact linéaire est utilisé dans notre étude. Il contient les composantes de contact normal et de cisaillement comme le montre la **Figure 6.1**. Les équations qui gouvernent ce modèle sont exprimées comme suit :

$$F_n = K_n U_n \quad (6.1)$$

$$F_s = \begin{cases} \sum K_s \Delta U_s, & F_s < \mu_f F_n \\ \mu_f F_n, & F_s \geq \mu_f F_n \end{cases} \quad (6.2)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_s \quad (6.3)$$

Où F_n et F_s sont les forces de contact, K_n et K_s sont respectivement la rigidité élastique pour le contact normal et de cisaillement, U_n et U_s sont respectivement le déplacement relatif normal et tangential, et μ_f est le coefficient de frottement.

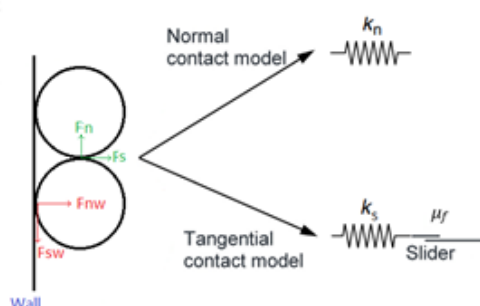


Figure 6.1 Modèle de contacts

6.2.2.2 Génération des particules

L'objectif de la génération des particules est de remplir la colonne par des particules selon une porosité cible et de s'assurer que l'ensemble est en équilibre. En général, l'espace à remplir est délimité par plusieurs parois, et dans notre cas il s'agit d'un cylindre de diamètre 50 mm et de hauteur 120 mm (**Figure 6.2**). Il est nécessaire de noter qu'il y a des limites de porosité que l'on ne peut pas atteindre ; il est évidemment impossible de mettre des particules avec une porosité très faible ou très forte. En effet, pour certaines valeurs de porosité, les particules peuvent être disposées sans se toucher ; pour d'autres valeurs, il y aura un chevauchement entre les particules.

La génération des particules est effectuée selon les étapes suivantes :

- La colonne est composée de deux parois planes horizontales et une paroi cylindrique verticale.
- L'échantillon est composé en trois couches T1, T2, T3 qui correspondent respectivement aux parties aval (T1), central (T2) et amont (T3). Chaque couche est générée séparément avec une granulométrie donnée. Cette génération par couche permet d'obtenir des échantillons présentant des hétérogénéités dites centrale ou aval.
- Dans chaque couche, une granulométrie est définie avec une porosité cible égale à 0,4. La courbe granulométrique a été reconstruite par des particules ayant un diamètre

précis. Les particules sont générées de façon aléatoire selon les proportions granulaires et à la porosité imposée pour obtenir chaque couche.

- L'échantillon est soumis à une force de pesanteur. Au cours des cycles de calcul, l'état d'équilibre est atteint si le rapport entre la moyenne des forces déstabilisantes (gravité) et celle des forces de contact est inférieur à 10^{-4} .
- La face inférieure est remplacée par une grille qui laisse passer les particules fines ($<1,5$ mm), avant de commencer l'essai de suffusion. Ce diamètre a été choisie en raison que 50% des constriction ont un diamètre plus petit que 1,5 (**Figure 6.3.b**). La grille est mise en place après le remplissage de la colonne. Cette étape permet d'éviter la perte des fines avant le lancement de la simulation de l'essai de suffusion.
- Une deuxième face inférieure est définie afin de retenir les particules érodées, sans affecter l'écoulement.

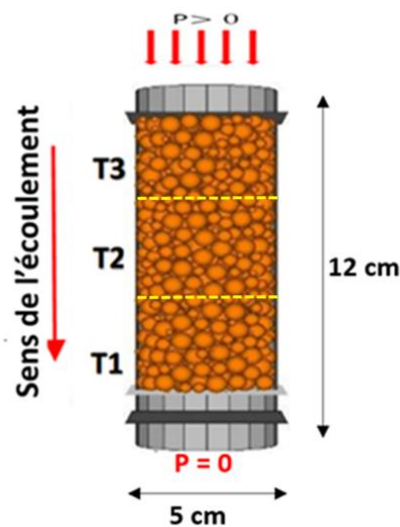


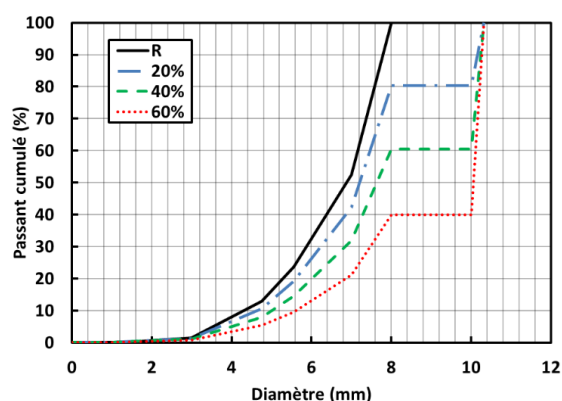
Figure 6.2 Echantillon généré par PFC3D

6.2.2.3 Matériaux

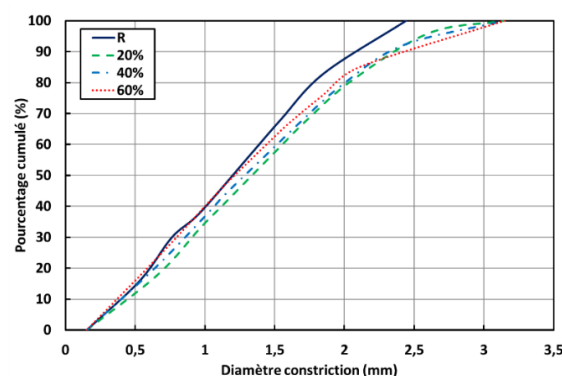
En réalité, la granulométrie des matériaux naturels peut être étendue comme celle de l'échantillon des graves de Rhin testé dans le chapitre 2 et qui s'étale jusqu'à 40 mm, de même que l'échantillon prélevé des alluvions du Rhône (**Souli et al. 2011**) dont la taille des particules varie de 0,1 à 16mm. Cependant, dans la simulation DEM, il est difficile de reproduire un sol naturel de granulométrie très étalée parce qu'il nécessiterait un temps de calcul conséquent. Dans notre étude, nous avons sélectionné une granulométrie qui s'étale jusqu'à 8 mm pour le sol de référence et 10,3 pour les éléments de la couche grossière dans la configuration hétérogène, tout en modifiant le pourcentage massique de chaque fraction granulaire afin de s'adapter aux limitations induite par l'utilisation du logiciel PFC 3D .

Des simulations de suffusion ont été réalisées sur des billes de verre dans une colonne cylindrique ($d=5\text{cm}$, $h=12\text{cm}$). On distingue trois configurations : référence (R), hétérogénéité centrale (C), hétérogénéité aval (A). En effet, les configurations d'hétérogénéité sont reproduites de manière similaire à celles testées des chapitres 2 (**Oueidat et al. 2021**) et 3. La similarité avec ces études est abordée en termes de la position d'hétérogénéité (Centrale, Aval).

Le matériau de référence est constitué de particules de dimension allant de 1mm à 8mm (**Figure 6.3.a**). Les matériaux hétérogènes ont été reconstitués à partir du matériau de référence par enrichissement en particules grossières d'une couche. Pour reproduire l'hétérogénéité à différents pourcentages (20%, 40%, 60%), la fraction granulaire 3mm-8mm du matériau de référence est remplacée par des particules plus grossières (10,3 mm). Le diamètre des particules érodables a été défini à partir de l'analyse CSD (**Figure 6.3.b**) qui montre que 60 % des constriction sont inférieures à 1,5 mm. Afin de garder le même potentiel d'érosion, la teneur en fines (<1,5 mm) est maintenue identique dans toutes les couches de l'échantillon. Le nombre de particules fines constitue le tiers du nombre total des particules, même si leur pourcentage massique semble faible (dû aux rapports de volumes). La courbe des constriction CSD obtenu à partir de la courbe granulométrique, en se basant sur le modèle de **Locke et al. (2001)**. Les pourcentages 20 %, 40 %, 60 %, représentant la fraction de particules grossières introduites ont été choisis dans le but d'étudier l'effet sur la susceptibilité d'un pourcentage d'hétérogénéité faible, moyen et élevé, respectivement. L'introduction d'hétérogénéités mène à l'apparition d'une discontinuité granulaire dans la courbe granulométrique et à la création de constriction plus grandes (diamètre max > 3 mm) que celle présentes dans le sol de référence (diamètre max < 2.5 mm), ce qui facilite le transfert des fines et par conséquent augmenter la susceptibilité à la suffusion.



(a)



(b)

Figure 6.3 (a) Courbe granulométrique et (b) courbe des constriction des différentes couches

Dans tous les essais, l'échantillon est généré en trois couches (T1, T2 et T3) (**Figure 6.4**). Dans la configuration de référence, la colonne entière a été remplie par le sol de référence. Pour la configuration d'hétérogénéité aval (A), seule la couche aval (T1) est remplie avec le mélange grossier (à 20%, 40% ou 60% de pourcentage). Pour la configuration de l'hétérogénéité centrale (C), la couche centrale (T2) du matériau de référence (R) est remplacée par une couche grossière à différents pourcentages de 20%, 40% ou 60%. La densité apparente a été maintenue constante dans toutes les configurations. Sept configurations ont été testées: à trois pourcentages (à 20%, 40% et 60% d'hétérogénéité) pour chacune des configurations aval (A) et centrale (C), et une configuration de référence homogène (R). Par exemple, 20A désigne une configuration avec 20% d'hétérogénéité en aval. Le **Tableau 6.2** récapitule les différentes configurations testées avec le pourcentage de particules grossières dans chaque couche.

Tableau 6.2 Composition des différentes configurations simulées

Configuration	Couche Amont	Couche Centrale	Couche Aval
Reference	R	R	R
20A, 40A, 60A	R	R	20%, 40%, 60%
20C, 40C, 60C	R	20%, 40%, 60%	R

Le diamètre maximal des billes dans l'échantillon hétérogène (10.3 mm) est supérieur au diamètre maximal du sol de référence (8 mm). Le diamètre maximal des billes dans l'échantillon hétérogène (10.3 mm) est supérieur au diamètre maximal du sol de référence (8 mm). L'écoulement est dirigé perpendiculairement aux interfaces séparant les différentes couches.

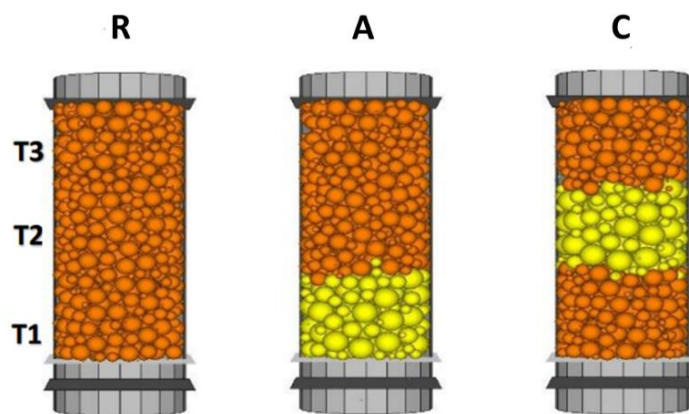


Figure 6.4 Vue des échantillons générés pour les différentes configurations testées

6.2.3 Modélisation de la phase fluide

6.2.3.1 Interaction Fluide-Particules

Dans le domaine fluide, le code CFD résout les équations de continuité et de Navier-Stokes pour un écoulement visqueux incompressible en tenant compte de l'effet des particules dans les cellules du fluide. Ces équations sont données comme suit :

$$\rho \frac{\partial(n\vec{v})}{\partial t} + \rho \vec{v} \nabla(n\vec{v}) = -n \nabla P + \mu \nabla^2(n\vec{v}) + \vec{f}_b \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial(n)}{\partial t} + \nabla(n\vec{v}) = 0 \quad (6.5)$$

où ρ est la densité du fluide, n est la porosité, P est la pression du fluide, μ est la viscosité dynamique du fluide, et \vec{f}_b est une force de réaction par unité de volume. La vitesse du fluide interstitiel est notée \vec{v} , tandis que $(n\vec{v})$ est la vitesse macroscopique (ou de décharge).

Les particules en mouvement interagissent avec le fluide par une force de réaction \vec{f}_b égale et opposée à celle appliquée par le fluide. Cette force \vec{f}_b est définie comme suit :

$$\vec{f}_b = \beta \vec{U} = \beta(\vec{u} - \vec{v}) \quad (6.6)$$

où \vec{u} est la vitesse moyenne des particules solides, et \vec{v} la vitesse interstitielle du fluide. Le coefficient β , dépendant de la fraction de vide dans l'élément fluide, est calculé dans notre cas sur la base de l'équation d'Ergun (1952) pour une porosité inférieure à 0,8 comme suit :

$$\beta = \frac{(1-n)}{d^2 n^2} (150(1-n)\mu + 1.75\rho d |\vec{U}|) \quad (6.7)$$

Où d est le diamètre moyen des particules dans l'élément fluide.

Cette équation d'Ergun (1952) a été utilisée dans les études de la suffusion dans les matériaux polydispersés comme dans le cas de l'étude des filtres granulaires par **Huang et al. (2014)** et de la suffusion de conduit par Cheng et al. (2018). Dans notre étude, le modèle est similaire à celui utilisé par **Hama et al (2016, 2019)** avec des paramètres d'entrée (rigidité, densité, particules, coefficient de frottement, loi de contact...). La différence est abordée dans la granulométrie des échantillons générés. En effet, **Hama et al (2016, 2019)** ont effectué des essais de suffusion sur des échantillons ayant une granulométrie globale uniforme (sans hétérogénéité). En plus, ils ont menée des essais triaxiaux afin d'étudier le comportement mécanique des sols suite à la suffusion. Par contre, dans notre étude, les simulations de suffusion sont effectuées sur des échantillons présentant des hétérogénéités au centre et en aval.

Une force d'interaction fluide-particule supplémentaire \vec{f}_{fluide} est ajoutée à l'équation de mouvement en DEM :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \frac{\vec{f}_{mesh} + \vec{f}_{fluide}}{m} + \vec{g} \quad (6.8)$$

Où \vec{f}_{mesh} est la somme des forces de contact agissant sur la particule et m est la masse de la particule. \vec{f}_{fluide} est la force totale appliquée par le fluide sur les particules. Donc les forces agissantes sur chaque particules sont dues à la pression du fluide, la pesanteur, et aux contacts intergranulaires (**Figure 6.5**).

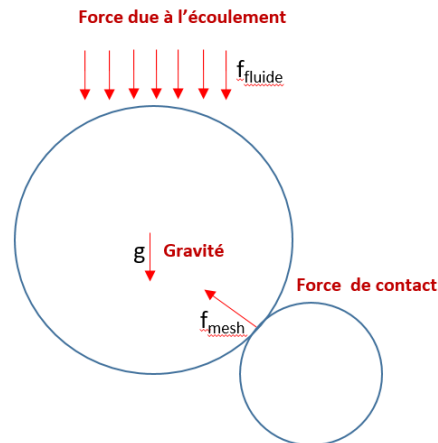


Figure 6.5 Bilan des forces agissantes sur les particules

\vec{f}_{drag} est la force de traînée appliquée sur chaque particule. Elle est proportionnelle au volume de cette dernière.

$$\vec{f}_{drag} = \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\vec{f}_b}{(1-n)} \quad (6.9)$$

\vec{f}_{fluide} est la résultante de la force de traînée \vec{f}_{drag} et de la poussée appliquée par le fluide sur la particule, et s'exprime comme suit :

$$\vec{f}_{fluide} = \vec{f}_{drag} - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \vec{g} = \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\vec{f}_b}{(1-n)} - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \vec{g} \quad (6.10)$$

Où r est le rayon de la particule et g l'accélération de la pesanteur. La méthode semi-implicite SIMPLE (Bender 1981) est utilisée pour calculer la pression et la vitesse du fluide dans chaque cellule. La Figure 6.6 présente le cycle de calcul sur PFC.

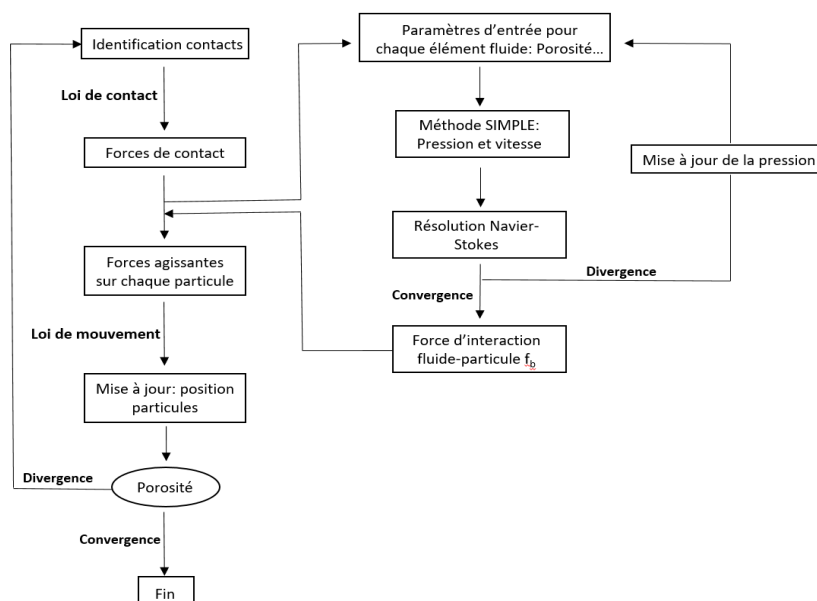


Figure 6.6 Cycle de calcul pour PFC3D

6.2.3.2 Conditions aux limites

L'application d'un gradient de pression contrôlé à travers l'échantillon génère un écoulement de fluide. Dans les simulations effectuées, pour appliquer les différents gradients hydrauliques, la pression est contrôlée au sommet de l'échantillon et maintenue nulle à la base de l'échantillon (**Figure 6.2**). La paroi inférieure de la cellule est une grille qui laisse passer les fines érodées et qui seront retenues par une autre face inférieure sans affecter l'écoulement. Cette condition est imposée par le fonctionnement du logiciel pour la comptabilisation des particules érodées.

Le gradient de pression ΔP entre le haut et le bas de l'échantillon a été utilisé pour évaluer le gradient hydraulique i :

$$i = \frac{\frac{\Delta P}{\gamma} + H}{H} \quad (6.11)$$

où γ est le poids volumique de l'eau et H est la hauteur de l'échantillon.

Le gradient hydraulique appliqué au cours des essais correspond à des valeurs réalistes allant de 1 à 9. Pour chaque essai, un gradient unique est appliqué de façon à garder les mêmes conditions initiales pour toutes les simulations. Le **Tableau 6.3** présente les sollicitations hydrauliques appliquées dans les différentes simulations.

Tableau 6.3 Sollicitations hydrauliques appliquées

Gradient de Pression (kPa)	Gradient hydraulique (i)
0.001	1
0.6	1.5
1.2	2
1.8	2.5
2.4	3
3	3.5
3.6	4
4.8	5
6	6
7.2	7
9.6	9

Le domaine fluide est discrétisé en $2 \times 2 \times 10$ éléments fluides selon les directions x , y et z (**Figure 6.7**). Le fluide est modélisé comme un domaine continu dans lequel il y a des particules sphériques discrétisées qui interagissent avec les éléments de contact (paroi, contacts intergranulaires), c'est-à-dire qu'il existe une phase fluide continu et une phase solide discrétisée (**Taylor et al. 2016**). Le fluide est maillé dans une forme rectangulaire plus grande de 5 fois le diamètre moyen des particules afin d'obtenir un volume élémentaire représentatif

(REV) (Volk et al. 2017). Ces éléments fluides sont maintenus fixes pendant toute la simulation. Les composantes de vitesse du fluide sont calculées au centre de la cellule. Les conditions aux limites sont appliquées à l'extérieur de la grille fluide considérée et les équations de Navier Stokes sont résolues en déterminant les vitesses et les pressions au cours de l'écoulement. La variation continue des forces de traînée aboutit au changement de la porosité jusqu'à l'obtention d'un état d'équilibre (**Figure 6.6**).

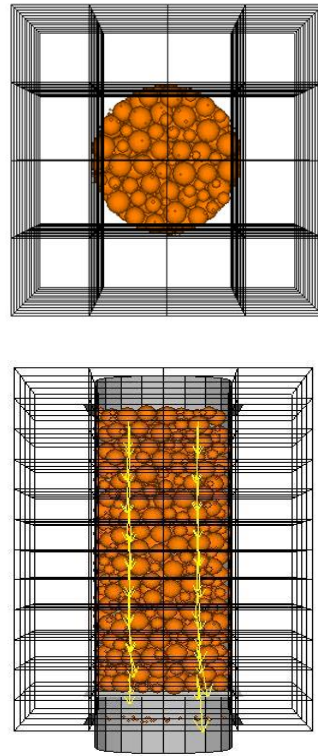


Figure 6.7 *Domaine fluide discrétisé en 3D avec écoulement descendant*

Dans la partie suivante, on présente les résultats concernant l'analyse de la proportion de perte de fines, la variation de la porosité ainsi que le mécanisme de transport de fines entre les différentes couches afin de comprendre l'effet du type de configuration et du pourcentage d'hétérogénéité sur le mouvement des particules à une échelle appropriée.

6.2.4 Résultats et discussion

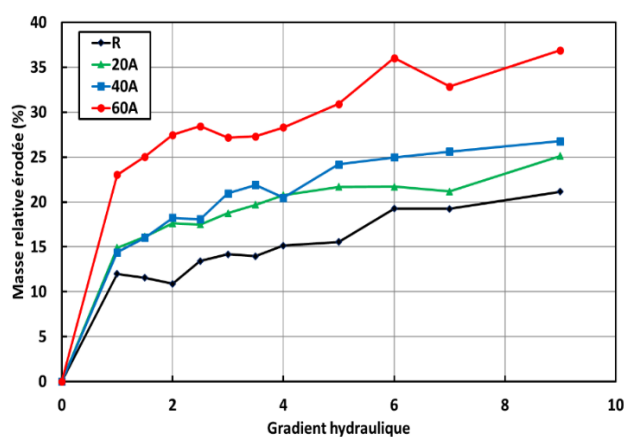
6.2.4.1 Masse relative érodée

L'érodabilité de l'échantillon est quantifiée par la masse érodée relative qui est le rapport entre la masse érodée et la masse initiale des particules fines. La teneur initiale en fines est maintenue identique dans toutes les configurations. La **Figure 6.8.a** et la **Figure 6.8.b** montrent l'évolution de la masse érodée relative en fonction du gradient hydraulique appliqué pour les configurations d'hétérogénéité aval et centrale, respectivement. Comme on l'a déjà mentionné, chaque gradient hydraulique correspond à un essai unique. La reconstitution de l'échantillon pour chaque essai peut conduire à des variations qui se répercutent par quelques fluctuations et sur les résultats. Cependant une allure globale est bien établie. Globalement, les résultats montrent qu'il y a une augmentation de la masse érodée relative avec le gradient hydraulique, dans l'ensemble des configurations testées. L'allure de la courbe présente deux parties : La

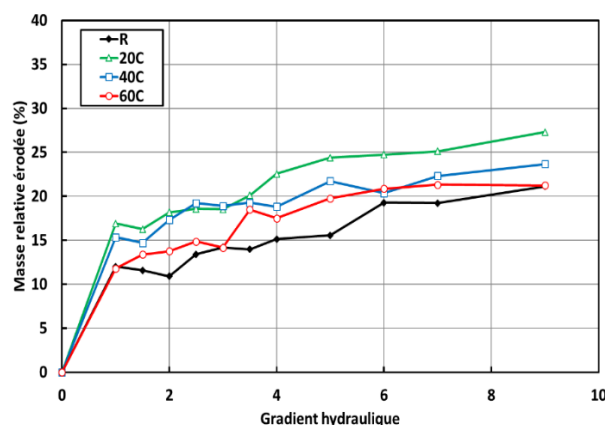
première décrit une forte augmentation de la masse érodée relative après l'application du gradient hydraulique initial. Dans la deuxième partie, impliquant un gradient hydraulique plus élevé, la masse érodée relative augmente légèrement. De plus, les résultats montrent que pour la configuration de l'hétérogénéité aval, la susceptibilité à la suffusion augmente avec le pourcentage d'hétérogénéité, c'est-à-dire $Me_{(R)} < Me_{(20A)} < Me_{(40A)} < Me_{(60A)}$. En outre, la configuration de forte hétérogénéité aval est la plus susceptible à la suffusion parmi toutes les configurations testées. Ce résultat est corrélé à la diminution de la capacité de rétention de la couche hétérogène aval qui est proche de l'exutoire.

Néanmoins, l'introduction de l'hétérogénéité dans la couche centrale n'entraîne pas toujours une augmentation de la susceptibilité à l'érosion. Il existe une valeur seuil du pourcentage d'hétérogénéité centrale à partir de laquelle un effet inverse est déclenché. En effet, on observe une augmentation de la masse érodée relative en passant de la configuration de référence R à la configuration centrale à faible hétérogénéité (20C), mais au-delà de ce pourcentage d'hétérogénéité de 20%, l'effet inverse apparaît, c'est-à-dire $Me_{(20C)} > Me_{(40C)} > Me_{(60C)}$. En effet, la présence d'une hétérogénéité centrale augmente la susceptibilité à la suffusion mais son intensification n'engendre pas une plus forte instabilité. En outre, l'effet du pourcentage d'hétérogénéité est plus prononcé dans la configuration aval que dans la configuration centrale. Ce résultat est illustré par les courbes de masse érodée relative qui sont plus rapprochées dans la configuration centrale (**Figure 6.8.b**). La couche aval dans la configuration d'hétérogénéité centrale agit comme un filtre.

L'effet de la position d'hétérogénéité est abordé par la comparaison entre les configurations aval et centrale pour un même pourcentage d'hétérogénéité. Les résultats montrent que la configuration aval est plus érodable que la configuration centrale ($Me_{(60A)} > Me_{(60C)}$; $Me_{(40A)} > Me_{(40C)}$; et $Me_{(20A)} > Me_{(20C)}$). Cet effet augmente avec l'augmentation du pourcentage d'hétérogénéité, ce qui est représenté par la différence de la masse relative érodée entre les configurations 60A et 60C, par rapport à 20A et 20C.



(a)



(b)

Figure 6.8 Masse érodée cumulée pour toutes les configurations (a) Aval et (b) Central

6.2.4.2 Évolution de la porosité de l'échantillon

La porosité est utilisée comme un indicateur essentiel dans l'étude du transport des particules entre les différentes couches et à travers le milieu poreux. La **Figure 6.9** montre la variation de la porosité dans les trois couches (T1, T2 et T3) de l'échantillon pour chaque configuration, après avoir été soumis à différents gradients hydrauliques allant de 1 à 9. Il est nécessaire de mentionner que la variation de la porosité est affectée par le réarrangement des particules et l'érosion des fines.

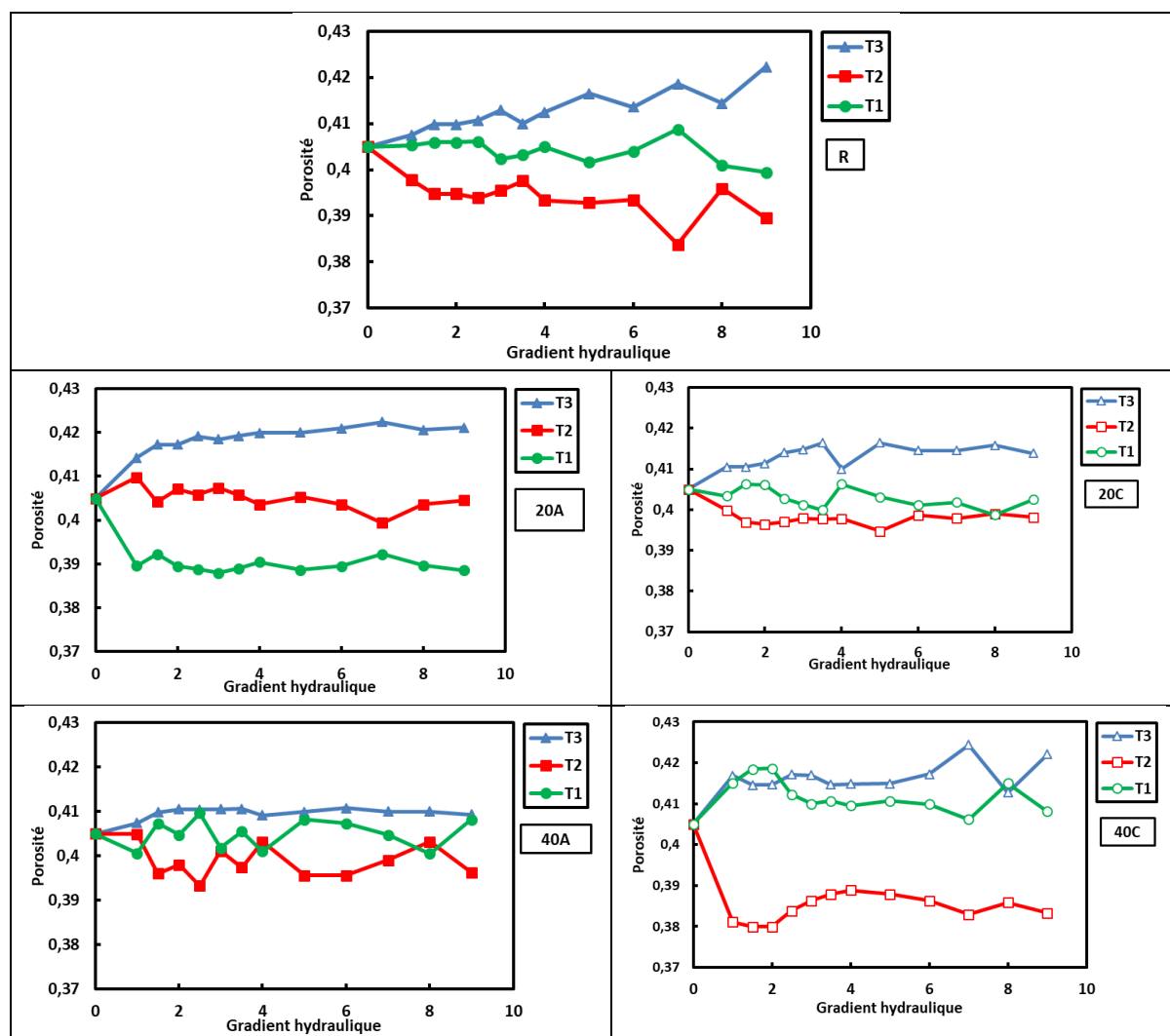
En comparant les résultats des différents essais, on constate que la porosité de la couche amont (T3) augmente progressivement avec l'augmentation du gradient hydraulique, indiquant un transfert de particules de la couche amont (T3) vers les deux couches inférieures (T2 et T1) sous l'effet de l'écoulement. La couche amont (T3) présente plus de perte de particules dans la configuration centrale que la couche aval (T1). Ceci s'explique par la présence de la couche grossière centrale qui facilite le transport des particules du côté amont. L'augmentation la plus significative de la porosité dans la couche T3 est obtenue dans la configuration à forte hétérogénéité centrale (60C).

En revanche, la tendance à la variation de la porosité dans la couche aval (T1) dépend de la configuration de l'hétérogénéité. L'introduction d'un pourcentage élevé d'hétérogénéité au centre (60C) peut augmenter l'efficacité du filtre en aval (couche T1). Cette occurrence est présentée par la tendance décroissante de la porosité pour la couche T1 dans la configuration 60C. Ces résultats démontrent que la localisation d'une hétérogénéité forte au milieu de l'échantillon permet le transport de particules vers la partie aval (couche T1). La configuration (60C) est la moins érodable parmi les configurations hétérogènes testées.

Dans la configuration (20A) la couche aval (T1) joue le rôle de filtre et retient les particules érodées des couches sus-jacentes (T2 et T3). Ce rôle de filtre dans la couche aval (T1) est plus prononcé dans cette configuration que dans celle de référence. Par contre, pour la configuration (40A) la fonction de filtre n'est plus efficace ce qui fait augmenter la porosité de (T1) et diminue celle de (T2). Ce processus est accentué avec le pourcentage d'hétérogénéité. La configuration à forte hétérogénéité aval (60A) présente la masse érodée relative la plus élevée

(Figure 6.8.a). Cependant, il est montré que la porosité dans la couche T1 et T3 subit une légère tendance à l'augmentation, tandis que dans la couche T2 elle montre une tendance à la diminution. Ce comportement révèle que la couche centrale s'enrichit des particules de l'amont, ainsi que la couche aval (T1) perd plus qu'en recevoir. La présence d'une couche aval grossière à proximité de la sortie rend cette configuration la plus susceptible à la suffusion.

Dans les configurations d'hétérogénéité central, la couche (T2) se remplit des fines venant de l'amont (T3). La configuration (40C) montre une singularité présentée par une augmentation de la porosité dans les couches amont (T3) et aval (T1) et une forte diminution de la porosité dans la couche centrale (T2). Dans cette configuration la couche centrale (T2) joue le rôle de filtre et s'enrichit par des particules de la couche amont (T3).



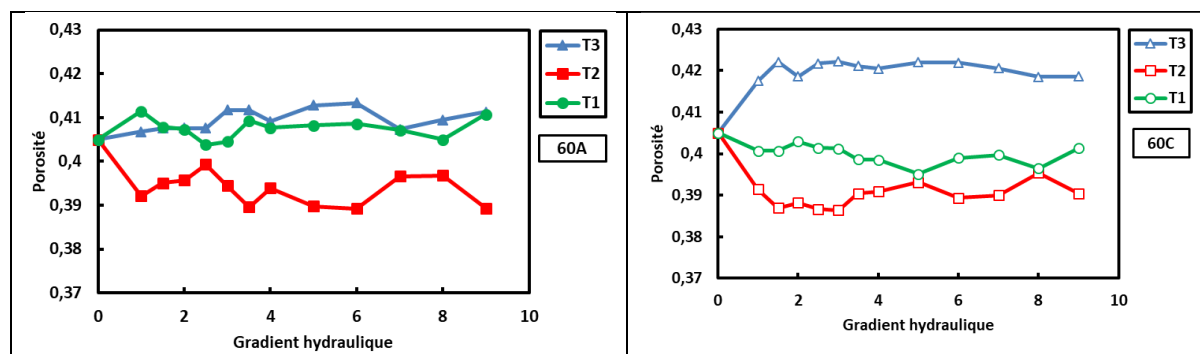


Figure 6.9 Evolution de la porosité pour toutes les configurations d'hétérogénéité simulées

6.2.4.3 Analyse par couche

Pour mieux comprendre l'effet de l'hétérogénéité sur le mécanisme de transport des particules, une étude plus fine est nécessaire. Cette partie se focalise sur l'étude de l'effet des hétérogénéités sur la capacité de rétention des couches centrale (T2) et aval (T1), la granulométrie post érosion, le pourcentage de perte de fines, et les forces de contact se produisant dans chaque couche de l'échantillon. Cette analyse est réalisée pour un gradient hydraulique $i=3$.

Masse érodée relative de chaque couche

L'effet de l'hétérogénéité a été étudié en évaluant l'effet du pourcentage (20%, 40%, 60%), et l'effet induit par chaque localisation spatiale de l'hétérogénéité (centrale, aval). La **Figure 6.10** montre l'évolution de la masse érodée relative dans chaque couche pour toutes les configurations testées, lorsque le système atteint un état stable. En comparant les configurations d'hétérogénéité en aval (20A, 40A, et 60A), les résultats (**Figure 6.10**) montrent que la masse relative érodée augmente avec le pourcentage d'hétérogénéité dans la couche en aval (T3). Cependant, l'effet de l'introduction de l'hétérogénéité centrale est moins prononcé sur la suffusion, c'est-à-dire la variation de la masse érodée est plus faible dans les configurations centrales que celles de l'aval. Il existe une valeur seuil à partir de laquelle on observe un effet inverse du pourcentage d'hétérogénéité dans la configuration centrale. Ceci est illustré par la masse érodée relative la plus faible dans la configuration centrale (60C) qui est moins sensible à la suffusion que les configurations impliquant un pourcentage d'hétérogénéité plus faible (20C et 40C). Pour chaque pourcentage d'hétérogénéité, on observe que la configuration d'hétérogénéité aval (A) est plus sensible à la suffusion que la configuration centrale (C). Ainsi, la configuration à forte hétérogénéité aval (60A) est la plus sensible à la suffusion en raison de la large distribution de grandes constriction formées par les particules grossières dans la couche aval.

En outre, ces résultats montrent que la plus grande et la plus petite fraction des particules érodées proviennent respectivement de la couche aval (T1) et de la couche amont (T3), pour toutes les configurations d'hétérogénéité. Ce comportement peut être expliqué par le processus de rétention qui réduit le pourcentage de particules érodées des couches amont (T3), alors que l'érosion de la couche aval (T1) est plus facile. Donc, la couche aval est la plus susceptible à

la suffusion dans toutes les configurations testées, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus par **Zhang et al. (2020)** et **Hu et al. (2019)**. La perte de fines dans la couche aval augmente avec le pourcentage d'hétérogénéité en raison de la quantité de particules grossières près de l'exutoire.

Par ailleurs, l'érosion dans la couche centrale (T2) dépend de la configuration de l'hétérogénéité. Les résultats obtenus à partir des configurations impliquant un pourcentage élevé d'hétérogénéité centrale (60C) indiquent qu'il y a moins d'érosion dans la couche centrale par rapport aux autres configurations. En effet, l'augmentation du pourcentage d'hétérogénéité dans la couche centrale (60C) conduit à l'accumulation de particules érodées à l'interface entre les couches T2 et T3, et favorise le processus de rétention (filtration). Ainsi, le processus de suffusion est non homogène le long de l'échantillon. **Chang (2012)** puis **Ke et Takahashi (2014)** ont rapporté la même observation que la perte des fines n'est pas uniforme dans les différentes couches de l'échantillon.

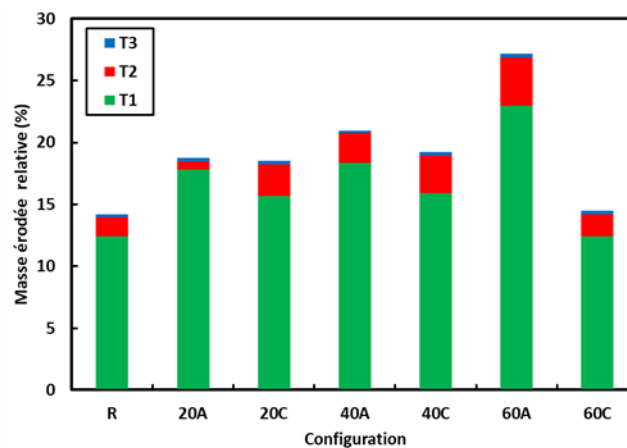


Figure 6.10 Masse relative érodée dans chaque couche en fonction de la configuration d'hétérogénéité

Granulométrie post-érosion

La suffusion aboutit au réarrangement et à la perte des particules. On distingue les particules mobiles non érodables des particules fines qui peuvent atteindre l'exutoire et créer la suffusion. L'analyse granulométrique des différentes couches, avant et après suffusion, permet de bien comprendre le processus de migration et d'échange des particules entre les différentes couches. Par conséquent, elle peut donner une indication sur le processus de filtration au sein de l'échantillon. Les **Figure 6.11**, **Figure 6.12**, **Figure 6.13**, **Figure 6.14** montrent la courbe granulométrique pré/post suffusion de chaque couche. Cette courbe est exprimée en pourcentage cumulé de particules. Le changement dans la courbe granulométrique est caractérisé par la position relative des courbes granulométriques avant et après essai. Ce changement est observé surtout pour des diamètres inférieurs à 1.5 mm dans toutes les configurations testées. Ce diamètre correspond aux particules susceptibles à la suffusion, ce qui valide notre choix de dimension de la grille à la sortie de la cellule. Pour les particules de diamètre supérieur à 1,5 mm on relève dans quelques courbes une petite variation due au faible mouvement des particules grossières notamment sur l'interface des différentes couches.

Les résultats montrent que la couche amont (T3) subit la plus grande perte en particules dans toutes les configurations testées. En effet, cette couche a tendance à perdre des particules en raison notamment de sa position en amont. En outre, toutes les courbes granulométriques montrent que toutes les couches perdent des particules fines, sauf la couche aval (T1) de la configuration à forte hétérogénéité centrale (60C). La teneur en fines dans cette couche augmente après l'essai de suffusion. Ce résultat valide l'hypothèse que la présence d'une forte hétérogénéité au centre aboutit à l'augmentation de l'efficacité de rétention du filtre en aval.

En outre, la couche aval (T1) dans la configuration d'hétérogénéité aval (60A) subit la plus grande perte de particules parmi toutes les autres configurations. Ce résultat est lié à la présence des particules grossières dans cette couche proche de l'exutoire, ce qui facilite le départ des fines. Par conséquent, cette configuration est la plus susceptible à la suffusion.

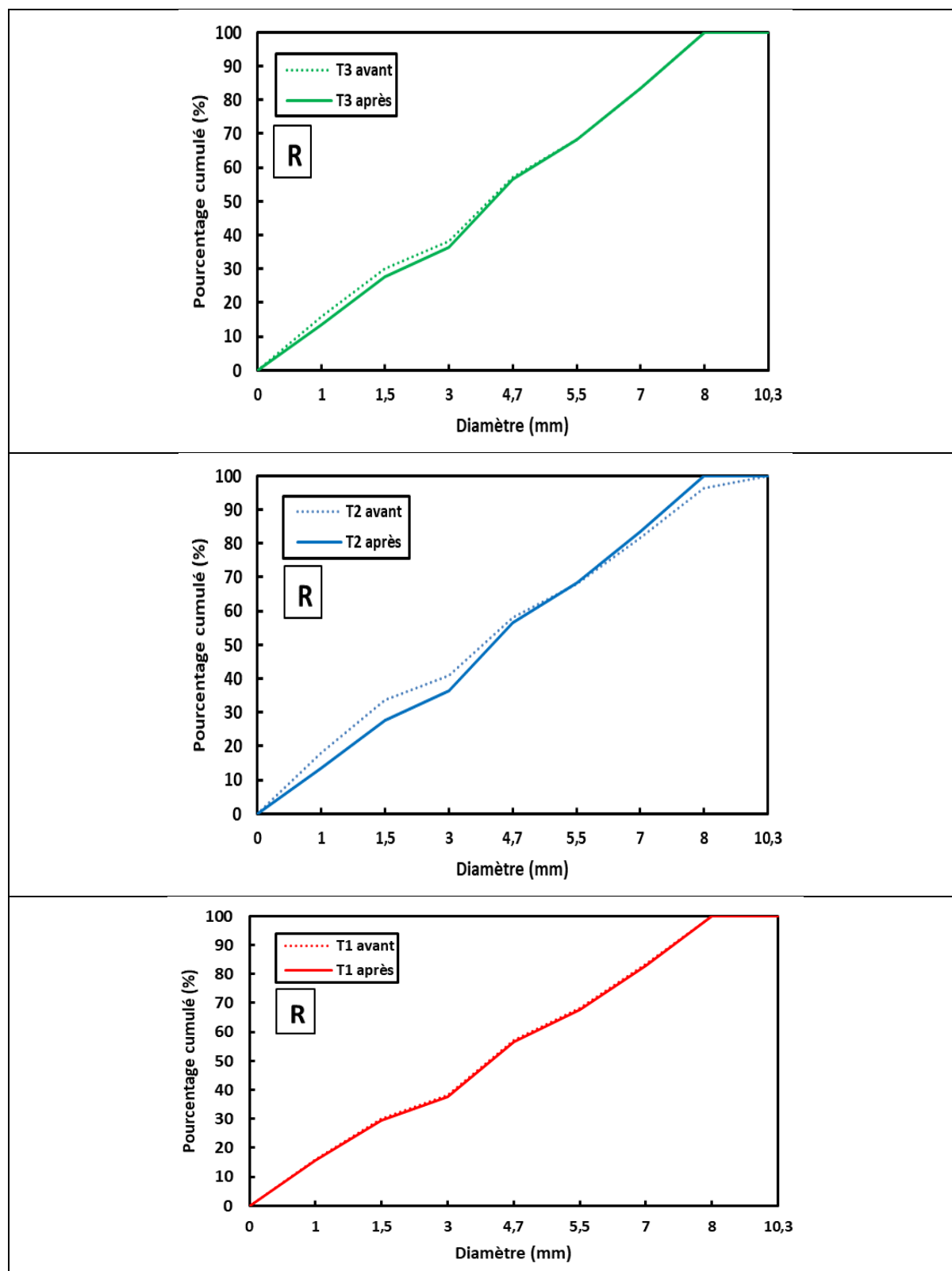


Figure 6.11 Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche pour la configuration de référence

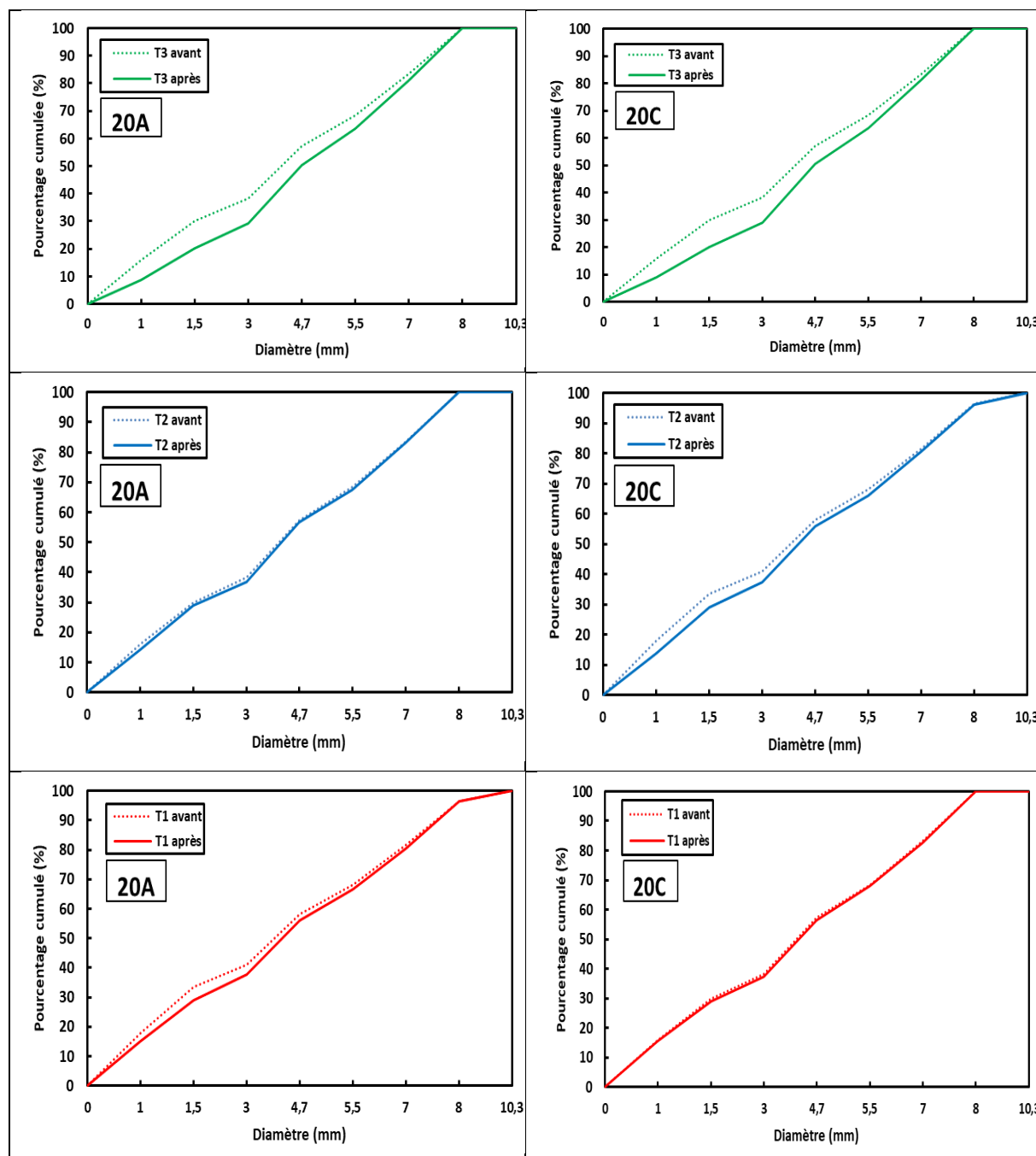


Figure 6.12 Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche avec un pourcentage d'hétérogénéité 60%

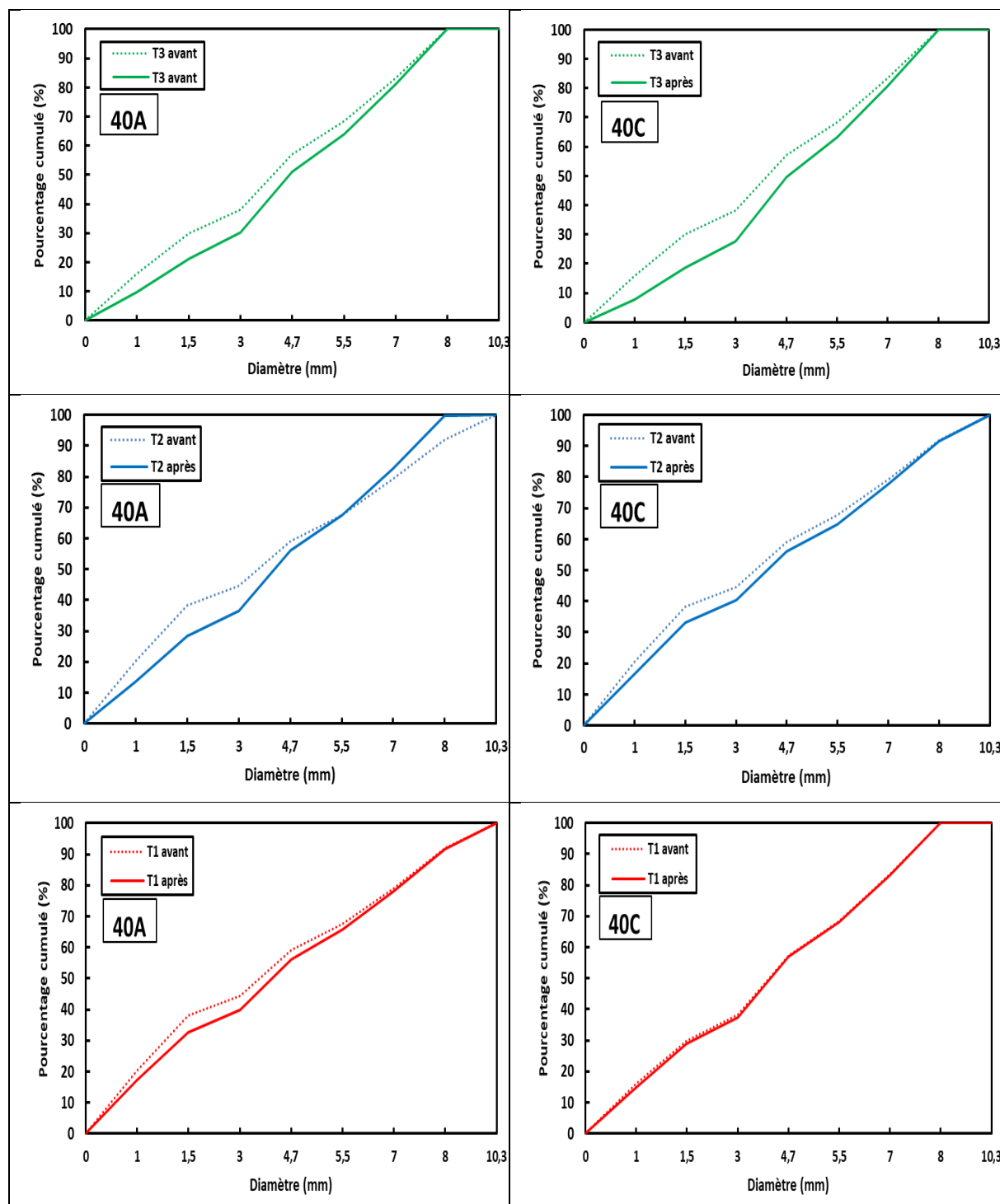


Figure 6.13 Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche avec un pourcentage d'hétérogénéité 40%

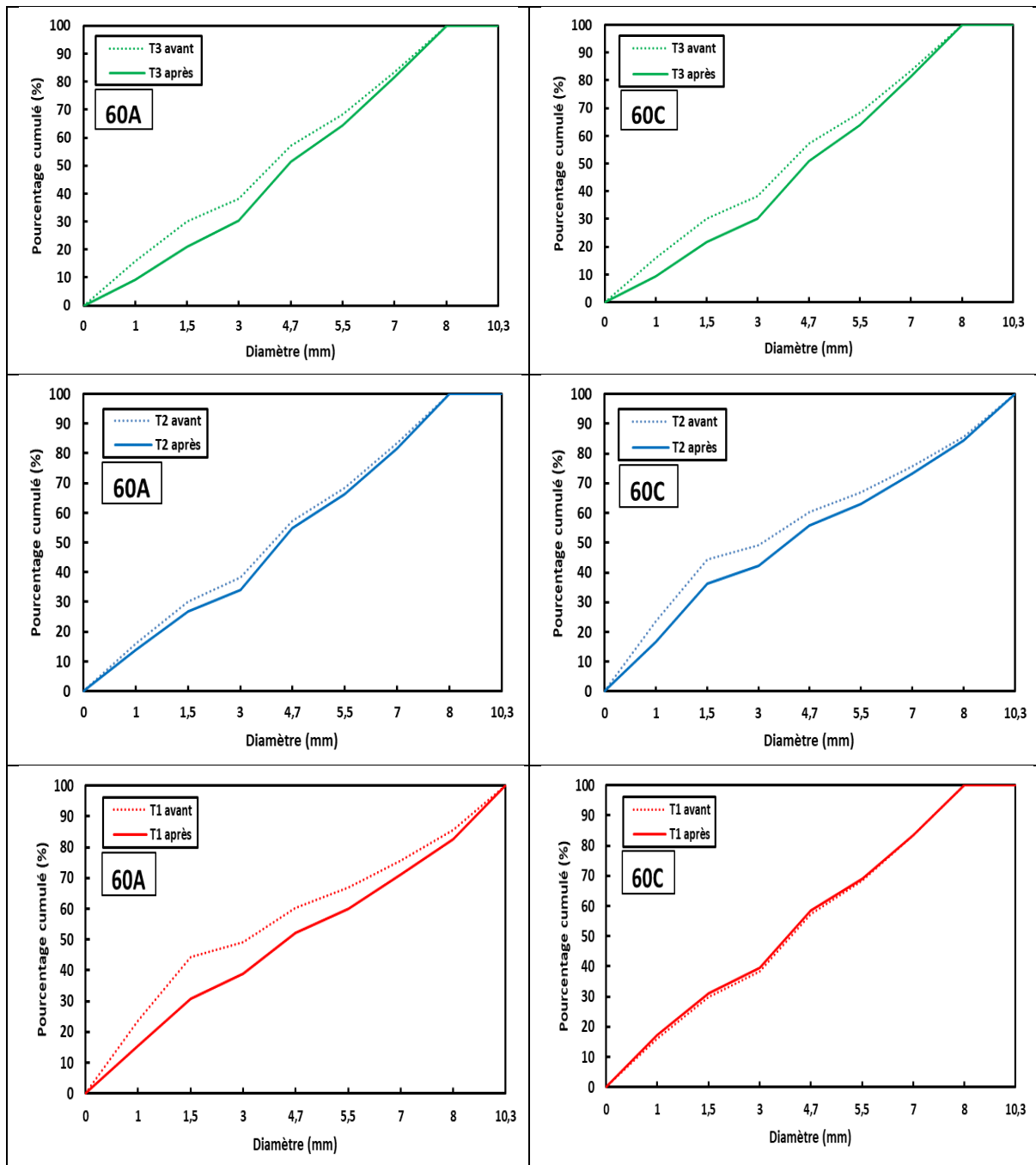


Figure 6.14 Granulométrie Pré et post suffusion de chaque couche pour les configurations avec un pourcentage d'hétérogénéité 60%

Effacité de rétention

L'efficacité de rétention est la capacité de la couche à filtrer les particules fines arrivant des couches en amont. Elle s'exprime par le rapport entre la masse relative des particules retenues et celles arrivant à la couche concernée. Ce paramètre permet de comprendre l'effet du pourcentage d'hétérogénéités sur la capacité de filtration des différentes couches de l'échantillon. La capacité de rétention dans chaque couche pour toutes les configurations testées est présentée dans la **Figure 6.15**. Comme les résultats l'indiquent, l'efficacité de rétention dans la couche aval (T1) diminue avec l'augmentation de l'introduction des particules plus grossières dans la couche en aval.

En comparant les configurations d'hétérogénéité centrale (C), les résultats montrent que la capacité de rétention des couches (T1 et T2) évolue légèrement de 20C à 40C, alors qu'en passant à 60C, une variation significative est observée. Dans ce cas, il existe une valeur seuil du pourcentage d'hétérogénéité à partir de laquelle l'effet de l'hétérogénéité centrale est prononcé.

En plus, la configuration avec un pourcentage d'hétérogénéité centrale élevé (60C) présente la plus grande efficacité de rétention dans la couche aval (T1). Ce résultat est cohérent avec notre analyse concernant le processus de filtration, la masse érodée relative, et confirme que la couche aval joue le rôle principal dans le contrôle de la suffusion. Cette configuration (60C) fournit la plus faible susceptibilité à la suffusion par rapport aux configurations d'hétérogénéité testées.

Donc, la présence d'une hétérogénéité abordée par une couche plus grossière diminue sa capacité de rétention et peut augmenter la capacité d'une autre couche sous-jacente, comme dans le cas de la couche aval (T1) dans la configuration (60C).

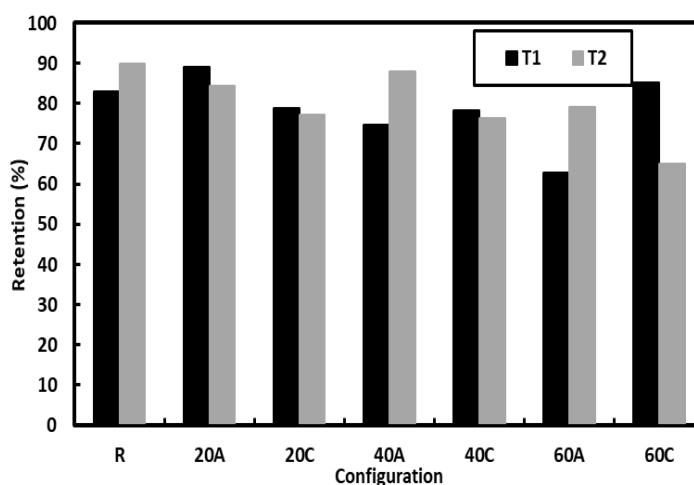
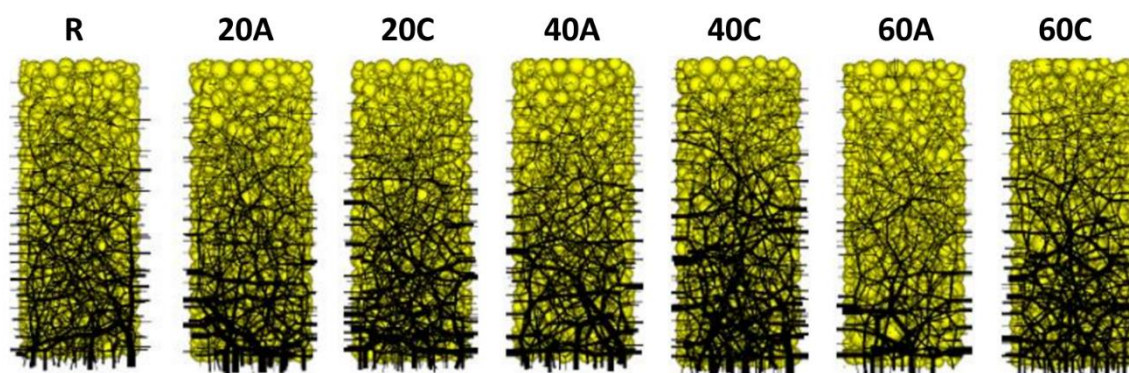


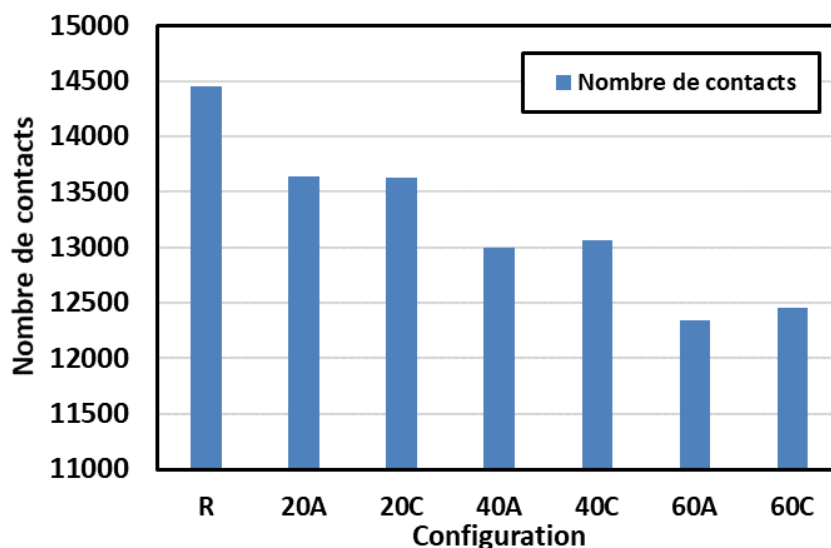
Figure 6.15 Efficacité de rétention dans chaque couche selon la configuration testée

6.2.4.4 Forces de contact

Les forces de contact sont les forces résultantes des interactions particule-particule et particule-paroi. Elles sont calculées en utilisant le modèle de contact linéaire (section 6.2.2.1). Ces chaînes de force nous aident à comprendre le comportement du milieu granulaire vis-à-vis de la suffusion. La **Figure 6.16.a** présente la chaîne de forces de contact après les essais d'érosion pour le gradient hydraulique $i=3$, pour toutes les configurations testées. On observe que dans tous les cas, les forces de contact dans la couche amont (T3) sont les plus faibles, tandis que dans la couche aval (T1) elles sont les plus élevées. Cela montre l'état de contraintes fortes auxquelles est soumise la couche aval. Il est également observé que la distribution des forces de contact dans les spécimens érodés diffère de plus d'un ordre de grandeur. Ce comportement peut être attribué à l'augmentation de la contrainte appliquée (gravité) de la partie amont vers la partie aval, sous l'effet du flux appliqué. Cette observation est similaire à celle obtenue par **Hu et al (2019)**, qui démontre que les chaînes de force près de la limite aval sont plus grandes. On constate également que les forces de la chaîne de contact montrent une distribution hétérogène, même dans la configuration de référence qui présente une distribution uniforme de la taille des grains. Chaque distribution granulométrique correspond à un état critique unique de la connectivité des particules. La connectivité globale des particules (**Figure 6.16.b**) dans toutes les configurations diminue après l'introduction des particules grossières, en particulier dans le cas d'un pourcentage d'hétérogénéité élevé (60A) qui est la configuration la plus érodable. On peut également noter que les configurations centrales (20C, 40C, 60C) ont autant de contact que (20A, 40A, 60A), respectivement. Donc, le nombre de contact diminue avec l'introduction des hétérogénéités, il est moins affectée par la localisation de l'hétérogénéité.



(a)



(b)

Figure 6.16 a) Chaîne de force post-érosion, b) nombre de contacts ($i=3$)

6.3 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Dans le but de comparer les résultats du modèle numérique, plusieurs essais expérimentaux sont effectués avec les mêmes matériaux et les mêmes conditions appliquées dans les simulations numériques. Les configurations expérimentalement testées sont les suivantes : R, 40A, 40C, 60A, 60C.

Cette partie présente la procédure de reconstitution des échantillons, ensuite, une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux de la modélisation numérique seront présentées afin de vérifier la validité du modèle numérique. Finalement, une analyse d'images par tomographie à rayons X est effectuée pour décrire qualitativement la microstructure de chacune des configurations testées.

6.3.1 Modélisation physique

Les essais sont réalisés dans la même colonne de suffusion ($d=50$ mm, $h=120$ mm) sur des billes de verre de même caractéristiques que celles testées dans le chapitre 3 (Figure 6.17). Plusieurs configurations générées dans l'étude numérique sont sélectionnées afin de les reproduire expérimentalement: R, 40A, 40C, 60A, 60C. Les courbes granulométriques de matériaux testées sont présentées dans la Figure 6.3. La procédure de préparation et de remplissage est similaire à celle détaillée dans le chapitre 3. La porosité est fixée à 0.3. Les échantillons sont soumis à un gradient hydraulique constant égal à 3, afin de les comparer avec les résultats obtenus par les simulations numériques pour le même gradient ($i=3$). La durée totale des essais est proche de 3 heures et on suppose qu'elle est suffisante pour comparer avec les résultats des simulations numériques.

Par ailleurs, des scans par tomographie à rayons X avant et après essai de suffusion ont été effectués avec les mêmes paramètres d'entrée (Puissance, Intensité, résolution) du chapitre 3. La procédure suivie dans cette étude expérimentale est similaire à celle effectuée dans le

chapitre 3, mais avec un gradient constant ($i=3$) et en changeant la granulométrie des billes de verre, l'ouverture de la grille en aval (1.5 mm), et les configurations d'hétérogénéité.

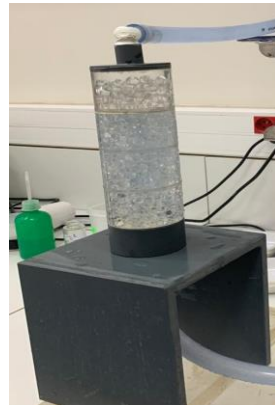


Figure 6.17 Vue de la colonne de suffusion

6.3.2 Résultats et discussions

Dans cette partie, une comparaison des résultats expérimentaux et numériques est réalisée afin de valider le modèle. On s'intéresse dans un premier temps à une analyse quantitative en termes de masse relative érodée tout en vérifiant la répétabilité de l'essai. Ensuite, une simple analyse qualitative est effectuée à partir d'analyse d'images des scans post suffusion.

6.3.2.1 Masse relative érodée

La masse relative érodée est le rapport de la masse érodée par rapport à la masse initiale des fines. Elle constitue un paramètre principal pour évaluer la susceptibilité à l'érosion d'un sol. Les particules érodables sont de diamètre compris entre 1 mm et 1,5 mm. A la fin de chaque essai, ces particules érodées sont récupérées dans un tamis d'ouverture 20 μm . Ensuite, elles sont séchées pour déterminer la masse érodée cumulée. La masse relative érodée correspond au rapport de la masse érodée cumulée sur la masse initiale des particules fines. Le **Tableau 6.4** présente la masse relative érodée pour chaque configuration testée. Avant l'analyse des résultats de nos essais, il faut d'abord vérifier la répétabilité des essais en validant au minimum deux essais pour chaque configuration. Ainsi pour évaluer cette répétabilité, l'écart type est calculé. Les résultats (**Tableau 6.4**) montrent que l'écart type maximal est de 2.5 % dans la configuration de référence (R). Cet écart étant acceptable, la répétabilité des essais est donc vérifiée.

Tableau 6.4 Evaluation de la précision de deux essais de suffusion pour chaque configuration testée

	R	40A	40C	60A	60C
Masse relative 1 (%)	12.4	25.7	20.8	33	18.7
Masse relative 2 (%)	16	26	23	30	17
Ecart type (%)	2.5	0.27	1.5	2.1	1.2

La **Figure 6.18** présente la masse relative érodée obtenue des simulations numériques et des essais expérimentaux pour chacune des configurations testées. Les résultats de ces essais montrent le même classement de la susceptibilité à la suffusion avec l'étude numérique ($R < 60C < 40C < 40A < 60A$). La configuration à forte hétérogénéité aval (60A) est la plus susceptible à la suffusion, alors que celle de référence est la plus résistante. Il est important de noter que l'écart obtenu est lié aux hypothèses du modèle telles que les lois de contact linéaires, et aux conditions expérimentales où il est difficile de reproduire parfaitement à l'identique ces essais.... L'écart type maximale est 2.96% (**Tableau 6.5**). Il est acceptable, donc on peut dire que le modèle numérique est bien validé.

Tableau 6.5 Evaluation de la précision de deux essais de suffusion pour chaque configuration testée

	R	40A	40C	60A	60C
Expérimental	14.2	25.8	21.9	31.5	17.8
Numérique	13.9	21.8	19.2	27.3	18.4
Ecart type (%)	0.21	2.82	1.9	2.96	0.42

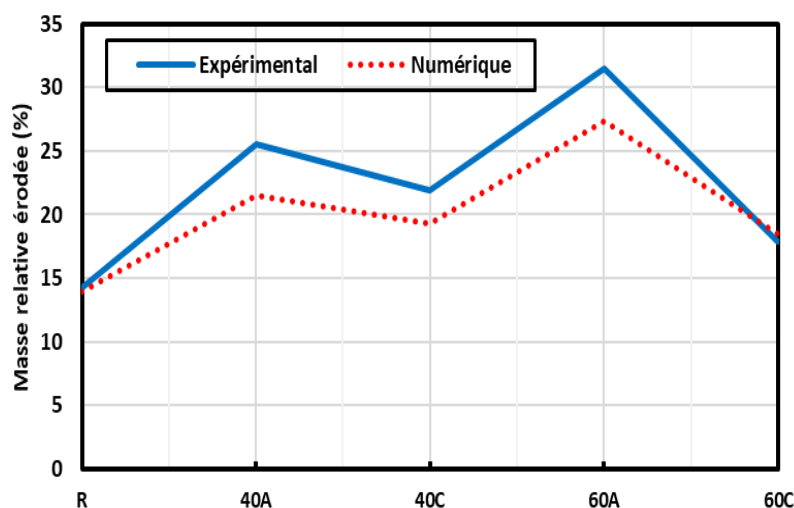


Figure 6.18 Résultats expérimentaux et numériques

6.3.2.2 Analyse d'images par tomographie x

Afin de bien étendre l'analyse de la suffusion à l'échelle des particules, des scans par tomographie x sont effectués après l'essai. L'analyse d'images sur le logiciel Imagej est réalisée en suivant la même procédure détaillée dans le chapitre 3. Cependant, l'analyse est effectuée de façon qualitative en raison des limitations liées à la granulométrie des échantillons testés. En effet, les échantillons reproduits dans l'étude numérique présentent une faible teneur en fines, par conséquent l'efficacité du traitement d'images est faible pour déterminer le changement de la porosité dû au mouvement des fines. Le but de cette analyse est de bien visualiser l'effet des hétérogénéités abordé par l'introduction des particules grossières sur la modification de la structure de l'échantillon. La **Figure 6.19** présente la coupe médiane des différentes configurations testées après suffusion. Les particules fines sont représentatives en termes d'effectif mais pas en termes de pourcentage massique, il est donc difficile de traiter les

particules fines par tomographie. On s'intéresse surtout à la distribution des particules grossières qui constituent le squelette granulaire.

Concernant la distribution des constriction, on voit l'apparition des grandes constriction surtout dans le cas d'une forte hétérogénéité (60 %) alors qu'elles sont plus petites dans la configuration de référence. L'introduction des particules grossières aboutit à la création des grandes constriction, ce qui peut affecter la susceptibilité à la suffusion de l'échantillon, notamment en aval ($40A > 40C$; $60A > 60C$). En effet, la présence de cette hétérogénéité en aval facilite l'érosion des fines qui est observée dans la couche aval de la configuration 60A qui montre une grande fraction de vides et par conséquent on obtient une forte susceptibilité à la suffusion.

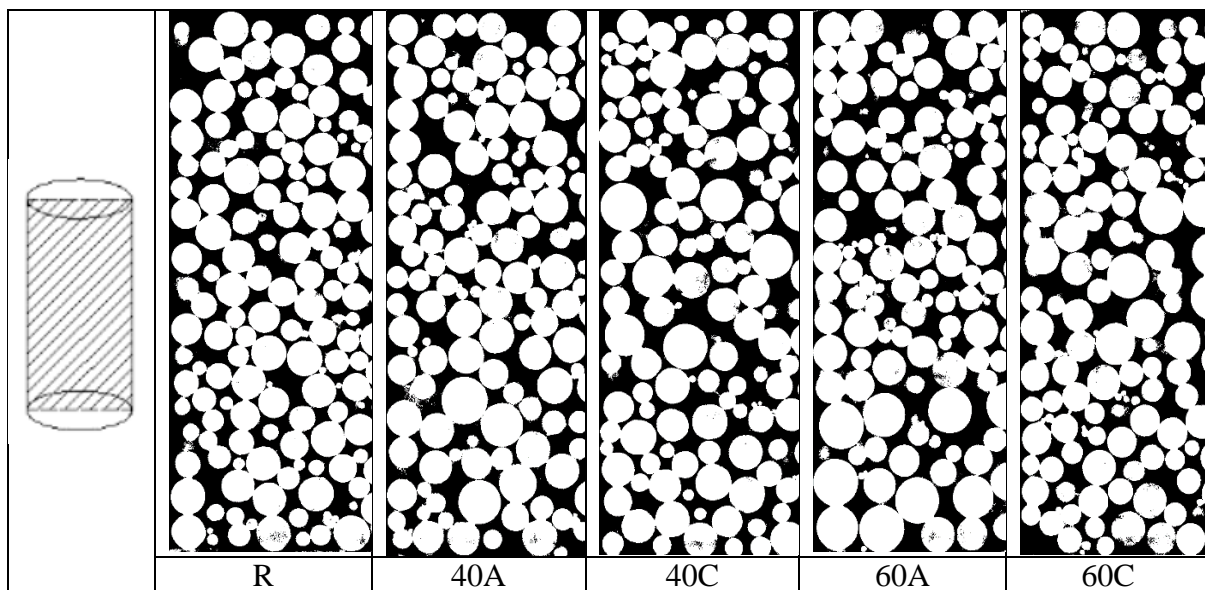


Figure 6.19 Coupe médiane des configurations testées

6.4 Conclusion

Ce chapitre présente une approche CFD-DEM pour modéliser la suffusion dans un sol hétérogène multicouche. L'hétérogénéité est abordée en ajoutant des particules plus grossières à différentes positions (centrale, aval) avec différents pourcentages (20%, 40%, 60%). Les simulations de la suffusion ont été réalisées sur une colonne cylindrique soumise à un écoulement aval. Cette étude nous a permis d'étudier l'effet de telles configurations d'hétérogénéité à l'échelle des particules sur l'érodabilité du matériau. Les principales conclusions sont résumées comme suit :

- L'évolution croissante de l'érosion ne dépend pas de la configuration de l'hétérogénéité. Il y a une augmentation continue de la perte de fines avec le gradient hydraulique.

- Dans l'ensemble des configurations testées, le processus d'érosion est hétérogène même dans l'échantillon avec une distribution granulométrique uniforme (configuration de référence R). Ceci a été observé en termes de forces de contact et de quantité de particules érodées dans chaque couche.

-La configuration en aval fournit plus de suffusion que la configuration centrale. Cette différence de comparaison est plus accentuée dans le cas d'un pourcentage d'hétérogénéité élevé (60%).

-Les résultats montrent que l'érodabilité augmente lorsque le pourcentage d'hétérogénéité augmente dans la couche aval ($20A < 40A < 60A$). Cependant, l'hétérogénéité centrale conduit à l'apparition d'un effet inverse sur la susceptibilité à l'érosion ($20C > 40C > 60C$). L'effet de l'hétérogénéité est plus prononcé si elle est située dans la couche avale.

- En ce qui concerne l'efficacité de la rétention, l'introduction d'un pourcentage élevé d'hétérogénéité dans la couche centrale (60C) peut créer un filtre aval efficace.

- Dans l'ensemble des configurations testées, la couche en aval fournit la perte la plus élevée de particules (érosion), par rapport aux couches en amont. Ainsi, la couche avale joue le rôle de contrôle du processus de suffusion.

Les résultats de cette étude numérique sont confrontés à des résultats d'essais de laboratoire (suffusion et tomographie par rayons X) et une bonne concordance est notée. Le modèle a été validé par la reproduction expérimentale des simulations de suffusion qui a montré une faible différence entre la masse érodée relative numérique et expérimentale. En outre, une comparaison entre les résultats de ce chapitre avec celles des chapitre 4 et 5 converge vers le même synthèse que la configuration aval est plus susceptible à la suffusion que la configuration centrale ; et que la présence d'une hétérogénéité centrale augmente la rétention ce qui peut créer des zones de surpression.

Conclusions générales et perspectives

L'érosion interne est l'une des principales causes d'instabilités des ouvrages hydrauliques dont les conséquences peuvent être dramatiques aux niveaux humaines et économiques. La suffusion, un des processus d'érosion interne, est une érosion sélective des particules fines dans la matrice des particules grossières du sol sous l'effet de l'écoulement. Ce transfert de masse est un processus insoupçonné qui peut conduire à la rupture de l'ouvrage. Malgré les nombreux projets de recherches (ANR, PN « ERINOH ») qui ont été menées dans le but d'améliorer la compréhension du comportement du milieu granulaire vis-à-vis de la suffusion, il reste encore des questions non élucidées, notamment dans l'étude de la suffusion des sols hétérogènes. Cette thèse constitue une contribution à la compréhension des effets des hétérogénéités granulaires sur la suffusion. Ainsi, cette étude constitue une évaluation de la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques en terre vis-à-vis de la structure hétérogène des remblais. Durant cette étude, l'hétérogénéité a été abordée par couches et plusieurs essais ont été effectués sur des milieux différents et avec des colonnes de suffusion de dimensions différentes. De plus, une tomographie 3D aux rayons X a été réalisée sur des échantillons de billes de verre pour étudier l'impact de la suffusion sur la structure du sol hétérogène à l'échelle du pore. Ces études expérimentales ont été complétées par une étude numérique basée sur la modélisation par la méthode des éléments discrets couplée avec la dynamique des fluides (CFD-DEM). Toutes ces études ont été réalisées sur les échantillons présentant des hétérogénéités au centre ou en aval, en changeant notamment l'échelle d'investigation. Les effets des particules fines, du taux et de la position d'hétérogénéité, de la dimension de l'échantillon sur la vulnérabilité à la suffusion ont été évalués. La masse érodée cumulée, le développement des pressions interstitielles locales et la distribution granulométrique post-suffusion, sont discutés.

Dans l'étude à petite échelle, les essais sur les sols sablo-argileux ont montré que La susceptibilité à la suffusion augmente avec l'augmentation du taux d'hétérogénéité, à l'exception de la configuration avec faible hétérogénéité en aval (20%) qui présente un effet inverse (plus résistante que la configuration homogène). Egalement, il est important de prendre en compte l'effet du type de fines en présence des hétérogénéités. L'impact des hétérogénéités augmente lorsque l'érodabilité des particules fines devient plus forte. La présence du Kaolinite est très préjudiciable dans un ouvrage en remblai. L'Illite présente la plus forte résistance à la suffusion et cette argile est moins affectée par les hétérogénéités.

Dans l'expérimentation à grande échelle, en particulier pour les sols grossiers comme les alluvions dans les fondations, la présence des zones hétérogènes à l'intérieur de la structure peut engendrer des surpressions et par conséquent aboutir à une rupture brutale du barrage. Par contre, la présence des hétérogénéités à proximité de l'exutoire peut donner naissance à un processus de succion qui augmente la susceptibilité à la suffusion, mais ce phénomène semble moins dangereux que la présence des fortes hétérogénéités à l'intérieur du corps de barrage.

Un sol sans hétérogénéité présente la plus faible susceptibilité à la suffusion et la configuration d'hétérogénéité avale est la plus érodable. Le processus de suffusion est toujours accompagné par une diminution de la perméabilité hydraulique liée au processus de filtration quel que soit la configuration d'hétérogénéité testée.

La tomographie à rayons X a montré que la mise en place des matériaux en plusieurs couches de granulométrie différentes augmente la susceptibilité à la ségrégation locale ; ceci est vérifié par la diminution importante de la porosité dans les couches grossières des configurations hétérogènes (avale et centrale). En outre, la présence d'une couche grossière à l'intérieur d'un sol peut conduire à l'augmentation de l'efficacité de rétention dans les couches situées en aval. La suffusion est un processus non uniforme, elle modifie les propriétés du sol différemment le long de l'échantillon.

Les simulations numériques de la suffusion ont montré que l'évolution croissante de la suffusion ne dépend pas de la configuration d'hétérogénéité. Globalement, il y a une augmentation continue de la perte de fines avec l'augmentation du gradient hydraulique. Dans l'ensemble des configurations testées, la couche en aval fournit l'érosion la plus élevée de particules par rapport aux couches en amont. Ainsi, la couche avale devient la couche de contrôle du processus de suffusion. En effet, l'effet des hétérogénéités est plus prononcé si elle est introduite en aval qu'au centre.

Concernant l'effet d'échelle, les résultats ont montré une concordance qualitative entre les essais à grande échelle (chapitre 4), la tomographie à rayons X (chapitre 5), et la numérique (chapitre 6). Ces résultats se convergent sur la même conclusion que la configuration d'hétérogénéité avale est plus susceptible à la suffusion que la centrale, et celle de référence la plus résistante. En outre, il a été montré une augmentation de la susceptibilité à la suffusion lors de la présence d'une forte hétérogénéité, et une tendance de la conductivité hydraulique à décroître. Par contre, quelques différences entre ces résultats avec ceux de la petite colonne (Chapitre 3). Cette différence est expliquée par le type des fines, la granulométrie. La configuration d'hétérogénéité centrale semble plus susceptible à la suffusion que la configuration avale dans la petite colonne (chapitre 3), alors que c'est l'inverse qui se produit dans les autres études (chapitres 4, 5, 6). Ce comportement peut être lié au type de fines qui joue un rôle essentiel dans le processus de détachement et de transport, mais aussi à la taille des particules grossières.

Des expérimentations avec d'autres configurations (distribution aléatoire ou contrôlée) aideront à mieux cerner l'impact de la présence de zones granulaires singulières dans un ouvrage en terre sur sa vulnérabilité vis-à-vis de la suffusion. Enfin, d'autres types d'hétérogénéités localisées (connectées ou pas) peuvent être testées afin d'étudier leurs effets sur la suffusion. Des analyses (par tomographie) de la cinématique des particules durant la suffusion sur un modèle physique plus conséquent seront nécessaires pour comprendre les processus localisés. Pour la suite, il serait intéressant de développer un modèle empirique qui prend en compte la granulométrie, la localisation d'hétérogénéité, et l'épaisseur de chaque couche pour évaluer la susceptibilité à la suffusion d'un sol hétérogène. En plus, l'application d'un champ de contraintes (verticales ou de confinement triaxial) pourrait contribuer à mieux comprendre l'effet des hétérogénéités sur les ouvrages dans leur environnement et l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement mécanique (dilatance ou contractance) de ces sols hétérogènes suite à la suffusion.

Références bibliographiques

- Åberg, B., 1993. Washout of Grains from Filtered Sand and Gravel Materials. *Journal of Geotechnical Engineering* 119, 36–53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(36))
- Aboul Hosn, R., Benahmed, N., Nguyen, C.D., Sibille, L., Philippe, P., Chareyre, B., 2019. Effects of Suffusion on the Soil's Mechanical Behavior: Experimental Investigations, in: Bonelli, S., Jommi, C., Sterpi, D. (Eds.), *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees, Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–15. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9_1
- Aboul Hosn, R., Sibille, L., Benahmed, N., Chareyre, B., 2018. A discrete numerical model involving partial fluid-solid coupling to describe suffusion effects in soils. *Computers and Geotechnics* 95, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.11.006>
- Achmus, M., Abdel-Rahman, K., 2003. The influence of “up-scaling” on the results of particle method calculations of non-cohesive soils, in: *Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods*. Routledge.
- ADEL, H.D., 1988. Internal stability of minestone. *Proc. Int. Symp. Modelling Soil -Water-Structure Interaction* 225–231.
- Ahlinhan, M.F., Achmus, M., 2012. Experimental Investigation of Critical Hydraulic Gradients for Unstable Soils 599–608. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)58](https://doi.org/10.1061/41147(392)58)
- Bambara, G., 2016. Évaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente (phdthesis). Doctorat en Géosciences de l'Environnement.
- Beguin, R., 2011. Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre (phdthesis). Université de Grenoble.
- Belheine, N., Plassiard, J.-P., Donzé, F.-V., Darve, F., Seridi, A., 2009. Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling. *Computers and Geotechnics* 36, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.02.003>
- Benamar, A., 2014. Effect of hydraulic load and water chemistry on soil suffusion. <https://doi.org/10.1201/b17703-24>
- Benamar, A., Correia dos Santos, R.N., Bennabi, A., Karoui, T., 2019. Suffusion evaluation of coarse-graded soils from Rhine dikes. *Acta Geotech.* 14, 815–823. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00782-1>
- Benamar, A., Karoui, T., Bennabi, A., Seghir, A., Wang, H., 2012. Influence of fine particles on internal erosion of sandy Soils, in: *International Conference on Scour and Erosion (ICSE)*, August. pp. 27–31.
- Bendahmane, F., Marot, D., Alexis, A., 2008. Experimental Parametric Study of Suffusion and Backward Erosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 134, 57–67. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:1\(57\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:1(57))
- Bender, E., 1981. Numerical heat transfer and fluid flow. Von S. V. Patankar. Hemisphere Publishing Corporation, Washington – New York – London. McGraw Hill Book Company, New York 1980. 1. Aufl., 197 S., 76 Abb., geb., DM 71,90. *Chemie Ingenieur Technik* 53, 225–225. <https://doi.org/10.1002/cite.330530323>

- Bi, J., Luo, X., Shen, H., 2021. Modeling of Suffusion Considering the Influence of Soil Gradation. *Transp Porous Med* 136, 765–790. <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01534-6>
- Bianchi, F., Wittel, F.K., Thielmann, M., Trtik, P., Herrmann, H.J., 2018. Tomographic Study of Internal Erosion of Particle Flows in Porous Media. *Transp Porous Med* 122, 169–184. <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0996-8>
- Blunt, M.J., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi, O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., Paluszny, A., Pentland, C., 2013. Pore-scale imaging and modelling. *Advances in Water Resources*, 35th Year Anniversary Issue 51, 197–216. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.003>
- Bui, H.H., Fukagawa, R., Sako, K., Ohno, S., 2008. Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic–plastic soil constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 32, 1537–1570. <https://doi.org/10.1002/nag.688>
- Burenkova, V.V., 1993 . Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. *Filters in geotechnical and hydraulic engineering*. Balkema, Rotterdam 357–360.
- Campbell, C.S., Cleary, P.W., Hopkins, M., 1995. Large-scale landslide simulations: Global deformation, velocities and basal friction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 100, 8267–8283. <https://doi.org/10.1029/94JB00937>
- Catalano, E., Chareyre, B., Barthélémy, E., 2014. Pore-scale modeling of fluid-particles interaction and emerging poromechanical effects. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 38, 51–71. <https://doi.org/10.1002/nag.2198>
- Chang, D., 2012. Internal erosion and overtopping erosion of earth dams and landslide dams [WWW Document].
- Chang, D.S., Zhang, L., 2011. A Stress-controlled Erosion Apparatus for Studying Internal Erosion in Soils. *Geotechnical Testing Journal* 34. <https://doi.org/10.1520/GTJ103889>
- Chang, D.S., Zhang, L.M., 2013. Critical Hydraulic Gradients of Internal Erosion under Complex Stress States. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139, 1454–1467. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000871](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000871)
- Chareyre, B., Cortis, A., Catalano, E., Barthélemy, E., 2012. Pore-Scale Modeling of Viscous Flow and Induced Forces in Dense Sphere Packings. *Transp Porous Med* 94, 595–615. <https://doi.org/10.1007/s11242-012-0057-2>
- Cheng, K., Wang, Y., Yang, Q., 2018. A semi-resolved CFD-DEM model for seepage-induced fine particle migration in gap-graded soils. *Computers and Geotechnics* 100, 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.004>
- Cividini, A., Bonomi, S., Vignati, G.C., Gioda, G., 2009. Seepage-Induced Erosion in Granular Soil and Consequent Settlements. *International Journal of Geomechanics* 9, 187–194. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2009\)9:4\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:4(187))
- Crosta, G.B., Imposimato, S., Roddeman, D., 2009. Numerical modeling of 2-D granular step collapse on erodible and nonerodible surface. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 114. <https://doi.org/10.1029/2008JF001186>

- Cui, Y., Nouri, A., Chan, D., Rahmati, E., 2016. A new approach to DEM simulation of sand production. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 147, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.05.007>
- Cundall, P.A., 1971. A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system, in: *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, 1971.
- Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 29, 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M., Mazerolle, F., 1996. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique* 46, 529–546. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.3.529>
- Dikinya, O., Hinz, C., Aylmore, G., 2008. Decrease in hydraulic conductivity and particle release associated with self-filtration in saturated soil columns. *Geoderma* 146, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.014>
- Dong, H., Blunt, M.J., 2009. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images. *Phys. Rev. E* 80, 036307. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.036307>
- Elandaloussi, R., Bennabi, A., Dupla, J.C., Canou, J., Benamar, A., Gotteland, P., 2019. Effectiveness of Lime Treatment of Coarse Soils Against Internal Erosion. *Geotech Geol Eng* 37, 139–154. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0598-4>
- ERGUN, S., 1952. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.* 48, 89–94.
- Fan, M., McClure, J., Han, Y., Li, Z., Chen, C., 2018. Interaction Between Proppant Compaction and Single-/Multiphase Flows in a Hydraulic Fracture. *SPE Journal* 23, 1290–1303. <https://doi.org/10.2118/189985-PA>
- Fannin, R.J., Moffat, R., 2006. Observations on internal stability of cohesionless soils. *Géotechnique* 56, 497–500. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.7.497>
- Fell, R., 2005. *Geotechnical Engineering of Dams*. CRC Press.
- Fell, R., Fry, J.-J., 2013. State of The Art on the Likelihood of Internal Erosion of Dams and Levees by Means of Testing, in: *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–99. <https://doi.org/10.1002/9781118577165.ch1>
- Fleshman, M.S., Rice, J.D., 2014. Laboratory Modeling of the Mechanisms of Piping Erosion Initiation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 140, 04014017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001106](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001106)
- Fonseca, J., Sim, W. w., Shire, T., O’sullivan, C., 2014. Microstructural analysis of sands with varying degrees of internal stability. *Géotechnique* 64, 405–411. <https://doi.org/10.1680/geot.13.T.014>
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000a. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Can. Geotech. J.* 37, 1025–1061. <https://doi.org/10.1139/t00-029>
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000b. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Can. Geotech. J.* 37, 1000–1024. <https://doi.org/10.1139/t00-030>
- Frost, J.D., Park, J.Y., 2003. A critical assessment of the moist tamping technique. *Geotechnical Testing Journal* 26, 57–70.

- Garner, S.J., Fannin, R.J., 2010. Understanding internal erosion: A decade of research following a sinkhole event. *International Journal on Hydropower and Dams* 17, 93–98.
- Ge, W., Li, J., 2001. Macro-scale pseudo-particle modeling for particle-fluid systems. *Chin. Sci. Bull.* 46, 1503–1507. <https://doi.org/10.1007/BF02900568>
- Govindaraju, R.S., Reddi, L.N., Kasavaraju, S.K., 1995. A physically based model for mobilization of kaolinite particles under hydraulic gradients. *Journal of Hydrology* 172, 331–350. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02737-A](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02737-A)
- Hall, S. a., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G., BÉSUELLE, P., 2010. Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation. *Géotechnique* 60, 315–322. <https://doi.org/10.1680/geot.2010.60.5.315>
- Hama, N.A., Ouahbi, T., Taibi, S., Souli, H., Fleureau, J.-M., Pantet, A., 2019. Relationships between the internal erosion parameters and the mechanical properties of granular materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 23, 1368–1380. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1347526>
- Hama, N.A., Ouahbi, T., Taibi, S., Souli, H., Fleureau, J.M., Pantet, A., 2016. Analysis of mechanical behaviour and internal stability of granular materials using discrete element method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 40, 1712–1729. <https://doi.org/10.1002/nag.2510>
- Hasan, A., Alshibli, K. a., 2010. Experimental assessment of 3D particle-to-particle interaction within sheared sand using synchrotron microtomography. *Géotechnique* 60, 369–379. <https://doi.org/10.1680/geot.2010.60.5.369>
- Hertz, H., 1882. Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92, 22.
- Hu, Z., Zhang, Y., Yang, Z., 2020. Suffusion-Induced Evolution of Mechanical and Microstructural Properties of Gap-Graded Soils Using CFD-DEM. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 146, 04020024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002245)
- Hu, Z., Zhang, Y., Yang, Z., 2019. Suffusion-induced deformation and microstructural change of granular soils: a coupled CFD-DEM study. *Acta Geotech.* 14, 795–814. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00789-8>
- Huang, Q., Zhan, M., Sheng, J., Luo, Y., Su, B., 2014. Investigation of fluid flow-induced particle migration in granular filters using a DEM-CFD method. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* 26, 406–415. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60046-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60046-9)
- Indraratna, B., Raut, A.K., Khabbaz, H., 2007. Constriction-Based Retention Criterion for Granular Filter Design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133, 266–276. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:3\(266\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:3(266))
- Istomina, V.S., 1957. Filtration stability of soils. *Gostroizdat, Moscow, Leningrad* 15.
- J. A. M. Kuipers, W. P. M. van Swaaij, 1997. APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TO CHEMICAL REACTION ENGINEERING. *Reviews in Chemical Engineering* 13, 1–118. <https://doi.org/10.1515/REVCE.1997.13.3.1>

- Jiang, M.J., Yu, H.-S., Harris, D., 2005. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance. *Computers and Geotechnics* 32, 340–357. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.05.001>
- Karoui, T., 2015. Etude expérimentale de l'érosion de sols homogènes et hétérogènes (These de doctorat). Le Havre.
- Kawano, K., Shire, T., O'Sullivan, C., 2018. Coupled particle-fluid simulations of the initiation of suffusion. *Soils and Foundations* 58, 972–985. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.05.008>
- Ke, L., Takahashi, A., 2014a. Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil. *Soils and Foundations* 54, 713–730. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.06.024>
- Ke, L., Takahashi, A., 2014b. Triaxial Erosion Test for Evaluation of Mechanical Consequences of Internal Erosion. *Geotechnical Testing Journal* 37, 347–364. <https://doi.org/10.1520/GTJ20130049>
- Ke, L., Takahashi, A., 2012. Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow. *Soils and Foundations* 52, 698–711. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.010>
- Kenney, T.C., Lau, D., 1986. Internal stability of granular filters: Reply. *Can. Geotech. J.* 23, 420–423. <https://doi.org/10.1139/t86-068>
- Kenney, T.C., Westland, J., 1993. Laboratory study of segregation of granular filter materials. *Filters in geotechnical and hydraulic engineering* 313–319.
- Kezdi, A., 1979. SOIL PHYSICS - SELECTED TOPICS - DEVELOPMENTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING - 25.
- Klingbeil, R., Kleineidam, S., Asprion, U., Aigner, T., Teutsch, G., 1999. Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits. *Sedimentary Geology* 129, 299–310. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00067-6)
- Kovacs, G., 1981. Seepage hydraulics, *Developments in water science*. Elsevier Scientific Pub. Co. : distribution for the U.S.A. and Canada, Elsevier/North-Holland, Amsterdam ; New York.
- Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin, A.L., 1989. Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 115, 1747–1768.
- Li, M., Fannin, R. j., 2012. A theoretical envelope for internal instability of cohesionless soil. *Géotechnique* 62, 77–80. <https://doi.org/10.1680/geot.10.T.019>
- Li, M., Fannin, R.J., 2008. Comparison of two criteria for internal stability of granular soil. *Can. Geotech. J.* 45, 1303–1309. <https://doi.org/10.1139/T08-046>
- Liang, Y., Yeh, T.-C.J., Wang, J., Liu, M., Zha, Y., Hao, Y., 2019. Onset of suffusion in upward seepage under isotropic and anisotropic stress conditions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 23, 1520–1534. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1359110>
- Locke, M., Indraratna, B., Adikari, G., 2001. Time-Dependent Particle Transport through Granular Filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127, 521–529. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:6\(521\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:6(521))

- Lominé, F., Scholtès, L., Sibille, L., Poullain, P., 2013. Modeling of fluid–solid interaction in granular media with coupled lattice Boltzmann/discrete element methods: application to piping erosion. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 37, 577–596. <https://doi.org/10.1002/nag.1109>
- Lunt, I.A., Bridge, J.S., Tye, R.S., 2004. A quantitative, three-dimensional depositional model of gravelly braided rivers. *Sedimentology* 51, 377–414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00627.x>
- Luo, Y., Huang, Y., 2020. Effect of open-framework gravel on suffusion in sandy gravel alluvium. *Acta Geotechnica* 15, 2649–2664. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00933-9>
- Luo, Y., Qiao, L., Liu, X., Zhan, M., Sheng, J., 2013. Hydro-mechanical experiments on suffusion under long-term large hydraulic heads. *Nat Hazards* 65, 1361–1377. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0415-y>
- Luo, Y., Zhang, X., Xiao, M., 2020. Influence of constriction-based retention ratio on suffusion in double-layered alluvial foundation with a cutoff wall. *Soils and Foundations* 60, 1489–1506. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.10.002>
- Mao, C.-X., 2005. Study on piping and filters: Part I of piping. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics* 26, 209–215.
- Marot, D., Bendahmane, F., Nguyen, H.H., 2012. Influence of angularity of coarse fraction grains on internal erosion process. *La Houille Blanche* 47–53. <https://doi.org/10.1051/lhb/2012040>
- Mays, D.C., Hunt, J.R., 2005. Hydrodynamic Aspects of Particle Clogging in Porous Media. *Environ. Sci. Technol.* 39, 577–584. <https://doi.org/10.1021/es049367k>
- McCarthy, J., Zachara, J., 1989. ES&T Features: Subsurface transport of contaminants. *Environmental science & technology* 23, 496–502.
- Mehdizadeh, Amirhassan, Disfani, M., 2018. Micro Scale Study of Internal Erosion using 3D X-Ray Tomography.
- Mehdizadeh, A., Disfani, M.M., 2018. Micro scale study of internal erosion using 3D X-Ray tomography, in: *Scour and Erosion IX: Proceedings of the 9th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2018)*. p. 19.
- Milligan, V., 2003. Some Uncertainties in Embankment Dam Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129, 785–797. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:9\(785\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:9(785))
- MINDLIN, R.D., 1953. Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces. *J. Applied Mech.* 20, 327–344.
- Moffat, R., 2005. Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils. University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0063322>
- Moffat, R., Fannin, R.J., 2011. A hydromechanical relation governing internal stability of cohesionless soil. *Can. Geotech. J.* 48, 413–424. <https://doi.org/10.1139/T10-070>
- Moffat, R., Fannin, R.J., Garner, S.J., 2011. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil. *Can. Geotech. J.* 48, 399–412. <https://doi.org/10.1139/T10-071>

- Moffat, R., Herrera, P., 2015. Hydromechanical model for internal erosion and its relationship with the stress transmitted by the finer soil fraction. *Acta Geotech.* 10, 643–650. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0326-z>
- Moghadasi, J., Müller-Steinhagen, H., Jamialahmadi, M., Sharif, A., 2004. Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 43, 163–181. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2004.01.005>
- Nguyen, C.D., 2018. Etude expérimentale de l'impact de l'érosion par suffusion sur les propriétés physiques et mécaniques des sols (These de doctorat). Aix-Marseille.
- Nguyen, C.D., Benahmed, N., Andò, E., Sibille, L., Philippe, P., 2019. Experimental investigation of microstructural changes in soils eroded by suffusion using X-ray tomography. *Acta Geotech.* 14, 749–765. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00787-w>
- Oda, M., Iwashita, K., 2000. Study on couple stress and shear band development in granular media based on numerical simulation analyses. *International Journal of Engineering Science* 38, 1713–1740. [https://doi.org/10.1016/S0020-7225\(99\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7225(99)00132-9)
- Oueidat, M., Benamar, A., Bennabi, A., 2021. Effect of Fine Particles and Soil Heterogeneity on the Initiation of Suffusion. *Geotech Geol Eng* 39, 2359–2371. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01632-8>
- Pachideh, V., Hosseini, S.M.M.M., 2018. A New Physical Model for Studying Flow Direction and Other Influencing Parameters on the Internal Erosion of Soils. *GTJ* 42, 1431–1456. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170301>
- Pham, T., 2008. Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide (These de doctorat). Paris
- Prasomsri, J., Shire, T., Takahashi, A., 2021. Effect of fines content on onset of internal instability and suffusion of sand mixtures. *Géotechnique Letters* 11, 209–214. <https://doi.org/10.1680/jgele.20.00089>
- Ripley, C.F., 1986. Internal stability of granular filters: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*.
- Rochim, A., Marot, D., Sibille, L., Thao Le, V., 2017. Effects of Hydraulic Loading History on Suffusion Susceptibility of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 143, 04017025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001673](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001673)
- Royet, P., 2005. Internal erosion problems encountered on dams and dikes in France (historical cases), in: *Workshop on Internal Erosion*.
- Sail, Y., Marot, D., Sibille, L., Alexis, A., 2011. Suffusion tests on cohesionless granular matter. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15, 799–817. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9693366>
- Salehi Sadaghiani, M.R., Witt, K.J., 2011. Experimental identification of mobile particles in suffusible non cohesive soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15, 1155–1165. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9714846>
- Sanchez, R.L., Strutynsky, A.I., Silver, M.L., 1983. Evaluation of the Erosion Potential of Embankment Core Materials Using the Laboratory Triaxial Erosion Test Procedure. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS GEOTECHNICAL LAB.

- Scholtès, L., Hicher, P.-Y., Sibille, L., 2010. Multiscale approaches to describe mechanical responses induced by particle removal in granular materials. *Comptes Rendus Mécanique, Micromechanics of granular materials* 338, 627–638. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2010.10.003>
- Seghir, A., Benamar, A., Wang, H., 2014. Effects of Fine Particles on the Suffusion of Cohesionless Soils. *Experiments and Modeling. Transp Porous Med* 103, 233–247. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0299-2>
- Shafipour, R., Soroush, A., 2008. Fluid coupled-DEM modelling of undrained behavior of granular media. *Computers and Geotechnics* 35, 673–685. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.12.003>
- Sherard, J., 1979. Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils. 13th Int, in: *Congress on Large Dams, New Delhi*. p. R2.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Talbot, J.R., 1984. Filters for Silts and Clays. *Journal of Geotechnical Engineering* 110, 701–718. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:6\(701\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:6(701))
- Sibille, L., Marot, D., Sail, Y., 2015. A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter. *Acta Geotech.* 10, 735–748. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0388-6>
- Skempton, A.W., Brogan, J.M., 1994. Experiments on piping in sandy gravels. *Géotechnique* 44, 449–460. <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.3.449>
- SOULI, H., FLEUREAU, J.-M., ANDRIANATREHINA, L., PHAN, Q.T., 2011. *Compte-rendu des essais sur les alluvions du Rhône. Rapport final (Décembre 2011)*.
- Sterpi, D., 2003. Effects of the Erosion and Transport of Fine Particles due to Seepage Flow. *International Journal of Geomechanics* 3, 111–122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2003\)3:1\(111\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2003)3:1(111))
- Suits, L., Sheahan, T., Frost, J., Park, J.-Y., 2003. A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique. *Geotechnical Testing Journal - GEOTECH TESTING J* 26. <https://doi.org/10.1520/GTJ11108J>
- Suits, L., Sheahan, T., Moffat, R., Fannin, R., 2006. A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soils. *Geotechnical Testing Journal - GEOTECH TESTING J* 29. <https://doi.org/10.1520/GTJ100021>
- "Sutherland, K., Grabinsky, M., 2003. Evaluating segregation in granular filters for earth dams. BiTech Publishers Ltd., Richmond, BC (Canada), Canadian Geotechnical Society, Winnipeg, MB (Canada); International Association of Hydrogeologists, Canadian National Chapter, Waterloo, ON (Canada); North American Geosynthetics Society, Alliston, ON (Canada).
- Taylor, H.F., O'Sullivan, C., Sim, W.W., 2016. Geometric and Hydraulic Void Constrictions in Granular Media. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 142, 04016057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001547](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001547)
- Terzaghi, K., 1939. 45th james forrest lecture, 1939. soil mechanics - a new chapter in engineering science. *Journal of the Institution of Civil Engineers* 12, 106–142. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1939.14534>

- Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T., 1992. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technology* 71, 239–250. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)88030-L](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L)
- Ul Haq, I., Haq, I.U., 1996. Tarbela dam: resolution of seepage. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering* 119, 49–56. <https://doi.org/10.1680/igeng.1996.28135>
- Volk, A., Ghia, U., Stoltz, C., 2017. Effect of grid type and refinement method on CFD-DEM solution trend with grid size. *Powder Technology* 311, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.088>
- Wan, C.F., Fell, R., 2008. Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 134, 401–407. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:3\(401\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(401))
- Wan, C.F., Fell, R., 2004. Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130, 373–380. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(373))
- Yacine, S., 2012. Caractérisation expérimentale de l'érosion de volume de matériaux pulvérulents.
- Yazdchi, K., Luding, S., 2013. Upscaling and microstructural analysis of the flow-structure relation perpendicular to random, parallel fiber arrays. *Chemical Engineering Science* 98, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.04.049>
- Yu, A.B., Xu, B.H., 2003. Particle-scale modelling of gas–solid flow in fluidisation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 78, 111–121. <https://doi.org/10.1002/jctb.788>
- Zhang, D., Whiten, W.J., 1996. The calculation of contact forces between particles using spring and damping models. *Powder Technology, Research of Powder Technology in Australia* 88, 59–64. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(96\)03104-X](https://doi.org/10.1016/0032-5910(96)03104-X)
- Zhang, F., Wang, T., Liu, F., Peng, M., Furtney, J., Zhang, L., 2020. Modeling of fluid-particle interaction by coupling the discrete element method with a dynamic fluid mesh: Implications to suffusion in gap-graded soils. *Computers and Geotechnics* 124, 103617. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103617>
- Zhao, T., 2014. Investigation of landslide-induced debris flows by the DEM and CFD (PhD Thesis). Oxford University, UK.
- Zhou, S., Zhang, X., Wu, D., Di, H., 2018. Mathematical Modeling of Slurry Infiltration and Particle Dispersion in Saturated Sand. *Transp Porous Med* 124, 91–116. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1054-x>
- Zhou, Z.Y., Kuang, S.B., Chu, K.W., Yu, A.B., 2010. Discrete particle simulation of particle–fluid flow: model formulations and their applicability. *Journal of Fluid Mechanics* 661, 482–510. <https://doi.org/10.1017/S002211201000306X>

Résumé

Ce travail de recherche a pour but de caractériser les mécanismes de suffusion dans les sols présentant une hétérogénéité structurale par couches (centrale, avale) et de mettre en évidence leur influence sur l'initiation et le développement de la suffusion. Deux approches ont été adoptées: l'une expérimentale et l'autre numérique (éléments discrets). L'étude expérimentale a été menée avec des colonnes soumises à un écoulement vertical descendant sur un sable moyen et un sol grossier (graves du Rhin-France) provenant d'une digue, puis sur des billes de verre pour établir une comparaison avec les résultats numériques. Le développement de la suffusion et ses conséquences ont été analysés en utilisant la masse érodée cumulée, la granulométrie post-suffusion, la variation du gradient hydraulique local et de la perméabilité. Ainsi, le transfert des particules dans un sol hétérogène sous l'effet de la suffusion a été exploré à l'échelle du pore en utilisant la tomographie à rayons X. Les résultats ont montré que l'hétérogénéité dans la couche avale joue un rôle important dans le contrôle du processus de suffusion. La présence d'une hétérogénéité centrale conduit à l'augmentation de l'efficacité de rétention des particules érodées en aval. La partie numérique, basée sur une modélisation CFD-DEM a permis de simuler des essais de suffusion en utilisant le logiciel PFC^{3D} afin d'évaluer le rôle de chaque couche et leur interaction vis-à-vis de ce processus. La confrontation des résultats numériques à ceux obtenus par un essai de suffusion montre une concordance et valident l'approche numérique.

Mots clés : Suffusion, Fluide, Hétérogénéité, Eléments Discrets (DEM), Tomographie.

Abstract

The aim of this research work is to characterize the suffusion mechanisms in soils with structural heterogeneity by layers (central, downstream) and to highlight their influence on the initiation and development of suffusion. Two approaches were adopted: one experimental and the other numerical (discrete elements). The experimental study was conducted with columns subjected to vertical downward flow on medium sand and coarse soil (Rhine gravel) from a dike, and then on glass beads for comparison with numerical results. The development of suffusion and its consequences were analyzed using cumulative eroded mass, post-suffusion granulometry, variation of local hydraulic gradient and permeability. It is therefore necessary to conduct a complementary study that takes into account the transport and retention of fine particles in the soil. Thus, the transfer of particles in a heterogeneous soil under the effect of suffusion was explored at the pore scale using X-ray tomography. The results showed that heterogeneity in the downstream layer plays an important role in controlling the suffusion process. The presence of a central heterogeneity leads to an increase in the retention efficiency of the eroded particles downstream. The numerical part, based on a CFD-DEM modeling, allowed to simulate suffusion tests using the PFC3D software in order to evaluate the role of each layer and their interaction towards this process. The comparison of the numerical results with those obtained by a suffusion test shows a concordance and validates the numerical approach.

Key words: Suffusion, Fluid, Heterogeneity, Discrete Elements (DEM), Tomography.