

ÉTUDE DES CRITÈRES DE STABILITÉ INTERNE DES MATÉRIAUX GRANULAIRES POUR OUVRAGES EN REMBLAI

par

Céline BOUIN

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTREAL, LE 17 DÉCEMBRE 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Céline Bouin, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Yannic A. Éthier, directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Sébastien Dubé, codirecteur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Marc Robert, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. François Duhaime, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Benoît Courcelles, examinateur externe
Département des génies civil, géologique et des mines à Polytechnique Montréal

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 20 NOVEMBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Cette thèse a pu voir le jour grâce aux nombreuses personnes qui m’ont entourée au fil de ces années. Je ne pourrais toutes les nommer, mais j’espère que chacune se reconnaîtra.

Je souhaite toutefois remercier tout particulièrement Alexis Vadeboncoeur et Simon Weber, qui m’ont guidée dans la découverte de la recherche scientifique, un univers entièrement nouveau pour moi à mon arrivée au Québec.

J’adresse également une pensée spéciale à ma famille, dont le soutien constant m’a permis d’aller au bout de ce projet d’études, devenu peu à peu un véritable projet de vie. Je tiens à remercier plus particulièrement ma sœur, Camille Bouin, dont le soutien moral inconditionnel m’a accompagnée tout au long de ce parcours. Grâce à ses talents de graphiste, elle a su transformer mes croquis en figures de grande qualité, en y apportant sa touche professionnelle et artistique qui lui est propre.

Enfin, je remercie mon conjoint, Maxime St-Jean, rencontré à l’École de technologie supérieure (ÉTS). Il a partagé à la fois ma vie personnelle et, bien malgré lui, ma vie professionnelle. Sa présence à mes côtés a été la principale raison pour laquelle j’ai pu mener ce travail à terme. Grâce à lui, je repars non seulement avec une thèse achevée, mais aussi avec un petit être humain, Raphaël, qui illumine désormais notre quotidien.

Je tiens également à remercier l’Institut de recherche d’Hydro-Québec (IREQ) et Mitacs pour leur soutien financier.

Étude des critères de stabilité interne des matériaux granulaires pour ouvrages en remblai

Céline BOUIN

RÉSUMÉ

Les ouvrages en remblai sont les ouvrages de retenue les plus répandus au Québec. Composés de matériaux géologiques, ils peuvent subir une migration de particules fines sous l'effet de l'écoulement d'eau, un phénomène appelé suffusion. La susceptibilité à cette érosion interne sélective est fortement liée à l'instabilité interne du matériau, laquelle dépend principalement de la forme de sa courbe granulométrique. La méthode la plus fiable pour évaluer cette stabilité consiste à réaliser des essais d'écoulement en laboratoire. Toutefois, ces essais étant longs et coûteux, l'application de critères géométriques fondés sur des caractéristiques granulométriques est généralement privilégiée. Les plus couramment utilisés sont les critères semi-empiriques de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau.

Les approches expérimentale et géométrique présentent toutes deux des limites qui nuisent à une évaluation fiable de la stabilité interne des matériaux géologiques. Les essais d'écoulement montrent une forte variabilité, notamment en raison de l'absence de normalisation, tant dans les procédures expérimentales que dans les paramètres mesurés et les valeurs seuils retenues pour différencier un matériau stable d'un matériau instable. Bien qu'imparfaits, leurs résultats servent de référence pour identifier les avantages et les limites de critères géométriques semi-empiriques, en particulier ceux de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau. Ces critères, généralement jugés conservateurs, sont largement modifiés et/ou combinés, donnant naissance à de nombreux critères dérivés parfois divergents dans leurs évaluations. L'objectif principal de cette thèse est donc d'améliorer l'évaluation de la stabilité interne, afin de renforcer la sécurité des ouvrages en remblai. Le projet s'articule autour de deux sous-objectifs, chacun fondé sur l'une des deux approches existantes d'évaluation de la stabilité interne.

Le premier sous-objectif comporte deux étapes. La première consiste à évaluer plusieurs méthodes de saturation applicables à des matériaux granulaires soumis à un écoulement d'eau. Cette évaluation montre qu'une saturation complète est possible en combinant une méthode éliminant l'air dissous dans l'eau avec une autre chassant l'air dans les pores. Les combinaisons les plus efficaces sont celles couplant un écoulement ascendant d'eau désaérée, obtenue par cavitation sous vide, à une purge de dioxyde de carbone (CO_2) ou à une mise sous vide. La méthode par purge de CO_2 , permettant une saturation complète en un temps réduit, est retenue pour les essais d'écoulement de la seconde étape. Celle-ci vise à établir un critère expérimental rigoureux d'évaluation de la stabilité interne. Des matériaux granulaires grossiers, classés selon leur stabilité interne établie expérimentalement dans la littérature, sont reconstitués avec des billes de verre et testés sous un écoulement d'eau dans un perméamètre à parois rigides conçu pour cette étude. Plusieurs paramètres sensibles à la migration des particules fines sont mesurés et analysés selon l'évaluation de la stabilité interne rapportée dans la littérature. Quatre conditions, chacune associée à deux paramètres définissant la structure interne des matériaux, doivent être satisfaites simultanément pour qu'un matériau soit considéré comme stable.

VIII

Le deuxième objectif concerne l'évaluation comparative de critères semi-empiriques, en particulier ceux de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau, ainsi que leurs dérivés, en vue du développement d'un critère géométrique plus fiable pour évaluer la stabilité interne. Appliqués à diverses courbes granulométriques sélectionnées dans la littérature, leurs résultats sont comparés aux évaluations expérimentales publiées. Deux méthodes distinctes sont retenues selon la forme de la courbe granulométrique: le critère de De Mello pour les courbes discontinues et une combinaison des critères de Sherard (ajusté) et de Kenney & Lau pour les courbes continues.

Mots-clés : suffusion, stabilité interne, essai d'écoulement, saturation, critère géométrique

Study of internal stability criteria of granular materials for embankment structures

Céline BOUIN

ABSTRACT

The most common type of retaining structure in Quebec is the embankment dam. Constructed with geological materials, these dams may suffer from the migration of fine particles under seepage flow, a phenomenon known as suffusion. This selective internal erosion depends largely on the internal stability of the materials, which in turn depends on their grain size distribution (GSD). The most reliable approach to assess the internal stability is through laboratory flow tests. As an alternative to these costly and time-consuming tests, geometric criteria based on the GSD are often applied, with the semi-empirical criteria of Kezdi, Sherard, and Kenney & Lau being the most commonly used.

Both experimental and geometrical approaches have limitations that affect the reliability of internal stability assessment. Flow tests exhibit significant variability across laboratory studies, partly due to a lack of standardization. They differ in their experimental procedures, in the parameters measured during testing, and in the thresholds used to distinguish between stable and unstable materials. Although imperfect, these experimental results are used to identify the advantages and limitations of semi-empirical criteria, in particular those of Kezdi, Sherard and Kenney & Lau. These criteria, generally considered conservative, are often modified and/or combined, resulting in a multitude of derived criteria which may diverge in their assessment of internal stability. The main objective of this thesis is therefore to improve the assessment of internal stability in order to enhance the safety of embankment dams. Two sub-objectives are pursued, each based on one of the two existing approaches to assessing internal stability.

The first sub-objective comprises two stages. The first stage evaluates the efficiency of various methods of saturating granular materials. The results show that complete saturation is achieved by combining a method of removing dissolved air from the water with a method of eliminating air from the pores. The most effective approaches combine an upward seepage flow of deaerated water, produced by cavitation under vacuum, with either a purge of carbon dioxide (CO₂) or vacuum applied at the outlet. The CO₂ purge method, which achieves a complete saturation in a shorter time, is selected for the flow tests of the second stage. This stage aims to establish a rigorous experimental criterion for assessing the internal stability. Coarse granular materials, classified according to their internal stability experimentally established in the literature, were reconstituted with glass beads and tested under seepage flow in a rigid-wall permeameter designed for this study. Parameters sensitive to fine migration were monitored and analyzed according to the published assessment of the internal stability. Four threshold conditions, each associated with two parameters defining the internal structure of the materials, must be satisfied simultaneously for a material to be considered stable.

The second sub-objective is to establish a more reliable geometric criterion for assessing internal stability by comparing various semi-empirical criteria, particularly those of Kezdi, Sherard, and Kenney & Lau, as well as their derivatives. Applied to selected GSDs from the

literature, the results of these assessments are compared with the corresponding published experimental results. The comparison indicates that two methods are required to properly assess internal stability, depending on the GSD form: the De Mello criterion for discontinuous GSDs, and a combination of the modified Sherard and Kenney & Lau criteria for continuous GSDs.

Keywords: suffusion, internal stability, flow test, saturation, geometrical criteria

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
1.1 Généralités sur les ouvrages de retenue	7
1.1.1 Barrages et digues	7
1.1.2 Fonctions multiples des ouvrages de retenue.....	8
1.1.3 Types d'ouvrages de retenue	9
1.1.4 Critères de sélection du site de construction.....	10
1.1.5 Répartition et usages des grands barrages	10
1.2 Barrages en remblai	12
1.2.1 Matériaux de remblai	13
1.2.1.1 Sols fins.....	13
1.2.1.2 Sols grossiers	14
1.2.1.3 Sols avec une courbe granulométrique étalée.....	15
1.2.1.4 Matériaux d'enrochement	15
1.2.2 Catégories structurales des barrages en remblai	16
1.2.3 Incidents de barrages en remblai.....	18
1.2.3.1 Définitions.....	18
1.2.3.2 Statistiques des incidents dus à l'érosion interne.....	19
1.3 Mécanismes d'érosion interne	23
1.3.1 Généralités	23
1.3.1.1 Quatre phases de l'érosion interne.....	23
1.3.1.2 Facteurs favorisant l'érosion interne.....	24
1.3.2 Suffusion	26
1.3.2.1 Terminologie.....	27
1.3.2.2 Facteurs favorisant la suffusion	28
1.3.2.3 Études en laboratoire.....	29
1.4 Essais d'écoulement en laboratoire.....	30
1.4.1 Montage expérimental	31
1.4.1.1 Cellule d'écoulement	32
1.4.1.2 Eau de percolation et système hydraulique.....	33
1.4.1.3 Matériel de drainage	35
1.4.1.4 Surcharge verticale.....	35
1.4.2 Matériaux granulaires	35
1.4.2.1 Types de particules	36
1.4.2.2 Matériaux naturels ou reconstitués	36
1.4.2.3 Courbes granulométriques	36
1.4.3 Procédures d'essais	37
1.4.3.1 Étapes de préparation.....	37
1.4.3.2 Écoulement et vibrations.....	39
1.4.4 Paramètres de suffusion	40

1.4.4.1	Analyse granulométrique	40
1.4.4.2	Perte totale de particules fines	42
1.4.4.3	Paramètres hydrauliques	43
1.4.4.4	Déplacement vertical et variation de volume.....	46
1.4.5	Répétabilité des essais.....	47
1.4.6	Durée des essais	47
1.5	Critères géométriques	48
1.5.1	Critères semi-empiriques	49
1.5.1.1	Critères de Kezdi (1979) et de Sherard (1979)	50
1.5.1.2	Critère de Kenney & Lau (1985, 1986)	50
1.5.1.3	Critères de Burenkova (1993) et de Honjo et al. (1996).....	51
1.5.2	Variantes d'application des critères semi-empiriques	53
1.5.2.1	Valeurs seuils retenues.....	53
1.5.2.2	Variantes de présentation des résultats	54
1.5.2.3	Détermination alternative des paramètres.....	54
1.5.2.4	Plage d'application.....	55
1.5.3	Critères dérivés des critères semi-empiriques.....	55
1.5.3.1	Critères basés sur le calcul de la pente sécante.....	56
1.5.3.2	Autres modifications et/ou combinaisons des critères.....	57
CHAPITRE 2	OBJECTIFS, MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET CONTRIBUTIONS	61
2.1	Objectifs de la thèse	61
2.2	Méthodologie générale.....	62
2.2.1	Évaluation expérimentale des méthodes de saturation	62
2.2.2	Développement d'un critère expérimental de stabilité interne	64
2.2.3	Élaboration d'un critère géométrique de stabilité interne	67
2.3	Contributions de la thèse.....	68
CHAPITRE 3	ON PREFERRED SATURATION METHODS FOR GEOTECHNICAL FLOW TESTS.....	71
3.1	Introduction.....	72
3.2	Existing recommendations on saturation	74
3.2.1	ASTM recommendations	74
3.2.2	Recommendations from other authors	75
3.3	Materials and methods	77
3.3.1	Experimental program	77
3.3.2	Granular materials.....	78
3.3.3	Granular specimen preparation	80
3.3.4	Permeant water supply.....	80
3.3.5	Deaeration methods	82
3.3.5.1	Heating.....	82
3.3.5.2	Using a sand filter	84
3.3.5.3	Cavitation under vacuum	85
3.3.6	Saturation methods.....	85

	3.3.6.1	Vacuum	85
	3.3.6.2	CO ₂ purge.....	85
	3.3.6.3	Permeant water flow direction	86
	3.3.7	Calculation of the degree of saturation	86
3.4		Results and discussion	87
	3.4.1	Results.....	87
	3.4.1.1	Permeant water deaeration methods	90
	3.4.1.2	Permeameter saturation methods	92
	3.4.2	Discussion	95
	3.4.2.1	Permeant water deaeration methods	95
	3.4.2.2	Permeameter saturation methods	96
	3.4.2.3	Difference between glass bead and natural particle specimens	96
3.5		Conclusion	97
CHAPITRE 4		CRITERION FOR INTERNAL STABILITY OF COARSE GRANULAR MATERIALS FROM FLOW TESTS	99
4.1		Introduction.....	100
4.2		Previous test methods	102
	4.2.1	Suffusion testing	102
	4.2.2	Suffusion parameters	106
	4.2.3	Suffusion parameters	107
	4.2.3.1	Rigid-wall permeameter.....	111
	4.2.3.2	Saturation system	112
	4.2.3.3	Testing system	112
	4.2.4	Testing procedures	113
	4.2.4.1	Materials reconstitution	113
	4.2.4.2	Materials saturation.....	113
	4.2.4.3	Materials saturation.....	113
	4.2.4.4	Internal stability final measurements	114
	4.2.5	Experimental program	115
	4.2.6	Coarse Granular materials.....	116
4.3		Experimental results and laboratory criteria	118
	4.3.1	Repeatability tests	118
	4.3.2	Results of parameters affected by the fines erosion.....	119
	4.3.3	Proposed thresholds for flow tests	124
	4.3.4	Application of the laboratory criteria.....	126
4.4		Discussion	129
	4.4.1	Apparatus limitation.....	129
	4.4.2	Testing procedures limitations.....	129
	4.4.3	Laboratory flow tests results versus geometric criteria results	130
4.5		Conclusion	131

CHAPITRE 5	PROPOSITION OF A NEW GEOMETRIC METHOD TO ASSESS THE INTERNAL STABILITY OF COARSE GRANULAR MATERIALS.....	133
5.1	Introduction.....	134
5.2	Geometric criteria	136
5.2.1	Semi-empirical criteria.....	136
5.2.1.1	Criteria based on the shape of the GSD	136
5.2.1.2	Self-filtration criteria	137
5.2.2	Implementation of semi-empirical criteria.....	138
5.2.3	Implementation of semi-empirical criteria.....	139
5.2.3.1	Secant slope approaches	139
5.2.3.2	Other combined approaches.....	141
5.3	Database and flow tests.....	144
5.4	Assessment of internal stability using existing methods	147
5.4.1	Conservatism of the semi-empirical methods.....	150
5.4.2	Comparison between semi-empirical methods and recent approaches...	150
5.4.3	Comparison of methods for discontinuous and continuous GSDs	151
5.5	Assessment of internal stability using existing methods	151
5.5.1	Selection of a semi-empirical criterion for discontinuous GSDs.....	152
5.5.2	Combination of two semi-empirical criteria for continuous GSDs	154
5.5.3	Formulation of the unified criterion.....	155
5.6	Discussion	155
5.7	Conclusion	156
	CONCLUSION.....	159
	RECOMMANDATIONS	165
ANNEXE I	EXEMPLE DE JEU DE DONNÉES POUR ÉVALUER S_r ARTICLE 1 – CHAPITRE 3	169
ANNEXE II	CARACTÉRISATION D'UN MODÈLE DE SOL CONSTITUÉ DE BILLES DE VERRE POLYDISPERSÉES POUR L'ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS EN MILIEU POREUX	173
ANNEXE III	COURBES GRANULOMÉTRIQUES AVANT ET APRÈS ESSAI ARTICLE 2 – CHAPITRE 4	193
ANNEXE IV	CALCUL DU VOLUME TOTAL ET DE L'INDICES DES VIDES ARTICLE 2 – CHAPITRE 4	215
ANNEXE V	APPLICATION DES CRITÈRES GÉOMÉTRIQUES ARTICLE 3 – CHAPITRE 5	227
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	239

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Processus de développement définissant les quatre principaux mécanismes d'érosion interne et les facteurs de vulnérabilité nécessaires à leur apparition24
Tableau 1.2	Résumé des critères géométriques semi-empiriques pour déterminer la stabilité interne53
Tableau 1.3	Résumé des approches dérivées des critères semi-empiriques géométriques de Kezdi, Sherard, Kenney & Lau et Burenkova pour évaluer la stabilité interne60
Tableau 3.1	ASTM recommendations on permeant water used for flow tests in a rigid-wall cell74
Tableau 3.2	ASTM recommendations on the specimen saturation method for flow tests in a rigid-wall cell.....75
Tableau 3.3	Characteristics of glass bead and natural particle specimens79
Tableau 3.4	Summary of phase I of the saturation test results obtained on glass bead specimens and on natural particle specimens with the grain size distribution A - Upward flow combined with a vacuum87
Tableau 3.5	Summary of phase II of the saturation test results obtained on glass bead specimens and on natural particle specimens with the grain size distribution A – Water deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature88
Tableau 3.6	Summary of the saturation tests results obtained on natural particle specimens with the grain size distribution B – Water deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature88
Tableau 4.1	Flow tests used to evaluate the susceptibility of granular materials to suffusion and/or its onset103
Tableau 4.2	Parameters used to evaluate the internal stability of granular materials106
Tableau 4.3	Material properties, application of the Kezdi, Sherard and Kenney & Lau geometric criteria and testing conditions109

Tableau 4.4	Loss of fines and evolution of the GSD between the initial and final tested materials for the materials considered stable based on previous flow tests	120
Tableau 4.5	Loss of fines and evolution of the GSD between the initial and final tested materials for the materials considered unstable based on previous flow tests	121
Tableau 4.6	Evolution of the total volume and the void ratio of the tested materials for materials considered stable based on previous flow tests	122
Tableau 4.7	Evolution of the total volume and the void ratio of the tested materials for the materials considered unstable based on previous flow tests	123
Tableau 4.8	Assessment of the internal stability of the materials after the application of the laboratory criterion.....	128
Tableau 5.1	Internal stability of coarse granular materials.....	148
Tableau 5.2	Evaluation of $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$ and $(H/F)_{\text{min}}$ for the discontinuous GSDs.....	152
Tableau 5.3	Evaluation of $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{max}}$ and $(H/F)_{\text{min}}$ for the continuous GSDs	153
Tableau 5.4	Probability of internal instability of continuous GSDs based on the combined parameters $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{max}}$ for $F > 5\%$ and $(H/F)_{\text{min}}$ from the three commonly used semi-empirical criteria.....	154

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Répartition des fonctions des grands barrages mondiaux.....	9
Figure 1.2	Répartition des types de grands barrages en service dans le monde.....	11
Figure 1.3	Répartition des grands barrages dans neuf provinces canadiennes et deux territoires (Yukon et Territoires du Nord-Ouest)	12
Figure 1.4	Illustrations des formes possibles de courbes granulométriques de matériaux granulaires : 1) linéaire uniforme sur l'ensemble de la courbe, 2) linéaire uniforme limitée aux particules fines, 3) discontinue et (4) concave vers le haut.....	15
Figure 1.5	Illustrations des différents types de barrages en remblai : barrages homogènes – 0, 1 et 2; barrages zonés - 3, 4 et 5; et barrages diaphragmes - 6, 7, 8, 9, 10 et 11	17
Figure 1.6	Pourcentage de rupture dans les barrages en remblai selon les trois modes de rupture.....	20
Figure 1.7 a)	Ruptures et b) accidents répertoriés dans les barrages en remblai selon leur type et l'emplacement de l'érosion interne	22
Figure 1.8	Diagramme de Venn résumant les effets de l'interaction des trois facteurs de vulnérabilité sur le comportement des particules et les mécanismes d'érosion interne qui en résultent	26
Figure 1.9	Distinction entre la suffusion et la suffosion à partir des paramètres affectés du matériau	28
Figure 1.10	Exemple d'application des méthodes graphiques employées par Kenney & Lau (1985) pour évaluer la stabilité interne d'un matériau (« A ») : a) Courbes granulométriques avant et après essai et b) graphique représentant H en fonction de F	42
Figure 1.11	Distribution de h illustrant les trois comportements possibles d'un matériau sous l'effet d'un écoulement.....	45
Figure 1.12	Zones de stabilité interne sur le graphique du rapport d_{90}/d_{60} en fonction du rapport d_{90}/d_{15} : I. et III. Instabilité interne, II. Stabilité interne et IV. Sols artificiels	52

Figure 1.13	Droites de probabilité d'instabilité interne Wan & Fell en fonction du type de matériau : (a) silt-sable-gravier ou une argile-silt-sable-gravier, avec un pourcentage en argile et une plasticité limités et (b) sable-gravier contenant moins de 10 % de particules fines non plastiques ($d < 0,075$ mm)59
Figure 3.1	Summary of the experimental program77
Figure 3.2	Grain size distributions for the saturation tests78
Figure 3.3	(A) Rigid-wall permeameter used during the saturation tests, and (B) apparatus used to saturate tested specimens during saturation tests and to follow the specimen saturation. Lateral piezometers were only used to determine the saturated hydraulic conductivity (Tableau 3.3)81
Figure 3.4	Apparatus used (A) to control water temperature changes during saturation tests with heated water and (B) to deaerate water (arrows represent the airflow direction), and (C) sand filter used to deaerate water83
Figure 3.5	Water temperature during the saturation tests with heated water combined with a vacuum on the specimens with the grain size distribution A84
Figure 3.6	Example of a saturation curve obtained at the end of a saturation test. Part 1 is obtained from constant flowrate, whereas part 2 is obtained from constant hydraulic gradient. 3 represents the time at the moment when permeant water exists in the permeameter89
Figure 3.7	Saturation curves with the four permeant waters for (A) glass bead specimens with grain size distribution A, and (B) natural particle specimens with grain size distribution A. Saturation was performed with upward flow combined with a vacuum at the permeameter outlet91
Figure 3.8	Saturation curves with the three different specimen saturation methods for (A) glass bead specimens with grain size distribution A, and (B) natural particle specimens with grain size distribution A. Permeant water was deaerated by cavitation under vacuum93
Figure 3.9	Saturation curves with two specimen saturation methods obtained for natural particle specimens with grain size distribution B. Permeant water was deaerated by cavitation under vacuum94

Figure 3.10	Saturation curves obtained for replicated tests on glass bead specimens with grain size distribution A with three different specimen saturation methods. Permeant water was deaerated by cavitation under vacuum94
Figure 4.1	a) Rigid-wall permeameter designed for this study and b) apparatus used during the flow tests. Blue arrows correspond to the flow direction during the test108
Figure 4.2	Summary of the experimental program (references providing the GSDs used for this study are given in Tableau 4.3).....116
Figure 4.3	GSDs of materials considered stable based on previous flow test results. Continuous and discontinuous GSDs are presented with continuous and dotted lines, respectively117
Figure 4.4	GSDs of materials considered unstable based on previous flow test results. Continuous and discontinuous GSDs are presented with continuous and dotted lines, respectively117
Figure 4.5	Results of the four threshold conditions for the materials considered stable and unstable based on previous flow test results127
Figure 5.1	Determination of d'_{85} (triangle markers) and D'_{15} (cube markers), required for the application of the criteria of Kezdi (1979) and Sherard (1979), and of F_{4d} required to calculate H for the application of the criterion of Kenney & Lau (1985, 1986)137
Figure 5.2	Synthetic graph developed by Zhou et al. (2016) to combine three commonly used semi-empirical criteria, using the secant slope methods proposed by Chapuis (1992).....140
Figure 5.3	“Butterfly wings chart” proposed by Moraci et al. (2014, 2015) and later improved by Mandaglio et al. (2018), using the secant slope methods proposed by Chapuis (1992)141
Figure 5.4	Synthetic graph developed by Li & Fannin (2008) to combine two commonly used semi-empirical criteria, using the parameter H defined by Kenney & Lau (1985, 1986)142
Figure 5.5	Synthetic graph combining the two methods of the Chang & Zhang (2013) criterion for continuous and discontinuous GSDs, using the parameters $(H/F)_{\min}$ and G_r , respectively. Internal stability depends on the appropriate geometric parameter and/or the fines content, defining three distinct zones (A, B and C)144

Figure 5.6	Discontinuous GSDs of the internally stable (solid line and markers) and unstable (dotted line and empty markers) granular materials146
Figure 5.7	Continuous GSDs of the internally stable (solid line and markers) and unstable (dotted line and empty markers) granular materials146

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

A&al	Critère géométrique de Andrianatrehina et al. (2016)
ACB	Association canadienne des barrages
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	<i>Broadly</i> (Courbe granulométrique étalée)
B*	Critère géométrique de Burenkova (1993)
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
C	<i>Continuous</i> (Courbe granulométrique continue)
C&Z	Critère semi-empirique de Chang & Zhang (2013)
CIGB (ICOLD)	Commission Internationale des Grands Barrages (<i>International Commission on Large Dams</i>)
CIGB - CODS	CIGB – <i>Committee on Dam Safety</i>
CO ₂	Dioxyde de carbone
CTN504	Mécanique des sols
D	<i>Discontinuous</i> (Courbe granulométrique discontinue ou à trou)
DM	Critère géométrique de De Mello (1975)
ÉTS	École de technologie supérieure
G	<i>Geometric</i> (Critère géométrique)
GG	<i>Gap-graded</i> (Courbe granulométrique discontinue ou à trou)
GP	<i>Poorly graded gravel</i> (Graviers uniformes; mélanges de gravier et de sable; peu ou pas de particules fines)
GSD	<i>Grain size distribution</i> (Courbe granulométrie des particules)
H	<i>Hydraulic</i> (Critère hydraulique)

HM	<i>Hydromechanical</i> (Critère hydromécanique)
H&al	Critère géométrique de Honjo et al. (1993)
Hg	Symbole chimique du mercure
K&L	Critère géométrique de Kenney & Lau (1985, 1986)
K*	Critère géométrique de Kezdi (1979)
L	<i>Linearly</i> (Courbe granulométrique linéaire)
L&F	Critère géométrique de Li & Fannin (2008)
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i> (transducteur différentiel variable linéaire)
M&al	Critère semi-empirique de Mandaglio et al. (2018)
MCIF	Manuel canadien d'ingénierie des fondations
MED	Méthode des éléments discrets
MEF	Méthode des éléments finis
MGC843	Méthodes expérimentales en géotechnique
MS	<i>Marginally stable</i> (Matériau faiblement stable)
Na ₂ SO ₃	Sulfite de sodium anhydre
OD	Oxygène dissous
PVA	<i>Polyvinyl alcohol</i> (Alcool Polyvinylique)
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (Polychlorure de vinyle)
S	<i>Stable</i> (Matériau stable)
S*	Critère géométrique de Sherard (1979)
SP	<i>Poorly graded sand</i> (Sables uniformes; peu ou pas de particules fines)

SW	<i>Well-graded sand</i> (Sables bien étalés; sables graveleux; peu ou pas de particules fines)
U	<i>Unstable</i> (Matériau instable)
UC	<i>Upwardly concave</i> (Courbe granulométrique de forme concave vers le haut)
US	<i>United States</i>
USACE	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i>
USBR	<i>United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation</i>
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
USSD	<i>United States Society on Dams Committee on Materials for Embankment Dams</i>
W&F	Critère géométrique de Wan & Fell (2004, 2008)
Z&al	Critère géométrique de Zhou & al. (2017)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$	Valeur de (D'_{15}/d'_{85}) au niveau de la discontinuité
$(D'_{15}/d'_{85})_{\text{max}}$	Valeur maximale de (D'_{15}/d'_{85})
$(H/F)_{\text{min}}$	Valeur minimale de (H/F)
A	Constante de Hamaker
C	Constante dépendant du pourcentage initial de particules fines dans le matériau
C_c	Coefficient de courbure
C_u	Coefficient d'uniformité
$C.R.$	Compacité relative
d	Diamètre des particules
d'_{85}	Diamètre correspondant à 85% du pourcentage passant massique de la fraction fine
d_m	Diamètre moyen des particules
d_{max}	Diamètre maximal de la discontinuité
d_{min}	Diamètre minimal de la discontinuité
d_x	Diamètres correspondant à x % du pourcentage passant massique
D'_{15}	Diamètre correspondant respectivement à 15 % du pourcentage passant massique de la fraction grossière
$D_{\text{grillage}}, D_{\text{screen}}$	Diamètre d'ouverture du grillage
e	Coefficient de restitution de l'énergie ou d'inélasticité
e	Indice des vides
e_f	Indice des vides après essai

e_i	Indice des vides avant essai
$e_{\max}$	Indice des vides maximal
$e_{\min}$	Indice des vides minimal
F, F_d	Pourcentage passant massique des particules de diamètre d
F_{4d}	Pourcentage passant massique des particules de diamètre $4d$
G_r	Rapport de discontinuité
G_s	Densité des solides
h	Charge hydraulique
H	Incrément de masse
h', h''	Facteurs conditionnels d'uniformité
i	Gradient hydraulique
i_{cr}	Gradient hydraulique critique
I_D	Indice de densité relative
I_p	Indice de plasticité
I_r	Degré d'instabilité ou indice d'instabilité interne
K	Conductivité hydraulique
k	Coefficient de perméabilité
L	Longueur
M_e	Masse du perméamètre rempli d'eau
M_s	Masse des grains solides ou du matériau sec
M_t	Masse totale du matériau

M_{tot}	Masse totale du perméamètre contenant le matériau durant la saturation
n	Porosité
P	Pourcentage passant massique des particules fines
P^*	Probabilité d'instabilité interne
P_{atm}	Pression atmosphérique
P_C	Pourcentage de cohérence calculé pour les courbes granulométriques continues
P_{C-S}	Pourcentage de cohérence calculé pour les courbes granulométriques continues stables
P_{C-U}	Pourcentage de cohérence calculé pour les courbes granulométriques continues instables
P_D	Pourcentage de cohérence calculé pour les courbes granulométriques discontinues
P_{D-S}	Pourcentage de cohérence calculé pour les courbes granulométriques discontinues stables
P_{D-U}	Pourcentage de cohérence calculé pour les courbes granulométriques discontinues instables
P_{fines}	Pourcentage de perte totale de particules fines
Q	Débit d'écoulement
Re	Nombre de Reynolds
S	Pente sécante
S_f	Pourcentage passant massique de la fraction fine
S_{min}	Pente sécante minimale
S_r	Degré de saturation

S_X	Pente sécante selon le critère géométrique X
t	Temps
T	Température
t_0	Temps correspondant à la première sortie d'eau de percolation à l'exutoire du perméamètre
u	Pression interstitielle
v	Vitesse d'écoulement
V_t, V_T	Volume total du matériau
v_i	Vitesse incidente
v_r	Vitesse restituée après le choc
w	Teneur en eau
w_L	Limite de liquidité
w_P	Limite de plasticité
x	Facteur tenant compte de la tortuosité de l'écoulement
$\gamma_{d,max}$	Poids volumique sec maximal des sols
$\gamma_{d,min}$	Poids volumique sec minimal des sols
Δe	Pourcentage de variation de l'indice des vides
Δe_f	Pourcentage de variation de l'indice des vides pour l'ensemble du matériau
Δe_{lo}	Pourcentage de variation de l'indice des vides pour l'anneau du bas
Δe_{mi}	Pourcentage de variation de l'indice des vides pour l'anneau du milieu
Δe_{up}	Pourcentage de variation de l'indice des vides pour l'anneau du haut

Δh	Perte de charge
ΔK	Changement de la conductivité hydraulique
ΔP_f	Différence du pourcentage passant massique correspondant au diamètre d'ouverture du grillage pour l'ensemble du matériau, entre les états initial et final
ΔP_{lo}	Différence du pourcentage passant massique correspondant au diamètre d'ouverture du grillage pour l'anneau inférieur, entre les états initial et final
ΔP_{max}	Différence maximale du pourcentage passant massique entre les anneaux supérieur et inférieur
ΔP_{mi}	Différence du pourcentage passant massique correspondant au diamètre d'ouverture du grillage pour l'anneau du milieu, entre les états initial et final
ΔP_{up}	Différence du pourcentage passant massique correspondant au diamètre d'ouverture du grillage pour l'anneau du haut, entre les états initial et final
ΔV	Changement de volume
ΔV_{tf}	Pourcentage de variation du volume total du matériau
ε_a	Déformation axiale
ε_v	Déformation volumétrique
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau
$\rho_{d,max}$	Masse volumique sèche maximale
$\rho_{d,min}$	Masse volumique sèche minimale
ρ_s	Masse volumique des particules
ρ_w	Masse volumique de l'eau
σ'	Contrainte normale effective
σ_{cell}	Contrainte cellulaire

UNITÉ DE CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE

μS microsiemens

UNITÉS DE CONTRAINTE

kPa kiloPascal

inHg *inch of mercury* (pouce de mercure)

UNITÉ DE DÉBIT

cm^3/s centimètre cube par seconde

UNITÉS DE MASSE ET DE POIDS

Masse

g gramme

Masse volumique

kg/m^3 kilogramme par mètre cube

g/cm^3 gramme par centimètre cube

Poids volumique

kN/m^3 kiloNewton par mètre cube

UNITÉ DE QUANTITÉ DE MATIÈRE

Concentration

mg/L milligramme par litre

UNITÉ DE TEMPÉRATURE

$^{\circ}\text{C}$ degré Celsius

UNITÉS DE TEMPS

Temps

h heure

min minute

s seconde

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

m mètre

cm centimètre

mm millimètre

μm micromètre

Volume

m^3 mètre cube

cm^3 centimètre cube

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

m/s mètre par seconde

cm/s centimètre par seconde

INTRODUCTION

Les ouvrages de retenue, tels que les barrages et les digues, sont des structures d'envergure construites par l'Homme depuis l'Antiquité. Ils permettent de gérer et d'exploiter les ressources en eau douce, notamment à des fins agricoles, énergétiques, domestiques et de protection contre les crues. Il existe plusieurs types d'ouvrages de retenue, conçus pour répondre à ces besoins, qui diffèrent par leur forme, leur grandeur et les matériaux utilisés. Le plus ancien d'entre eux est l'ouvrage dit « en remblai », constitué de matériaux géologiques. Il reste aujourd'hui le type d'ouvrage le plus répandu à l'échelle mondiale. Cette tendance se vérifie également au Canada, cinquième pays au monde par nombre de barrages, dont une grande partie se situe dans la province du Québec. Le recours aux ouvrages en remblai s'explique principalement par deux facteurs. D'une part, l'évolution des connaissances en mécanique des sols et en géotechnique permet actuellement de concevoir des structures plus performantes, y compris sur des sites de plus en plus complexes. D'autre part, la possibilité d'utiliser des matériaux géologiques disponibles localement permet de réduire les coûts de construction.

S'agissant des matériaux géologiques, leur sélection est une étape déterminante dans la conception d'un ouvrage en remblai. Elle repose sur une évaluation rigoureuse des propriétés hydrauliques et géotechniques du matériau, généralement déterminées en laboratoire à l'aide d'essais normalisés. Le choix doit non seulement être adapté à la fonction qu'il doit remplir, qu'il s'agisse de drainage, d'étanchéité, de protection ou de stabilisation, mais également orienté de manière à limiter, voire prévenir, toute migration de particules sous l'effet de sollicitations hydrauliques et mécaniques défavorables. À défaut, l'ouvrage en remblai peut être sujet à une érosion dite « interne ». Ce phénomène, lorsqu'il n'est pas détecté à temps, peut évoluer vers la formation d'une brèche, voire entraîner la rupture complète de l'ouvrage, engendrant ainsi des conséquences économiques, environnementales et humaines majeures. L'un des exemples de ruptures les plus connus est celui du barrage de Teton Dam, situé près de Wilford en Idaho (États-Unis). La rupture, survenue le 5 juin 1976, a causé 11 décès, laissé plus de 20 000 personnes sans abri et généré environ 70,0 millions de dollars US de dommages.

Depuis le début du XX^e siècle, les analyses des incidents de barrages ont révélé qu'un tiers des ruptures de barrages en remblai était dû à une érosion interne, souvent survenue lors du remplissage du réservoir ou dans les premières années d'exploitation.

Parmi les quatre principaux mécanismes d'érosion interne (érosion régressive, érosion de conduit, érosion de contact et suffusion), la présente étude s'intéresse spécifiquement à la suffusion. Ce phénomène désigne la migration sélective des particules les plus fines d'un matériau granulaire à travers le réseau des pores formé par les particules les plus grossières, sous l'effet des forces hydrauliques induites par l'écoulement d'eau. Pour que la suffusion se produise, deux conditions doivent être réunies : un gradient hydraulique critique, nécessaire pour initier la migration des particules, et une susceptibilité du matériau à l'érosion, liée à certaines de ses propriétés, telles que l'instabilité interne ou la porosité.

Depuis les années 1950, de nombreuses études sont menées afin de mieux définir le phénomène de suffusion. Les premières études portent principalement sur la susceptibilité des matériaux granulaires, et plus particulièrement sur leur stabilité interne. Cette propriété est directement liée à leur courbe granulométrique. Une évaluation adéquate de cette propriété est essentielle pour la conception d'ouvrages en remblai. Si les matériaux stables disponibles localement sont évalués à tort comme instables, il faut alors envisager l'emploi d'un matériau stable situé plus loin, ce qui augmente les coûts de transport. Cependant, considérer un matériau instable comme stable peut avoir des répercussions humaines graves, notamment en cas de rupture de l'ouvrage, en plus des impacts financiers.

L'évaluation de la stabilité interne repose sur deux approches étroitement liées : la réalisation d'essais d'écoulement en laboratoire, en soumettant directement le matériau granulaire à un écoulement d'eau, et l'application de critères géométriques, basés entre autres sur les caractéristiques granulométriques du matériau. Bien que considérée comme plus fiable, la méthode expérimentale est longue, exigeante et encore dépourvue de normalisation faisant consensus. De plus, les dispositifs expérimentaux employés varient considérablement d'une étude à l'autre et les critères expérimentaux utilisés pour qualifier un matériau comme stable

manquent de rigueur, reposant parfois sur des jugements subjectifs. Afin d'estimer la stabilité interne du matériau ou de procéder à une présélection, un ou plusieurs critères géométriques sont généralement employés, en raison de leur simplicité et de leur rapidité d'application. Une multitude de critères géométriques est proposée dans la littérature depuis les années 1950. Les premiers, qualifiés de semi-empiriques, reposent sur des analyses théoriques et/ou expérimentales. Les plus couramment utilisés en recherche et en pratique sont ceux de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau. Depuis le début des années 2000, de nombreux autres critères ont été proposés. La plupart modifient et/ou combinent ces approches historiques généralement jugées conservatrices, en particulier les trois précitées. La méthodologie adoptée est généralement la même. Des matériaux granulaires sont sélectionnés, dont la stabilité interne a été évaluée au préalable au moyen d'essais d'écoulement et ce, malgré les limites évoquées précédemment. Cette stabilité évaluée expérimentalement est ensuite comparée à celle obtenue avec les critères semi-empiriques retenus par l'étude. Sur cette base, un nouveau critère est formulé, tenant compte des limites et des avantages identifiés dans les approches historiques. Il en résulte une multitude de critères dérivés, dont l'évaluation de la stabilité interne d'un même matériau peut différer. À ce jour, aucun d'entre eux ne fait consensus pour évaluer de manière fiable la stabilité interne des matériaux granulaires, notamment dans le cadre de la construction d'ouvrages en remblai.

La présente thèse vise à améliorer l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires en explorant successivement les limites des approches expérimentale et géométrique actuellement utilisées en recherche et en pratique. Pour l'approche expérimentale, l'accent est mis sur l'hétérogénéité et l'imprécision des dispositifs employés lors des essais d'écoulement, en particulier la procédure de saturation appliquée, ainsi que sur les paramètres mesurés et leurs valeurs seuils retenues pour différencier les matériaux stables des matériaux instables. L'étude de l'approche géométrique repose, quant à elle, à la fois sur une réévaluation de critères semi-empiriques, en particulier ceux de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau, et sur l'évaluation de nombreux critères dérivés qui en découlent, aspect jusqu'ici peu abordé dans la littérature.

Cette recherche est présentée sous forme de thèse par articles et est organisée en cinq chapitres. Le Chapitre 1 présente une revue de la littérature. Il débute par des généralités sur les ouvrages de retenue, en se concentrant plus particulièrement sur ceux construits en remblai. Il aborde ensuite brièvement les différents mécanismes d'érosion interne susceptibles d'entraîner leur rupture, avant de se concentrer plus en détail sur le phénomène de suffusion. Enfin, il traite de la stabilité interne, et plus particulièrement de son évaluation. À cette fin, les deux approches permettant de l'évaluer sont détaillées : l'approche expérimentale, fondée sur des essais d'écoulement réalisés en laboratoire, quels que soient leurs objectifs, et l'approche géométrique, reposant sur des critères basés sur la courbe granulométrique, qu'ils soient semi-empiriques ou dérivés de ces derniers.

Le Chapitre 2 présente l'objectif principal de la thèse, ainsi que les deux sous-objectifs, chacun associé à l'une des deux approches existantes d'évaluation de la stabilité interne. Le premier sous-objectif comporte deux étapes, tandis que le second n'en comprend qu'une. La méthodologie générale adoptée pour répondre à ces deux sous-objectifs est exposée, afin de justifier les choix opérés tout au long de la recherche. Enfin, les contributions scientifiques dans le domaine y sont également présentées.

Le Chapitre 3 se consacre à l'analyse des méthodes de saturation recommandées dans les normes ou issues de la littérature, en vue de préparer les matériaux granulaires aux essais d'écoulement. Il permet d'établir une méthode assurant la saturation complète des matériaux, condition de laboratoire fondamentale, avant d'évaluer leur stabilité interne au moyen d'essais d'écoulement. Ce travail a permis d'identifier deux méthodes de saturation efficaces, dont l'une assure la saturation complète en un temps réduit. Ce chapitre correspond à la première étape du premier sous-objectif et est présenté sous forme d'article : *On Preferred Saturation Methods for Geotechnical Flow tests*, publié dans la revue *Geotechnical Testing Journal*, en ligne le 18 août 2020 (article 1).

Le Chapitre 4 porte sur le développement d'un critère expérimental rigoureux permettant d'évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires soumis à un écoulement d'eau. Les

matériaux ont été préalablement saturés selon la méthode identifiée dans le Chapitre 3 (article 1), c'est-à-dire celle permettant la saturation complète en un temps réduit. Ce chapitre correspond à la deuxième étape du premier sous-objectif et est présenté sous forme d'article : *Criterion for Internal Stability of Coarse Granular Materials from Flow Tests*, soumis à la revue *Canadian Geotechnical Journal*, le 8 septembre 2025 (article 2).

Le Chapitre 5 vise à développer un critère géométrique permettant d'évaluer de manière plus fiable la stabilité interne des matériaux granulaires à partir de leur courbe granulométrique. Il repose sur l'analyse de l'efficacité de critères géométriques semi-empiriques et leurs dérivés, en particulier ceux de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau, pour évaluer adéquatement la stabilité interne. Ces trois critères historiques ont été retenus pour deux raisons : leur utilisation fréquente en recherche et en pratique, ainsi que les observations réalisées au Chapitre 4 (article 2), issues de la comparaison entre résultats expérimentaux et géométriques. Ce chapitre répond au deuxième sous-objectif et est également présenté sous forme d'article : *Proposition of a New Geometric Method to Assess the Internal Stability of Coarse Granular Materials*, soumis à la revue *Acta Geotechnica*, le 15 octobre 2025 (article 3).

La conclusion générale de la thèse synthétise les résultats des trois articles qui répondent aux deux sous-objectifs et rappelle les principales contributions de cette recherche à l'amélioration de l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires.

Enfin, des recommandations sont proposées pour de futures recherches sur l'évaluation de la stabilité interne, notamment en lien avec les choix expérimentaux réalisés dans le cadre de cette recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Généralités sur les ouvrages de retenue

Depuis des milliers d'années, les êtres humains construisent des ouvrages destinés à retenir l'eau douce présente sur Terre afin de subvenir à leurs besoins. Ces ouvrages dits de retenue se déclinent en deux types : les barrages et les digues. Ils doivent pouvoir résister à la poussée de l'eau tout en étant étanches. Le choix des matériaux qui les composent est donc essentiel. Un ouvrage peut être en béton, ce qui lui confère une structure rigide, ou en remblai, ce qui lui confère une structure plus souple (United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation (USBR), 1987; Marche, 2008). Pour le projet de construction, le type d'ouvrage le plus adapté aux diverses conditions régionales et locales, et le plus économique, est sélectionné. Au Canada, le Québec est la province qui a construit le plus de barrages ces 50 dernières années, principalement pour produire de l'électricité.

1.1.1 Barrages et digues

Un barrage est une structure construite sur un cours d'eau afin de créer un plan d'eau utilisé comme réservoir. La hauteur de ce réservoir, dit « d'emmagasinement », dépend généralement des besoins en eau. Selon la définition de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB, 2011), un barrage est considéré « grand » s'il mesure plus de 15 mètres de hauteur depuis le point le plus bas de ses fondations jusqu'à sa crête ou s'il mesure entre 5 et 15 mètres de hauteur pour un réservoir d'une capacité de plus de trois millions de mètres cubes. Quant à la digue, c'est souvent sa longueur qui la caractérise. Elle peut être seule ou associée à un barrage. Dans ce dernier cas, elle est souvent construite de part et d'autre du barrage, contribuant ainsi à la fermeture du réservoir d'emmagasinement (Marche, 2008; Hydro-Québec, 2023). Dans la suite de la revue de littérature, le terme « barrage » est utilisé à des fins de simplification.

1.1.2 Fonctions multiples des ouvrages de retenue

Selon l'USBR (1987), les fonctions des ouvrages de retenue peuvent être regroupées en trois catégories : le stockage, la diversion et la rétention. Pendant les périodes de précipitations, l'eau est emmagasinée dans le réservoir. Dans les cas d'une structure de stockage et d'une structure de diversion, cette eau est en grande partie utilisée ou dirigée vers des canaux afin d'irriguer les terres, de produire de l'électricité et/ou d'alimenter les alentours en eau. Le reste est conçu pour améliorer la navigation fluviale et pour permettre des activités de loisirs ainsi que de pisciculture (Figure 1.1). Dans le cas d'une structure de rétention, l'eau est retenue afin de limiter les inondations et ainsi de minimiser leurs effets sur les populations et le paysage environnants. Dans la gestion des résidus miniers, la structure de confinement retient l'eau utilisée pour l'extraction des résidus miniers ainsi que ces derniers (Association canadienne des barrages (ACB), 2019). Plus de la moitié des grands barrages construits dans le monde ont une fonction unique, mais de plus en plus de barrages sont également construits pour répondre à des fonctions secondaires (Figure 1.1; CIGB, 2023).

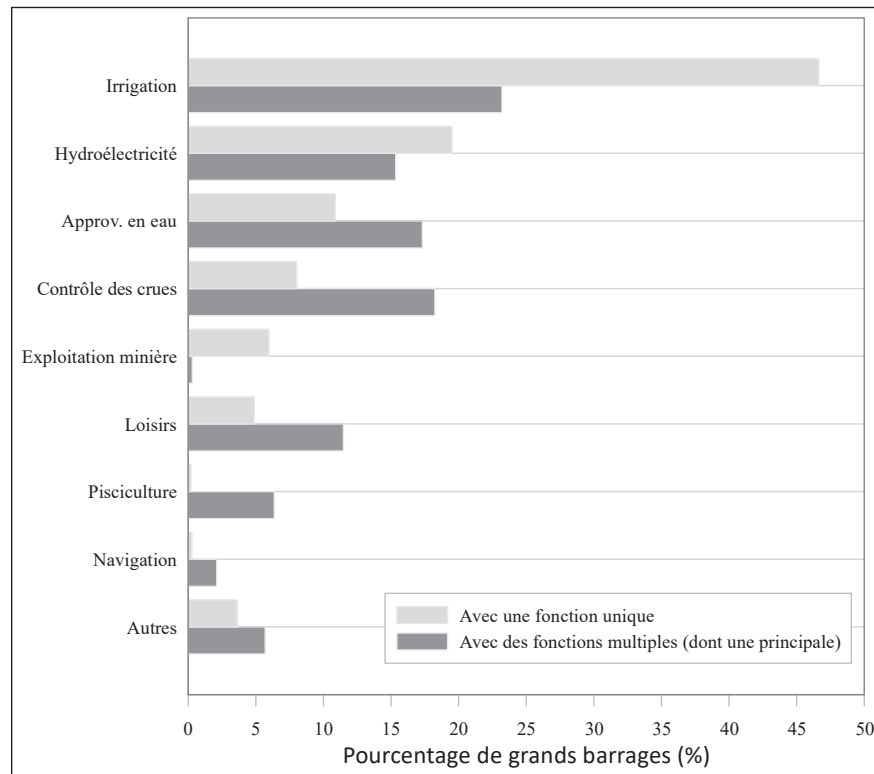


Figure 1.1 Répartition des fonctions des grands barrages mondiaux
Adaptée de la CIGB (2023, page Web)

1.1.3 Types d'ouvrages de retenue

Le barrage en remblai est le type de barrage le plus ancien construit par l'homme. Son étanchéité et sa stabilité dépendent des matériaux utilisés pour sa construction. Ceux-ci correspondent à des matériaux géologiques, à l'exclusion des sols organiques et de la tourbe. Ils se regroupent en deux catégories : les sols (fins, grossiers et à large gamme de tailles de particules) et les matériaux d'enrochement (cailloux, blocs et roches concassées; *United States Society on Dams Committee on Materials for Embankment Dams* (USSD), 2011; Manuel canadien d'ingénierie des fondations (MCIF), 2023). Lorsque la proportion volumique de sols est plus importante que celle des matériaux d'enrochement, on parle de barrage en terre. Dans le cas inverse, on parle de barrage en enrochement (CIGB, 2011; Foster, Fell & Spannagle, 2000). En ce qui concerne le barrage en béton, on distingue trois grands types : le barrage-poids, le barrage à contreforts et le barrage-voûte. Leur stabilité dépend principalement de leur forme (USBR, 1987; Marche, 2008; Hydro-Québec, 2023). Des barrages en bois ou en caissons

de bois et en enrochements ont aussi été construits, mais leur faible durabilité les rendait généralement peu rentables (USBR, 1987; Marche, 2008). Dans la suite de la revue de littérature, seules les informations sur le barrage en remblai sont exposées.

1.1.4 Critères de sélection du site de construction

Un site potentiel pour la construction d'un barrage fait l'objet d'une étude approfondie selon des critères géologiques, morphologiques, hydrologiques et topographiques. Les critères géologiques sont multiples. Ils concernent à la fois la fondation sur laquelle le barrage est construit et les matériaux géologiques qui sont utilisés pour sa construction. Les considérations à prendre en compte pour la fondation d'un barrage sont sa capacité portante, sa conductivité hydraulique (K , cm/s) ainsi que la présence ou non de fracture, voire de faille. Les matériaux géologiques sont sélectionnés selon leurs caractéristiques hydrauliques et mécaniques, évaluées préalablement à l'aide d'essais en laboratoire. Le dernier critère géologique à prendre en compte est la présence d'une activité sismique dans la région du site considéré. Concernant les critères morphologiques, ils correspondent à la forme de la vallée ou au degré des pentes. Les critères hydrologiques et météorologiques comprennent quant à eux les caractéristiques d'écoulements et de précipitations de la région où le barrage est construit. Ces dernières sont étudiées pour prédire les bénéfices qui peuvent être générés par l'exploitation du barrage. Une fois le site de construction sélectionné selon les conditions précédentes, sa topographie est étudiée afin de déterminer le niveau de remplissage maximal du réservoir d'emménagement (USBR, 1987; Kutzner, 1997; USSD, 2011).

1.1.5 Répartition et usages des grands barrages

Selon la dernière mise à jour du registre des grands barrages de la CIGB en avril 2023, 61 988 grands barrages sont en service dans le monde pour satisfaire diverses fonctions (Figure 1.1). Parmi eux, environ 80 % sont des barrages en remblai, dont 67,3 % en terre et 14,4 % en enrochement (Figure 1.2; CIGB, 2023).

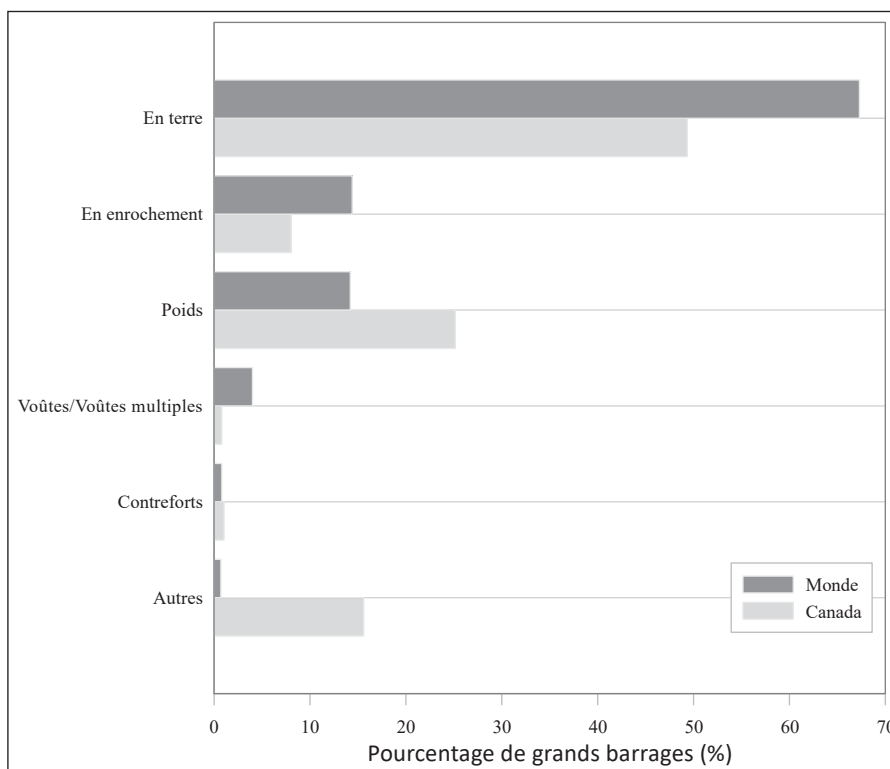


Figure 1.2 Répartition des types de grands barrages en service dans le monde

Adaptée de l'ACB (2019, p. 39) et de la CIGB (2023, page Web)

Un quart des ouvrages mondiaux sont situés en Amérique (CIGB, 2023), le Canada figurant parmi les dix pays ayant construit le plus de barrages au monde (14 000 ouvrages dont 1 440 sont classés comme des grands barrages; ACB, 2019). Construits pour la plupart après les années 1969, plus des deux tiers des barrages canadiens sont destinés à la production d'électricité (70,0 %; ACB, 2019). En 2019, la moitié des barrages canadiens répertoriés étaient des barrages en terre (Figure 1.2). Cette proportion s'explique par la préférence accordée à ce type de barrage depuis les années 1950, en raison de la disponibilité de nombreux matériaux géologiques à proximité des sites de construction, ainsi que de l'amélioration de leur conception (ACB, 2019). Bien que le Québec ne représente que 17 % de la superficie du territoire canadien, il abrite plus de la moitié des grands barrages du pays (Figure 1.3), principalement utilisés pour la production d'électricité (ACB, 2019).

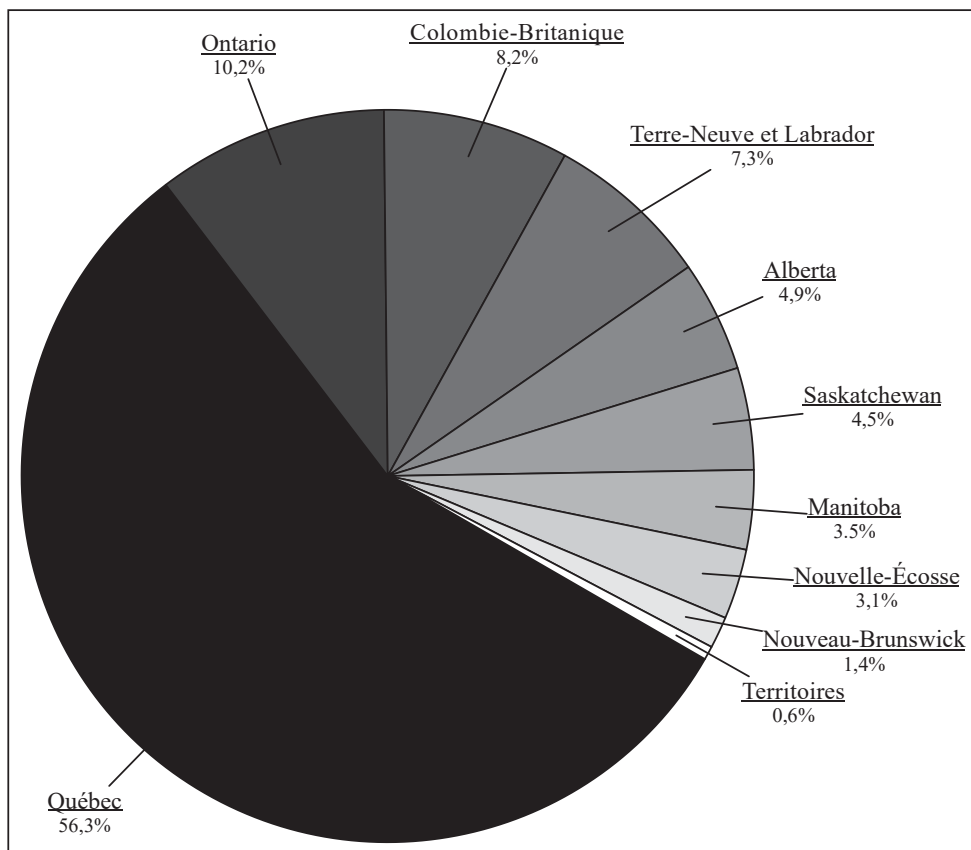


Figure 1.3 Répartition des grands barrages dans neuf provinces canadiennes et deux territoires (Yukon et Territoires du Nord-Ouest)
Adaptée de l'ACB (2019, p. 38)

1.2 Barrages en remblai

Selon l'USBR (1987), un barrage en remblai est une structure unique, qui peut toutefois être classée en trois grandes catégories (homogènes, diaphragmes et zonés). Le type de barrage en remblai construit dépend généralement des types de matériaux géologiques disponibles sur ou à proximité du site de construction, ainsi que de leur quantité. Idéalement, les matériaux les plus proches du site sont retenus, à condition que leurs propriétés hydrauliques et mécaniques répondent aux exigences du projet (drainage, étanchéité, protection, stabilité; USBR, 1987; USSD, 2011).

Depuis le début du XIX^{ème} siècle, de nombreux incidents de barrages ont été recensés, entraînant des pertes autant économiques qu'humaines (Foster et al., 2000; Marche, 2008;

CIGB, 2017; CIGB - *Committee on Dam Safety* (CODS), 2019). Dans les cas les plus anciens recensés, ces incidents résultaient d'une construction fondée sur des règles empiriques. Or, depuis les années 1930, l'application des principes de mécanique des sols et de géotechnique à la conception des barrages a permis de réduire le nombre d'incidents, sans toutefois les empêcher complètement (USBR, 1987; Kutzner, 1997; Marche, 2008). La sous-section 1.2.1 présente les matériaux de remblai et leurs caractéristiques générales. La sous-section 1.2.2 définit les trois grandes catégories de barrages en remblai pouvant être construits à partir de ces matériaux. Enfin, la sous-section 1.2.3 présente une brève analyse des incidents recensés pour ce type d'ouvrage.

1.2.1 Matériaux de remblai

Les matériaux de remblai, qu'il s'agisse de sols ou de matériaux d'enrochement, sont classés au moyen d'essais standardisés en laboratoire. Les sols fins comprennent l'argile et le silt, tandis que les sols grossiers regroupent le sable et le gravier. Les sols dont l'agencement de particules présente un large éventail de tailles, allant de l'argile aux blocs, présentent une courbe granulométrique dite « étalée ». Les matériaux d'enrochement, quant à eux, correspondent à des fragments rocheux (USBR, 1987; Kutzner, 1997; USSD, 2011; MCIF, 2023). Outre pour leur classification granulométrique, ces matériaux font l'objet d'essais permettant de déterminer leurs caractéristiques hydrauliques (K) et mécaniques (compressibilité, déformabilité, résistance au cisaillement, sensibilité à la liquéfaction). Ces propriétés géotechniques, qui varient selon le type de matériaux géologiques, sont recherchées dans la conception des barrages en remblai (USBR, 1987; Kutzner, 1997; USSD, 2011).

1.2.1.1 Sols fins

Selon la classification des sols du MCIF (2023), un sol dit « fin » est un sol dont 50 % des particules qui le constituent ont un diamètre (d , mm) inférieur à 0,075 mm. La distinction entre l'argile et le silt repose sur l'évaluation de la limite de liquidité (w_L) et de l'indice de plasticité (I_p), ce dernier correspondant à l'écart entre w_L et la limite de plasticité (w_P ; MCIF, 2023). La plasticité constitue une caractéristique essentielle des sols fins : l'argile est un sol fin plastique,

tandis que le silt est peu ou non plastique. Qu'il s'agisse d'argile ou de silt, le sol fin présente généralement une faible K , une faible résistance au cisaillement et souvent une forte compressibilité (USSD, 2011).

1.2.1.2 Sols grossiers

Selon la classification des sols du MCIF (2023), le sol grossier, aussi appelé sol pulvérulent, est un sol dont 50 % des particules qui le constitue ont un d supérieur à 0,075 mm. Les propriétés d'un sol grossier dépendent en grande partie de sa courbe granulométrique. Elle peut être bien graduée, c'est-à-dire que toutes les particules allant de la plus fine à la plus grossière sont bien représentées, ou alors mal graduée, c'est-à-dire que soit les particules qui les composent sont de même taille (courbe granulométrique uniforme, Figure 1.4), soit une ou plusieurs tailles intermédiaires sont manquantes (courbe granulométrique discontinue ou à trou; Figure 1.4; USBR, 1987; Lafleur, Mlynarek & Rollin, 1989). La proportion de particules dites « fines », définies par un d inférieur à 0,075 mm, joue également un rôle important dans le comportement d'un sol grossier. Lorsqu'il en contient peu, le sol grossier, alors qualifié de matériau propre, est généralement facile à compacter, peu affecté par la teneur en eau (w , %) et résistant au gel (USBR, 1987). Quelle que soit la proportion de particules fines, un sol grossier présente généralement une forte résistance au cisaillement et une grande K (USSD, 2011). Cependant, il est vulnérable à l'érosion, qu'elle soit de surface ou interne.

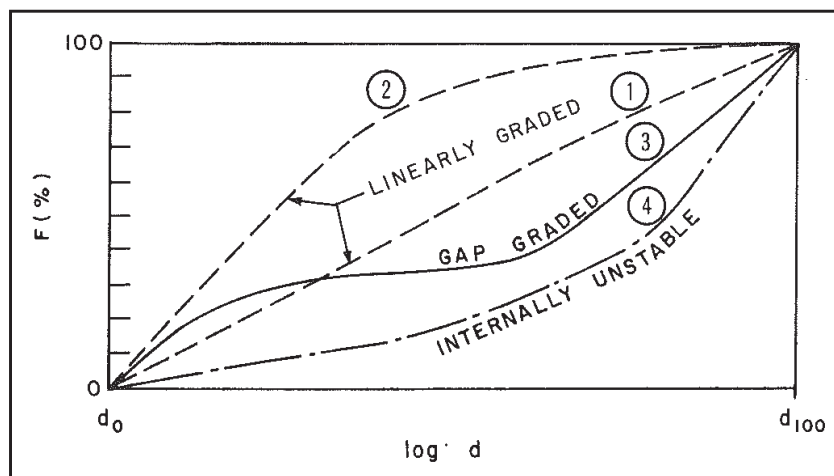


Figure 1.4 Illustrations des formes possibles de courbes granulométriques de matériaux granulaires : 1) linéaire uniforme sur l'ensemble de la courbe, 2) linéaire uniforme limitée aux particules fines, 3) discontinue et (4) concave vers le haut
Tirée de Lafleur et al. (1989, p. 1753)

1.2.1.3 Sols avec une courbe granulométrique étalée

Un sol dont la courbe granulométrique est étalée peut présenter à la fois des caractéristiques de sol fin et de sol grossier (MCIF, 2023). Le till, fréquemment utilisé dans la construction de barrages en remblai, en est un exemple typique (USSD, 2011). Issu des périodes de glaciation, il est particulièrement abondant au Canada (Rönnqvist, 2010; MCIF, 2023). Des différences existent en fonction des roches-mères d'où provient le till et donc de la région où se situent les barrages en remblai. Généralement, le till présente une faible K approchant celle d'un sol fin. En revanche, à l'instar d'un sol grossier, il présente une forte résistance au cisaillement, une faible compressibilité et une vulnérabilité à l'érosion interne (USSD, 2011).

1.2.1.4 Matériaux d'enrochement

Des fragments rocheux robustes et durables sont généralement recherchés comme matériaux d'enrochement. De par leur importante taille, il est plus difficile de déterminer leurs propriétés physiques (Kutzner, 1997). En général, elles dépendent de la forme de la courbe granulométrique du matériau d'enrochement, à l'instar d'un sol grossier, et de sa proportion de particules dites « de roches », définies par un d supérieur à 10 mm. Lorsqu'elle dépasse

60 % du matériau, l'enrochement dit « propre » présente généralement une forte résistance au cisaillement, une faible compressibilité et une grande K (Kutzner, 1997; USSD, 2011). Une autre caractéristique importante à prendre en compte d'un matériau d'enrochement est sa durabilité, c'est-à-dire sa résistance aux intempéries, qui est généralement élevée. Quant à la résistance en compression, elle varie selon le matériau d'enrochement.

1.2.2 Catégories structurales des barrages en remblai

Les premiers barrages construits par l'homme se rapprocheraient des barrages homogènes (Kutzner, 1997). Ils sont composés d'un seul type de matériau, principalement choisi pour sa faible K afin d'assurer l'étanchéité de la structure (Figures 1.5 0), 1.5 1) et 1.5 2); Kutzner, 1997; USSD, 2011; Rönnqvist, 2010; ACB, 2019). Une couche d'enrochement ou de sols grossiers peut être ajoutée sur la face amont ou aval pour limiter l'érosion par l'eau ou le vent et contrôler l'écoulement d'eau (Figures 1.5 1) et 1.5 2); USBR, 1987; Fell, MacGregor, Stapledon, Bell & Foster, 2014).

Les barrages homogènes ont ensuite laissé place aux barrages diaphragmes, qui ont été largement construits jusqu'aux années 1930. Ces derniers associent un matériau perméable (sable, gravier ou enrochements) à un matériau mince et peu perméable, appelé diaphragme (terre, béton de ciment ou enrobés bitumineux; Figures 1.5 6) à 1.5 11); USBR, 1987). Le matériau perméable assure la stabilité du barrage tout en contrôlant l'écoulement de l'eau, tandis que le diaphragme garantit son étanchéité (USBR, 1987; Fell et al., 2014). Une couche d'enrochement peut également être ajoutée sur la face amont de ce type de barrage pour limiter l'érosion (USBR, 1987; Kutzner, 1997).

Un barrage est considéré comme zoné lorsque le matériau peu perméable présente une épaisseur horizontale égale ou supérieure à la hauteur du barrage pour l'ensemble des élévations (Figures 1.5 3), 1.5 4) et 1.5 5)). Depuis les années 1930, la construction de ce type de barrages, tout comme celle des barrages homogènes, est privilégiée (USBR; Fell et al., 2014; Foster et al., 2000). Le noyau est encadré par des matériaux plus perméables (sable,

gravier ou enrochements), qui assurent le drainage, la protection ou la stabilité, selon leur emplacement (USBR, 1987; Fell et al., 2014). Un ou plusieurs matériaux avec une granulométrie intermédiaire, appelés filtres, sont placés entre le noyau et les matériaux grossiers afin de prévenir d'une possible migration des particules qui les composent (USBR, 1987; Kutzner, 1997; Fell et al., 2014).

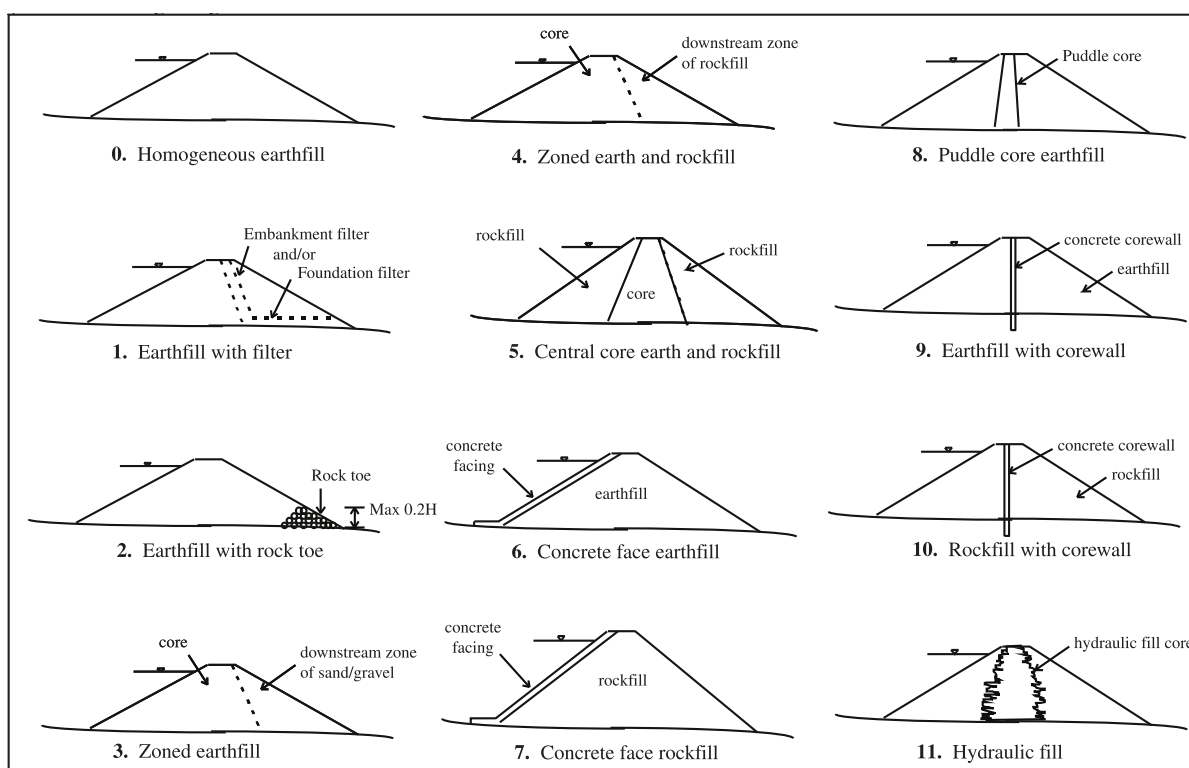


Figure 1.5 Illustrations des différents types de barrages en remblai : barrages homogènes – 0, 1 et 2; barrages zonés - 3, 4 et 5; et barrages diaphragmes - 6, 7, 8, 9, 10 et 11
Tirée de Foster et al. (2000, p. 1002)

Traduction en français des types des barrages illustrés dans la Figure 1.5:

- barrages homogènes : 0. en terre, 1. en terre avec filtres et 2. en terre avec une recharge d'enrochement en pied;
- barrages zonés : 3. en terre, 4. en terre et en enrochement et 5. en enrochement avec un noyau central en terre;

- barrages diaphragmes : 6. en terre avec un masque amont en béton, 7. en enrochement avec un masque amont en béton, 8. avec un noyau d'argile corroyée, 9. en terre avec un noyau en béton, 10. en enrochement avec un noyau en béton et 11. par remblayage hydraulique.

1.2.3 Incidents de barrages en remblai

Les matériaux de remblai utilisés pour la construction de barrages subissent de fortes contraintes. Celles-ci sont dues au poids des matériaux, à la poussée de l'eau stockée dans le réservoir d'emménagement, mais aussi à l'eau qui s'écoule à travers les matériaux (Kutzner, 1997; USSD, 2011; Fell et al., 2014). Ces contraintes peuvent fragiliser le barrage, voire entraîner sa rupture selon différents modes de rupture (CIGB, 2017; CIGB – CODS, 2019). Depuis plusieurs années, des organismes professionnels internationaux, tels que la CIGB - CODS (2019), et des groupes de chercheurs, tels que Foster et al. (2000) et Fry (2016), analysent les données sur les incidents de barrages. Leur objectif est de mieux comprendre les raisons et les mécanismes responsables de la vulnérabilité des barrages afin d'améliorer leur sécurité.

1.2.3.1 Définitions

Des incidents peuvent survenir durant la construction et/ou de l'exploitation du barrage. Ces derniers peuvent être de deux types : la rupture et l'accident. La rupture correspond à la destruction partielle ou totale de la structure et/ou de ses fondations (Marche, 2008; CIGB - CODS, 2019). L'accident est une rupture évitée grâce à une intervention humaine après la détection d'un défaut dans l'ouvrage ou dans ses fondations (Fry, 2016; CIGB, 2017).

Selon la CIGB - CODS (2019), les incidents sont dus à trois modes de rupture : le franchissement (également appelé érosion externe), l'érosion interne et la défaillance structurelle. Le franchissement est dû au débordement de l'eau contenue dans le réservoir d'emménagement, par exemple lors d'inondations. L'érosion interne, quant à elle, correspond à l'arrachement et à l'entraînement des particules d'un matériau de remblai dus à

l'écoulement d'eau le traversant. Elle s'accompagne en général d'une modification des pressions interstitielles pouvant entraîner des soulèvements et/ou des déversements. Il existe quatre principaux mécanismes d'érosion interne : l'érosion régressive, l'érosion de conduit, l'érosion de contact et la suffusion. Ces mécanismes, ainsi que les conditions favorisant leur développement, sont définis plus en détail dans la section 1.3. La défaillance structurelle inclut des phénomènes tels que les mouvements de masse (glissement, tassement), ainsi qu'un manque de soutien du corps du barrage et/ou de ses fondations. Dans certains incidents répertoriés, plusieurs modes de rupture sont impliqués (Foster et al., 2000; CIGB, 2017; CIGB - CODS 2019).

1.2.3.2 Statistiques des incidents dus à l'érosion interne

La lecture des travaux de Foster et al. (2000), de Fry (2016), de la CIGB (2017) et de la CIGB - CODS (2019) permet de tirer plusieurs conclusions sur les incidents survenus dans les grands barrages en remblai depuis le début du XIX^{ème} siècle. D'après la CIGB - CODS (2019), qui étudie les incidents affectants tous types de barrages depuis 1974 (CIGB - CODS, 2019), les barrages en remblai présentent le taux de rupture le plus élevé, souvent en raison d'une conception déficiente. Le franchissement est le principal phénomène responsable de ces ruptures, suivi par l'érosion interne (Figure 1.6; Foster et al., 2000; Fry, 2016; CIGB, 2017). Cependant, une analyse par type de barrage en remblai révèle que les barrages en enrochement sont davantage affectés par un franchissement, tandis que les barrages en terre sont légèrement plus touchés par l'érosion interne (CIGB - CODS, 2019).

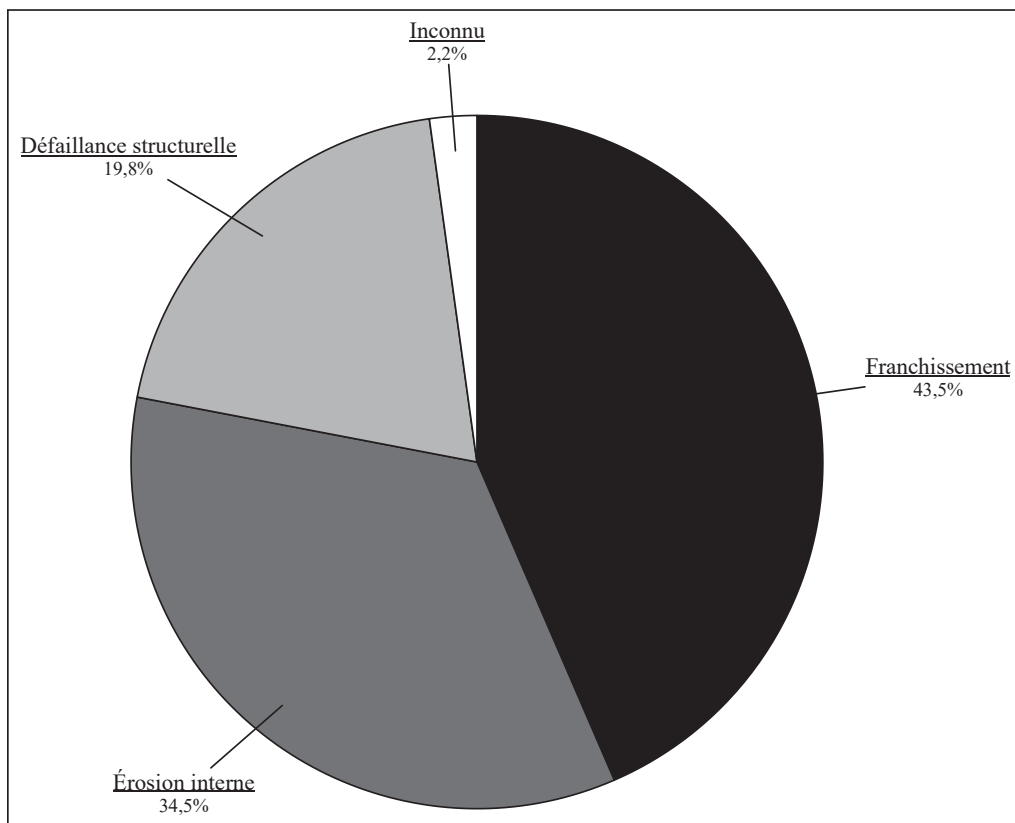


Figure 1.6 Pourcentage de rupture dans les barrages en remblai selon les trois modes de rupture

Adaptée de la CIGB - CODS (2019, p. 33)

Les incidents de barrages en remblai dus à l'érosion interne surviennent généralement dans des conditions dites normales, c'est-à-dire en l'absence de catastrophes naturelles (inondations, séismes) ou d'interventions humaines hostiles. Il est souvent difficile de localiser précisément la zone d'amorçage de l'érosion. Toutefois, dans les cas identifiés, ce phénomène affecte d'abord le remblai, notamment autour ou à proximité des conduites, puis ses fondations et enfin l'interface remblai-fondation (Figures 1.7a et 1.7b; Foster et al., 2000; CIGB, 2017; CIGB – CODS, 2019). L'étude de Foster et al. (2000) distingue les types de barrage en remblai, présentés en Figure 1.5, impliqués dans les incidents survenus dans le monde jusqu'en 1986. Le barrage homogène est celui ayant connu le plus grand nombre de ruptures, tandis que le barrage zoné est celui en ayant subi le moins (Figure 1.7 a). Ce dernier est néanmoins associé au plus grand nombre d'accidents liés à une érosion interne (Figure 1.7 b). Le fait que l'érosion interne entraîne d'avantage d'accidents que de ruptures dans les barrages zonés s'explique par

la présence de zones en aval plus stables, qui permettent à l'ouvrage de ne pas s'effondrer malgré la présence d'une érosion (Foster et al., 2000). Deux périodes sont généralement critiques pour un barrage : le remplissage du réservoir, durant lequel le risque de rupture est le plus élevé, et les cinq premières années d'exploitation (CIGB, 2017; CIGB - CODS, 2019). Enfin, selon Fry (2016), qui analyse uniquement les ruptures de barrages en remblai causées par une érosion interne, l'érosion de conduit est considérée comme le mécanisme le plus dangereux, tandis que la suffusion est jugée la moins dangereuse, après l'érosion régressive et l'érosion de contact.

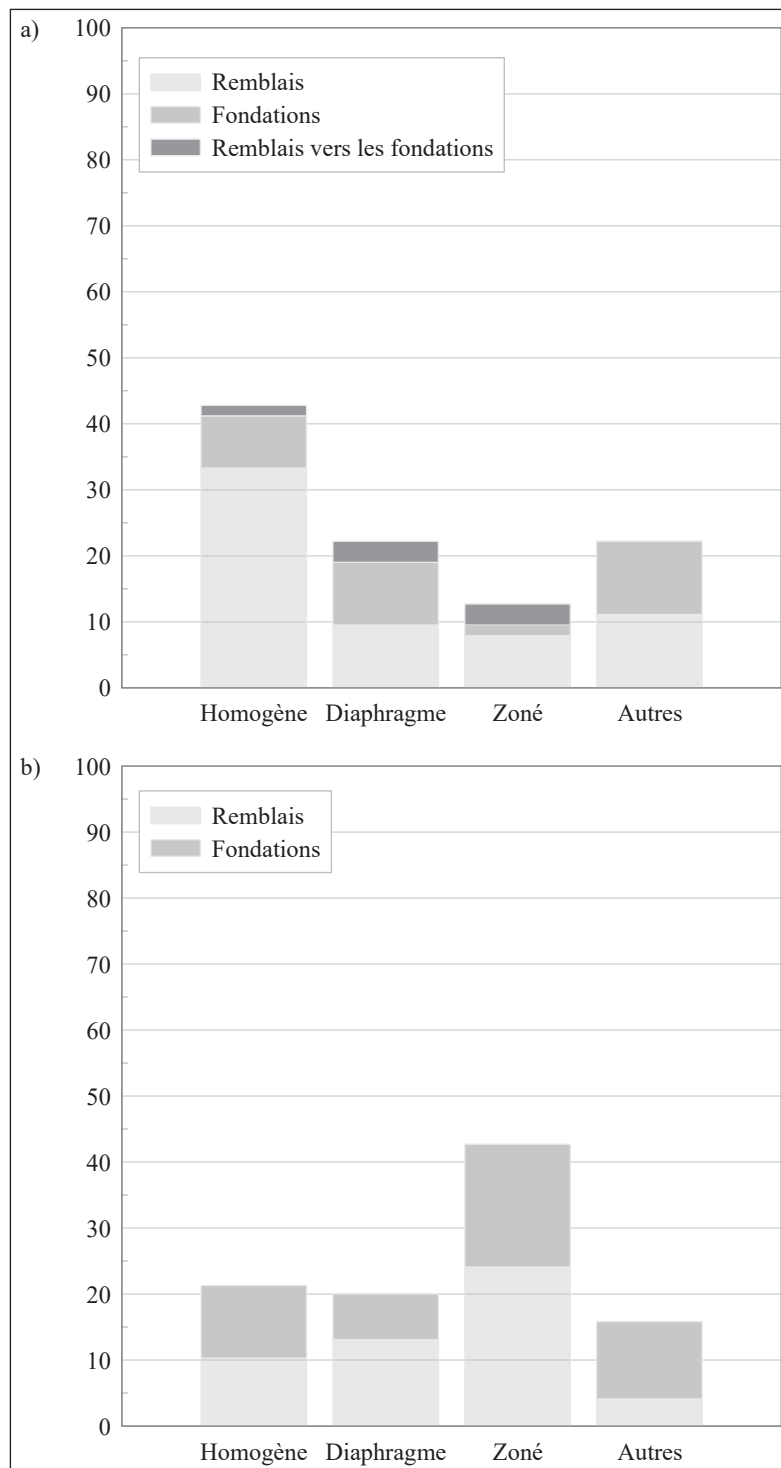


Figure 1.7 a) Ruptures et b) accidents répertoriés dans les barrages en remblai selon leur type et l'emplacement de l'érosion interne

Adaptée de Foster et al. (2000, p. 1007)

1.3 Mécanismes d'érosion interne

La classification des mécanismes d'érosion interne repose sur les processus d'initiation et de transport des particules impliqués. Ces derniers résultent eux-mêmes d'une combinaison de trois facteurs associés à des faiblesses au sein du corps de l'ouvrage et/ou de ses fondations (Garner & Fannin, 2010) : la susceptibilité du matériau à la migration des particules, la présence d'un gradient hydraulique critique (i_{cr}) permettant d'initier l'érosion et l'existence d'une contrainte critique rendant le matériau incapable de s'opposer à cette migration. Parmi les mécanismes d'érosion interne, la suffusion désigne la migration sélective des particules les plus fines non fixes d'un matériau granulaire, sous l'effet d'un écoulement d'eau, à travers le squelette formé par les particules les plus grosses. La sous-section 1.3.1 présente les généralités associées aux quatre principaux mécanismes d'érosion interne, tandis que la sous-section 1.3.2 est consacrée aux spécificités de la suffusion, phénomène étudié plus spécifiquement dans le cadre de cette thèse. Par souci de simplicité, le terme « particules fines » sera utilisé dans la suite pour désigner les plus petites particules d'un matériau granulaire, sans se limiter uniquement à celles de d inférieur à 0,075 mm. Lorsque cette catégorie sera visée, l'expression « particules de d inférieur à 0,075 mm » sera employée.

1.3.1 Généralités

Les mécanismes d'érosion interne se déroulent en quatre phases : initiation, continuation, progression et apparition d'une rupture ou d'une brèche (Rönnqvist, 2010; CIGB, 2017). Toutefois, les processus d'initiation et de progression varient selon le type de mécanisme, lesquels dépendent de la nature des facteurs de vulnérabilité présents dans le corps de l'ouvrage (Garner & Fannin, 2010). Un barrage peut être affecté par un premier mécanisme d'érosion interne, susceptible d'en déclencher un second.

1.3.1.1 Quatre phases de l'érosion interne

L'érosion interne débute par une perte d'équilibre des particules du matériau granulaire. L'écoulement d'eau traversant le barrage doit exercer une force de soulèvement suffisante pour

contrer les forces intergranulaires. Ce processus d'initiation, ou d'arrachement, varie selon le type d'érosion interne en jeu (Tableau 1.1). En l'absence d'un filtre ou si celui-ci est inefficace (phase de continuation), les particules non fixes ou arrachées sont transportées par l'écoulement, permettant ainsi la progression de l'érosion. Ce transport peut s'effectuer dans un conduit qui se forme progressivement, appelé « renard » (érosion régressive), ou dans un conduit préexistant qui s'élargit avec le temps (érosion de conduit). Il peut aussi s'effectuer à travers les pores formés par les particules plus grossières que les particules érodées, comme dans l'érosion de contact et la suffusion (Tableau 1.1; Blais, 2005; CIGB, 2017). Quel que soit le processus de transport en jeu, les caractéristiques hydrauliques et/ou mécaniques du matériau sont affectées, ce qui peut fragiliser l'ouvrage et mener à sa rupture (Wan & Fell, 2004, 2008; Andrianetrehina et al., 2016; CIGB, 2017).

Tableau 1.1 Processus de développement définissant les quatre principaux mécanismes d'érosion interne et les facteurs de vulnérabilité nécessaires à leur apparition

Type d'érosion interne	Processus d'initiation	Processus de progression	Facteurs de vulnérabilité
Érosion régressive	Détachement des particules de la surface aval libre d'un matériau ou en contact avec un autre matériau plus grossier	Formation progressive d'un ou plusieurs renards, qui peuvent s'effondrer	Géométrique, hydraulique et mécanique
Érosion de conduit	Détachement des particules de toutes tailles le long des parois d'un conduit (chemin préférentiel, fissure, zone de plus grande perméabilité)	Élargissement progressif du conduit préexistant	Géométrique, hydraulique et mécanique
Érosion de contact	Détachement des particules d'un matériau fin en contact avec un matériau plus grossier	À travers les pores formés par les particules du matériau grossier	Géométrique, hydraulique et mécanique
Suffusion	Migration des particules fines non fixes d'un matériau	À travers les pores formés par les particules grossières, correspondant au squelette du matériau	Géométrique et hydraulique

1.3.1.2 Facteurs favorisant l'érosion interne

La susceptibilité du matériau, facteur de nature géométrique (Kezdi, 1979; Kenney & Lau, 1985; Khan, 2003; Li & Fannin, 2008), dépend de ses caractéristiques granulaires (instabilité

interne, porosité (n), présence de particules de d inférieur à 0,075 mm cohésives) et de son incompatibilité avec les matériaux environnants (Figure 1.8). L'instabilité interne, correspondant à l'incapacité du matériau à empêcher la migration de ses particules fines mises en mouvement par un écoulement (Fannin & Moffat, 2006), est généralement considérée comme la plus influente (Garner & Fannin, 2010). Cette condition est approfondie dans la sous-section 1.4.2.1.

Le gradient hydraulique critique, facteur de nature hydraulique généralement local, dépend non seulement du gradient hydraulique (i) appliqué, mais aussi de paramètres tels que la vitesse d'écoulement (v , cm/s), et les pressions interstitielles (u , kPa) présentes ou développées au cours du temps (Figure 1.8). Cette condition est abordée dans la sous-section 1.4.2.2.

La contrainte critique, facteur de nature mécanique, peut résulter de conditions locales ou globales dans le corps de l'ouvrage. Elle survient notamment lorsque les contraintes internes sont faibles, par exemple en présence de vibrations (dus à des séismes), de tassements différentiels (dus à un compactage déficient) ou de conduits (dus aux animaux, aux racines ou aux lentilles de gel). Elle peut également résulter d'un transfert de contraintes lié à une migration de particules (Figure 1.8; Kezdi, 1979; Kenney & Lau, 1985; Khan, 2003; Li & Fannin, 2008; Garner & Fannin, 2010; Rönnqvist, 2010).

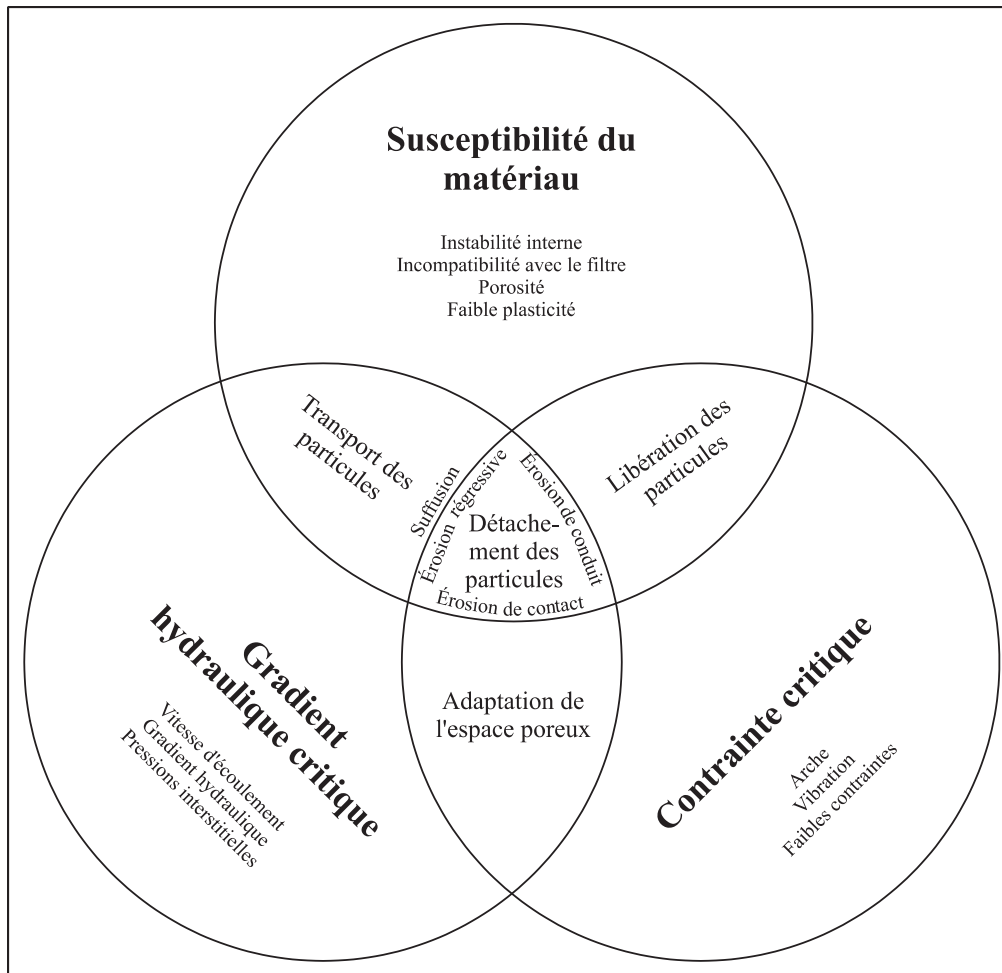


Figure 1.8 Diagramme de Venn résumant les effets de l'interaction des trois facteurs de vulnérabilité sur le comportement des particules et les mécanismes d'érosion interne qui en résultent
Adaptée de Garner & Fannin (2010)

1.3.2 Suffusion

Depuis les années 1950, plusieurs termes ont été employés dans la littérature pour décrire l'érosion interne sélective, notamment répertoriés par Li (2008) et Fannin & Slangen (2014). Les deux termes les plus couramment utilisés sont « suffusion » et « suffosion », dont l'usage dépend des modifications induites au matériau soumis à l'écoulement. Quel que soit le type d'érosion interne sélective, une susceptibilité du matériau et un i_{cr} sont nécessaires. Ces deux facteurs sont de plus en plus étudiés depuis les années 1950 au moyen d'essais d'écoulement

réalisés en laboratoire. Leur objectif est généralement de développer un critère qui permettrait de les évaluer sans forcément passer par l'expérimentation.

1.3.2.1 Terminologie

Selon Fannin & Slangen (2014), une distinction est nécessaire entre l'emploi des termes « suffusion » et « suffosion ». Cette distinction, de plus en plus répandue dans la littérature, repose sur les modifications qu'induisent ces érosions internes sélectives aux caractéristiques du matériau. Dans les deux cas, la migration des particules fines modifie la conductivité hydraulique (ΔK , cm/s). Si cette migration entraîne une augmentation de K sans un changement de volume (ΔV , cm³) du matériau, le terme « suffusion » est à privilégier (Figure 1.9). En revanche, si cette migration entraîne une modification de K couplée à un ΔV et à un colmatage du matériau, le terme « suffosion » est plus approprié (Figure 1.9; Garner & Fannin, 2010; Fannin & Slangen, 2014). Contrairement à la suffusion, qui est un phénomène non destructeur, la suffosion est destructrice. Dans la suite de cette thèse, le terme « suffusion » sera utilisé par souci de simplicité, sauf lorsque l'érosion interne visée correspond explicitement à une suffosion.

Un autre terme qui revient souvent dans les études sur la suffusion, et plus particulièrement sur la stabilité interne est celui d'autofiltration (Honjo, Haque, & Tsai, 1996; Wan & Fell, 2004; Fannin & Slangen, 2014). Un matériau auto-filtrant est constitué de particules grossières capables de retenir les particules moyennes d'une migration induite par l'écoulement, ces dernières retenant à leur tour les particules fines. Ainsi, un matériau non autofiltrant est considéré comme instable (Wan & Fell, 2004).

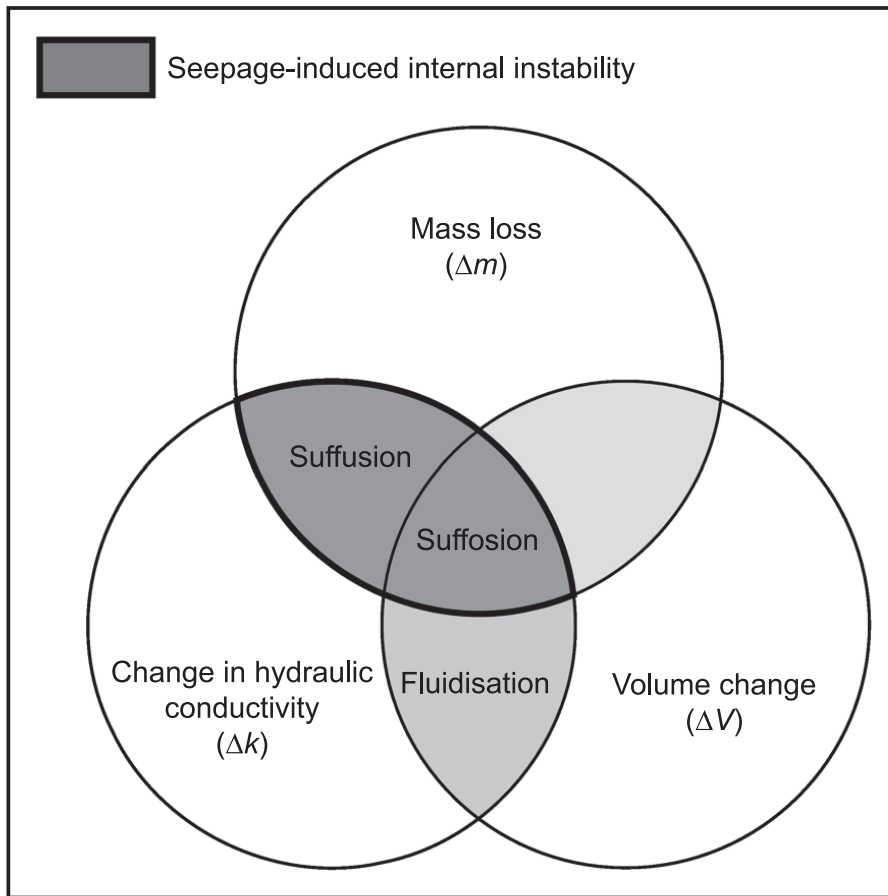


Figure 1.9 Distinction entre la suffusion et la suffosion à partir des paramètres affectés du matériau
Tirée de Fannin & Slangen (2014, p. 293)

1.3.2.2 Facteurs favorisant la suffusion

La susceptibilité d'un matériau dépend notamment de son instabilité interne et de n (Kenney & Lau, 1985; Wan & Fell, 2004; Moraci, Mandaglio, & Ielo, 2014; Israr & Irfan, 2020). Seule l'instabilité interne est abordée en détail dans cette sous-section, en raison de son influence prépondérante. Pour qu'un matériau soit instable, deux conditions interdépendantes doivent être réunies, toutes deux influencées par la forme de la courbe granulométrique (Wan & Fell, 2004; Li & Fannin, 2008). D'une part, les particules grossières doivent constituer un squelette solide, appelé structure primaire, capable de supporter les contraintes imposées, tandis que les particules fines doivent rester libres à l'intérieur des pores formés par cette structure (Andrianatrehina et al., 2016). D'autre part, les pores créés par les particules

grossières doivent être interconnectés, sous forme d'interstices ou de constriction (Kenney & Lau, 1985; Li & Fannin, 2008; Garner & Fannin, 2010; Zhou, Ranjith & Li, 2016), et être plus larges que les particules fines érodées. Selon Skempton & Brogan (1994), le respect de la première condition nécessite que la fraction fine ne dépasse pas 35 % de la masse totale du matériau (M_t , g). À défaut, les particules grossières « flotteraient » entre les particules fines, empêchant la formation d'un squelette porteur (Skempton & Brogan, 1994; Wan & Fell, 2004; Moraci et al., 2015; CIGB, 2017).

Concernant i_{cr} nécessaire à l'initiation à la suffusion, il est généralement plus faible que celui requis pour initier d'autres types d'érosion interne (Rönnqvist & Viklander, 2016). Un écoulement présentant un i inférieur à i_{cr} théorique, défini comme celui pour lequel la contrainte normale effective (σ' , kPa) est nulle pour un écoulement vertical ascendant, peut suffire à provoquer une suffusion dans un matériau instable (Skempton & Brogan, 1994; Wan & Fell, 2004a). De la suffusion a été observée dans des matériaux soumis à des i inférieurs à 0,3 (Skempton & Brogan, 1994; Wan & Fell, 2004; Ataii & Fannin, 2016; Israr & Irfan, 2020).

1.3.2.3 Études en laboratoire

Les premières études en laboratoire sur la suffusion se sont principalement concentrées sur la susceptibilité de matériaux soumis à un écoulement, et plus précisément sur leur stabilité interne. Ces études visaient à évaluer directement cette stabilité au moyen d'essais d'écoulement en laboratoire (Lafleur et al., 1989; Fannin & Moffat, 2006) et/ou à développer un critère géométrique fondé sur la courbe granulométrique (*U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1953; Istomina, 1957; Lubochkov, 1962, 1963; De Mello, 1975; Kezdi, 1979, Sherard, 1979; Kenney & Lau, 1985, 1986; Lowe, 1988; Burenkova, 1993; Honjo et al., 1996; Chang & Zhang, 2013; Moraci et al., 2014, 2015; Mandaglio et al., 2014; Andrianatrehina et al., 2016; Zhou et al., 2016). Bien que Kenney & Lau (1985) jugent la méthode expérimentale comme étant la plus fiable pour évaluer la stabilité interne, l'approche géométrique offre l'avantage d'identifier les matériaux potentiellement instables sans avoir à recourir à des essais

d'écoulement. Ces critères, reposant généralement sur des caractéristiques granulométriques considérées pertinentes, ont d'abord été développés sur la base d'analyses théoriques et/ou expérimentales. Ces derniers, qualifiés de semi-empiriques, ont ensuite été modifiés et/ou combinés afin de formuler des approches plus robustes. La susceptibilité d'un matériau dépendant également de n , certaines études ont examiné l'influence de l'indice de densité relative (I_D , %) ou de la compacité relative (C.R., %) au moyen d'essais d'écoulement, cherchant parfois à établir un critère géométrique qui en tiendrait compte (Wan & Fell, 2004; Israr & Irfan, 2020).

Il faudra attendre les années 1990 pour que l'amorçage de la suffusion soit étudié au moyen d'essais d'écoulement. Ces derniers visent à évaluer le rôle de i , appliqué seul ou combiné à σ' donnée, dans l'initiation et la progression de la suffusion (Skempton & Brogan, 1994; Moffat, 2002; Khan, 2003; Wan & Fell, 2004; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takashi, 2014; Slangen & Fannin, 2017; Ataii & Fannin, 2022). Ces approches sont à l'origine de critères dits hydrauliques et hydromécaniques. Les travaux menés montrent qu'un i nécessaire à la migration des particules fines dépend de caractéristiques propres au matériau, telles que n , la forme de la courbe granulométrique ou encore la nature des particules (Khan, 2003; Wan & Fell, 2004a; Israr & Irfan, 2020), ainsi que de σ' appliquée (Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008). Les critères hydrauliques et hydromécaniques sont parfois établis en complément de l'évaluation de la stabilité interne des matériaux (Khan, 2003; Wan & Fell, 2004; Li, 2008) et/ou intégrés à des approches combinant des caractéristiques granulométriques (Li, 2008; Israr & Irfan, 2020).

1.4 Essais d'écoulement en laboratoire

Lors des essais d'écoulement, quelle que soit la nature du critère évalué (géométrique, hydraulique et/ou hydromécanique), les matériaux sont placés dans une cellule d'écoulement, puis généralement soumis à un simple écoulement d'eau. Des paramètres expérimentaux sont relevés au cours et/ou à la fin des essais, puis analysés afin de mieux comprendre le phénomène de suffusion. Il n'existe toutefois aucune norme encadrant la réalisation de ces essais

(Slangen & Fannin, 2016). Cette absence de cadre normatif contribue à la grande hétérogénéité des procédures rapportées dans la littérature, que ce soit en termes de dispositifs expérimentaux (cellules d'écoulement, système hydraulique, matériel de drainage, surcharge), d'étapes de préparation (mise en place, compactage, saturation) et de critères retenus pour juger de la stabilité interne d'un matériau ou de la présence de suffusion (analyses granulométriques, perte de particules fines, paramètres hydrauliques, variation du volume du matériau). Ces derniers sont présentés dans les sous-sections 1.4.1, 1.4.2 et 1.4.3 respectivement. Une partie de cette variabilité s'explique également par la diversité des objectifs poursuivis dans les études (type de critère évalué, type de matériau testé, conditions d'essais recherchées). La présente section décrit les dispositifs expérimentaux principalement prévus pour évaluer la stabilité interne, le plus souvent dans une perspective de développement de critères géométriques. Quelques éléments relatifs aux dispositifs utilisés pour établir des critères hydrauliques et hydromécaniques sont également mentionnés, sans que leurs spécificités propres soient détaillées dans cette thèse.

1.4.1 Montage expérimental

Dans un dispositif expérimental, la cellule d'écoulement joue un rôle central. De forme cylindrique, elle peut être à parois rigides ou souples. Elle est généralement conçue ou modifiée à partir d'une cellule existante pour pouvoir étudier la suffusion. L'adaptation ou l'ajout le plus courant concerne l'intégration d'un système ouvert, destiné à permettre la migration des particules fines en dehors du matériau. L'eau utilisée pour les essais d'écoulement, appelée « eau de percolation » (*American Society for Testing and Materials* (ASTM) D2434-22), est introduite à l'aide d'un système hydraulique à charge constante ou variable, selon les objectifs. Une plaque perforée associée à un grillage est généralement utilisée pour assurer une distribution uniforme de l'écoulement à travers le matériau. Enfin, une surcharge, qu'elle soit nominale ou contrôlée, est généralement appliquée pendant la saturation et l'essai.

1.4.1.1 Cellule d'écoulement

Les cellules à parois rigides sont les plus couramment utilisées. Il s'agit notamment de perméamètres (Lafleur et al., 1989; Skempton & Brogan, 1994; Honjo et al., 1996) ou de dispositifs d'essai du rapport de gradient (Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008). Toutefois, leur rigidité peut favoriser l'apparition de chemins préférentiels le long des parois. Afin de limiter ce phénomène, le diamètre interne de la cellule d'écoulement doit généralement être de dix fois supérieur au d correspondant à 95 % du pourcentage passant massique (d_{95} , mm) du matériau testé (Chapuis, 2012; ASTM D2434-22). Une autre approche consiste à tapisser l'intérieur des parois d'une couche de matériau souple ou de particules, réduisant ainsi les effets de bords (Kenney & Lau, 1985; Khan, 2003). Les parois rigides peuvent être faites d'un matériau transparent (ASTM D2434-22), ce qui facilite l'observation de la saturation du matériau (Chang & Zhang, 2011) et/ou de la migration des particules fines pendant l'essai (Ke & Takashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016). Les cellules d'écoulement à parois souples, quant à elle, sont principalement employées dans les études portant sur l'évaluation d'un critère hydromécanique (Chang & Zhang, 2011; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). Ce type de cellule permet d'appliquer une contrainte cellulaire (σ_{cell} , kPa) sur le matériau tout en limitant les chemins préférentiels (ASTM D2434-22).

La cellule d'écoulement retenue pour l'étude de la suffusion, qu'elle soit à parois rigides ou souples, peut être dotée d'un système fermé ou ouvert. Un système fermé peut suffire à évaluer la stabilité interne, la migration des particules étant alors confinée à l'intérieur du matériau (Andrianatrehina et al., 2016). Toutefois, un système ouvert, dont l'utilisation est fortement recommandée par Kenney & Lau (1985, 1986), est généralement privilégié dans les études sur la suffusion, car il permet d'observer plus facilement la migration des particules fines sous l'effet de l'écoulement.

Une cellule d'écoulement avec un système ouvert est généralement divisée en trois parties. La partie supérieure contient le matériau soumis à l'écoulement. La partie centrale est composée d'une plaque perforée et d'un grillage. La plaque perforée retient le matériau tout en distribuant

l'eau, tandis que le grillage laisse uniquement passer les particules fines susceptibles de migrer (ASTM D2434-22; Lafleur et al., 1989; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). Il n'existe pas de règle précise concernant les tailles d'ouverture idéales pour la plaque perforée et le grillage. Toutefois, les diverses études ont tendance à adapter l'ouverture du grillage en fonction de la forme de la courbe granulométrique du matériau. Si elle est discontinue, le diamètre minimum de la fraction grossière est généralement retenu (Moffat, 2002; Khan 2003; Fannin & Moffat, 2006; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022), alors que si elle est continue, les d correspondant à 40 % et 50 % du pourcentage passant massique, notés d_{40} et d_{50} (mm), sont généralement retenus (Lafleur et al., 1989; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008). La plaque perforée est souvent choisie avec une taille d'ouverture plus grande que celle du grillage. Une autre approche consiste à remplacer la plaque perforée et le grillage par une couche de particules grossières (Kenney & Lau, 1985; Wan & Fell, 2004), jouant à la fois le rôle de couche filtrante et de couche drainante. Enfin, la partie inférieure sert de collecteur pour les particules fines érodées. Il peut prendre la forme d'un réservoir (Kenney & Lau, 1985; Lafleur et al., 1989; Skempton & Brogan, 1994; Honjo et al., 1996), d'un contenant détachable (Chang & Zhang; 2011), ou d'un tuyau en silicone flexible (Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006). Un entonnoir est parfois placé sous la plaque perforée et le grillage, afin de diriger les particules érodées vers le collecteur tout en limitant les risques de colmatage (Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takahashi, 2014; Ataii & Fannin, 2022).

1.4.1.2 Eau de percolation et système hydraulique

L'eau de percolation peut être prélevée directement au robinet, comme recommandé par la norme ASTM D2434-22, ou distillée afin de limiter la présence de particules en suspension susceptibles d'obstruer les pores du matériau. Elle peut ensuite être utilisée telle quelle ou désaérée avant d'être écoulee à travers le matériau. Une eau désaérée est généralement recommandée lors des essais d'écoulement (ASTM D2434-22; ASTM D4491; ASTM D5101; ASTM D5856; Chapuis, 1989, 2012) en raison de son influence significative sur l'obtention

d'une saturation complète du matériau. Pour être considérée comme désaérée, sa concentration en oxygène dissous (OD, mg/L), mesurée à l'aide d'un kit chimique ou d'un appareil de mesure spécifique (ASTM D4491; Daniel, 1994), doit être inférieure à 6 mg/L (ASTM D4491; Halse, Lord, & Koerner, 1988; Fischer, Maré, & Holtz, 1999; Aydulek & Kutay, 2004), voire à 2 mg/L selon certaines références (ASTM D5101; Bertram 1940; Daniel, 1994). La désaération de l'eau peut être réalisée au moyen de différentes méthodes, appliquées individuellement ou en les combinant (Bertram, 1940; Li, 2008). Elles reposent sur deux grands principes : physiques et thermiques. Les méthodes physiques incluent la filtration à travers un sable fin (ASTM D2434; Bertram, 1940; Lafleur et al., 1989; Li, 2008; Slangen & Fannin, 2016) ou à travers un filtre à carbone (Li, 2008; Slangen & Fannin, 2016), la pulvérisation en fines gouttelettes dans un récipient sous vide (ASTM D5856; Bertram, 1940; Halse et al., 1988; Daniel, 1994; Bardet, 1997), ainsi que l'imposition d'un vide (Li, 2008). Les méthodes thermiques regroupent la désaération par chauffage (ASTM D2434; Bertram, 1940) et par ébullition (ASTM D5856; Chu, Davidson, & Wickstrom, 1955; Daniel, 1994).

L'eau retenue pour les essais est ensuite placée dans un réservoir à charge constante situé en amont de la cellule d'écoulement. Il peut s'agir d'une cellule de Mariotte (ASTM D2434-22; Chang & Zhang, 2011), qui présente l'avantage de pouvoir être aisément mise sous vide (Bertram, 1940). Le réservoir d'entrée d'eau est généralement couplé à un second réservoir à charge constante, placé en aval de la cellule d'écoulement (Kenney & Lau, 1985; Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). L'utilisation conjointe des réservoirs amont et aval permet d'appliquer et de contrôler l'écoulement d'eau à travers le matériau. Dans certaines études, une pompe est utilisée entre les deux réservoirs pour remettre l'eau en circulation dans la cellule d'écoulement (Kenney & Lau, 1985; Honjo et al., 1996; Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016). Lorsque cette eau est désaérée, Moffat (2002) recommande d'y ajouter régulièrement de l'eau fraîchement désaérée afin de maintenir une faible concentration en OD. Toutefois, la norme ASTM D2434-22 déconseille de faire circuler à nouveau l'eau de percolation entre les deux réservoirs.

1.4.1.3 Matériel de drainage

Le drainage dans les cellules d'écoulement est généralement assuré par une plaque perforée et un grillage placés au-dessus du matériau. La plaque perforée joue le rôle d'une pierre poreuse, permettant de distribuer uniformément l'écoulement à travers le matériau tout en évitant de créer une perte de charge significative dans le système (ASTM D2434-22; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016). Le grillage, placé entre le matériau et la plaque perforée, empêche le colmatage de la plaque par les particules grossières (Chang & Zhang, 2011). Sa taille d'ouverture est généralement choisie plus petite que celle du grillage inférieur (Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ataii & Fannin, 2022). Dans certaines études, l'utilisation de la couche de particules grossières à la place de la plaque perforée (Wan & Fell, 2004; Skempton & Brogan, 1994) ou en complément (Ataii & Fannin, 2022) permet d'assurer la distribution de l'écoulement.

1.4.1.4 Surcharge verticale

La charge verticale est appliquée sur le haut du matériau de manière nominale, à l'aide d'un ressort (Kenney & Lau, 1985; ASTM D2434-19), ou de grenaille de plomb (Honjo et al., 1996), ou de manière contrôlée, au moyen d'un piston pneumatique placé sur la plaque perforée (Moffat, 2002; Khan, 2003; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). La surcharge nominale vise à maintenir le matériau en place durant la saturation et l'essai, tandis que la surcharge contrôlée permet également de reproduire des conditions de σ' données.

1.4.2 Matériaux granulaires

Les matériaux testés diffèrent tant par le type de particules qui les composent (particules naturelles, particules artificielles, roches concassées) que par leur nature (matériaux naturels, matériaux reconstitués). Les courbes granulométriques associées sont généralement étalées, notamment de forme concave vers le haut, ou discontinues.

1.4.2.1 Types de particules

Les matériaux sont constitués de particules naturelles ou de roches concassées, dont la forme est généralement subangulaire (Kenney & Lau, 1985; Skempton & Brogan, 1994; Honjo et al., 1996; Moffat, 2002; Wan & Fell, 2004; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takashi, 2014; Andrianetrahina et al., 2016; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). Cependant, des billes de verre, particules sphériques artificielles, sont de plus en plus utilisées pour étudier la suffusion (Lafleur et al., 1989; Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008; Slangen & Fannin, 2016). Elles sont choisies pour leurs propriétés particulières, notamment leur sphéricité et leur surface lisse, qui réduisent le nombre de paramètres supplémentaires qui influencent l'érosion interne (Lafleur et al., 1989), ainsi que leur nature transparente.

1.4.2.2 Matériaux naturels ou reconstitués

Les matériaux testés sont soit naturels, comme les matériaux notés X et Y dans l'étude de Kenney & Lau (1985), utilisés comme filtres pour la construction d'un barrage en remblai, soit reconstitués à partir de particules naturelles ou artificielles. Dans le cas de matériaux reconstitués, les particules sont mélangées de façon à obtenir une courbe granulométrique spécifique. L'étude de Honjo et al. (1996) constitue un bon exemple de matériaux reconstitués. Dans cette étude, des matériaux avec des courbes granulométriques discontinues ont été reconstitués de façon à varier la discontinuité selon plusieurs paramètres (diamètres minimaux ($d_{\min}$, mm) et maximaux ($d_{\max}$, mm) de la discontinuité, largeur de la discontinuité, pourcentages des fractions fine et grossière).

1.4.2.3 Courbes granulométriques

Différentes formes de courbes granulométriques sont testées dans la littérature. La forme linéaire est celle qui est la moins représentée, tandis que les formes discontinues et étalées, qui plus est concaves vers le haut, le sont davantage. Deux raisons principales expliquent ce choix. D'une part, une forme linéaire est plus susceptible de donner un matériau stable, alors qu'une forme discontinue et une forme étalée concave vers le haut sont plus susceptibles de donner un

matériau instable (Lafleur et al., 1989; Honjo et al., 1996; Indraratna & Locke, 1999; Wan & Fell, 2008; Ke & Takashi, 2014; Andrianatrehina et al., 2016; Zhou et al., 2016). D'autre part, les matériaux présentant une courbe granulométrique discontinue et étalée sont fréquemment employés dans la construction de barrages en remblai, malgré leur forte susceptibilité à l'érosion (Ke & Takashi, 2014). Ce choix s'explique par leur grande abondance dans certaines régions du monde, notamment en Amérique du Nord et en Scandinavie (Khan, 2003; Wan & Fell, 2004; Li, 2008; Rönnqvist, 2010).

1.4.3 Procédures d'essais

Les étapes de préparation comprennent la mise en place, le compactage et la saturation du matériau. Idéalement, elles doivent permettre d'obtenir un matériau homogène et complètement saturé (Kenney & Lau, 1985; Chapuis, 1989, 2012; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Andrianatrehina et al., 2016; Slangen & Fannin, 2016). Pour les matériaux instables, ces étapes peuvent s'avérer délicates en raison de la plus grande susceptibilité des particules qui les composent de migrer. Il est ainsi plus difficile d'obtenir un matériau homogène à la fin de ces étapes (Moffat, 2002; Khan, 2003; Andrianatrehina et al., 2016). Une fois ces étapes de préparation complétées, le matériau est soumis à un écoulement d'eau, ascendant ou descendant, et parfois accompagné de vibrations, selon le protocole expérimental.

1.4.3.1 Étapes de préparation

Le compactage du matériau s'effectue généralement selon une méthode de mise en place humide (Honjo et al., 1996; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takashi, 2014; Andrianatrehina et al., 2016; Ataii & Fannin, 2022). Le matériau est d'abord humidifié à une w spécifique, si nécessaire, afin de limiter la ségrégation des particules (Lafleur et al., 1989; Honjo et al., 1996) et de permettre un placement contrôlé durant la préparation. Il est ensuite compacté en plusieurs couches à l'aide d'une tige de piquage ou d'un dameur, de manière à atteindre la densité relative visée. L'indice de densité relative ou la C.R. ciblés varient selon les études, bien que ces paramètres influencent n déjà identifiée comme jouant un rôle dans la

susceptibilité des matériaux à l'érosion (Wan & Fell, 2004a, Israr & Irfan, 2020). Par exemple, Andrianatrehina et al. (2016) visent un I_D de 70 % tandis que Honjo et al. (1996) placent leurs matériaux à un I_D supérieur à 90 %. La première correspond généralement à la valeur minimale recommandée pour le compactage des remblais de barrages, tandis que la seconde se rapproche davantage d'une valeur optimale recherchée (Kutzner, 1997). Après compactage, le matériau est ensuite saturé à l'aide d'un écoulement d'eau vers le haut appliqué soit seul (Skempton & Brogan, 1994), soit couplé avec une purge de CO_2 au préalable (Chang & Zhang, 2011), ou encore à une mise sous vide (Honjo et al., 1996; Ke & Takashi, 2014). Les méthodes de saturation, combinant généralement une désaération de l'eau et des méthodes visant à éliminer l'air dans les pores du matériau (purge de CO_2 ou mise sous vide), permettent d'atteindre un degré de saturation (S_r , %) élevé, voire une saturation complète ($S_r = 100$ %), particulièrement lorsque le matériau est placé sec avant saturation (Chapuis, 2012). Pour vérifier S_r atteint, Chapuis (1989, 2004) propose une méthode s'appuyant sur des mesures de masse et de volume du matériau à saturer ainsi que de la cellule d'écoulement utilisée.

Certains matériaux ne sont cependant pas compactés avant les essais. C'est notamment le cas lorsque la méthode de pluviométrie à sec ou la méthode de pluviométrie humide (Bardet, 1997) sont utilisées. Avec la méthode de pluviométrie à sec, le matériau granulaire est mis en place de façon lâche au moyen d'un entonnoir et d'une tubulure flexible à son extrémité, en réalisant des mouvements circulaires et ascendants dans le but d'en répartir uniformément les particules. Quant à la méthode de pluviométrie humide, généralement combinée à la technique de dépôt discret de Kurbis (1988), elle permet une mise en place du matériau de façon lâche tout en assurant simultanément une saturation complète (Bardet, 1997; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Slangen & Fannin, 2016). Cette méthode consiste à préparer plusieurs spécimens en respectant la courbe granulométrique visée, puis à les faire bouillir dans de l'eau désaérée. L'ensemble est ensuite placé sous vide à température ambiante afin de s'assurer d'une désaération complète de l'eau. Chaque portion est ensuite déposée dans la cellule d'écoulement à l'aide d'une cuillère, dans un faible volume d'eau désaérée préalablement versé dans la cellule. Cette eau permet de maintenir une saturation complète du matériau pendant la mise en place et de limiter la ségrégation des particules.

1.4.3.2 Écoulement et vibrations

Le gradient hydraulique appliqué durant les essais d'écoulement est plus élevé que celui observé dans la pratique (Kenney & Lau, 1985). Il peut être maintenu constant tout au long de l'essai ou augmenté progressivement, par exemple en ajustant la hauteur des réservoirs (Kenney & Lau, 1985; Moffat, 2002; Khan, 2003; Wan & Fell, 2004). Lorsqu'il est incrémenté, l'objectif est généralement d'identifier i_{cr} à partir duquel une migration des particules fines est observée (Skempton & Brogan, 1994; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Ataii & Fannin, 2022). Concernant la direction de l'écoulement, elle est généralement ascendante dans les études portant sur les critères hydrauliques et hydromécaniques (Skempton & Brogan, 1995; Wan & Fell, 2004; Li, 2008; Slangen & Fannin, 2016), tandis qu'un écoulement dirigé vers le bas est souvent privilégié dans les études développant un critère géométrique. Un élément important à considérer lors d'un essai d'écoulement est la perte de charge (Δh , mm) dans les différentes parties du montage expérimental, notamment dans les connexions et les tubulures (ASTM D2434-22; Khan, 2003; Li, 2008; Ke & Takahashi, 2014; Duhaime et al., 2015). Ces pertes de charge peuvent faire en sorte que i réellement imposé au sein du matériau soit inférieur à celui visé, en particulier dans les matériaux granulaires à forte K (Khan, 2003). Il est recommandé de mesurer i réel au moyen de piézomètres latéraux situés sur les parois de la cellule d'écoulement directement en amont et en aval du matériau (Moffat, 2002; Khan, 2003; Chapuis, 2012; Duhaime, Chapuis, & Weber, 2015).

En plus de soumettre le matériau à un écoulement d'eau, des études en laboratoire utilisent des vibrations afin de provoquer une suffusion (Kenney & Lau, 1985; Lafleur et al., 1989; Honjo et al., 1996; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Ke & Takashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2016). Ces dernières sont généralement appliquées au moyen d'un marteau pneumatique sur la base de la cellule d'écoulement. Pourtant, selon Garner & Fannin (2010), les vibrations révéleraient d'une condition de contrainte critique. Combinées à une susceptibilité du matériau et un i_{cr} , elles pourraient entraîner un autre type d'érosion interne que la suffusion (Figure 1.8).

1.4.4 Paramètres de suffusion

L'analyse granulométrique avant et après essais, ainsi que l'évaluation de la perte totale de particules fines, sont les paramètres les plus fréquemment utilisés pour évaluer la stabilité interne des matériaux. Les valeurs seuils utilisées pour distinguer un matériau stable d'un matériau instable sont rarement précisées et peuvent paraître arbitraires, comme le soulignent Andrianatrehina et al. (2016). Les paramètres hydrauliques et ΔV servent généralement à définir le type et le moment d'initiation de l'érosion interne sélective et/ou à caractériser son développement (Moffat, 2002; Li, 2008). Les études comparent généralement l'évolution de plusieurs paramètres entre eux afin de mieux comprendre la migration des particules fines.

1.4.4.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à comparer les courbes granulométriques du matériau avant et après essai. À l'issue de l'essai, le matériau est séparé en plusieurs spécimens, généralement au nombre de trois (haut, milieu et bas; Lafleur et al., 1989; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Chapuis, 2012; Andrianatrehina et al., 2016). La courbe granulométrique de chaque spécimen est ensuite déterminée, puis comparée à celle du matériau initialement placé. Cette comparaison permet d'évaluer si un spécimen a subi une perte ou un gain de particules fines sous l'effet de l'écoulement, avec ou sans vibrations, se traduisant alors par une courbe granulométrique plus grossière ou plus fine, respectivement. La comparaison peut également se faire entre les courbes granulométriques des différents spécimens, informant alors sur l'ampleur et la direction de la migration.

Les travaux menés sur la suffusion ont permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques qualitatives concernant l'évolution de la distribution granulométrique des matériaux stables et instables soumis à un écoulement, avec ou sans vibrations. Les matériaux stables présentent des courbes granulométriques avec de légères différences entre les spécimens. Le spécimen du milieu affiche généralement une courbe quasi identique à celle du matériau initial (Kenney & Lau, 1985; Israr & Irfan, 2020), tandis qu'une légère perte de particules fines est

parfois observée pour les spécimens du haut et du bas (Lafleur et al., 1989; Khan, 2003). En revanche, les matériaux instables présentent des différences plus marquées. Le spécimen du milieu peut, selon les cas, présenter une perte ou un gain de particules fines généralement modéré, tandis que les spécimens du haut et du bas présentent une perte significative. Dans le cas d'un écoulement descendant, la perte observée dans le spécimen du bas peut également résulter du contact direct avec le matériel de drainage, en plus des effets liés aux méthodes de préparation et à l'écoulement (Moffat, 2002).

Certaines études vont au-delà des comparaisons qualitatives en proposant une évaluation quantitative de la stabilité interne. La méthode graphique développée par Kenney & Lau (1985) permet, par exemple, d'estimer la portion de particules fines ayant migré d'un spécimen au cours de l'essai (Figure 1.10a). Elle repose sur le principe que la portion grossière de la courbe granulométrique du spécimen en question demeure identique à celle du matériau initial. Les courbes finales et initiales sont alors superposées en alignant leur portion grossière, puis l'échelle verticale du graphique est ajustée pour estimer la perte totale à partir de la différence entre les portions fines. Appliquée uniquement au spécimen du milieu, cette méthode a permis à Kenney & Lau (1985) d'identifier une perte de particules fines supérieure à 7 % pour les matériaux instables. Wan & Fell (2004) appliquent cette méthode graphique à leurs matériaux, estimant ainsi une perte de particules fines supérieures à 5 % avec ceux évalués comme instables. Enfin, dans l'étude menée par Andrianatrehina et al. (2016), qui utilise une cellule d'écoulement avec un système fermé, la courbe granulométrique du spécimen du haut est comparée à celle du spécimen du bas. Le matériau est considéré comme instable si la différence maximale entre les pourcentages passants de ces deux spécimens ($\Delta P_{\max}$, %) dépasse 5 %. Ce seuil, choisi de manière arbitraire par les auteurs, s'appuie notamment sur une comparaison avec les valeurs observées dans d'autres études portant sur la suffusion.

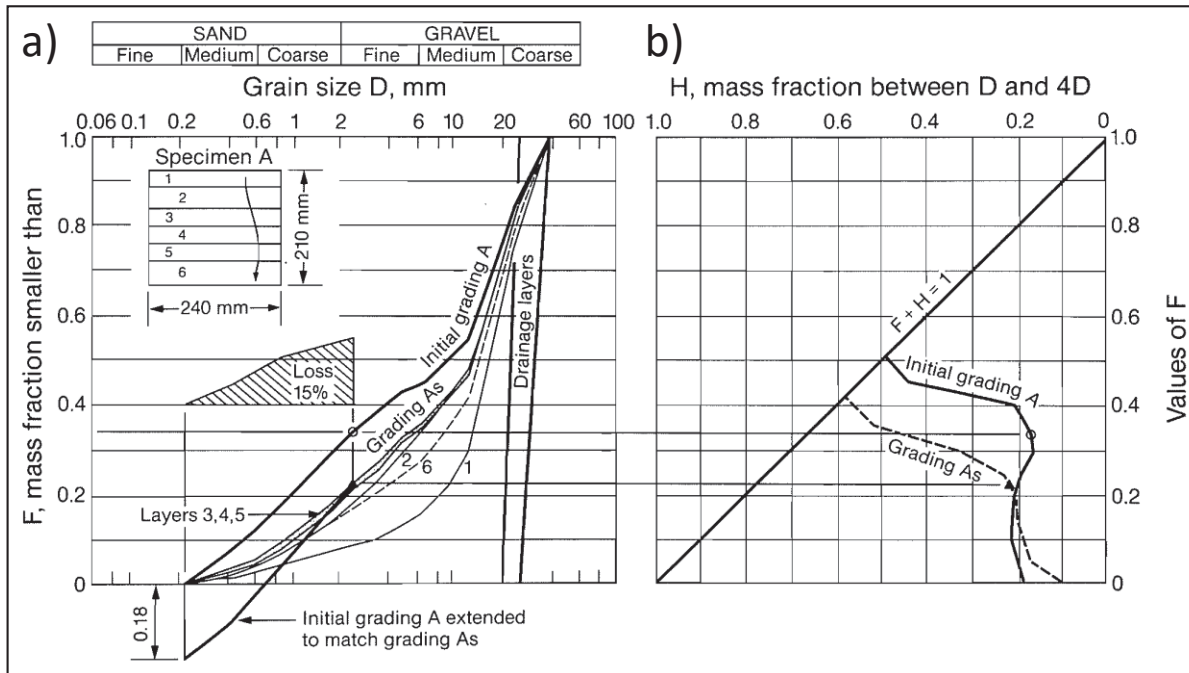


Figure 1.10 Exemple d'application des méthodes graphiques employées par Kenney & Lau (1985) pour évaluer la stabilité interne d'un matériau (« A ») : a) Courbes granulométriques avant et après essai et b) graphique représentant H en fonction de F
Tirée de Kenney & Lau (1985, p. 219)

1.4.4.2 Perte totale de particules fines

La perte totale de particules fines est estimée à partir des particules fines érodées récupérées dans le collecteur. Celles-ci sont ensuite pesées, soit en fin d'essai (Lafleur et al., 1989; Skempton & Brogan, 1994; Honjo et al., 1996), soit à différentes étapes de l'essai (préparation, variation de i appliqué; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Ke & Takahashi, 2014; Ataii & Fannin, 2022). Cela est notamment possible en pinçant le tuyau en silicone flexible pour séparer les particules érodées ou en remplaçant le contenant détachable dans lequel les particules migrent durant l'essai. Dans les études de Ke & Takahashi (2014) et d'Ataii & Fannin (2022), ces particules sont pesées en continu au moyen d'une cellule de charge installée au sein du collecteur pressurisé. La perte totale de particules fines est généralement exprimée en pourcentage, correspondant au rapport entre la masse sèche des particules fines érodées et la masse sèche initiale du matériau (M_s , g; Skempton & Brogan, 1994; Khan, 2003; Li, 2008; Ke & Takahashi, 2014; Ataii & Fannin, 2022). Certaines études

rapportent plutôt la masse sèche des particules fines érodées à la surface du matériau traversée par l'écoulement (Lafleur et al., 1989; Khan, 2003; Chang & Zhang, 2011).

Selon Lafleur et al. (1989), une érosion mineure des particules fines des matériaux de remblai peut être nécessaire pour atteindre un certain état d'équilibre au niveau de l'interface noyau-filtre. Toutefois, la quantité pouvant être tolérée à cette fin demeure subjective et fait l'objet de débat. En termes de seuil, une perte inférieure à 1 % est généralement jugée négligeable dans les études portant sur la suffusion (Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006). Une perte avoisinante 4 % semble en revanche distinguer les matériaux stables des matériaux instables (Skempton & Brogan, 1994; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Israr & Irfan, 2020). Par exemple, dans les essais d'écoulement menés par Fannin & Moffat (2006), le matériau stable K présente une perte totale de 3,7 %, tandis que le matériau instable D atteint 4,8 %. Israr & Irfan (2020), qui ont montré que l'augmentation de I_D tend à limiter l'érosion des particules, ont évalué comme stables des matériaux initialement jugés instables pour des I_D faibles (Israr & Irfan, 2020). Par exemple, leur matériau D est jugé instable pour des I_D inférieurs à 60 %, avec une perte totale supérieure à 4,74 %, tandis qu'il est jugé stable pour des I_D supérieurs à 70 %, avec une perte inférieure à 3,54 %.

1.4.4.3 Paramètres hydrauliques

Dans un matériau homogène, stable et complètement saturé, les paramètres hydrauliques, tels que i ou K , devraient être identiques sur toute la longueur du matériau et invariables dans le temps. En revanche, dans un matériau non uniforme, partiellement saturé ou instable, ces paramètres varient localement et temporellement en raison d'hétérogénéités, de la présence et du développement de bulles d'air ou de la migration de particule (Lafleur et al., 1989; Skempton & Brogan, 1994; Moffat, 2002; Khan, 2003; Wan & Fell, 2004; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takashi, 2014; Andrianatrehina et al., 2016; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). Pour permettre le suivi de ces paramètres hydrauliques, la charge hydraulique (h , cm) doit être mesurée localement sur toute la longueur du matériau. Ces mesures sont effectuées à un intervalle de temps régulier au moyen de

piézomètres (Lafleur et al., 1989; Skempton & Brogan, 1994; Honjo et al., 1996; Moffat, 2002) ou de capteurs de pression (Moffat, 2002; Khan, 2003; Wan & Fell, 2004; Fannin & Moffat, 2006) placés directement sur les parois de la cellule d'écoulement. L'évaluation de K nécessite en complément une mesure du débit d'écoulement (Q , cm³/s) (Lafleur et al., 1989), réalisée en mesurant la masse d'eau récupérée à la sortie, par exemple à l'aide d'un contenant positionné sur une balance (Chang & Zhang, 2011).

Dans les études de Moffat (2002) et de Khan (2003), h mesurée par différents piézomètres permet d'évaluer l'homogénéité du matériau avant l'essai et de suivre la migration des particules fines pendant l'écoulement, avec ou sans vibrations. Cette perte de charge est représentée en fonction de la distance entre chaque piézomètre et le grillage. Dans la théorie, cette relation devrait être et rester linéaire pour l'ensemble du matériau, sauf en cas d'hétérogénéité, d'une saturation incomplète ou encore d'une migration de particules fines. Si le matériau préparé est homogène et complètement saturé, la migration est détectée en comparant la courbe réelle à la droite idéale : une accumulation de particules fines en bas du matériau se traduit par une augmentation locale de h , la courbe étant alors positionnée en dessous de la droite linéaire, tandis qu'une perte s'accompagne d'une diminution, la courbe se situant alors au-dessus de la droite (Figure 1.11).

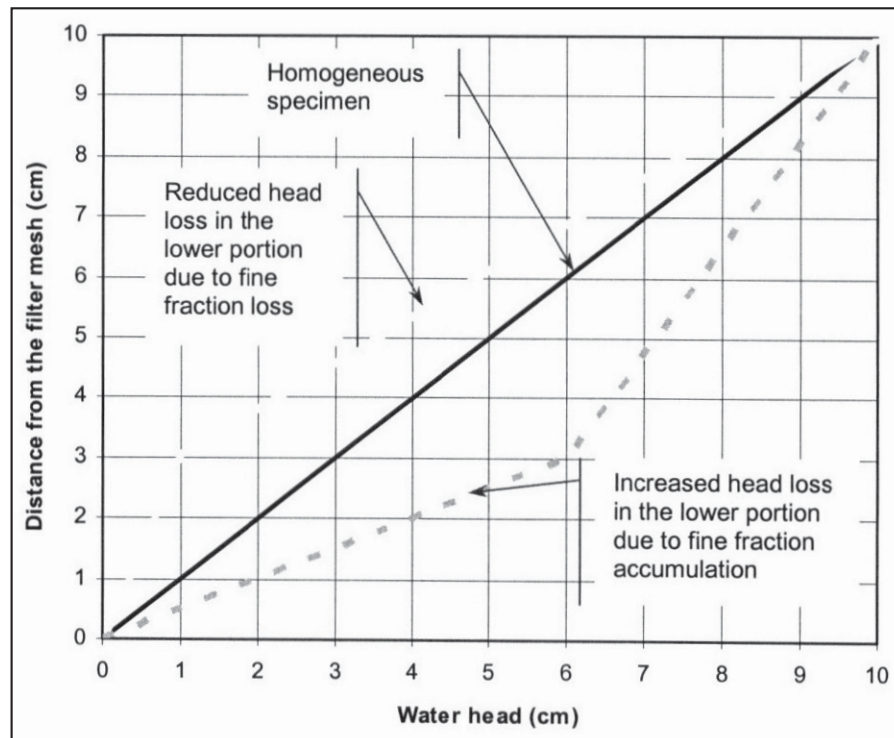


Figure 1.11 Distribution de h illustrant les trois comportements possibles d'un matériau sous l'effet d'un écoulement
Tirée de Khan (2003, p. 43)

L'évolution des paramètres hydrauliques, tels que v , i ou K , peut être étudiée en fonction du temps (t , s) et/ou de i appliqué (Lafleur et al., 1989; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Ataii & Fannin, 2022). Une évolution dans le temps permet de détecter la migration de particules et d'en localiser l'origine. Une perte de particules fines à un endroit donné s'accompagne d'une augmentation locale de K , tandis qu'un gain entraîne une diminution. Khan (2003) s'appuie, par exemple, sur l'évolution des K globale et centrale du matériau pour identifier la présence de suffusion. Aucun seuil de variation n'est clairement défini pour les paramètres hydrauliques, les observations demeurant généralement qualitatives. Cette évolution est néanmoins souvent comparée aux résultats de l'analyse granulométrique ou de la perte totale de particules fines (Lafleur et al., 1989; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006). L'analyse en fonction de i appliqué permet, quant à elle, de déterminer la valeur de i_{cr} à partir duquel la suffusion s'amorce (Li, 2008; Ataii & Fannin, 2022), valeur spécifiquement recherchée dans les études hydrauliques et hydromécaniques. Cette détermination permet de mieux comprendre l'influence de certaines caractéristiques du

matériau ou des conditions d'essai sur l'amorçage de la suffusion. Wan & Fell (2004) ont ainsi démontré que des i très faibles peuvent suffire à initier l'érosion de particules fines lorsque le matériau présente une forte n , une courbe granulométrique discontinue et/ou des particules fines non plastiques. À l'inverse, Moffat (2002), Khan (2003) et Li (2008) ont démontré qu'un i plus élevé est requis lorsque soumis à une importante contrainte normale effective.

1.4.4.4 Déplacement vertical et variation de volume

L'évolution du déplacement vertical du matériau soumis à un écoulement, avec ou sans vibrations, est l'un des derniers paramètres évalués dans les études portant sur la suffusion. Il peut être mesuré en fin d'essai (Honjo et al., 1996) ou au cours du temps à l'aide d'un transducteur différentiel variable linéaire (Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Slangen & Fannin, 2016). Dans ce dernier cas, il est généralement utilisé pour déterminer la déformation axiale (ε_a , %), correspondant à la variation de la hauteur du matériau au cours de l'essai rapportée sur sa hauteur initiale. Cette déformation axiale augmente significativement lorsque l'érosion des particules fines entraîne une restructuration du squelette formé par les particules grossières. Pour Khan (2003), ε_a est considérée comme faible pour des valeurs inférieures à 2 %, et élevée pour des valeurs au-delà de 10 %. Cette restructuration peut également être évaluée en étudiant l'évolution de la déformation volumétrique (ε_v , %) au cours du temps, un paramètre mesuré dans les cellules à parois souples (Ke & Takashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). L'analyse conjointe de ε et de ε_v permet notamment de déterminer le type d'érosion interne à l'œuvre (Li, 2008; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). Pour rappel, si la perte de particules fines s'accompagne à la fois d'un ΔK et d'un ΔV , le phénomène observé relève de la suffosion et non de la suffusion (Fannin & Slangen; 2014). Par exemple, Slangen & Fannin (2016) considèrent qu'une suffosion est impliquée dans leurs matériaux dès lors que ε_v est supérieure à 1,54 %, accompagnée ou non d'une ε_a significative.

1.4.5 Répétabilité des essais

Avant de commencer la série d'essais d'écoulement sur les matériaux au programme, il est généralement nécessaire d'en vérifier la répétabilité, ce qui permet d'assurer que les étapes de préparation et d'essais fournissent des résultats similaires (Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016). La répétabilité des essais est vérifiée par le biais d'essais effectués sur plusieurs réplicats d'un même matériau. Le matériau choisi pour cette évaluation est généralement celui considéré comme le plus susceptible à la migration des particules fines sous l'effet d'un écoulement. Cette susceptibilité est préalablement estimée en se basant sur l'évaluation des critères géométriques appliqués directement à la courbe granulométrique du matériau (Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008). La répétabilité des essais est ensuite évaluée à partir de plusieurs paramètres sensibles aux conditions de préparation et à la migration des particules fines, tels que l'indice des vides (e), I_D , ε_a , la distribution de h , le pourcentage de perte de particules ou encore l'analyse granulométrique (Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016). Si ces paramètres varient légèrement d'un réplicat à un autre, alors les procédures des essais d'écoulement peuvent être considérées comme répétables. Par exemple, Moffat (2002), Khan (2003) et Li (2008) considèrent leurs essais comme étant répétables alors que les différences observées entre les pourcentages de particules fines érodées pour différents réplicats atteignent au maximum 2,9 %.

1.4.6 Durée des essais

La durée des essais d'écoulement rapportés dans la littérature varie de quelques minutes à plusieurs jours. Elle dépend à la fois des étapes de préparation, parmi lesquelles la saturation complète constitue une étape particulièrement longue (Chapuis, 2012), et du programme expérimental. Par exemple, Li (2008) met en place et sature les matériaux en employant la méthode de pluviométrie humide combinée à la technique de dépôt discret, une procédure pouvant s'étendre sur plusieurs heures, voire plusieurs jours. La durée d'application de l'écoulement, avec ou sans vibrations, varie quant à elle selon les objectifs propres à l'étude.

Dans les essais portant sur les critères géométriques, l'écoulement est généralement maintenu jusqu'à ce qu'à la stabilisation des paramètres étudiés et en l'absence de migration de particules fines (Kenney & Lau, 1985; Wan & Fell, 2004). Pour les essais sur les critères hydrauliques et hydromécaniques, la durée des essais dépend du nombre d'étapes retenues dans les protocoles expérimentaux. Un faible i est maintenu pendant plusieurs minutes, puis il est progressivement augmenté jusqu'à atteindre un seuil maximal prédéfini (Chang & Zhang, 2011; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022), ou i_{cr} déclenchant l'amorçage de la suffusion (Li, 2008). La durée pendant laquelle i est maintenu et la valeur à laquelle il est progressivement augmenté varient en fonction des protocoles expérimentaux. Lorsque des vibrations sont utilisées pour observer de la suffusion, elles peuvent être appliquées pendant toute la durée de l'essai (Kenney & Lau, 1985; Honjo et al., 1996) ou uniquement à la fin, conjointement avec le i maximal (Moffat, 2002; Fannin & Moffat, 2006).

1.5 Critères géométriques

L'application de critères géométriques constitue une méthode alternative aux essais d'écoulement pour évaluer la stabilité interne d'un matériau. Initialement appliqués tels que suggérés par leurs auteurs, les critères semi-empiriques font l'objet de modifications depuis au moins trois décennies. Les premières modifications concernent la manière de présenter les résultats issus de leur application (Chapuis, 1992; Skempton & Brogan, 1994). Plusieurs années s'écoulent avant l'apparition de nouvelles approches qui modifient l'application de ces critères historiques ou les combinent afin d'en améliorer l'efficacité. En général, les critères de Kezdi (1979), de Sherard (1979) et de Kenney & Lau (1985, 1986) sont jugés conservateurs, car ils tendent à évaluer certains matériaux stables comme étant instables (e.g. Wan & Fell, 2004, 2008; Chang & Zhang, 2013; Moraci et al., 2014, 2015; Rönnqvist & Viklander, 2016; Zhou et al., 2016; Ni, Dallo, & Wang, 2018). Les nouvelles approches visent à obtenir des critères moins conservateurs tout en évaluant de manière adéquate la stabilité interne des matériaux instables. Après avoir présenté brièvement les critères semi-empiriques dans la section 1.5.1, les variantes d'applications observées dans la littérature sont détaillées dans la section 1.5.2. La section 1.5.3 présente, quant à elle, des critères dérivés des méthodes semi-

empiriques, notamment celles fondées sur les critères de Kezdi (1979), Sherard (1979) et Kenney & Lau (1985, 1986). Par souci de simplicité, les critères semi-empiriques utilisés dans les approches dérivées sont indiqués sans date de publication dans les sections 1.5.2 et 1.5.3.

1.5.1 Critères semi-empiriques

Dans les années 1950, la stabilité interne des matériaux granulaires est évaluée à partir du coefficient d'uniformité (C_u). Selon l'USACE (1953) et Istomina (1957), un matériau granulaire présentant un C_u supérieur à 20 est plus susceptible de subir la migration de ses particules sous l'effet d'un écoulement. Cependant, Lubochkov (1962, 1965) constate que ce paramètre n'est pas suffisant à lui seul pour évaluer adéquatement la stabilité interne d'un matériau et propose une méthode prenant en compte la forme de la courbe granulométrique. Dans les années 1970, l'évaluation de la stabilité interne s'appuie plutôt sur le principe du critère de rétention des filtres proposé par Terzaghi (1939), appliqué à un seul et même matériau. Cette approche conduit à l'élaboration des critères de De Mello (1975), de Kezdi (1979) et de Sherard (1979), ainsi qu'à celui de Lowe (1988), proposé un peu plus tard. Il faut attendre les années 1980, pour voir apparaître des critères géométriques tenant compte de la forme de la courbe granulométrique, parmi lesquels figurent ceux de Kenney & Lau (1985, 1986), de Burenkova (1993) et de Honjo et al. (1996). Parmi l'ensemble de ces approches, trois critères géométriques sont couramment utilisés en recherche comme en pratique : ceux de Kezdi (1979), de Sherard (1979) et de Kenney & Lau (1985, 1986; Wan & Fell, 2008; Chang & Zhang, 2013; Zhou et al., 2016). Le Tableau 1.2 récapitule les conditions nécessaires pour qu'un matériau soit considéré comme stable selon les différents critères énumérés précédemment. Seuls les principes des critères de Kezdi (1979), de Sherard (1979), de Kenney & Lau (1985, 1986), de Burenkova (1993) et de Honjo et al. (1996) sont détaillés dans les sections 1.5.1.1, 1.5.1.2 et 1.5.2.3. Enfin, une figure illustrant l'application des critères de Kezdi (1979), de Sherard (1979) et de Kenney & Lau (1985, 1986) est présentée au Chapitre 5 (article 3) et n'est pas reproduite ici afin d'éviter la redondance.

1.5.1.1 Critères de Kezdi (1979) et de Sherard (1979)

Les critères de Kezdi (1979) et de Sherard (1979) consistent à appliquer le critère de rétention des filtres de Terzhagi (1939) à un matériau unique. Pour ce faire, il est nécessaire de diviser la courbe granulométrique du matériau en deux en un point arbitraire, afin d'obtenir deux fractions. La fraction de particules située au-dessus de ce point est appelée fraction grossière, tandis que celle située en dessous du point est appelée fraction fine. Pour qu'un matériau soit considéré comme stable, sa fraction grossière doit servir de filtre à sa fraction fine, qui est considérée, par analogie, comme le sol fin ou le noyau à protéger. Après avoir dessiné les courbes granulométriques des fractions grossière et fine du matériau, les d correspondant respectivement à 15 % du pourcentage passant massique de la fraction grossière (D'_{15} , mm) et à 85 % du pourcentage passant massique de la fraction fine (d'_{85} , mm) sont déterminés. Le critère de rétention de Terzaghi (1939) est ensuite appliqué entre les fractions grossière et fine du matériau. Cette manipulation est réalisée pour l'ensemble des diamètres de la courbe granulométrique. Si le rapport D'_{15}/d'_{85} est inférieur à 4 ou 5, le matériau est alors considéré comme stable.

1.5.1.2 Critère de Kenney & Lau (1985, 1986)

Kenney & Lau (1985, 1986) évaluent la stabilité interne d'un matériau au moyen d'une méthode reposant sur le principe que les particules de diamètre compris entre d et $4d$ doivent être suffisamment nombreuses pour retenir celles de diamètre d . Ces dernières sont susceptibles d'être entraînées par l'écoulement à travers les pores formés par les particules de d supérieur à $4d$. Pour appliquer ce principe, Kenney & Lau (1985) proposent de tracer le graphique représentant le pourcentage passant massique des particules de diamètre d (F ou F_d , %) en abscisse et l'incrément de masse H (%) en ordonnée, H correspondant à la différence entre les pourcentages passants massiques des particules de diamètre $4d$ (F_{4d} , %) et de diamètre d (F_d). Les matériaux granulaires de compacité dense à moyennement dense sont considérés comme stables si H est supérieur à $1,3F_d$ (Figure 1.10b). Cette condition s'applique uniquement à une portion de la courbe granulométrique du matériau, déterminée par la forme de la courbe granulométrique de la fraction grossière du matériau, chargée de retenir les

particules fines. Si cette fraction présente une courbe granulométrique étalée ($C_u > 3$), le critère de Kenney & Lau (1985) est appliqué aux 20 premiers pourcentages passants massiques de la courbe granulométrique, sinon il est appliqué aux 30 premiers pourcentages. Cependant, plusieurs chercheurs ayant testé le critère de Kenney & Lau (1985) évaluent la valeur seuil proposée par Kenney & Lau (1985) trop conservatrice (Kenney & Lau, 1986). Après une réévaluation menée par Kenney & Lau (1986), un matériau granulaire est considéré comme stable si H est supérieur à F , pour les 20 ou 30 premiers pourcentages passants massiques selon le C_u de la fraction grossière.

1.5.1.3 Critères de Burenkova (1993) et de Honjo et al. (1996)

Les critères géométriques de Burenkova (1993) et de Honjo et al. (1996) sont basés sur des rapports de diamètres.

Dans l'étude menée par Burenkova (1993), ces rapports, appelés facteurs conditionnels d'uniformité, correspondent aux rapports d_{90}/d_{60} , noté h' , et d_{90}/d_{15} , noté h'' , où d_{15} , d_{60} et d_{90} sont les d correspondant respectivement à 15 %, 60 % et 90 % du pourcentage passant massique. Selon Wan & Fall (2008), h' représente la pente de la fraction grossière, tandis que h'' représente l'action filtrante entre les fractions grossière et fine du matériau. En traçant le graphique représentant h' en fonction du $\log(h'')$ pour différents matériaux granulaires dont l'instabilité interne a été évaluée expérimentalement, Burenkova (1993) définit quatre zones de stabilité interne (Figure 1.12) : les zones I et III correspondent à des sols suffusifs, la zone II correspond à des sols non suffusifs et la zone IV correspond à des sols artificiels.

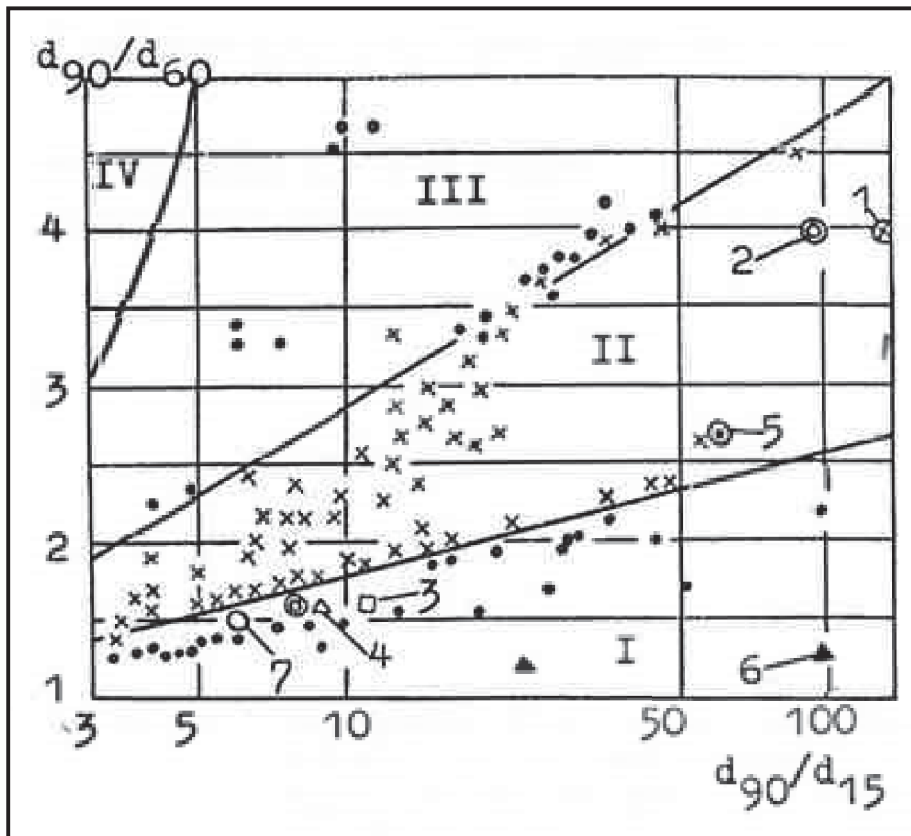


Figure 1.12 Zones de stabilité interne sur le graphique du rapport d_{90}/d_{60} en fonction du rapport d_{90}/d_{15} : I. et III. Instabilité interne, II. Stabilité interne et IV. Sols artificiels
Tirée de Burenkova (1993, p. 359)

Dans l'étude menée par Honjo et al. (1996), la variable étudiée est la discontinuité des courbes granulométriques. Pour ce faire, plusieurs matériaux sont testés au moyen d'essais d'écoulement, leurs courbes granulométriques discontinues variant selon les $d_{\min}$ et $d_{\max}$ de la discontinuité, sa largeur et les proportions des fractions fines et grossières. Les résultats du tassement et le pourcentage de particules fines érodées pour chacun des matériaux sont présentés en fonction du rapport $d_{\max}/d_{\min}$. L'analyse de ces résultats a permis de mettre en évidence que les proportions des fractions fines et grossières n'influencent pas significativement la stabilité, seul $d_{\max}/d_{\min}$ est déterminant. Un matériau granulaire présentant un $d_{\max}/d_{\min}$ supérieur à 4,0 est ainsi plus susceptible d'éroder sous l'effet d'un écoulement (Honjo et al., 1996).

Tableau 1.2 Résumé des critères géométriques semi-empiriques pour déterminer la stabilité interne

Références	Conditions nécessaires pour la stabilité interne d'un matériau
U.S. Army (1953)	$C_u < 20$
Istomina (1957)	$C_u < 10$
De Mello (1975) ^a	$D'_{15}/d'_{85} < 4 \text{ à } 5$
Kezdi (1979) ^b	$D'_{15}/d'_{85} < 4 \text{ à } 5$
Sherard (1979) ^b	$D'_{15}/d'_{85} < 4 \text{ à } 5$
Kenney & Lau (1985, 1986) ^c	$H \geq F$
Lowe (1988) ^b	$D'_{15}/d'_{85} < 5$
Burenkova (1993)	$0,76\log(h'')+1 < h' < 1,86\log(h'')+1$
Honjo et al. (1996)	$d_{\max}/d_{\min} < 4,0$

Notes : ^a Appliqué uniquement à $d_{\min}$ de la discontinuité qui sert de point de séparation entre les fractions fine et grossière. ^b Appliqué à l'ensemble des diamètres de la courbe granulométrique. ^c Appliqué pour $F < 20$ % si la fraction grossière a un $C_u > 3$, et pour $F < 30$ % si $C_u \leq 3$.

1.5.2 Variantes d'application des critères semi-empiriques

Avant la proposition de modifications majeures et de combinaisons de critères semi-empiriques, plusieurs ajustements plus légers ont été proposés dans la littérature, portant notamment sur les valeurs seuils retenus, la présentation des résultats, la détermination des paramètres nécessaires et la plage d'application des critères. Ces variantes sont présentées dans les sections 1.5.2.1 à 1.5.2.4.

1.5.2.1 Valeurs seuils retenues

Dans les études portant sur la suffusion, une valeur seuil de 4 est généralement adoptée pour le critère de Kezdi (Fannin & Moffat, 2006; Li & Fannin, 2006; Chang & Zhang, 2013; Moraci et al., 2014; Zhou, Ranjith et Li, 2016) et une valeur de 5 pour le critère de Sherard (Moraci et al., 2014; Zhou et al., 2016), bien que les auteurs aient initialement proposé une plage de valeurs comprises entre 4 et 5.

1.5.2.2 Variantes de présentation des résultats

Dans l'étude menée par Skempton & Brogan (1994), la valeur minimale de (H/F) , notée $(H/F)_{\min}$ et désignée comme l'indice de stabilité interne, est comparée à la valeur seuil de 1,0, au lieu de tracer le graphique donnant H en fonction de F requis pour appliquer le critère de Kenney & Lau (Figure 1.10b).

Dans les études de Fannin & Moffat (2006), Li (2008) et Li & Fannin (2008), la valeur maximale de (D'_{15}/d'_{85}) , notée $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$, est comparée aux valeurs seuils définies par les critères de Kezdi, de Sherard et de De Mello au lieu de présenter les courbes granulométriques des fractions fines et grossières des matériaux nécessaires de tracer pour appliquer ces critères.

Chapuis (1992) ainsi que Moraci et al. (2014, 2015) déterminent la stabilité interne des matériaux selon le critère de Sherard à l'aide du graphique représentant (D'_{15}/d'_{85}) en fonction de d , correspondant au point où la courbe granulométrique est divisée en deux pour définir des fractions fines et grossières. Le paramètre (D'_{15}/d'_{85}) est désigné « degré d'instabilité » par Chapuis (1992) et « indice d'instabilité interne » par Moraci et al. (2014, 2015), et est noté I_r .

1.5.2.3 Détermination alternative des paramètres

Une méthode alternative, utilisée par Chapuis (1992), Skempton & Brogan (1994) ainsi que Lai et al. (2022), concerne la détermination des paramètres d'_{85} et D'_{15} utilisés dans les critères de Kezdi et Sherard. Au lieu de tracer les courbes granulométriques des fractions fines et grossières du matériau, ces paramètres sont déterminés directement sur la courbe granulométrique du matériau de la façon suivante : pour un diamètre de particule d choisi dont le pourcentage passant massique correspond à F (%), le paramètre d'_{85} correspond au diamètre obtenu par l'expression $0,85F$, tandis que le paramètre D'_{15} correspond au diamètre fourni par l'expression $0,85F + 15$.

Chapuis (1992) propose également une méthode alternative permettant d'appliquer les critères de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau sans devoir diviser la courbe granulométrique en

deux ni tracer le graphique H en fonction de F . Cette méthode repose sur le calcul de la pente sécante (S) de la courbe granulométrique. Cette dernière doit être supérieure aux valeurs seuils des critères de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau exprimées en termes de S , qui sont disponibles dans le Tableau 1.2.

1.5.2.4 Plage d'application

Andrianatrehina et al. (2016) et Ni et al. (2018) ont déterminé que l'application des critères de Kezdi et de Sherard sur l'ensemble de la courbe granulométrique des matériaux conduit généralement à des résultats trop conservateurs.

Selon Andrianatrehina et al. (2016), un matériau est considéré comme instable si F correspondant à (D'_{15}/d'_{85}) égal à 4,0 est supérieur à 5 % (Tableau 1.2).

Pour Ni et al. (2018), l'application des critères de Kezdi et de Sherard uniquement sur une portion de la courbe granulométrique permet d'évaluer adéquatement la stabilité interne des matériaux présentant une courbe granulométrique étalée (Tableau 1.2). La courbe est alors subdivisée en trois parties, dont une portion correspond aux particules dites intermédiaires situées entre les fractions grossière et fine. Pour identifier cette portion, Ni et al. (2018) proposent une méthode graphique basée notamment sur l'utilisation de pentes sécantes.

1.5.3 Critères dérivés des critères semi-empiriques

Plusieurs méthodes dérivées modifient et/ou combinent les critères de Kezdi, de Sherard, de Kenney & Lau, ainsi que celui de Burenkova. Ces méthodes sont résumées dans le Tableau 1.3. La section 1.5.3.1 présente les approches fondées sur le calcul de S proposé par Chapuis (1992) pour l'application des critères de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau, tandis que la section 1.5.3.2 décrit d'autres modifications et/ou combinaisons de ces critères, incluant également un critère dérivé de celui de Burenkova. Enfin, les figures illustrant l'application des critères de Li & Fannin (2008), de Chang & Zhang (2013), de Moraci et al. (2014, 2015), de Mandaglio, Moraci, & Polimeni (2018), version dérivée du critère de Moraci et al. (2014,

2015), ainsi que de Zhou et al. (2016) sont présentées au Chapitre 5 (article 3) et ne sont pas reproduites ici afin d'éviter la redondance.

1.5.3.1 Critères basés sur le calcul de la pente sécante

Après avoir réalisé des essais d'écoulement sur des matériaux granulaires, Moraci et al. (2014, 2015) proposent le graphique dit « des ailes de papillons », représentant S en fonction de F , afin d'évaluer la stabilité interne d'un matériau. Ce graphique présente quatre zones délimitées par les droites limites des critères de Sherard et de Kenney & Lau, calculées selon la méthode proposée par Chapuis (1992) : une zone où les matériaux sont évalués comme stables, une zone où ils sont évalués comme instables et deux zones où la stabilité est inconnue. Le nom de ce graphique provient de la forme que prennent ces quatre zones dessinées. Initialement, la stabilité interne est déterminée en positionnant sur le graphique la pente sécante minimale ($S_{\min}$) et la moyenne des pourcentages passants massiques correspondant à (D'_{15}/d'_{85}) et à $(H/F)_{\min}$ notée simplement F par Moraci et al. (2014). Moraci et al. (2015) apportent trois modifications à leur méthode. Le critère de Kezdi considéré dans la méthode de Moraci et al. (2014) n'est plus pris en compte en raison de sa similarité avec le critère de Sherard et de son caractère jugé trop conservateur. De plus, les paramètres (H/F) et (D'_{15}/d'_{85}) sont calculés uniquement pour des F inférieurs à 35 %, pourcentage maximal de fraction fine à considérer selon Skempton & Brogan (1994). Enfin, la moyenne des pentes sécantes, notée simplement S par Moraci et al. (2015), est calculée pour les critères de Sherard et de Kenney & Lau au lieu de $S_{\min}$. Le point de coordonnées (S, F) , représentant respectivement la moyenne des pentes sécantes et la moyenne des pourcentages massiques correspondant à D'_{15}/d'_{85} et à $(H/F)_{\min}$, est ensuite positionné sur le graphique « des ailes de papillons », puis comparé aux droites limites correspondantes aux critères de Sherard et de Kenney & Lau (Tableau 1.3). Mandaglio et al. (2018) cherchent à évaluer la susceptibilité des matériaux situés à l'intérieur des deux zones où la stabilité n'a pas pu être déterminée par Moraci et al. (2014, 2015). Selon ces auteurs, la position du point de coordonnées (S, F) , calculée selon la méthode de Moraci et al. (2014, 2015), nécessite seulement d'être comparée à la droite limite correspondante au critère de Kenney & Lau (Tableau 1.3).

La méthode proposée par Zhou et al. (2016) est basée sur les critères de Kezdi, de Sherard et de Kenney & Lau. Elle consiste à tracer une droite à trois points sur le graphique représentant S en fonction de F . Le graphique est dit « synthétique », chaque point correspondant à l'un des trois critères considérés. Les points associés aux critères de Kezdi et de Sherard ont pour coordonnées $S = 24,9 \%$ et $21,5 \%$, soit les valeurs seuils respectives à partir desquelles les matériaux sont considérés comme instables, et leurs valeurs F correspondantes. Toutefois, à la suite des comparaisons des résultats d'essais d'écoulement et ceux obtenus par l'application des critères géométriques, Zhou et al. (2016) jugent les critères de Kezdi et de Sherard trop conservateurs pour de faibles valeurs de F . Ainsi, les versions modifiées des critères de Kezdi et de Sherard sont seulement appliquées à partir d'un certain F : pour le critère de Kezdi, F correspondant à $S = 24,9 \%$ doit être supérieur à 15% pour considérer le matériau comme instable, tandis que pour le critère de Sherard, F correspondant à $S = 21,5 \%$ doit être supérieur à $12,95 \%$. Le troisième point, représentant le critère de Kenney & Lau, a pour coordonnées les valeurs de S et F associées à $(S/F)_{\min}$. Sur le graphique synthétique, si la droite reliant les trois points se situe au-dessus de la droite limite d'équation $S = 1,66F$, alors le matériau est considéré comme stable.

1.5.3.2 Autres modifications et/ou combinaisons des critères

Li & Fannin (2008) évaluent l'efficacité des critères de Kezdi et de Kenney & Lau à partir de courbes granulométriques issues de différentes études en laboratoire. Pour le critère de Kenney & Lau, le paramètre $(H/F)_{\min}$ est déterminé pour des valeurs de F comprises entre 5% et 40% . Concernant le critère de Kezdi, une distinction est faite entre les courbes granulométriques continues et discontinues : la valeur maximale de (D'_{15}/d'_{85}) est utilisée pour les courbes granulométriques continues, tandis que la valeur de (D'_{15}/d'_{85}) obtenue au niveau de la discontinuité est retenue pour les courbes granulométriques discontinues. Les critères de Kezdi et de Kenney & Lau étant évalués trop conservateurs, Li & Fannin (2008) proposent une méthode les combinant afin d'atténuer ce caractère. Les valeurs de H et F correspondantes à $(H/F)_{\min}$ sont reportées sur le graphique de H en fonction de F . L'incrément de masse H est comparé à F , valeur seuil du critère de Kenney & Lau, lorsque F est inférieur à 15% , et à

15 %, correspondant à la valeur seuil modifiée du critère de Kezdi considérée par Li & Fannin (2008), lorsque F est supérieur à cette valeur (Tableau 1.3).

Wan & Fell (2004, 2008) utilisent h' et h'' , définis par Burenkova, pour déterminer le potentiel d'instabilité interne d'un matériau. Ces facteurs conditionnels d'uniformité sont ensuite comparés à des droites de probabilité, dont les équations dépendent du type de matériau testé. Ces équations sont présentées dans le Tableau 1.3 et illustrées dans les Figures 1.13a et 1.13b, les symboles creux indiquant les matériaux stables et les symboles pleins les matériaux instables. Selon Rönqvist & Viklander (2016), un matériau est considéré comme instable lorsque sa probabilité dépasse 70 %.

Chang & Zhang (2013) déterminent deux critères géométriques permettant d'évaluer la stabilité interne d'un matériau, en fonction de la forme de sa courbe granulométrique. Ces critères reposent sur la combinaison du pourcentage passant massique des particules fines (P , %), correspondant au pourcentage de particules de d inférieur à 0,063 mm dans leur étude, et d'un paramètre géométrique. Ce dernier correspond au rapport de discontinuité $d_{\max}/d_{\min}$, noté G_r , pour les courbes granulométriques discontinues et à $(H/F)_{\min}$ pour les courbes granulométriques continues. Pour une courbe granulométrique continue, si P est supérieur à 20 %, le matériau est considéré comme stable. Dans le cas contraire, la valeur de $(H/F)_{\min}$ doit être comparée aux valeurs seuils retenues par Chang & Zhang (2013) présentées dans le Tableau 1.3. Pour une courbe granulométrique discontinue, P doit être supérieur à 35 % pour que le matériau soit considéré comme stable, sans qu'il soit nécessaire de comparer G_r aux valeurs seuils présentées dans le Tableau 1.3.

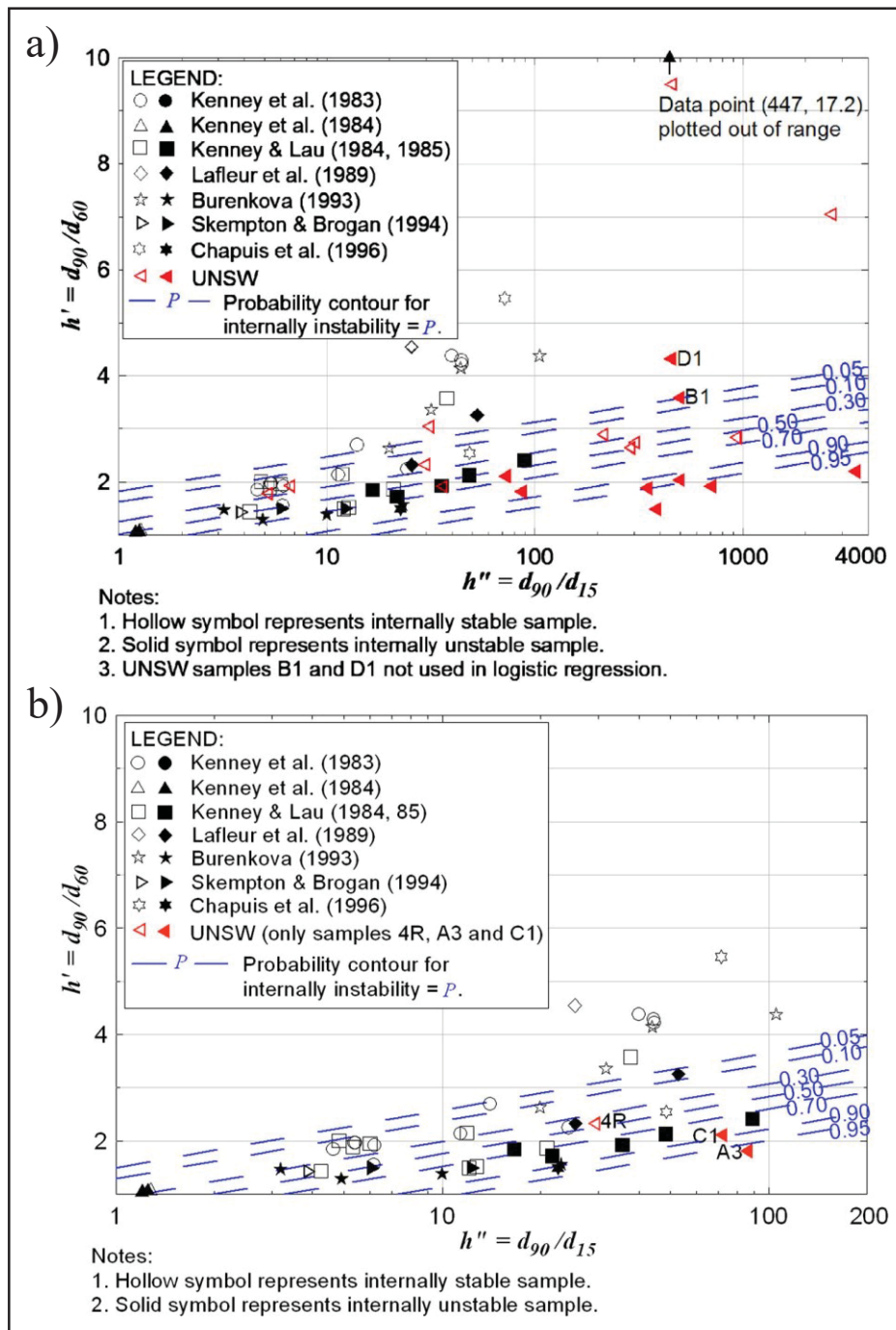


Figure 1.13 Droites de probabilité d'instabilité interne Wan & Fell en fonction du type de matériau : (a) silt-sable-gravier ou une argile-silt-sable-gravier, avec un pourcentage en argile et une plasticité limités et (b) sable-gravier contenant moins de 10 % de particules fines non plastiques ($d < 0,075$ mm)

Tirée de Wan & Fell (2008, p. 405 et 406)

Tableau 1.3 Résumé des approches dérivées des critères semi-empiriques géométriques de Kezdi, Sherard, Kenney & Lau et Burenkova pour évaluer la stabilité interne

Références	Conditions pour la stabilité du matériau	Références des critères modifiés et/ou combinés
Chapuis (1992) ^a	$S = 0,15/\log(D'_{15}/d'_{85}) > 24,9 \%$	Kezdi
	$S = 0,15/\log(D'_{15}/d'_{85}) > 21,5 \%$	Sherard
	$S = (F_{4d}-F_d)/\log 4 > 1,66F_d$	Kenney & Lau
Skempton & Brogan (1994) ^b	$D'_{15}/d'_{85} \leq 4,0$	Kezdi
Li & Fannin (2008) ^c	$H \geq F$ si $F < 15 \%$ $H > 15 \%$ si $F \geq 15 \%$	Kezdi et Kenney & Lau
Wan & Fell (2004, 2008) ^{d,e}	$P^* = \exp(Z)/(1 + \exp(Z))$ Avec : - $Z = 2,378\log(h'') - 3,648h' + 3,701$ pour les mélanges avec fines, - $Z = 3,875\log(h'') - 3,591 + 2,436$ pour les mélanges sable-gravier.	Burenkova
Chang & Zhang (2013)	Pour les sols bien gradués : - $(HF)_{\min} > 1,0$ si $P < 5$, - $(HF)_{\min} > - (1/15)P + 4/3$ si $5 < P < 20 \%$, - Si $P > 20 \%$.	Kenney & Lau
	Pour les sols avec une graduation à trou : - $G_r < 3,0$ si $P < 10 \%$, - $G_r < 0,3P$ si $10 < P < 35 \%$, - Si $P > 35 \%$.	N/A
Moraci et al. (2014, 2015) ^f	$S > 21,5 \%$ et $S > 1,66F$ Avec : - $S = (S_1 + S_2)/2$ - $F = (F_1 + F_2)/2$	Sherard et Kenney & Lau
Andrianatrehina et al. (2016)	$F < 5 \%$ avec F correspondant à $(D'_{15}/d'_{85}) = 4,0$	Kezdi
Zhou et al. (2016)	$F < 15 \%$ pour $S = 24,9 \%$	Kezdi
	$F < 12,95 \%$ pour $S = 21,5 \%$	Sherard
	$S > 1,66F$ avec S et F de $(S/F)_{\min}$	Kenney & Lau
Mandaglio et al. (2018) ^g	$S > 1,66F$	Sherard et Kenney & Lau
Ni et al. (2018) ^h	$D'_{15}/d'_{85} < 4,0$ à $5,0$	Kezdi et Sherard
Lai et al. (2022) ^a	$D'_{15}/d'_{85} < 4,0$ ou $5,0$	Kezdi et Sherard

Notes : ^a d'_{85} correspondant au d pour $0,85F$ et D'_{15} au d pour $0,85F + 15$. ^b Appliqué aux d correspondant au pourcentage de la fraction fine (S_f , %) ainsi qu'aux pourcentages voisins. ^c H et F de $(H/F)_{\min}$. ^d P^* correspondant à la probabilité d'instabilité interne ^e « Mélanges avec fines » correspondant au silt-sable-gravier et d'argile-silt-sable-gravier avec un $I_p < 13 \%$ et moins de 10% d'argile ($d < 0,002$ mm) et « mélanges sable-gravier » correspondant au sable-gravier avec moins de 10% de silt non plastique. ^f S_1 et F_1 correspondants à S et F de $(H/F)_{\min}$ et S_2 et F_2 correspondants à S et F du maximum relatif ou absolu de I_r proche de 5 , avec F_1 et $F_2 < 35 \%$. ^g S et F déterminés selon la méthode de Moraci et al. (2014, 2015). ^h Appliqué uniquement aux d de particules intermédiaires.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS, MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET CONTRIBUTIONS

2.1 Objectifs de la thèse

La présente thèse a pour objectif principal d'améliorer l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires destinés à être utilisés comme matériaux de construction d'ouvrages en remblai. Ce travail s'inscrit dans une démarche visant à renforcer la sécurité des ces ouvrages, en améliorant la sélection des matériaux face aux phénomènes d'érosion interne, et plus particulièrement à la suffusion.

Cet objectif général est divisé en deux sous-objectifs, chacun correspondant à l'une des deux approches existantes utilisées en recherche et en pratique pour évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires. Chacun vise au développement d'un critère spécifique.

Le premier sous-objectif, divisé lui-même en deux étapes, consiste à proposer une méthode expérimentale permettant d'évaluer la stabilité interne d'un matériau granulaire au moyen d'essais d'écoulement. En l'absence de norme encadrant ce type d'essai, les dispositifs expérimentaux employés varient considérablement, notamment en ce qui concerne la méthode de saturation, ainsi que les paramètres mesurés et leurs valeurs seuils retenues pour distinguer les matériaux stables des matériaux instables. La première étape a ainsi consisté à évaluer différentes méthodes de saturation, afin d'identifier une procédure assurant une saturation complète des matériaux granulaires, condition de laboratoire idéale recherchée, avant l'évaluation de sa stabilité interne. Une fois cette méthode de saturation déterminée, la deuxième étape a consisté à réaliser des essais d'écoulement sur des matériaux granulaires grossiers dont la stabilité interne est connue, dans le but de développer un critère expérimental rigoureux, fondé sur plusieurs paramètres sensibles à la migration des particules fines.

Le deuxième sous-objectif vise à analyser l'efficacité de critères géométriques appliqués à des matériaux granulaires grossiers dont la stabilité interne est connue, afin de développer un

critère permettant d'évaluer de manière plus fiable la stabilité interne d'un matériau granulaire à partir de sa courbe granulométrique. Ce développement s'appuie autant sur l'analyse d'approches semi-empiriques, en particulier celles de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, que sur leurs dérivés proposés dans la littérature, afin d'en dégager les limites et les avantages respectifs.

Cette division de la recherche a amené l'écriture de trois articles scientifiques. Le premier porte sur l'évaluation des méthodes de saturation, tandis que les deux suivants traitent respectivement du développement du critère expérimental et du critère géométrique. Ces articles scientifiques sont présentés aux Chapitres 3, 4 et 5 de la présente thèse, respectivement. La méthodologie générale est détaillée dans la section suivante.

2.2 Méthodologie générale

Les sections suivantes présentent les méthodologies utilisées pour les trois articles permettant de répondre aux deux sous-objectifs présentés préalablement.

2.2.1 Évaluation expérimentale des méthodes de saturation

Pour répondre à la première étape du premier sous-objectif, une revue des méthodes de saturation recommandées par les normes d'essais et appliquées dans la littérature lors d'essais d'écoulement a été nécessaire. Cette revue de littérature a permis de mettre en évidence que la saturation des matériaux granulaires dépend de deux éléments : l'air dissous dans l'eau de percolation utilisée pour la saturation et l'air contenu dans les pores du matériau à saturer. Trois méthodes de désaération de l'eau de percolation et trois méthodes de saturation sont ainsi étudiées.

L'efficacité de ces méthodes de saturation est évaluée au moyen d'essais dits de saturation réalisés sur des matériaux granulaires. Lors de ces essais, l'évolution de S_r est suivie au cours de t en employant une méthode adaptée de Chapuis et al. (1989) et de Chapuis (2004) pour le calcul de S_r des matériaux granulaires mis en place dans un perméamètre à parois rigides.

L'Annexe I présente un exemple de jeu de données issu d'un essai de saturation, incluant notamment les paramètres à mesurer pour calculer S_r selon la méthode de Chapuis et al. (1989) et de Chapuis (2004), ainsi que les corrections à appliquer à son évaluation au cours de t . L'objectif est de trouver une combinaison des méthodes de désaération de l'eau de percolation et de saturation permettant d'atteindre une saturation complète ($S_r = 100\%$) du matériau granulaire, et si possible, en un temps réduit.

Trois matériaux granulaires ont été sélectionnés pour évaluer l'efficacité des méthodes. Seuls des matériaux granulaires stables ont été choisis afin d'éviter toute interférence due à une migration de particules fines pouvant influencer la valeur finale de S_r et le temps de saturation. La stabilité interne a été vérifiée soit par un essai d'écoulement, réalisé dans l'étude dont le matériau est issu, soit par l'application des trois critères géométriques de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, retenus en raison de leur usage fréquent en recherche et en pratique. Deux de ces matériaux granulaires sont des matériaux reconstitués à partir d'une même courbe granulométrique. Ils diffèrent par la nature des particules utilisées : des billes de verre pour le premier et des particules naturelles provenant d'un sable tamisé pour le second. Le troisième matériau est un sol naturel dont la courbe granulométrique est plus fine que celles des deux premiers matériaux et qui présente des particules de d inférieur à 0,075 mm non cohésives. Ces matériaux granulaires ont été sélectionnés pour deux raisons. La première est de déterminer une méthode efficace pour saturer à la fois des matériaux contenant des particules naturelles et des matériaux contenant des billes de verre, ces dernières ayant été choisies afin de reconstituer les matériaux étudiés dans le cadre de l'article 2 (Chapitre 4). La deuxième raison est d'identifier une méthode efficace pour les matériaux grossiers présentant des particules de d inférieur à 0,075 mm non cohésives, car ces derniers sont plus difficiles à saturer en raison de la petite taille de leurs pores.

Les essais de saturation ont été menés en deux phases distinctes. Lors de la première phase, l'efficacité des méthodes de désaération de l'eau de percolation a été évaluée sur les deux matériaux reconstitués, chacune étant combinée à la méthode de saturation préconisée par la norme ASTM D2434-19 sur les essais de perméabilité à charge constante, en vigueur lors de

la rédaction de l'article 1 (Chapitre 3). La méthode de désaération ayant permis d'obtenir une saturation complète a été retenue pour la deuxième phase, et couplée aux trois méthodes de saturation pour saturer à nouveau les deux matériaux reconstitués. Les deux méthodes les plus efficaces, c'est-à-dire celles assurant une saturation complète, ont ensuite été appliquées au matériau intact, caractérisé par une courbe granulométrique plus fine. Enfin, la méthode de saturation la plus performante, ainsi que certaines pratiques expérimentales, ont été retenues pour le développement du critère expérimental de stabilité interne présenté dans l'article 2 (Chapitre 4).

2.2.2 Développement d'un critère expérimental de stabilité interne

Une revue de littérature portant sur l'étude du phénomène de suffusion à l'aide d'essais d'écoulement a été effectuée au préalable pour répondre à la deuxième étape du premier sous-objectif. Les études examinées concernent l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires au moyen de critères de laboratoire et/ou géométriques, ainsi que l'amorçage de la suffusion dans un matériau granulaire. Cette revue de littérature a mis en évidence une grande variabilité des essais d'écoulement, tant en ce qui concerne les montages et les procédures d'essais utilisés pour étudier la suffusion qu'en ce qui concerne les paramètres mesurés et analysés pour l'évaluer. À partir de cette étude de la revue de littérature, un dispositif expérimental a été mis en place afin de déterminer un critère de laboratoire pour évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires au moyen d'essais d'écoulement.

Les essais d'écoulement ont été réalisés sur des matériaux granulaires placés dans un perméamètre à parois rigides muni d'un système ouvert, permettant ainsi la migration des particules fines vers l'extérieur du matériau sous l'effet d'un écoulement. Une illustration est présentée à la section 4.2.3. Conçu spécifiquement pour cette étude, le perméamètre s'inspire en partie des pratiques observées dans la littérature sur l'étude de la suffusion. Il se compose de trois parties distinctes : une partie supérieure constituée de trois anneaux amovibles, permettant la récupération des billes de verre dans trois zones distinctes du matériau (haut, milieu et bas) à l'issue de l'essai, une partie centrale combinant une plaque perforée et un

grillage afin de retenir le matériau tout en permettant aux particules fines de migrer et une partie inférieure correspondant à une cellule servant à récupérer les particules fines érodées.

Les matériaux granulaires ont été reconstitués à partir de billes de verre, des particules sphériques à surface lisse dont la densité des solides (G_s) est identique, quelle que soit leur taille. Ces particules artificielles ont été utilisées pour minimiser les variables additionnelles susceptibles d'interférer avec la stabilité interne du matériau (forme et texture des particules, variation de G_s ou présence de cohésion). L'Annexe II présente un article de conférence qui caractérise les billes de verre et discute de la représentativité de matériaux reconstitués avec ce type de particules pour l'étude des écoulements en milieu poreux. Les matériaux granulaires reconstitués ont été sélectionnés parmi ceux qui ont été testés dans le cadre d'études sur la suffusion. Deux exigences ont été satisfaites concernant les tailles minimales et maximales des particules qui composent ces matériaux. En raison de l'utilisation de billes de verre pour reconstituer les matériaux, aucun matériau contenant des particules de d inférieur à 0,075 mm n'a été retenu dans l'étude actuelle. Concernant la taille maximale des particules, afin d'éviter la formation de chemins préférentiels, il a été choisi de sélectionner des matériaux dont le diamètre maximal des particules qui les constituent est en adéquation avec le diamètre interne du perméamètre. Pour satisfaire ces deux exigences, certaines courbes granulométriques de matériaux testés ont dû être ajustées. Une fois les matériaux sélectionnés dans la littérature, ceux-ci sont classés selon leur stabilité interne, évaluée à partir des essais d'écoulement rapportés dans les études d'origine (matériaux stables et instables). Ensuite, dans chacune des deux catégories, les matériaux sont séparés selon que leurs réponses aux critères de Kezdi, Sherard et Kenny & Lau concordent ou non avec les résultats de l'essai d'écoulement (catégories essais & critères et essais vs critères).

Après avoir reconstitué les matériaux, ceux-ci sont placés de façon lâche et sèche dans le perméamètre. La mise en place lâche a été choisie au lieu d'une mise en place dense, généralement préconisée dans les normes et utilisée dans la pratique et dans la littérature, en raison de la nature des particules utilisées pour reconstituer les matériaux, ainsi que de la nature d'une partie des matériaux testés. En effet, le choix d'une méthode de compactage standard a

été écarté afin d'éviter le bris des billes de verre, qui doivent être réutilisées tout au long de l'étude pour reconstituer les matériaux. Pour obtenir des matériaux denses tout en évitant le bris de particules, il avait été initialement envisagé d'utiliser une table vibrante couplée à un poids, qui est la méthode de compactage utilisée dans la norme ASTM D4253 sur les méthodes d'essai normalisées pour la masse volumique sèche maximale ($\rho_{d,max}$, g/cm³) et le poids volumique sec maximal des sols ($\gamma_{d,max}$, kN/m³) à l'aide d'une table vibrante. Cependant, cette méthode provoquait une migration prématurée des particules fines, d'autant plus pour un matériau instable. Il a donc été choisi de placer les matériaux reconstitués avec des billes de verre à sec et de façon lâche, selon la procédure de la norme ASTM D4254 sur les méthodes d'essai normalisées pour déterminer la masse volumique sèche minimale ($\rho_{d,min}$, g/cm³) et le poids volumique sec minimal des sols ($\gamma_{d,min}$, kN/m³) et le calcul de I_D . Les matériaux ainsi placés sont ensuite saturés selon la méthode de saturation déterminée dans l'article 1 (Chapitre 3), assurant une saturation complète du matériau granulaire ainsi que du perméamètre en un temps réduit et cela, quelle que soit la courbe granulométrique du matériau reconstitué. La seule différence amenée par rapport à cette méthode de saturation est le débit Q utilisé pour saturer les matériaux. Afin de minimiser autant que possible la migration des billes de verre lors de la saturation, notamment dans les matériaux instables qui sont plus sensibles aux manipulations, un très faible Q a été appliqué.

Les matériaux granulaires ont ensuite été soumis à un écoulement d'eau descendant sous un faible gradient i , choisi de manière à permettre un écoulement laminaire à travers l'ensemble des matériaux, tout en permettant la migration des particules fines dans les matériaux instables. Ce gradient hydraulique a été appliqué seul, sans être couplé à des vibrations mécaniques appliquées directement sur le perméamètre, bien que certaines études sur la suffusion en fassent usage. La raison est que la présente étude considère que la suffusion résulte exclusivement d'un écoulement sous un i_{cr} dans un matériau granulaire instable. Avant le lancement de la campagne d'essais, la répétabilité de la procédure d'essais d'écoulement décrite précédemment a été vérifiée à l'aide d'un matériau granulaire instable. Les paramètres influencés par l'érosion interne des particules fines, notamment la courbe granulométrique, l'indice des vides et le volume total du matériau (V_t , cm³) ont été évalués pour chaque matériau.

Les courbes granulométriques avant et après essai sont présentées dans l'Annexe III, tandis que les mesures nécessaires au calcul de e et de V_t , ainsi que les valeurs obtenues avant et après essais, sont fournies dans l'Annexe IV. Un critère de laboratoire, fondé sur quatre conditions, a ensuite été développé à partir de l'analyse comparative de ces paramètres entre matériaux stables et instables, tels qu'évalués selon les études d'origine.

2.2.3 Élaboration d'un critère géométrique de stabilité interne

Une revue de la littérature a été également menée pour répondre au deuxième sous-objectif. Elle s'est principalement concentrée sur les critères géométriques permettant d'évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires à partir de leur courbe granulométrique, qu'ils soient semi-empiriques ou dérivés de ces derniers.

La démarche scientifique adoptée dans la présente étude s'inspire de celles décrites dans les études portant sur les critères géométriques dérivés. Elle commence par la sélection de douze critères géométriques : six semi-empiriques et six dérivés de ces derniers. Les premiers critères retenus sont ceux de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, en raison de leur utilisation fréquente en recherche et en pratique pour évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires. Le choix de retenir ces trois critères, ainsi que cinq approches qui en dérivent, est conforté par le constat effectué à la fin de l'étude précédente sur l'évaluation de la stabilité interne par ces trois critères historiques (article 2, Chapitre 4). Trois autres critères semi-empiriques ont également été inclus à l'analyse, ainsi qu'une approche dérivée de l'un d'eux. Parmi ces critères additionnels, deux évaluent essentiellement la stabilité interne de matériaux granulaires présentant une courbe granulométrique discontinue.

Les douze critères géométriques sélectionnés ont été appliqués à des matériaux granulaires grossiers issus d'études sur la suffusion, dont la stabilité interne avait été évaluée à l'aide d'essais d'écoulement. Les graphiques de l'Annexe V illustrent cette application en présentant les points correspondant aux résultats obtenus pour chacun des matériaux. Les matériaux considérés incluent ceux déjà testés dans l'article 2 (Chapitre 4), en conservant leur courbe

granulométrique d'origine, ainsi que de nouveaux matériaux granulaires. Le choix de ces matériaux additionnels s'est porté sur des matériaux granulaires grossiers sans particules de d inférieur à 0,075 mm, afin de rester cohérent avec les matériaux utilisés lors de l'étude précédente (article 2, Chapitre 4). Ce choix de ne pas inclure de matériaux avec des particules de d inférieur à 0,075 mm est renforcé par le constat qui est que la stabilité interne de ce type de matériaux est plus complexe, qui plus est si les particules de d inférieur à 0,075 mm sont cohésives. En effet, ces dernières jouent un rôle dans la stabilité interne du matériau qu'elles constituent. Parmi les matériaux retenus, seuls ceux pour lesquels les trois critères de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau donnaient des évaluations divergentes ont été retenus, en raison du constat effectué lors de l'étude précédente sur l'évaluation de la stabilité interne par ces trois critères (article 2, Chapitre 4).

Les résultats issus de l'application des critères géométriques ont été comparés aux résultats expérimentaux obtenus par essais d'écoulement lors des études d'origine. La fiabilité de chaque critère a été évaluée à partir du pourcentage de concordance entre les évaluations géométriques et expérimentales. Pour les critères de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, le calcul de probabilités associées à la prédiction de la stabilité interne des matériaux granulaires a également été effectué. L'analyse conjointe de ces deux indicateurs permet de mettre en évidence les limites et les avantages des différents critères géométriques, qu'ils soient semi-empiriques ou dérivés de ces derniers. À partir de ces observations, les critères les plus performants pour l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires grossiers ont été identifiés, puis retenus pour développer un nouveau critère géométrique.

2.3 Contributions de la thèse

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires, en proposant des approches expérimentale et géométrique, à des fins d'utilisation dans les remblais de construction d'ouvrages. Elle a donné lieu à plusieurs contributions scientifiques, ainsi qu'à l'amélioration de certaines procédures expérimentales institutionnelles.

Les contributions scientifiques associées aux articles 1, 2 et 3, présentés respectivement aux Chapitres 3, 4 et 5, sont détaillées dans les paragraphes suivants.

L'article 1 (Chapitre 3) contribue à une meilleure compréhension des pratiques nécessaires pour atteindre une saturation complète de matériaux granulaires dans le cadre des essais d'écoulement. Il tient compte des deux principaux éléments influençant la saturation : l'air dissous dans l'eau de percolation et l'air présent dans les pores des matériaux. Il évalue ensuite l'efficacité de différentes méthodes de désaération et de saturation, issues de normes et de la littérature. L'article met en évidence les limites et les avantages de ces méthodes et propose deux combinaisons de méthodes de désaération et saturation permettant d'atteindre une saturation complète, quelle que soit la nature des particules constituant le matériau. L'une d'elles se distingue par sa rapidité, tout en assurant une saturation complète, indépendamment du type de matériau. Pour cette raison, elle est retenue pour la suite des travaux expérimentaux de l'article 2 (Chapitre 4), de même que le système hydraulique et le dispositif de suivi de S_r , tous deux également utilisés dans l'article 1 (Chapitre 3) et identifiés comme essentiels pour atteindre une saturation complète.

L'article 2 (Chapitre 4) met en évidence l'hétérogénéité des dispositifs expérimentaux utilisés pour étudier la suffusion, tant au niveau des montages et des procédures que des paramètres retenus pour évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires. Il propose un critère expérimental rigoureux reposant sur quatre conditions, chacune combinant deux paramètres sensibles à la migration des particules fines, qui doivent être simultanément satisfaites pour qu'un matériau grossier soit considéré comme stable. Le développement de ce critère a révélé une forte cohérence entre les résultats expérimentaux et les évaluations issues des critères géométriques de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, couramment utilisés en recherche et en pratique. Cette cohérence motive leur sélection dans l'article 3 (Chapitre 5), consacré à l'évaluation de critères géométriques en vue d'en développer un permettant de distinguer de manière plus fiable les matériaux stables et instables.

L'article 3 (Chapitre 5) évalue l'efficacité de plusieurs critères géométriques, incluant en particulier les critères semi-empiriques de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, ainsi que certains critères dérivés proposés dans la littérature, pour distinguer correctement les matériaux stables et instables. L'analyse montre que la prise en compte de la forme de la courbe granulométrique, ainsi que l'application à un intervalle spécifique de pourcentage passant, permet d'améliorer la performance de l'évaluation. Sur cette base, un critère géométrique combiné est proposé, fondé sur trois approches historiques, afin d'offrir une méthode plus fiable pour l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires grossiers.

À ces contributions scientifiques s'ajoutent des contributions institutionnelles, réalisées au sein du Département du génie de la construction de l'ETS durant les années de doctorat. Celles-ci comprennent notamment :

- 1) la rédaction d'un protocole de laboratoire sur les essais de perméabilité à charge constante destiné au cours de mécanique des sols (CTN504) enseigné au baccalauréat;
- 2) la rédaction d'une présentation sur le granulomètre laser, intégrée au contenu du cours de méthodes expérimentales en géotechnique (MGC843) enseigné aux cycles supérieurs;
- 3) la conception et réalisation, en collaboration avec le personnel technique, du dispositif expérimental associé aux essais de perméabilité de CTN504, incluant la fabrication d'un système hydraulique et de perméamètres;
- 4) la mise en service et le développement de procédures d'utilisation pour plusieurs équipements de laboratoire, dont le désaérateur d'eau, la table vibrante et le granulomètre laser;
- 5) l'amélioration des techniques de désaération de l'eau et de saturation des matériaux granulaires dans le cadre de projets académiques;
- 6) la formation d'étudiants à la réalisation d'essais de perméabilité à charge constante et d'érosion interne dans le cadre de projets industriels.

CHAPITRE 3

ON PREFERRED SATURATION METHODS FOR GEOTECHNICAL FLOW TESTS

Céline Bouin^a, Simon Weber^b, Yannic A. Ethier^c, Jean-Sébastien Dubé^d, and François Duhaime^e

^{a,b,c,d,e} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié dans « Geotechnical Testing Journal », août 2020

ABSTRACT

Laboratory flow tests performed on granular materials in rigid-wall permeameters are used to determine the hydraulic conductivity of saturated materials or to study particle migration. For such tests, specimen preparation is important, particularly the saturation process. The presence of gas bubbles in the tested specimen leads to smaller hydraulic conductivity values and may affect particle migration. Therefore, measures must be taken to obtain fully saturated specimens. In order to improve saturation, two elements have to be taken into consideration; first, the presence of gas in the permeant water, and second, the presence of gas in the pores of the specimen. Several flow tests are described in ASTM standards. These standards involve different conditioning methods for permeant water (e.g., heating, seepage through a sand filter, cavitation under vacuum), and different specimen saturation methods (e.g., saturation with an upward flow under vacuum, following carbon dioxide flushing). In this article, water deaeration and specimen saturation methods were evaluated and compared using a mass-volume method. In the first phase, the importance of using deaerated permeant water was examined by comparing different conditioning methods for permeant water. Saturation using water in equilibrium with atmospheric pressure was compared with saturation with water heated at 40 °C, water deaerated using a sand filter, and water deaerated by cavitation under vacuum. In the second phase, the influence of purging the gas contained in the soil specimen before saturation using carbon dioxide or a vacuum was compared. In both cases, the permeant water was deaerated by cavitation under vacuum. These tests showed that combining a purge of the specimen with carbon dioxide with saturation using an upward flow of water deaerated

by cavitation under vacuum yielded the highest degree of saturation for granular specimens in a rigid-wall permeameter. Another advantage of this combination is that it accelerates specimen saturation.

Keywords: Saturation, rigid-wall permeameter, granular material, glass beads, laboratory flow tests, hydraulic conductivity

3.1 Introduction

Laboratory tests for determining the hydraulic conductivity of granular materials are described in standards such as ASTM D2434-19, *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*, and ASTM D5856, *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter*. Similar tests are also used to assess the internal stability of granular materials (e.g., Kenney & Lau, 1985, 1986; Lafleur et al., 1989; Li, 2008; Wan & Fell, 2008). Such flow tests are conceptually simple, yet their detailed procedures can be complex, especially with regard to specimen preparation (Daniel, 1994), parasitic head losses (Daniel, 1994; Duhaime et al., 2015), and data acquisition (Woo, Kim, & Chung, 2018). Flow tests need to be performed on homogeneous, fully saturated specimens that are prepared to the desired density index.

It is known that gas bubbles can be trapped in the pores of granular materials during saturation (Chapuis, Weber, & Duhaime, 2015). Their presence, size, and stability depend on the variations of physical and chemical parameters, i.e., the pressure and the temperature of the apparatus and the specimen, and the dissolved gas content in the permeant water (Orlob & Radhakrishna, 1958; Chapuis, 2004). If conditions allow, the bubbles can grow and move through the pores of the granular material (Chapuis et al. 2015). Bubble growth and movement causes a decrease in the material hydraulic conductivity (ASTM D5856; Bertram, 1940; Orlob & Radhakrishna, 1958; Halse et al., 1988; Chapuis et al., 1989; Bardet, 1997;

Aydilek & Kutay, 2003; Woo et al., 2018), and a possible modification of the material homogeneity because of the displacement of particles by the gas bubbles (ASTM D5101, *Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems*; Orlob & Radhakrishna, 1958; Chapuis et al., 1989). Saturation is also a concern in compacted clay (Chapuis, 2017; Chen, Peng, & Yang, 2018; Landon, Marchetti, & DeGroot, 2018; Wang, Wei, & Zou, 2019). This article is concerned with the specimen saturation step in flow tests on granular materials.

ASTM standards present different methods to fully saturate granular materials. These methods can be divided into those that are concerned with reducing dissolved gas in the permeant water, and those that are concerned with removing gas from the pores of the unsaturated granular material prior to or during saturation. The recommended methods vary largely from one standard to another, and literature on their relative efficiency is limited. Moreover, a number of parameters that are common to several standards (e.g., dissolved oxygen content in water, DOC) are associated with different specifications. A greater uniformity among methods, with the aim of reaching a degree of saturation (S_r) as close as possible to 100 % in the laboratory, would improve the reproducibility of flow tests. This requires the relative efficiency of the saturation methods to be compared.

A testing program was developed to compare the water deaeration and specimen saturation methods recommended in ASTM standards, specifically three methods to minimize dissolved gas in the permeant water, and two methods to minimize gas trapped in the pores of the granular material during saturation. The efficiency of the different methods was determined by measuring S_r as a function of time during specimen saturation using the mass-volume method of Chapuis et al. (1989). The goal of this article is to compare the methods, both with respect to the final specimen saturation and the time spent to achieve it, and to discuss their benefits and limitations.

3.2 Existing recommendations on saturation

3.2.1 ASTM recommendations

In this article, only ASTM standards dealing with flow tests conducted in rigid-wall cells are reviewed regarding their recommendations on specimen saturation. Tableaux 3.1 and 3.2 present a summary of these recommendations.

Tableau 3.1 ASTM recommendations on permeant water used for flow tests in a rigid-wall cell

ASTM standard		D2434-19	D4491	D5101	D5856
Determined parameter or behavior		k of granular soils with 10 % max < 75 μm	k_{water} of geotextiles	Filtration compatibility of soil-geotextile systems	k of porous material with $k \leq 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Permeant water		“Tap water” “De-aired water may be used if preferred”	“the test water used for the water flow tests shall be de-aired”	“Test water should be ... deaired”	“de-aired tap water shall be used for the permeant liquid”
Principle or method used to deaerate water		“Fine sand screen” “Constant-head filter tank ... to remove most of the air from tap water” “Water maintained in an inflow temperature (T) sufficiently high to cause a decreasing T gradient”	“the de-airing system may be either a commercially available system or one consisting of a vacuum pump capable of removing a minimum of 150 L/min of air”	“Water deairing system”	“by boiling, by spraying a fine mist of water into an evacuated vessel attached to a vacuum source, or by forceful agitation of water in a container attached to a vacuum source”
DOC	Measurement method	...	“Commercially available chemical kits or by a dissolved oxygen meter”	...	...
	Value, mg/L	...	< 6	< 2	...
Water storage		...	“a closed storage tank under a slight vacuum until room T is attained”	“store at a T within +/- 2 °C of the tested soil-geotextile system”	“de-aired water shall not be exposed to air for prolonged periods”

Tableau 3.2 ASTM recommendations on the specimen saturation method for flow tests in a rigid-wall cell

ASTM standard	D2434-19	D4491	D5101	D5856
Gas evacuation method	“Using a vacuum pump or suitable aspirator, evacuate the specimen under 50 cm (20 in.) Hg for 15 min”	“Submerge a tube attached to a source of vacuum to just above the surface of the geotextile”	“attaching a carbon dioxide line ... and regulating the gas flow at 2 L/min and purging the system”	“Flush permeant water through the influent line”
Water flow	“a slow saturation of the specimen from the bottom upward under full vacuum”	“fill the apparatus with de-aired water until the water level reaches the overflow”	“raising the level ... slowly... slow saturating process”	“assemble the permeameter cell and fill it with de-aired permeant water”

A comparison of the four ASTM standards mentioned in Tableaux 3.1 and 3.2 highlights the range of recommendations on permeant water deaeration, gas evacuation from the specimen, and specimen saturation. This situation implies that these methods, however different from each other, should lead to a saturated specimen, a fundamental condition for the realization of flow tests. However, the S_r resulting from these largely different methods has not been assessed so far.

3.2.2 Recommendations from other authors

The use of water presenting a low DOC during flow tests is preferable. It avoids bringing gas in the specimen (Chu et al., 1955), and it helps to dissolve the gas bubbles that are trapped in the granular material (Daniel, 1994; Chapuis, 2004). Water can be deaerated using physical methods, such as heating, or equilibrium with a vacuum.

The main method to verify water deaeration is to measure the DOC in water with a dissolved oxygen meter (Daniel, 1994). Halse et al. (1988), Fischer, Maré, & Holtz (1999), and Aydilek & Kutay (2004) followed recommendations in ASTM D4491, *Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity*, regarding the maximum DOC in

permeant water (Tableau 3.1). Daniel (1994) suggested a DOC of 1 to 2 mg/L, whereas Bertram (1940) advised a maximum DOC of 0.7 mg/L to avoid affecting the hydraulic conductivity.

Bertram (1940), Halse et al. (1988), Chapuis et al. (1989), Bardet (1997), Fischer et al (1999), and Aydilek & Kutay (2004) deaerated their permeant water under a vacuum, whereas Chu et al. (1955) used warm water for simplicity reasons. In Bertram (1940), Halse et al. (1988), and Bardet (1997), water was deaerated by spraying a fine mist into a sealed container under a vacuum. With this method, deaeration of water was improved by increasing the distance between the spraying point and the water surface. Bertram (1940) combined this deaeration system with a preheating of the water, and a simple sand filter positioned between the water supply and the permeameter. Daniel (1994) suggested deaeration by boiling or by spraying a fine mist into a vacuum-sealed container. Deaerated water can be produced in advance if stored in a closed tank under a slight vacuum (Aydilek & Kutay, 2004; Bardet, 1997) or in a storage carboy using a balloon to avoid contact between air and water (Bertram, 1940).

Chapuis et al. (1989) listed different methods for soil specimen saturation. Among these methods, an upward flow of deaerated water always results in a partial saturation for soil specimens. This method only provides a complete saturation for glass beads (Chapuis et al., 2015). For soil specimens, Chapuis et al. (1989) suggest applying a vacuum on a dry specimen before imposing an upward flow. The upward flow improves the evacuation of gas bubbles (Chapuis et al., 1989; Daniel, 1994). To limit the hydraulic gradient, the vacuum needs to be applied on both the supply tank and the permeameter (Chapuis et al., 1989). A carbon dioxide (CO₂) purge can also be used to flush air from a dry porous material prior to saturation (Chu et al. 1955; Fischer et al 1999). Because CO₂ is heavier than air, CO₂ injected from the bottom of the permeameter progresses upward, and pushes the air out from the pores of the granular material. Because of its large solubility compared to air, CO₂ then dissolves in the permeant water (Fischer et al 1999).

3.3 Materials and methods

3.3.1 Experimental program

Figure 3.1 presents a summary of the experimental program which was conducted in two phases. Phase I consists in testing deaeration methods for permeant water, whereas Phase II consists in testing saturation methods for soil specimens. In each phase, specimens of granular material in a rigid-wall permeameter are saturated to assess the impact of deaeration methods for permeant water and specimen saturation methods.

	PHASES	SPECIMENS		SATURATION TESTS	
		Grain size distribution	Particles	Permeant waters	Saturation methods
GAS IN WATER	I Deaeration methods for permeant water	(A)	Glass beads	- Water in equilibrium at ambient temperature and atmospheric pressure - Water heated at 40 °C at atmospheric pressure - Water deaerated with a sand filter at ambient temperature and atmospheric pressure - Water deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature	Upward flow combined with a vacuum at the outlet
			Natural particles		
GAS IN SOIL	II Specimen saturation methods	(A)	Glass beads	Water deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature	- Upward flow - Upward flow combined with a vacuum at the outlet - Upward flow combined with a CO₂ purge
		(B)	Natural particles	Water deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature	- Upward flow combined with a vacuum at the outlet - Upward flow combined with a CO₂ purge

Figure 3.1 Summary of the experimental program

Three deaeration methods are compared during phase I: i) heating the water at 40 °C at atmospheric pressure, ii) circulating the water through a sand filter at ambient temperature and atmospheric pressure, and iii) mixing the water under vacuum at ambient temperature to induce cavitation. The resulting permeant waters are compared with water at equilibrium with ambient temperature and atmospheric pressure. The four types of permeant water are used with the same specimen saturation method, namely upward flow combined with the application of a

vacuum at the permeameter outlet. The specimens are prepared with glass beads or natural sand particles, both having the grain size distribution identified as A in Figure 3.2.

During phase II, three specimen saturation methods are tested and compared: i) upward flow, ii) upward flow combined with a vacuum at the outlet, and iii) upward flow preceded by a CO₂ purge. The permeant water is deaerated by cavitation under vacuum for the three specimen saturation methods. The specimens are prepared with the same glass beads or natural sand particles as in phase I. A third granular material with natural particles and the grain size distribution identified as B in Figure 3.2 is also used to confirm the results obtained with the first two granular materials.

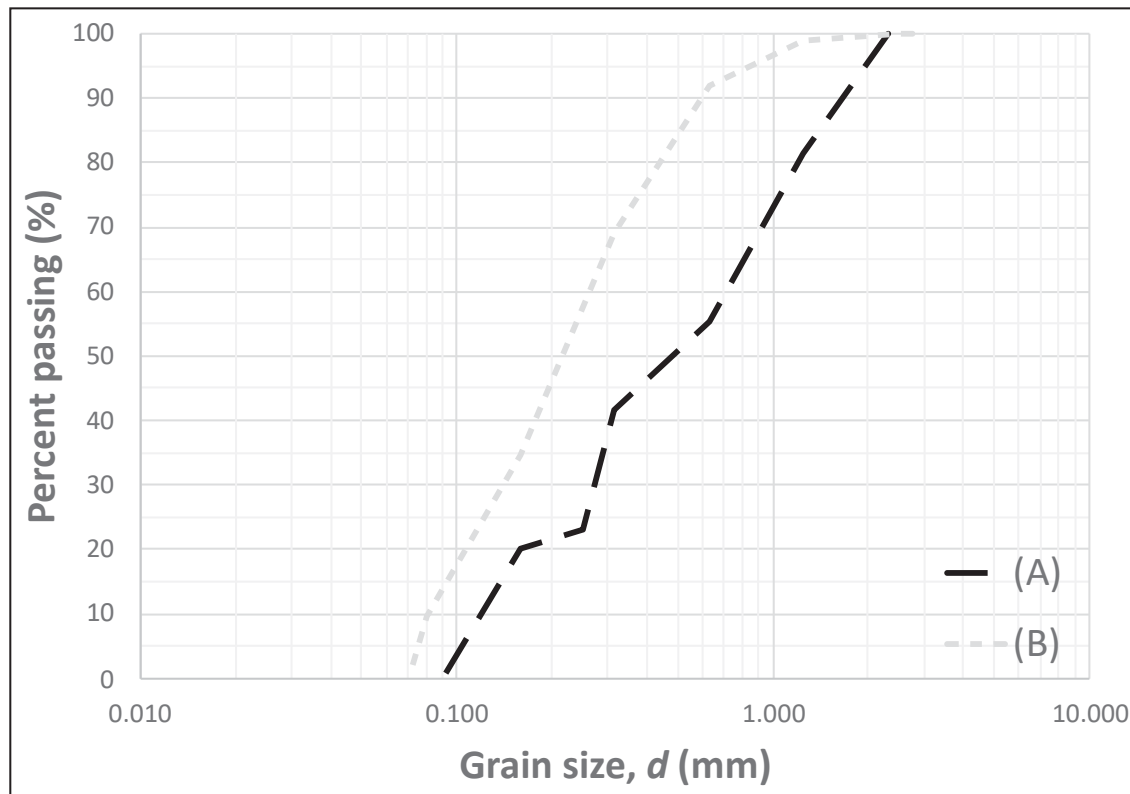


Figure 3.2 Grain size distributions for the saturation tests

3.3.2 Granular materials

Grain size distribution A (Figure 3.2) is slightly modified from the FR3 grain size distribution used by Li (2008). This grain size distribution corresponds to a poorly graded sand (SP)

according to ASTM D2487, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. For both natural particles and glass beads, this grain size distribution A is obtained by mixing the particles retained on nine sieves in the 0.080 to 2.3 mm range. This grain size distribution A was chosen to ensure that stable specimens are obtained with regard to internal erosion. The stability is assessed based on the Kezdi (1979), Sherard (1979) and Kenney & Lau (1985, 1986) criteria, and the suffusion tests carried out by Li (2008). Both glass beads and natural particles of silica sands are used to confirm if spherical and smooth particles are easier to saturate than natural particles, as mentioned by Chapuis et al. (2015). The natural sand particles used for grain size distribution A were obtained by sieving a sand containing some silt. A slightly finer-grained natural sand with particle size distribution B is also used to confirm the results of phase II on a different material with natural particles (Figure 3.2 and Tableau 3.3). Its particle size ranges from 0.072 to 2.5 mm. The grain size distribution of soil B was not modified by sieving. Grain size distribution B also corresponds to a poorly graded sand (SP).

Tableau 3.3 Characteristics of glass bead and natural particle specimens

Property	Grain size distribution A		Grain size distribution B
	Glass beads	Natural particles	Natural particles
Number of specimens	9 ^a	6	2
Specific Gravity of solids ^b	2.50	2.68	2.75
Effective Size, mm	0.120	0.120	0.081
Coefficient of Uniformity	5.9	5.9	3.25
Coefficient of Curvature	0.88	0.88	0.92
Mean Void Ratio	0.32	0.45	0.60
with a standard deviation of	0.006	0.015	0.012
Measured Saturated Hydraulic Conductivity, cm/s ^c	7.95×10^{-3}	9.93×10^{-3}	2.78×10^{-2}
Predicted Saturated Hydraulic Conductivity, cm/s ^d	4.95×10^{-3}	1.02×10^{-2}	1.00×10^{-2}

Note: ^a Three tests were carried out as replicate tests. ^b Determined by means of the pycnometer method given in ASTM D854, *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ^c Permeability tests have been conducted in addition to the saturation tests. ^d Measured values range between twice and three times the values predicted with equation (4) of Chapuis et al. (2015). This equation was selected according to the flow chart in Figure 3.2 of Chapuis et al. (2015).

To minimize preferential flow along the sidewall, the maximum particle size of all the tested specimens are at least twelve times smaller than the inner diameter of the permeameter (ASTM D2434-19).

The saturation tests were performed on specimens at their minimum void ratio as determined with a vibratory table per ASTM D4253, *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table* (Tableau 3.3). In accordance with Youd (1973), the spherical glass bead specimens have the lowest minimum void ratio.

3.3.3 Granular specimen preparation

Each granular material was placed in a 100-mm internal diameter rigid-wall permeameter made of clear PVC (Figure 3.3) using a funnel to spread the particles evenly in a slow spiral motion (ASTM D2434-19). After placing the loose dry material in the permeameter, it was densified using a vibratory table, with a vertical stress of 14 kPa applied by a dead weight on the dry material (ASTM D4253). This compaction method was chosen particularly for the glass bead specimens to avoid particle breakage. The dry density of each specimen was measured. The permeameter wall is sealed using O-rings between the top cap, the permeameter, and the base. Silicone is applied at the base to make it airtight and watertight. To verify the airtightness, a vacuum is applied at the top of the permeameter before each test. It was verified that the permeameter could maintain the vacuum after disconnecting the vacuum tube.

3.3.4 Permeant water supply

In the ASTM D2434-19 standard, a fine sand filter tank at atmospheric pressure supplies the permeameter with permeant water at constant head using an overflow. This apparatus raises concerns in terms of the stability of the permeant water as a prolonged exposure to air will result in an increase in dissolved air in the permeant water (ASTM D5856). A constant pressure tank called a Mariotte bottle was used to supply the permeameter with the permeant water (e.g., McCarthy, 1934; Daniel, 1994; Bardet, 1997; Woo et al. 2018, Figure 3.3B). This apparatus limits the dissolution of gases before and during the saturation tests. In fact, a vacuum was

applied on the Mariotte bottle for storing the water deaerated by cavitation under vacuum before the start of the tests. Hence, the DOC of the permeant water increased only slowly due to the Mariotte bottle, namely at 0.15 mg/L per hour on average. This average was calculated using DOC measurements taken with an oximeter at the Mariotte bottle outlet during saturation tests.

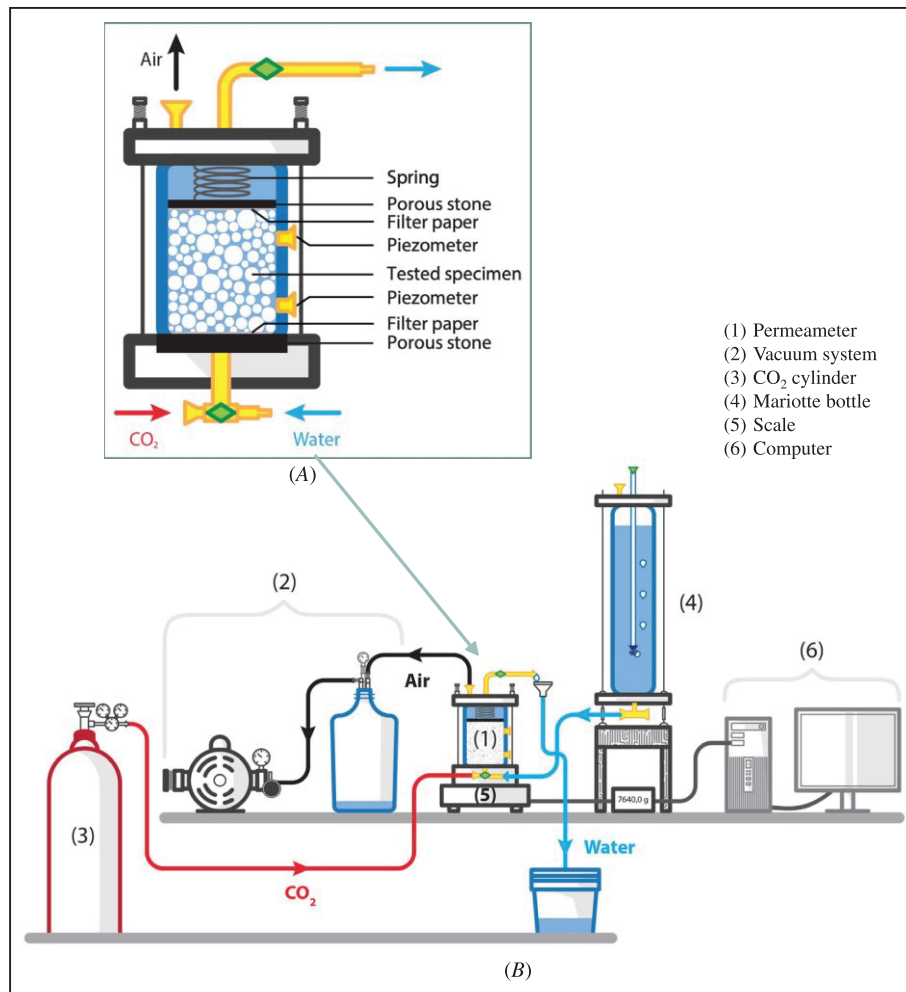


Figure 3.3 (A) Rigid-wall permeameter used during the saturation tests, and (B) apparatus used to saturate tested specimens during saturation tests and to follow the specimen saturation. Lateral piezometers were only used to determine the saturated hydraulic conductivity (Tableau 3.3)

Moreover, upward flow of the permeant water through the permeameter occurred under a constant hydraulic gradient of 0.4 to ensure laminar conditions (ASTM D2434-19). For all deaeration methods, type III deionized water was used.

3.3.5 Deaeration methods

3.3.5.1 Heating

Water was heated to a temperature of 40 °C. This temperature was chosen to avoid weakening the permeameter material. Water was first preheated to 40 °C using a hot plate. The heated water was then transferred to the Mariotte bottle that was wrapped in heater bands and insulating material (Figure 3.4A). The heater bands and insulating material were used to ensure that the water remained at 40 °C during specimen saturation. The heater bands were switched on and off periodically during the night using a timer, to prevent overheating of the material. The water temperature was measured with temperature sensors at the inlet and the outlet of the permeameter during saturation (Figure 3.4A). Despite the precautions taken, the water temperature at the inlet of the permeameter decreased during the night for one of the two tests (Figure 3.5). Nevertheless, inflow temperature was continuously above outflow temperature and S_r increased.

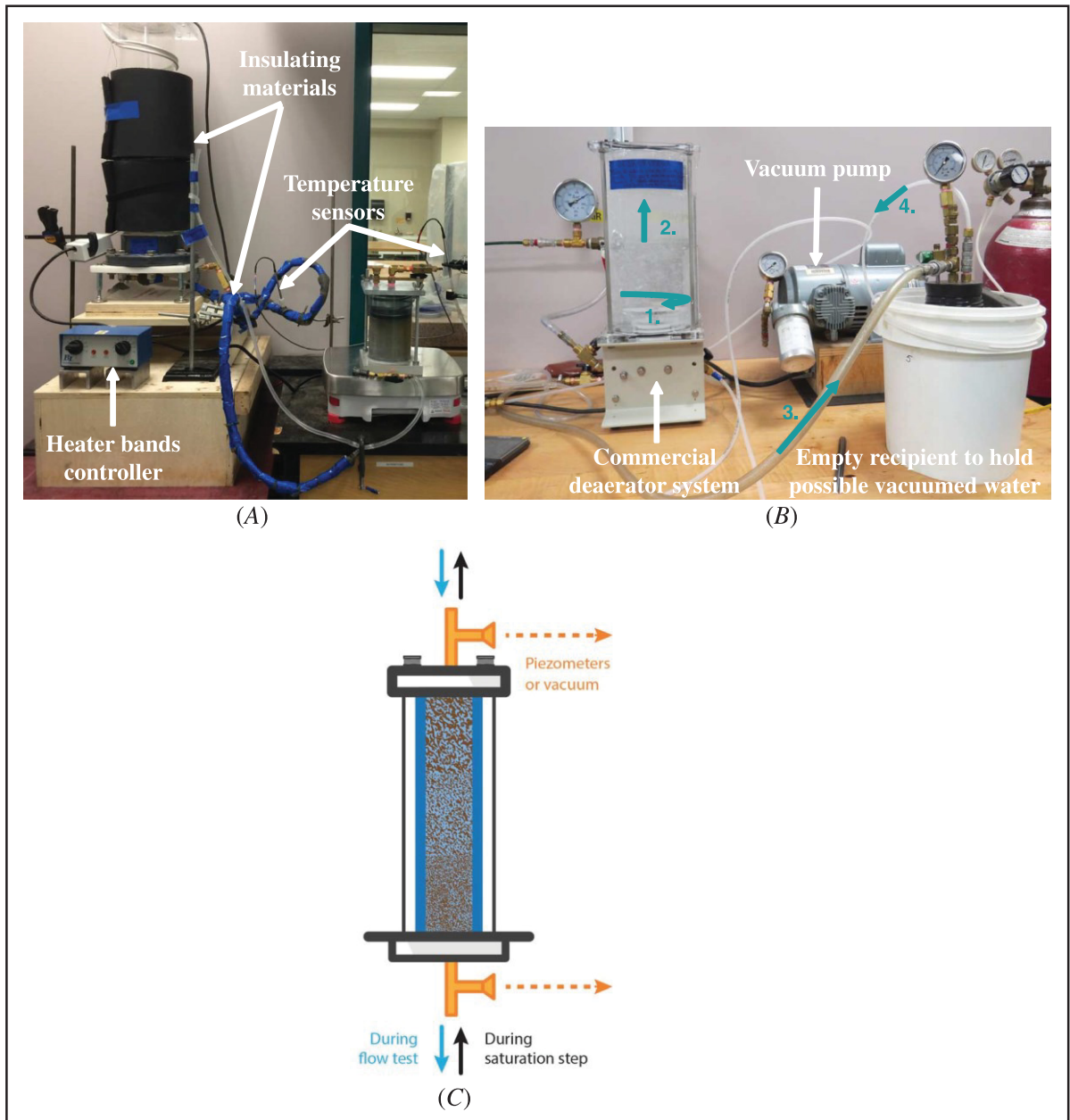


Figure 3.4 Apparatus used (A) to control water temperature changes during saturation tests with heated water and (B) to deaerate water (arrows represent the airflow direction), and (C) sand filter used to deaerate water

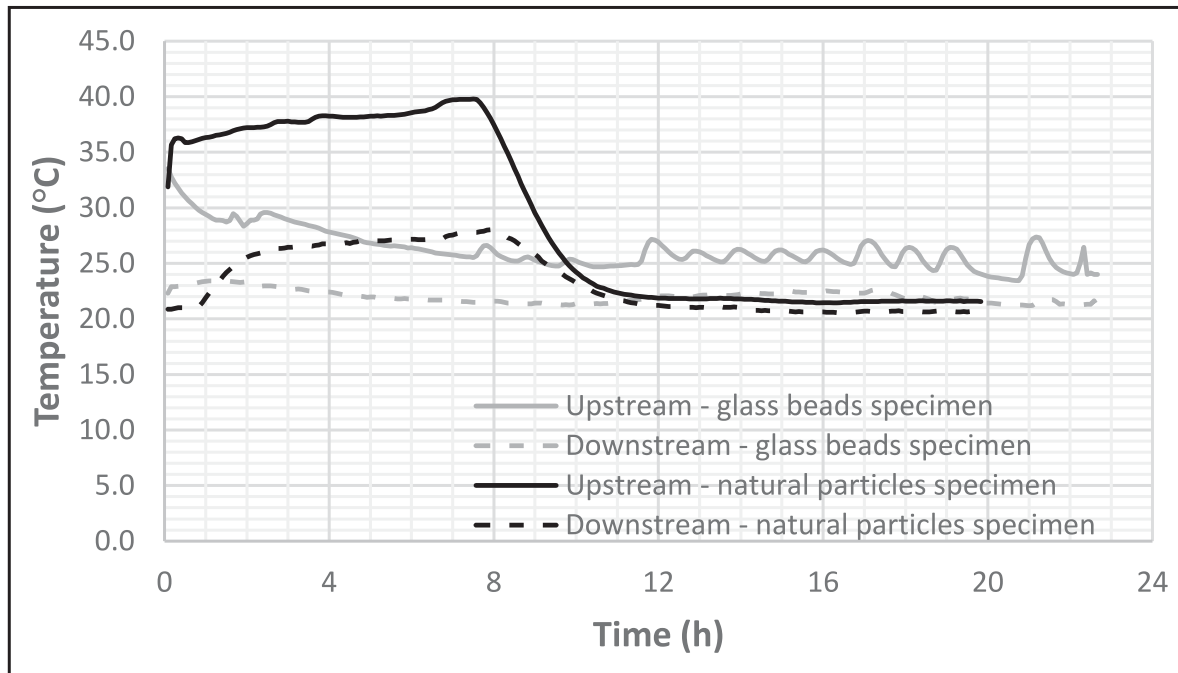


Figure 3.5 Water temperature during the saturation tests with heated water combined with a vacuum on the specimens with the grain size distribution A

3.3.5.2 Using a sand filter

The filter consisted of a rigid-wall cell with a 240-mm length and 52-mm internal diameter. The cell was made of clear PVC, and filled with three layers of silica sands (Figure 3.4C). The layers were placed from coarsest to finest in the flow test direction to progressively deaerate the tested water. The filter was saturated with an upward flow of type III deionized water, previously in equilibrium with ambient temperature and atmospheric pressure, under a constant hydraulic flowrate. Vacuum was applied on the dry sand filter before opening the water valve and was maintained upon opening the valve while filling the filter. The sand filter was then placed between the Mariotte bottle and the permeameter. The water to be deaerated then flowed from the Mariotte bottle, downward through the sand filter (Figure 3.4C), then upward through the permeameter for specimen saturation (Figure 3.3A).

3.3.5.3 Cavitation under vacuum

A 2100 Nold DeAerator was used to deaerate the permeant water. It consists of an 8-liter tank with a rotating impeller at the bottom which causes cavitation of gas bubbles (Figure 3.4B). The tank headspace was kept under vacuum for the removal of gases coming out of solution. The effectiveness of this system has been verified with both an oximeter and the chemical Winkler method (American Public Health Association et al. 2005). It was established that the type III deionized water in equilibrium at ambient temperature (22 °C) and at atmospheric pressure needed 20 min under a vacuum of 100 kPa to reach a DOC below 2 mg/L. This DOC was considered acceptable, per ASTM D4491 and D5101 standards. The deaerated water was then transferred to the Mariotte bottle for permeameter saturation.

3.3.6 Saturation methods

3.3.6.1 Vacuum

Based on ASTM D2434-19, a vacuum of 68 kPa was imposed at the top of the permeameter for 15 min before specimen saturation (Figure 3.3). The vacuum was maintained as long as the part between the top of the specimen and the top of the permeameter was not filled with water (Figure 3.3).

3.3.6.2 CO₂ purge

CO₂ was supplied from a cylinder to the inlet at the bottom of the permeameter (Figure 3.3). CO₂ was flushed at a flowrate of 2.0 L/min for a minimum of 10 min through the oven-dried specimen according to ASTM D5101. The specimen was at room temperature during this procedure.

3.3.6.3 Permeant water flow direction

The Mariotte bottle used to supply permeant water was connected to the base of the permeameter (Figure 3.3), as the resulting upward flow facilitated the evacuation of the air or CO₂ bubbles in the pores of the dry specimen (ASTM D2434-19). The progression of water through the soil as well as the migration of visible gas bubbles during the saturation step could be observed through the clear PVC wall of the permeameter. However, an absence of visible gas bubbles may not mean a complete saturation (Chapuis, 2004).

3.3.7 Calculation of the degree of saturation

Saturation (S_r) of each specimen was measured over time with the setup shown in Figure 3.3B, and the mass-volume method given in Chapuis et al. (1989). More precisely, the weight of the permeameter filled with the specimen was measured with a scale (model Ohaus explorer, readability 0.1 g, Figure 3.3B), and recorded on a computer (Figure 3.3B). During the test, the only tubing connected to the permeameter was the water inlet tubing. It was firmly attached to the laboratory countertop, as close to the scale as possible, so that variations of its weight during saturation did not influence scale readings. At the top of the permeameter, the outflowing water was collected with a funnel that was not in contact with the scale (Figure 3.3B). S_r was determined using equation (3.1) (Chapuis, 2004),

$$S_r = \frac{M_{\text{tot}} - M_e + V\rho_w - M_s}{V\rho_w - \frac{M_s}{G_s}} \quad (3.1)$$

where

G_s = specific gravity of solids, unitless (see Tableau 3.3)

V = specimen volume, cm³

M_s = mass of the solids or mass of the dry specimen, g

M_e = mass of the permeameter filled with water, g

M_{tot} = total mass of the permeameter filled with specimen during saturation, g

ρ_w = water density, g/cm³

The first four parameters, G_s , V , M_s , and M_e were measured before saturation. During saturation, M_{tot} and water temperature were measured. The latter was used to estimate ρ_w . Using the computer, M_{tot} was recorded every 5 min once the water entered the permeameter. S_r was estimated at $\pm 1 \%$ with equation (3.1). The accuracy was calculated with equation (10) of Chapuis et al. (1989).

3.4 Results and discussion

3.4.1 Results

A summary of the test results is available in Tableaux 3.4–3.6. Test duration depended on the evolution of S_r . It was decided to stop the tests when the water level in the Mariotte bottle was close to the air-entry level or after 24 h, even if S_r continued to increase.

Tableau 3.4 Summary of phase I of the saturation test results obtained on glass bead specimens and on natural particle specimens with the grain size distribution A - Upward flow combined with a vacuum

Permeant waters	Glass bead specimens				Natural particle specimens			
	$S_r(t_0)$		Maximum S_r		$S_r(t_0)$		Maximum S_r	
	Value, %	Time	Value, %	Time	Value, %	Time	Value, %	Time
In equilibrium at ambient temperature and atmospheric pressure	93.2	1 h 00 min	97.1	7 h 10 min	86.7	45 min	91.5	13 h 55 min
Heated at 40 °C at atmospheric pressure	93.5	30 min	99.8	22 h 20 min	85.5	40 min	99.0	16 h 25 min
Deaerated with the sand filter at ambient temperature and atmospheric pressure	94.9	1 h 25 min	98.8	22 h 20 min	91.3	1h 05 min	96.6	22 h 50 min
Deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature	94.7	1h 00 min	99.9	8h 25 min	92.9	1h 05 min	99.8	8 h 55 min

Tableau 3.5 Summary of phase II of the saturation test results obtained on glass bead specimens and on natural particle specimens with the grain size distribution A – Water deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature

Specimen saturation methods	Glass bead specimens				Natural particle specimens			
	$S_r(t_0)$		Maximum S_r		$S_r(t_0)$		Maximum S_r	
	Value, %	Time	Value, %	Time	Value, %	Time	Value, %	Time
Simple upward flow	91.8	1 h 30 min	100.4 ^a	21 h 50 min	82.2	2 h 40 min	97.3	21 h 10 min
Upward flow combined with a vacuum	94.7	1 h 00 min	99.9	8 h 25 min	92.9	1 h 05 min	99.8	8 h 55 min
Upward flow combined with CO ₂ purge	100.1 ^a	1 h 10 min	100.7 ^a	20 min	99.4	55 min	101.1 ^a	45 min

Note: ^a S_r has been estimated with an error of ± 1 %, which explains an estimated saturation over 100.0 %.

Tableau 3.6 Summary of the saturation tests results obtained on natural particle specimens with the grain size distribution B – Water deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature

Permeant water	Specimen saturation methods	$S_r(t_0)$		Maximum S_r	
		Value (%)	Time	Value (%)	Time
Deaerated by cavitation under vacuum at ambient temperature	Upward flow combined with a vacuum	93.5	1 h 20 min	99.8	20 h 50 min
	Upward flow combined with CO ₂ purge	97.9	1 h 15 min	100.1 ^a	1 h 05 min

Note: ^a S_r has been estimated with an error of ± 1 %, which explains an estimated saturation over 100.0 %.

Note that the saturation curves consist of two parts (Figure 3.6, parts 1 and 2 of the curve). The first part is obtained using a constant flowrate whereas the second part is obtained by applying a constant hydraulic gradient. In both cases, the specimens were subjected to a constant laminar flow. In the first part, S_r is rapidly increasing. It represents the filling of the specimen's pores, and permeameter voids (e.g., at the top and bottom, see Figure 3.3A) with permeant water. In the second part, S_r reaches a plateau. It corresponds to a slower increase in S_r when permeant water starts flowing out of the permeameter (Figure 3.6, part 3). It essentially represents the contribution of slower mechanisms such as the displacement of gas bubbles from smaller pores, and the dissolution of trapped gas bubbles.

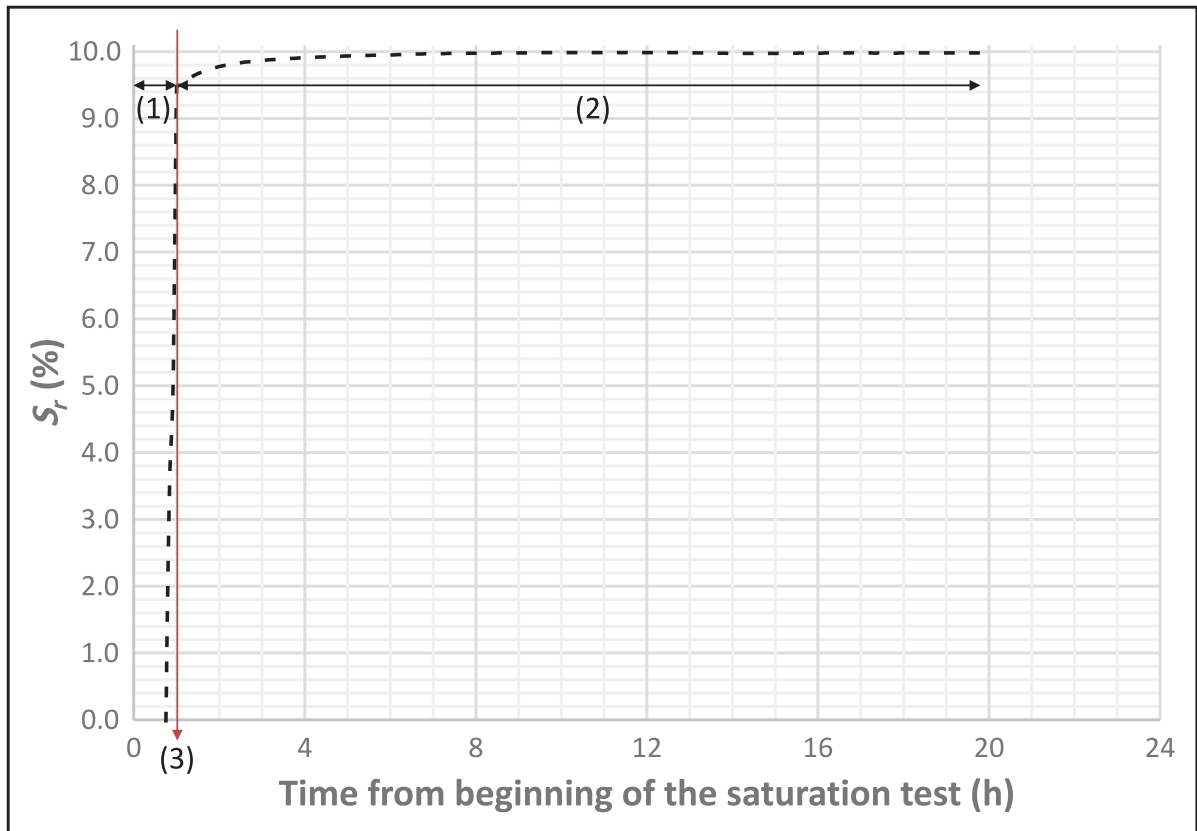


Figure 3.6 Example of a saturation curve obtained at the end of a saturation test.

Part 1 is obtained from constant flowrate, whereas part 2 is obtained from constant hydraulic gradient. 3 represents the time at the moment when permeant water exists in the permeameter

The first part of the saturation curves lasted between 30 min and 2 h 40 min (Tableaux 3.4 – 3.6). This duration includes the application of a vacuum or a CO_2 purge and the permeameter filling with permeant water. At the beginning of the permeant water flow, equation (3.1) gives negative S_r values, because it does not consider the air outside of the specimen which explains the time delay between the origin and the beginning of the saturation curves (Figure 3.6). The S_r values obtained at the end of this first part varied between 82 % and 100.1 %. These values were smaller for the natural particle specimens than for the glass bead specimens (Tableaux 3.4–3.6). The permeant water deaeration methods and specimen saturation methods differ with regards to the time needed to achieve a constant S_r . The saturation curves given in Figures 3.7–3.9 show only the second part of the saturation curves, after water starts flowing out of the

permeameter. The time axis origin is defined by the first outflow of permeant water at the permeameter outlet.

For saturation experiments with simple upward flow or with upward flow with vacuum, some air bubbles remained trapped in the void space at the top of the permeameter (Figure 3.3A), which led to an underestimation of S_r . At the end of these experiments, these gas bubbles were displaced with permeant water poured into the void space at the top of the permeameter, therefore slightly increasing the permeameter's mass. This slight mass increase was added to each point of the saturation curves given in Figures 3.6–3.10.

Three tests on glass bead specimens with grain size distribution A were carried out as replicate tests. The S_r results obtained for the different specimen saturation methods are similar (Figure 3.10).

3.4.1.1 Permeant water deaeration methods

The results obtained for the different permeant waters are shown in Figures 3.7A and 3.7B. Upward flow combined with vacuum at the outlet was used as the saturation method with the three permeant waters. Permeant water at equilibrium with atmospheric pressure and ambient temperature led to the smallest S_r , regardless of the type of particles. For the deaerated permeant waters, the water deaerated by cavitation under vacuum led to a complete saturation in less than 9 h, regardless of the type of particles (Tableau 3.4). Deaeration of water by heating led to larger S_r values compared to deaeration of water using a sand filter (Tableau 3.4). It can be observed that specimens made from natural particles led to smaller S_r compared with glass bead specimens, irrespective of the permeant water (Figures 3.7A and 3.7B and Tableau 3.4).

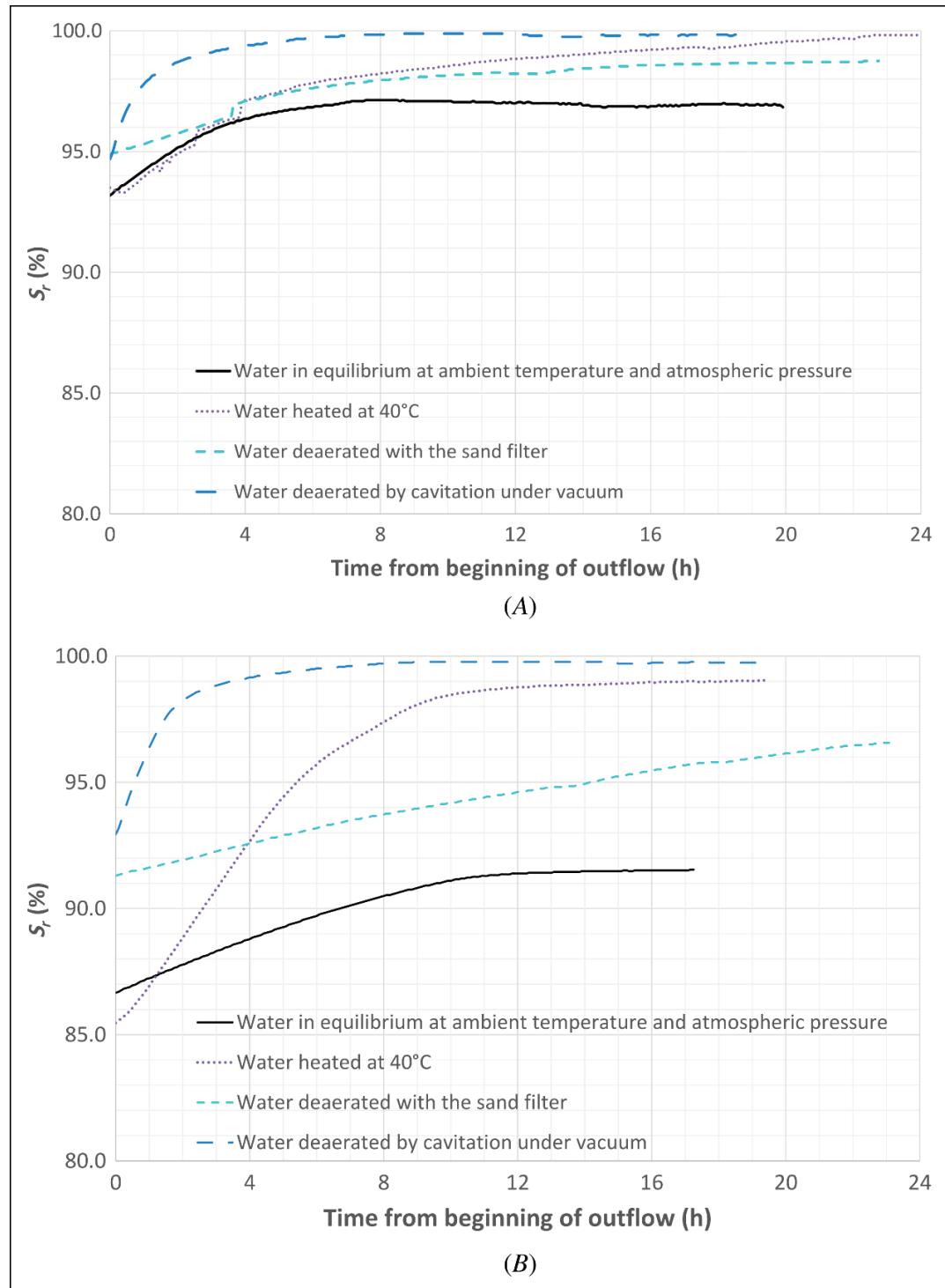


Figure 3.7 Saturation curves with the four permeant waters for (A) glass bead specimens with grain size distribution A, and (B) natural particle specimens with grain size distribution A. Saturation was performed with upward flow combined with a vacuum at the permeameter outlet

3.4.1.2 Permeameter saturation methods

The results obtained for the different specimen saturation methods are shown in Figures 3.8 and 3.9. Water deaerated by cavitation under vacuum was used as the permeant water in each case. Simple upward flow is the least effective specimen saturation method, regardless of the type of particles (Tableau 3.5). With this method, saturation was incomplete after 24 h for the specimen with natural particles and gradation A ($S_r = 97.3\%$). For glass beads with gradation A, simple upward flow required 15 h more than the other specimen saturation methods to reach complete saturation. Upward flow combined with vacuum, or after a CO₂ purge led to complete saturation, regardless of the type and size of particles (Tableaux 3.5 and 3.6). However, upward flow under vacuum needed 8 h longer than the CO₂ purge to reach that point for gradation A (Tableau 3.5). This time difference increased with a finer specimen (Gradation B, Tableaux 3.5 and 3.6).

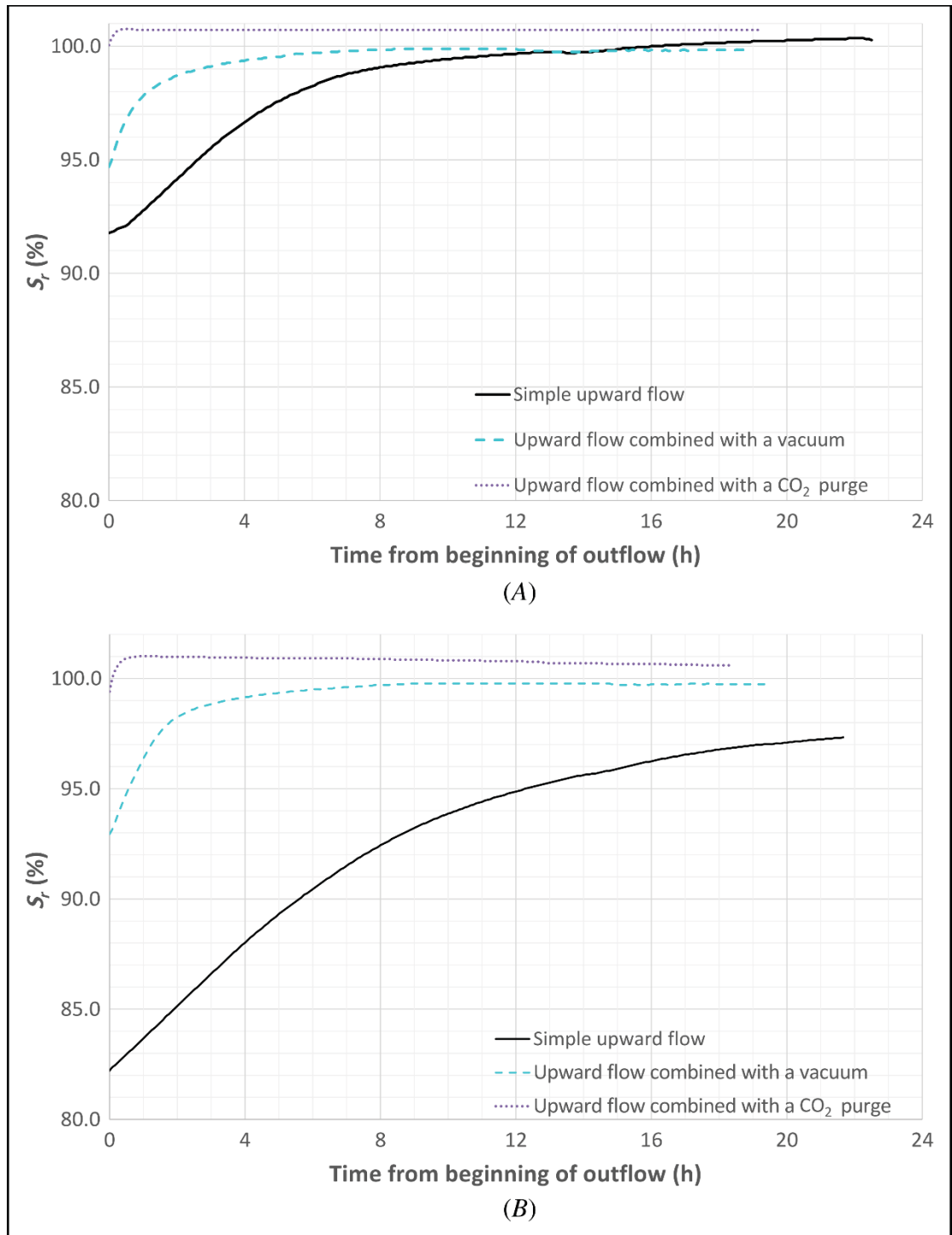


Figure 3.8 Saturation curves with the three different specimen saturation methods for (A) glass bead specimens with grain size distribution A, and (B) natural particle specimens with grain size distribution A. Permeant water was deaerated by cavitation under vacuum

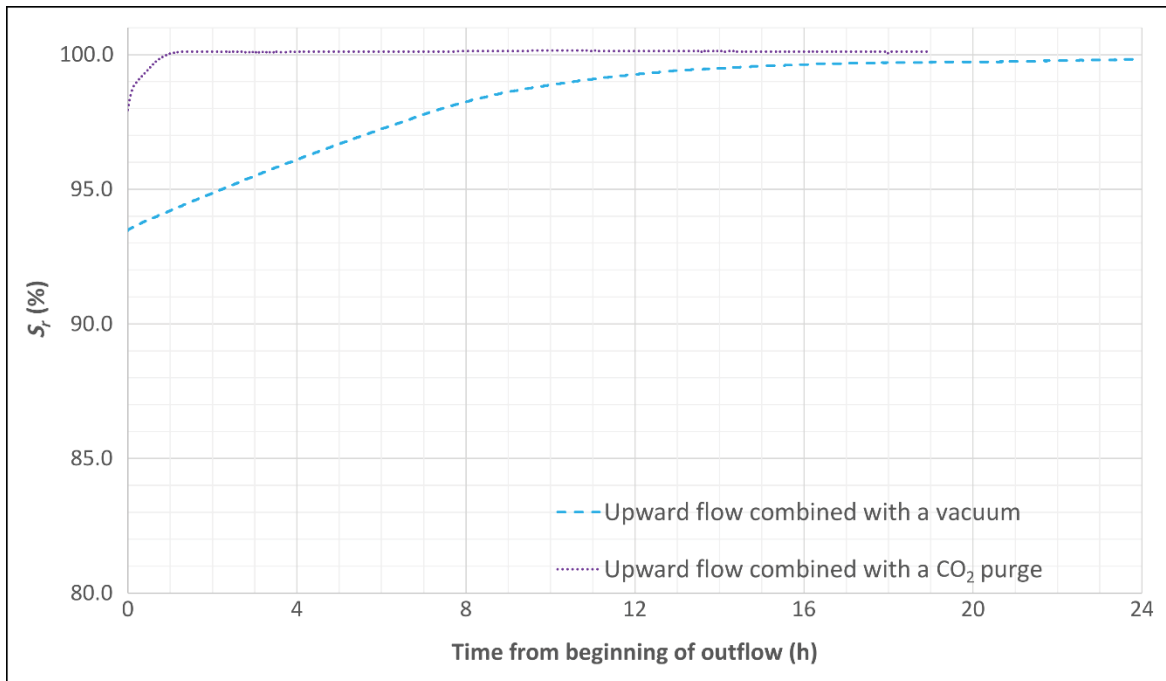


Figure 3.9 Saturation curves with two specimen saturation methods obtained for natural particle specimens with grain size distribution B. Permeant water was deaerated by cavitation under vacuum

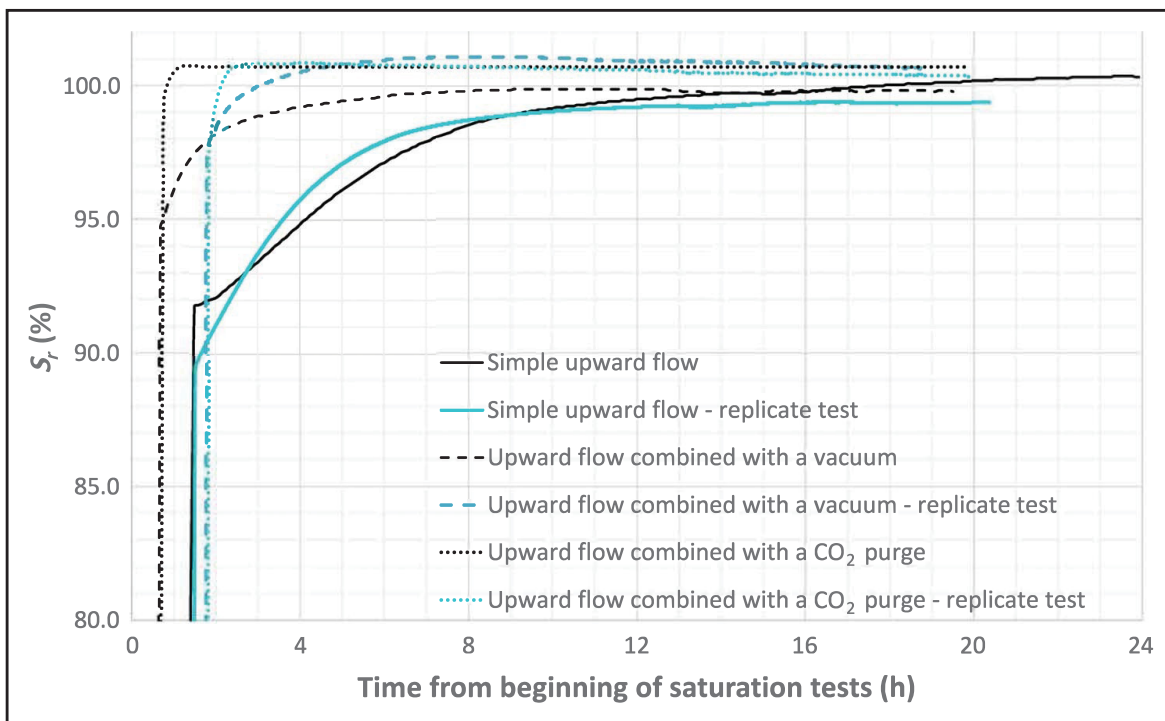


Figure 3.10 Saturation curves obtained for replicated tests on glass bead specimens with grain size distribution A with three different specimen saturation methods. Permeant water was deaerated by cavitation under vacuum

3.4.2 Discussion

3.4.2.1 Permeant water deaeration methods

Several observations were made during the saturation tests with the different permeant waters. Beyond S_r and duration, the requirements of the different water deaeration techniques should also be considered when choosing a method.

Before discussing the deaeration with a sand filter, it should be noted that the sand filter in this article is different from the one presented in ASTM D2434-19. It was chosen to use a closed sand filter, placed between the Mariotte bottle and the permeameter, whereas in ASTM D2434-19, the sand filter is combined with a constant head tank. The Mariotte bottle, the sand filter and the permeameter were connected in series. The use of this sand filter caused a head loss, which had to be compensated to keep a constant hydraulic gradient in the specimen. The quantity of trapped gas bubbles in the filter may also increase the head loss in the filter with time. Moreover, the desaturation of the sand filter decreased its efficiency. A slower S_r increase in the permeameter was observed when the sand filter was not changed and saturated between two saturation tests. To avoid this problem, the sand filter was changed before each saturation test, as recommended by Bertram (1940). Despite changing the filter, deaerating the water with the sand filter led to smaller maximum S_r values compared to heating or cavitation under vacuum (Tableau 3.4).

For saturation with heated water, a water temperature compatible with the tubing and permeameter material must be used to avoid weakening the materials while keeping the DOC lower than 6 mg/L. The heated water must then be kept at an inflow temperature sufficiently high to cause a temperature gradient within the specimen. As seen in this article, this requires specific equipment and precautions. However, an excessive temperature would induce flow and change the mechanisms of solute transfer.

Deaerating water by cavitation under vacuum was the easiest and the fastest method to produce permeant water. Moreover, this water can be deaerated in advance, and stored in a Mariotte

bottle under vacuum. This method led to the maximum S_r for all types of materials. These advantages would make cavitation under vacuum the preferred option for water deaeration prior to flow tests on saturated specimens.

3.4.2.2 Permeameter saturation methods

Results have shown that an air evacuation method, such as applying a vacuum at the permeameter outlet or a CO₂ purge, must be considered before or during saturation to accelerate the process, and to obtain larger S_r (Tableau 3.4). However, the efficiency of air evacuation methods is limited by the initial specimen humidity. For instance, it may be required to prepare a specimen using wet compaction. If the specimen and saturated porous stone at the bottom of the permeameter are initially partially saturated, it can reduce the CO₂ flow, and thus its air purging efficiency. In such cases, a compromise has to be made between wet compaction requirements, and the complete and rapid saturation of the specimen.

Air evacuation, using the CO₂ purge, led to complete saturation in less than 2 h. This would make it possible to conduct a flow test the same day as the saturation step. The finer the specimen, the more time will be saved with a CO₂ purge (Tableau 3.6). However, the use of CO₂ leads to an acidification of the permeant water. This method may thus be inappropriate for some soils, for example, soils rich in carbonates that readily react with acid water.

3.4.2.3 Difference between glass bead and natural particle specimens

The results reported herein confirm those of Chapuis et al. (2015). A larger S_r was reached with a simple upward flow in the glass bead specimen compared to the specimen made from natural particles (see Tableau 3.5), even though both had the same grain size distribution (A in Figure 3.2). With the specimen made from natural particles, a S_r of 97.3 % was reached after 24 h, whereas it took only 6 h 10 min to reach this value with the glass bead specimen. These results may be explained by the spherical shape and the smooth surface of the glass beads (Chapuis et al., 2015). It should be mentioned that the mean void ratio for grain size distribution A is 0.32 for glass bead specimens and 0.45 for natural particle specimens. The saturation of a

glass bead specimen thus requires no special equipment. It can simply be saturated with an upward flow of deaerated water.

3.5 Conclusion

Two measures have to be taken to saturate a granular material in a rigid-wall permeameter. The first precaution concerns the production of deaerated permeant water, either by cavitation under vacuum or by heating. Heating is time-consuming, and requires more measures and material than deaerating water by cavitation under vacuum. Moreover, water deaerated by cavitation under vacuum could be stored in the Mariotte bottle pending the start of the tests. The Mariotte bottle played an important role during saturation. Not only can it store the permeant water, but the Mariotte bottle also supplied the permeameter with water at a constant hydraulic head while limiting the reaeration of the permeant water. The second measure to be taken is the evacuation of pore gas before or during the saturation, i.e. by a CO₂ purge or by applying a vacuum respectively. Only glass bead specimens could be saturated using a simple upward flow of deaerated water without any means of gas evacuation.

The saturation tests indicated that the combination of deaerated water with a purge of CO₂ gave a complete saturation in a very short time. Results with the poorly graded sand showed that this time gain is even more significant with finer-grained specimens.

The mass-volume method given in Chapuis et al. (1989) has no specific requirements, and is quick to set up in order to monitor S_r over time. This set-up could be used both during the saturation step and the flow test itself. A constant mass of the permeameter and constant flowrate suggest saturation of the specimen is constant, and there is no particle migration. The mass-volume method is certainly useful for saturation control but has also other benefits, e.g., to monitor particle migration.

Finally, the current ASTM standards used for flow tests in a rigid-wall cell may be improved simply by changing some recommendations. A deaerated permeant water should be used

whatever the deaeration method used. The only constraint is that the deaerated permeant water must present a DOC lower than 2 mg/L. All standards should include recommendation on permeant water deaeration methods. Moreover, a recommendation should be made on the use of a water storage in case the permeant water is deaerated in advance. As regards the saturation method, evacuating the initial air from the pores before or during the saturation should be recommended.

Acknowledgements

The authors thank Richard Prowt, Alexis Vadeboncoeur, Michaël Dubois, Sébastien Ménard, and Maxime St-Jean for their assistance in performing the tests. In addition, the authors thank the associate editor and the reviewers for their comments and questions, which led to the improvement of the manuscript.

This study was sponsored by Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ) and Mitacs. Their financial assistance is gratefully acknowledged.

CHAPITRE 4

CRITERION FOR INTERNAL STABILITY OF COARSE GRANULAR MATERIALS FROM FLOW TESTS

Céline Bouin^a, Simon Weber^b, Yannic A. Ethier^c, Jean-Sébastien Dubé^d, and François Duhaime^e

^{a,b,c,d,e} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis pour publication dans « Canadian Geotechnical Journal », septembre 2025

ABSTRACT

Laboratory flow testing is a common approach for assessing the internal stability of granular materials. However, there is currently no established standard for the performance of these tests nor for the testing parameters that should be observed. A review of the literature reveals that the apparatus, the testing procedures and the experimental parameters evaluated vary depending on the studies. The objective of this article is to identify a method for assessing the internal stability of granular materials. Laboratory flow tests were conducted on coarse granular materials that had been selected based on the evaluation of their internal stability, as determined by previous laboratory tests and three geometric criteria commonly used in the literature (Kezdi, Sherard and Kenney & Lau criteria). The granular materials were reconstituted with glass beads and tested in a permeameter under a low hydraulic gradient seepage. Based on the results of the flow tests, a laboratory criterion is proposed comprising four threshold conditions. These threshold conditions refer to combined parameters that are affected by the migration of the fine particles, namely the grain size distribution, the mass loss expressed as a percentage, the change in void ratio and the change in volume.

Keywords: Suffusion, internal stability, coarse granular materials, flow tests, geometric criteria

4.1 Introduction

Embankment dam materials are susceptible to various forms of internal erosion, including suffusion. This selective process involves the migration of the fine particles of the granular material through interconnected pores formed by the coarse particles under seepage flow (e.g. Kenney & Lau, 1985; Chapuis, 1992; Wan & Fell, 2004; Rönnqvist & Viklander, 2016). The redistribution of the fines within the granular material, or even more their loss, alters the porosity of the material, thereby affecting the hydraulic conductivity. Furthermore, it may result in a restructuring of the coarse particle skeleton, causing a significant reduction in volume (Kovacs, 1981 in Garner & Fannin, 2010; Charles, 2001; Moffat, 2002; Fannin & Slangen, 2014). These alterations can potentially compromise the stability of the embankment dam, leading to failure.

According to Garner & Fannin (2010), suffusion occurs in a granular material when two adverse conditions are present: a hydraulic condition and a geometric condition. The hydraulic condition refers to the critical hydraulic gradient necessary to initiate internal erosion (Kezdi, 1979; Kenney & Lau, 1985; Khan, 2003; Li & Fannin, 2008; Garner & Fannin, 2010). The geometric condition is related to the susceptibility of the material to this phenomenon (Kezdi, 1979; Kenney & Lau, 1985; Khan, 2003; Li & Fannin, 2008). It depends on several properties of the material (internal instability, filter incompatibility, void space, free surface and low plasticity; Garner & Fannin, 2010).

The focus of this article is on the concept of internal stability. It is the capacity of the material to prevent the migration of its fine particles under seepage flow (Fannin & Moffat, 2006). It depends on the grain size distribution (GSD) of the material and can be assessed by using geometric criteria based on the material GSD. Two families of geometric criteria have been proposed in the literature: those based on Terzaghi's retention filter criterion (De Mello, 1975; Kezdi, 1979; Sherard, 1979), and those based on the shape of the GSD (Burenkova, 1993; Honjo et al., 1996; Kenney & Lau, 1985, 1986; Lubochkov, 1962, 1965 in Wan & Fell, 2004).

However, Kenney & Lau (1985) argued that direct laboratory flow tests provide a more reliable assessment of internal stability. The literature and practice currently lack standard test methods (Slangen & Fannin, 2016) and a comparison of the test methods that have been used to develop the geometric criteria. This explains the significant variability between the flow tests in the literature (Moffat, 2002). They differ not only in the apparatus used (e.g. open or closed system, shape of the collector, rigid or flexible-wall) or the testing procedures (e.g. loose or dense material, vibration), but also in the parameters observed during the flow tests and their threshold (change in GSD or in a hydraulic parameter, mass of eroded particles, decrease in total volume). As mentioned by Andrianatrehina et al. (2016), authors rarely specify the exact criteria they have chosen to assess the internal stability of the tested materials. For example, the acceptable loss of fine particles to determine whether a granular material is internally stable or not seems to be very subjective (Lafleur et al., 1989).

This paper presents a review of various apparatus and testing procedures used in the literature to assess the internal stability of materials under a seepage flow or to study the onset of suffusion. Then, an experimental program was developed to compare the response of stable and unstable materials subjected to constant seepage flow in the absence of vibration. Loose materials were reconstituted in a rigid-wall permeameter, designed for the study, with glass beads following various continuous and discontinuous GSDs. These GSDs were selected according to their response to the three most commonly used criteria in the literature, namely the Kezdi, Sherard and Kenney & Lau criteria, as well as their response during laboratory flow tests previously performed in the literature. Finally, based on the flow tests performed in this study, threshold values are proposed for the different parameters affected by the migration of the loose fine particles (GSD, mass of eroded particles, void ratio and total volume). These parameters and their threshold values are combined into a laboratory criterion to differentiate between stable and unstable granular materials.

4.2 Previous test methods

Several studies have investigated the susceptibility of granular materials to suffusion (Kenney & Lau, 1985; Lafleur et al.; 1989; Honjo et al., 1996; Wan & Fell, 2004, 2008). Their principal objectives were to establish the internal stability of materials and/or to identify a geometric criterion to differentiate between stable and unstable GSDs. Other studies have focused on the effect of the hydraulic gradient on the onset and the evolution of suffusion, introducing the hydraulic criteria. When the vertical effective stress is varied during the studies, a hydromechanical criteria is studied (Skempton & Brogan, 1994; Khan, 2003; Wan & Fell, 2004; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022). The lack of standardisation in laboratory tests to study the internal stability of granular material and the onset of suffusion is reflected by the varying testing apparatus and procedures adopted by the studies listed in Tableau 4.1.

4.2.1 Suffusion testing

The materials tested are generally a mixture of particles from natural deposits or crushed stone with a sub-angular shape. However, glass beads are also used to recreate materials. Regarding the shape of the GSD, materials with an upward concave shape and gap-graded curves have been subjected to more investigation than materials with a linear curve (Tableau 4.1). This can be explained by the fact that materials with an upward concave shape curve, or with a gap-graded curve are more susceptible to internal instability (Honjo et al., 1996; Wan & Fell, 2008; Andrianatrehina et al., 2016; Zhou et al., 2016).

Tableau 4.1 Flow tests used to evaluate the susceptibility of granular materials to suffusion and/or its onset

Reference	Material		Material preparation		Seepage flow			Vibrations	Surcharge	Seepage cell		Test duration	Criterion ^b
	Particles	GSD ^a	Compaction method	Saturation method	Water quality	Direction	Hydraulic gradient			Open or closed	Rigid or flex-wall		
Kenney & Lau (1985)	Natural particles	UC	With a tamper or by rodding	N/A	Re-circulated water	Downward	Re>10	Yes	Yes	Open	Rigid-wall ^c	30 h – 100 h	G
Lafleur et al. (1989)	Glass beads	L, UC and GG	N/A	N/A	Deaerated water	Downward	2.5 – 6.5	Yes	No	Open	Rigid-wall	2.5 h	G
Skempton & Brogan (1994)	Natural particles	UC and GG	Packed by hand	Upward flow	N/A	Upward	0.05 – 1	No	No	Open	Rigid-wall	1.5 h	H
Honjo et al. (1996)	Natural particles	B and GG	Moist tamping method	Vacuum pump connected at the top combined with an upward flow of water	Tap water	Downward	Direct pump pressure	Yes	Yes	Open	Rigid-wall	2 h	G
Moffat (2002)	Natural particles and glass beads	U and GG	A modified slurry preparation combined with a pluviation or a discrete deposition technique		Re-circulated, deaerated and distilled water	Downward	0.1 – 18.5	Yes	Yes	Open	Rigid-wall	N/A	HM
Khan (2003)	Glass beads	GG	A modified slurry preparation combined with a pluviation or a discrete deposition technique		Re-circulated, deaerated and distilled water	Downward	1 – 20	No	Yes	Open	Rigid-wall ^d	0.5 h – 4 h	G & H
Wan & Fell (2004)	Natural and crushed particles	UC, B and GG	With a tamping rod	N/A	Re-circulated water	Downward and upward	8	No	No	Open	Rigid-wall	N/A	G & H
Fannin & Moffat (2006)	N/A	UC and GG	A modified slurry preparation combined with a discrete deposition technique		Distilled and deaerated water	Downward	0.1 – 20	Yes	Yes	Open	Rigid-wall	N/A	G

Tableau 4.1 Flow tests used to evaluate the susceptibility of granular materials to suffusion and/or its onset (suite)

Reference	Material		Material preparation		Seepage flow			Vibrations	Surcharge	Seepage cell		Test duration Compaction method	Criterion ^b Saturation method
	Particles	GSD ^a	Compaction method	Saturation method	Water quality	Direction	Hydraulic gradient			Particles	GSD ^a		
Li (2008)	Natural particles and glass beads	UC, B and GG	A modified slurry preparation combined with a discrete deposition technique	Purge of CO ₂ combined with a downward flow of de-aerated water with gradient steps	Deaerated water	Downward and upward	0.5 – 15 1.0 – 65	No	Yes	Open	Rigid-wall	N/A	G & HM
Chang & Zhang (2011)	Natural and crushed particles	GG			Moist tamping method	Deaerated water	Downward	0.15 – 8.0	No	Yes	Open	Flex-wall	7 h – 8 h
Ke & Takahashi (2014)	Natural particles	GG	Moist tamping method	Vacuum pump connected at the top combined with an upward flow of water	Deaerated water	Downward	Maximum at 11.7	No	Yes	Open	Flex-wall	3h	HM
Andrianahirehina et al. (2016)	Natural particles	L, UC and GG	Moist tamping method	N/A	N/A	Downward	2.5 – 7.5	No	No	Closed	Rigid-wall	48 h – 7 days	G
Slangen & Fannin (2016)	Natural particles and glass beads	GG	A modified slurry preparation combined with a pluviation deposition technique		Filtered deaerated water	Upward	N/A	No	Yes	Open	Flex-wall	6 h	HM
Ataïi & Fannin (2022)	Natural particles	GG	Moist tamping method	Using back-pressure	Deaerated water	Downward	0.2 – 1.6	No	Yes	Open	Flex-wall	1.75 h	HM

Notes: ^a L: linearly, B: broadly, UC: upwardly concave, GG: gap-graded. ^b G: geometric, H: hydraulic, HM: hydromechanical. ^c A rigid-wall seepage cell with a compressible rubber layer on the inside wall ^d A rigid-wall seepage cell with a layer of glass beads that have been glued to the inside wall with silicon glue.

The seepage cell is typically cylindrical in shape and modified from a rigid-wall permeameter or from a flexible-wall triaxial cell (Tableau 4.1). The seepage cell may be designed as a closed system, in which the eroded fine particles are unable to migrate outside of the granular material (Kenney & Lau, 1985; Andrianatrehina et al., 2016). However, in most studies, an open system is selected for the seepage cell. This design allows the collection of eroded fine particles in a collector situated at the outflow of the seepage cell (Tableau 4.1), thereby facilitating direct observation of the actual mass loss resulting from erosion. If an open system is selected, the seepage cell is divided into two distinct parts, which are typically separated by a perforated rigid plate and a filter screen. The perforated rigid plate provides supports for the granular material, while the filter screen allows the fine particles displaced by the seepage forces or the vibrations to sediment in the collector (Moffat, 2002; Khan, 2003; Li, 2008; Ke & Takahashi, 2014; Ataii & Fannin, 2022). To select the opening size of the filter screen, studies differentiate between continuous (d_{40} or d_{50}) and discontinuous (smallest particle size of the coarse fraction) GSDs (Lafleur et al., 1989; Moffat, 2002; Khan 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Slangen & Fannin, 2016; Ataii & Fannin, 2022).

The methods employed to prepare the granular material for testing are diverse (Tableau 4.1). It is essential that these methods facilitate the production of homogeneous and fully saturated material, wherever possible (Kenney & Lau, 1985; Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Andrianatrehina et al., 2016; Slangen & Fannin, 2016). Nevertheless, obtaining a homogeneous material from an unstable material may prove to be a significant challenge (Moffat, 2002; Khan, 2003; Andrianatrehina et al., 2016). After preparation, the flow tests are performed with a downward or upward flow at a constant hydraulic gradient (Tableau 4.1). The use of a downward flow is typical for the assessment of geometric criteria, whereas an upward flow is more frequently employed to assess hydraulic criteria. Regardless of the seepage flow direction, the hydraulic gradient generally exceeds those observed in practice (Kenney & Lau, 1985). In studies examining the hydraulic and hydromechanical criteria, the hydraulic gradient is typically increased in steps during the flow tests. In addition to seepage flow, the granular materials can be subjected to vibrations in order to induce suffusion, as observed in the studies of Kenney & Lau (1985), Lafleur et al. (1989),

Honjo et al. (1996) and Moffat (2002). Finally, the granular material may be confined with a light surcharge during preparation and testing phases, particularly in the case of upward flow tests (Tableau 4.1).

Prior to performing flow tests on all granular materials, it is essential to evaluate the repeatability of the preparation and testing methods based on a variety of parameters (e.g. void ratio, dry density, volumetric strain, axial strain, head distribution, total loss in percentage or sieve analysis). The evaluation is typically conducted on a granular material that exhibits a high susceptibility to suffusion (Moffat, 2002; Khan, 2003; Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016).

4.2.2 Suffusion parameters

The internal stability of granular materials is typically evaluated through visual observations, post-test sieve analyses, fines loss measurements, hydraulic parameters, and volume changes (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Parameters used to evaluate the internal stability of granular materials

Reference	Visual observations of erosion	Post-test sieve analysis	Loss of fine particles	Hydraulic flow parameters	Displacement or volume data
Kenney & Lau (1985)		X			X
Lafleur et al. (1989)		X	X	X	X
Skempton & Brogan (1994)	X		X	X	
Honjo et al. (1996)		X	X		X
Moffat (2002)	X	X	X	X	X
Khan (2003)		X	X		X
Wan & Fell (2004)	X	X		X	
Fannin & Moffat (2006)		X	X	X	X
Li (2008)	X	X	X	X	X
Chang & Zhang (2011)		X	X	X	X
Ke & Takahashi (2014)	X	X	X	X	X
Andrianatrehina et al. (2016)		X			
Slangen & Fannin (2016)		X		X	X
Ataii & Fannin (2022)	X		X	X	X

In the event of suffusion, fines can be observed within the outflow. If a clear seepage cell is employed, migration may additionally be observed within the granular material. Post-test sieve analyses are commonly performed across different sections (e.g. top, middle, bottom) to evaluate changes in the material GSD. In open systems, the loss of fines is generally quantified by comparing the dry mass of eroded fine particles to the initial dry mass of the granular material (Skempton & Brogan, 1994; Khan, 2003; Li, 2008; Ke & Takahashi, 2014; Ataii & Fannin, 2022).

Hydraulic parameters are also closely examined. The hydraulic head is typically monitored at regular time intervals and at varying heights within the granular material using piezometers (Lafleur et al., 1989; Skempton & Brogan, 1994; Honjo et al., 1996; Moffat, 2002) or differential pressure transducers (Moffat, 2002; Khan, 2003; Wan & Fell, 2004; Fannin & Moffat, 2006). To determine whether suffusion has occurred within the granular material, Khan (2003) analyzed the head loss along the granular material. Non-uniform head loss along the granular material can be attributed to either incomplete saturation or migration of fine particles resulting from suffusion. The hydraulic gradient at which suffusion occurred is generally regarded as the target value in studies examining hydraulic and hydromechanical criteria (Tableaux 4.1 and 4.2). The combination of head loss and volumetric flow rate provides the total and local hydraulic conductivities, which were used by Lafleur et al. (1989) to assess the internal stability of a granular material. Finally, the vertical displacement can be measured to evaluate the dry density or volume of the granular material. This may be accomplished either during the flow tests with the aid of a linear variable differential transducer (LVDT; Khan, 2003; Li, 2008; Chang & Zhang, 2011; Ke & Takahashi, 2014; Slangen & Fannin, 2016), or at the end of the flow tests (Honjo et al., 1996; Kenney & Lau, 1985; Lafleur et al., 1989). Testing apparatus and procedures

4.2.3 Suffusion parameters

A schematic of the flow testing apparatus used in this study is given in Figure 4.1. It was devised based on common practices reported in the literature (Tableaux 4.1 and 4.2). Tableau

4.3 lists the material properties, the results of the application of the Kezdi, Sherard and Kenney & Lau geometric criteria to the GSDs and the testing conditions used for this study.

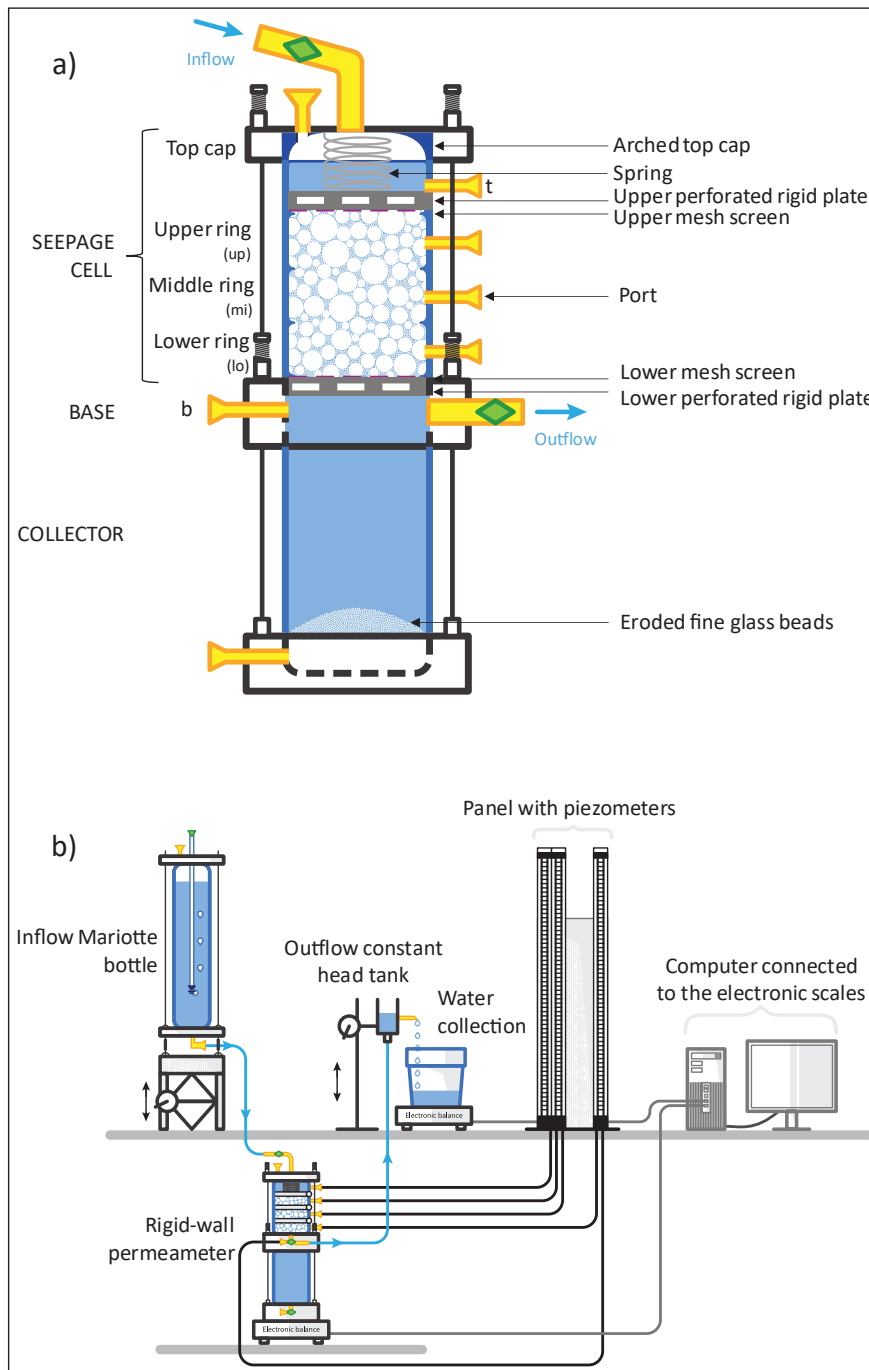


Figure 4.1 a) Rigid-wall permeameter designed for this study and b) apparatus used during the flow tests. Blue arrows correspond to the flow direction during the test

Tableau 4.3 Material properties, application of the Kezdi, Sherard and Kenney & Lau geometric criteria and testing conditions

Internal stability	Reference	GSD		d_{10} (mm)	C_u	C_c	USCS classification ^b	Geometric criteria ^{c,d}			Void ratio (-) ^e		Filter screen opening (mm) ^f
		Name	Shape ^a					Kezdi (1979)	Sherard (1979)	Kenney & Lau (1985, 1986)	e_{min}	e_{max}	
Test & Criteria	Kenney & Lau (1985)	21	C	0.860	4.0	1.0	SP with gravel	S	S	S	0.368	0.431	2.00
	Li (2008)	FR3		0.127	6.0	1.3	SW	S	S	S	0.285	0.366	0.500
	Andrianatrehina et al. (2015)	CL1		1.490	3.7	1.1	SP with gravel	S	S	S	0.394	0.442	4.00
	Honjo et al. (1996)	G2-a	D	0.150	4.7	2.7	SP	S	S	S	0.335	0.417	0.500
		G2-b		0.134	4.9	0.7	SP	S	S	S	0.313	0.408	0.500
	Kenney et Lau (1985)	K	C	0.890	4.1	1.0	SP with gravel	U	U	S	0.371	0.443	2.30
Test vs. Criteria	Skempton & Brogan (1994)	C		0.660	6.1	1.2	SW with gravel	U	U	S	0.308	0.381	2.30
		D		1.020	4.2	1.0	SP with gravel	U	U	S	0.358	0.426	2.80
	Andrianatrehina et al. (2015)	CL3		0.215	19.8	0.9	SP with gravel	S	S	U	0.193	0.270	1.75
	Honjo et al. (1996)	G1-a		0.250	4.3	2.1	SP	U	U	U	0.345	0.470	0.600
		G1-b	D	0.150	6.8	3.2	SP	U	S	U	0.258	0.377	0.600
		G1-c		0.135	7	0.5	SP	U	S	U	0.268	0.354	0.600
		G1-d		0.125	6.8	0.3	SP	S	S	U	0.295	0.374	0.600
		G3-a ^g		0.150	9.7	3.4	SP	U	U	U	0.266	0.344	0.600

STABLE

Tableau 4.3 Material properties, application of the Kezdi, Sherard and Kenney & Lau geometric criteria and testing conditions
(suite)

Internal stability	Reference	GSD		d_{10} (mm)	C_u	C_c	USCS classification ^b	Geometric criteria ^{c,d}			Void ratio (-) ^e		Filter screen opening (mm) ^f
		Name	Shape ^a					Kezdi (1979)	Sherard (1979)	Kenney & Lau (1985, 1986)	e_{min}	e_{max}	
UNSTABLE	Test & Criteria	a	C	0.180	20.9	1.8	SW with gravel	U	U	U	0.179	0.230	1.75
		FR8	D	0.118	11.8	0.1	SP	U	U	U	0.232	0.293	0.600
		HF01		0.220	21.5	6.0	SP with gravel	U	U	U	0.252	0.281	0.600
	Test vs. Criteria	DL1		0.243	23.9	6.7	GP with sand	U	U	U	0.207	0.251	2.00
	Andrianatrehina et al. (2015)	CL2	C	1.260	4.2	1	SP with gravel	U	U	S	0.311	0.374	3.80

Notes: ^a C: continuous, D: discontinuous. ^b According to ASTM D2487. ^c S: stable, U: unstable. ^d The bold letter indicates that the criterion result differs from the previous flow test result. ^e Determined by tests realized on the different materials reconstituted with glass beads according to ASTM D4253 and ASTM D4254. ^f The upper and lower filter screens with an opening close to the d_{40} for continuous GSDs or to the minimal glass bead size of the coarse fraction for discontinuous GSDs. ^g Material G3-a is considered stable in this study according to the laboratory results (settlement and total percentage mass loss of fines) obtained in Honjo et al. (1993).

4.2.3.1 Rigid-wall permeameter

The rigid-wall permeameter consisted of three detachable parts (Figures 4.1a and 4.1b): 1) the seepage cell, 2) the base, and 3) the collector. The seepage cell contained the fully saturated loose material. The base supported the granular material and acted as a separation between the seepage cell and the collector. The collector captured the eroded glass beads during the flow tests. These three parts were sealed with O-rings. Silicone was applied to the base and to the collector base to ensure watertightness and airtightness of the permeameter. To minimize the parasitic head loss in the connectors, valves and pipes with relatively large internal diameters (12 to 20 mm) were used.

The upper part consisted of four 100-mm inner diameter rigid-wall rings made of clear polyvinyl chloride (PVC). They were held together by flexible sleeves (Figure 4.1b). All rings were equipped with ports to which piezometers were connected during the test (Figures 4.1a and 4.1b). A top cap with a valve was fixed to the PVC rings. The top cap was arched to guide gas bubbles toward the outflow during saturation (Figure 4.1a). The valve on the top cap was used as an outflow during saturation and as an inflow during the test phase. A filter screen was placed on the tested material. Its opening size ranged from 0.500 to 3.80 mm depending on the tested material (Tableau 4.3). A perforated plate with 4.00 mm holes was placed on top of the filter screen to ensure a uniform water flow while minimizing the parasitic head losses. A spring was used to confine vertically the loose material during flow tests.

The base was designed to allow water to flow into the collector where the eroded glass beads were captured (Figure 4.1a). A perforated plate with 10.0 mm holes was inserted in the base to support the granular material. A filter screen was placed on the rigid plate to retain the coarse fraction while allowing the eroded fine particles to pass through. The same opening size was used for the lower and upper filter screens. It matched the d_{40} of the material for continuous GSDs, and the minimum diameter of the coarse fraction for discontinuous GSDs (Tableau 4.3). To avoid particle loss before the saturation step, a 3D-printed soluble filter made of polyvinyl alcohol (PVA) filament was installed on the filter screen. A portion of the filter solubilized

with the upward seepage flow during the saturation and the remainder sedimented with the eroded glass beads. Therefore, water could flow downward and transport eroded glass beads during the flow seepage step.

The collector was a clear PVC ring fixed to a metal base with a port for saturation.

4.2.3.2 Saturation system

The rigid-wall permeameter containing the dry granular material was saturated by an upward flow of deaerated water preceded by a CO₂ purge. The CO₂ cylinder was connected to the collector port. The saturation system was nearly the same as the one used in Bouin et al. (2021), except for a valve placed between the Mariotte bottle and the rigid-wall permeameter to regulate the water inflow to prevent erosion of the glass beads during the saturation step, especially for the unstable materials. The volume of water entering the permeameter was verified using an electronic scale placed under the permeameter (Figure 4.1b). A computer was used to record the volume of water flowing into the permeameter over time.

4.2.3.3 Testing system

The testing system is shown in Figure 4.1b.

A Mariotte bottle was used to impose a constant head at the permeameter inflow using deaerated water. A constant head deaerated water tank was used at the outflow. It consisted of a PVC cell with an opening to allow water to flow into a container that was weighed periodically during the test. The height of the constant head water tank could be adjusted using a laboratory clamp and stand system (Figure 4.1b).

Hydraulic head was measured using piezometers (tubes) connected to ports on the rigid-wall permeameter and installed on a panel with graduations (Figures 4.1a and 4.1b).

4.2.4 Testing procedures

4.2.4.1 Materials reconstitution

The rigid-wall permeameter was placed on the electronic scale before being filled with the granular material (Figure 4.1b). The rigid-wall permeameter was not removed from the electronic scale until the rings were separated at the end of the flow tests.

Three specimens were reconstituted for each tested material. They were obtained in accordance with the selected GSD and the corresponding maximum void ratio (Figures 4.3 and 4.4 and Tableau 4.3). Each dry specimen was then placed in the rigid-wall permeameter at its maximum void ratio using a funnel or a spoon to spread the particles evenly in a slow spiral motion, according to ASTM D2434-22 and ASTM D4254. The height of the tested material was determined following ASTM D2434-22 (average height equal to 120 mm).

4.2.4.2 Materials saturation

The water flow rate for saturation was chosen to correspond to a hydraulic gradient of less than 0.02 to minimize the fines migration during the saturation step. The water volume entering the permeameter every 30 s was calculated using the hydraulic conductivity of each tested material predicted using equation (4) of Chapuis et al. (2015). The 3D-printed PVA filter solubilized during this step. Saturation was stopped when the volume of water, as measured by the electronic scale, was constant. This step took several hours for the coarsest materials to two days for the finest materials.

4.2.4.3 Materials saturation

The flow tests were conducted under a downward flow of deaerated water at a constant hydraulic gradient of 0.2. This hydraulic gradient was chosen to achieve a laminar flow in most materials tested (ASTM D2434-22), while causing migration in unstable loose materials (Skempton & Brogan, 1994; Wan & Fell, 2004, 2008). In this study, it was decided not to

apply vibrations to the rigid-wall permeameter containing the tested granular material. Indeed, according to Garner & Fannin (2010), the use of vibrations coupled with a critical hydraulic gradient on an unstable material would lead to a different internal erosion process, not to suffusion (e.g. backward erosion, contact erosion, or concentrated leak erosion).

The five lateral piezometers were saturated with deaerated water and were connected to the ports of the rigid-wall permeameter. Three of the ports were located in the wall of the seepage cell (i.e. along the granular specimen), while two piezometers were installed at the inflow and the outflow faces of the specimen (t and b in Figure 4.1a).

The top cap and the base valves were slowly opened to minimize particle movement during test initiation. Hydraulic head was measured with the five piezometers at regular time intervals. The mass of water flowing out of the constant head tank in the container was measured at the same time interval by the electronic scale connected to the computer (Figure 4.1b). During the test, the erosion of the glass beads in the transparent collector was observed (Figure 4.1a). The flow test was ended when the flow rate and the hydraulic heads were constant and no more glass beads were eroded in the collector.

4.2.4.4 Internal stability final measurements

A number of parameters were evaluated to assess the internal stability of the granular materials. The approaches used are described below.

At the end of each flow test, the rigid-wall permeameter was slowly opened at the top. The length of the material after the flow test was then measured with a caliper to determine the final volume and the difference between the initial and final material volumes (ΔV_{tf} , in %). A positive difference signifies a reduction in volume.

The material contained in each PVC ring was then extracted. The surface was carefully trimmed with a straightedge to guarantee the complete removal of the glass beads. Following

the extraction, the glass beads from each portion were oven-dried overnight at 110 °C and then sieved (0.106 mm to 12.0 mm range). The sieving of the glass beads gave three GSDs, one for the upper portion, one for the middle portion, and one for the lower portion. Their sum gave the total GSD. The percentage passing the filter screen opening (D_{screen} , mm) for the three rings and the total GSD were compared to the initial value to define percentage passing differences in the top ring (ΔP_{up}), middle ring (ΔP_{mi}), bottom ring (ΔP_{lo}), and for the total GSD (ΔP_{f}). A positive difference indicates a loss of glass beads smaller than D_{screen} . A negligible difference can be explained by either the absence of migration of the glass beads smaller than D_{screen} from the portion in question, or the migration of these fines being compensated for by a gain of fines from the portion above.

The eroded glass beads that had settled in the collector during the flow test were recuperated (Figure 4.1a). They were then oven-dried overnight at 110 °C. The mass loss was expressed as a percentage of the total mass (P_{fines} ; Tableau 4.2).

Finally, the initial and final void ratios of the material were estimated using its measured length and its dry mass before and after the flow test. Additionally, the final void ratio in each ring was estimated using the height of the rings (with an average height of 40 mm) and the mass of glass beads obtained for each ring. The change in void ratio was calculated as a percentage of the initial void ratio for the upper ring (Δe_{up}), the middle ring (Δe_{mi}), the lower ring (Δe_{lo}), and the whole cell (Δe_{f}). A positive difference corresponds to an increase in void ratio.

4.2.5 Experimental program

Figure 4.2 presents a summary of the experimental program.

Flow tests were performed on fully saturated loose granular material reconstituted by mixing glass beads as described above. The granular materials were selected from those reported and tested in the previously cited literature. They are first grouped according to the assessment of their internal stability based on previous flow test results (stable or unstable materials; Figure

4.2). Then, within each group, the granular materials are then combined according to the results of the application of the three selected criteria (Kezdi, Sherard, and Kenney & Lau criteria). The granular materials that showed a comparable assessment of internal stability, as indicated by the results of the laboratory tests and the three criteria, were grouped together in the “Test & Criteria” category. Conversely, those with at least one inconsistent result were grouped in the “Test vs. Criteria” category (Figure 4.2 and Tableau 4.3). The testing campaign started with flow tests repeated on an unstable granular material (FR8; Figure 4.2) to verify the reproducibility of the results (Tableau 4.3). After this verification, the flow tests were performed on the other materials (Figures 4.2-4.4 and Tableau 4.3). The different parameters affected by the erosion of the fine glass beads were evaluated at the end of the tests (e.g. GSD, total percentage mass loss, void ratio and total volume). They were selected in combination to develop a laboratory criterion to differentiate between stable and unstable materials.

STABLE MATERIALS				UNSTABLE MATERIALS			
Test & Criteria		Test vs. Criteria		Test & Criteria		Test vs. Criteria	
21	G2-a	K	G1-a	a	FR8		CL2
FR3	G2-b	C	G1-b		HF01		
CL1		D	G1-c		DL1		
		CL3	G1-d				
			G3-a				

Figure 4.2 Summary of the experimental program (references providing the GSDs used for this study are given in Tableau 4.3)

4.2.6 Coarse Granular materials

Figure 4.3 presents the fourteen stable GSDs, five for which the test results are in agreement with the criteria results and nine for which they are in disagreement. Figure 4.4 presents the five unstable GSDs, four for which the test results are in agreement with the criteria results and one for which they are in disagreement.

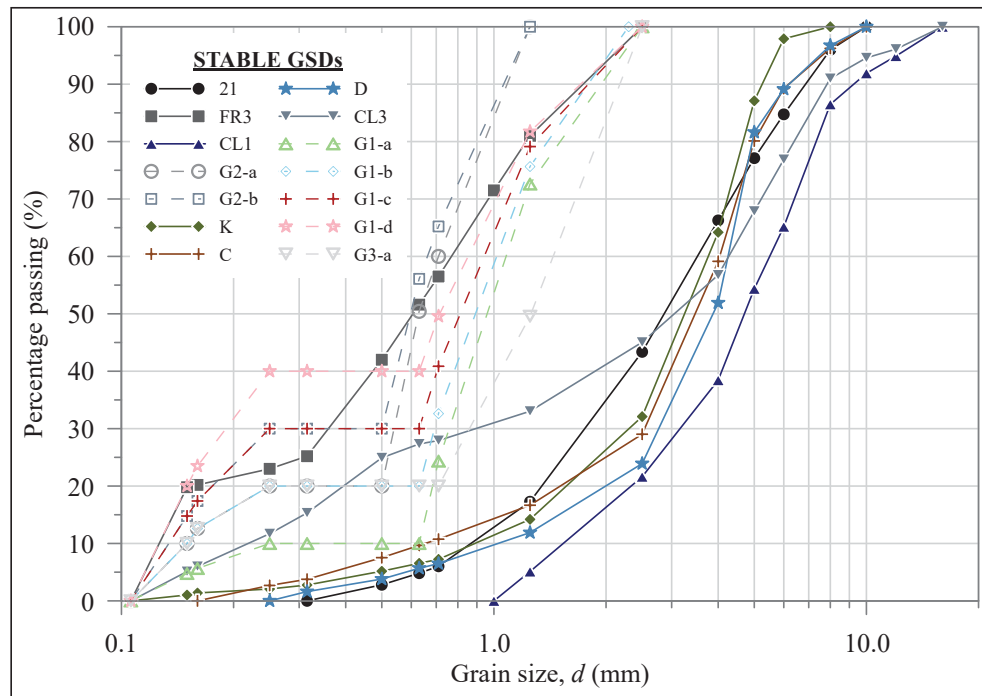


Figure 4.3 GSDs of materials considered stable based on previous flow test results. Continuous and discontinuous GSDs are presented with continuous and dotted lines, respectively

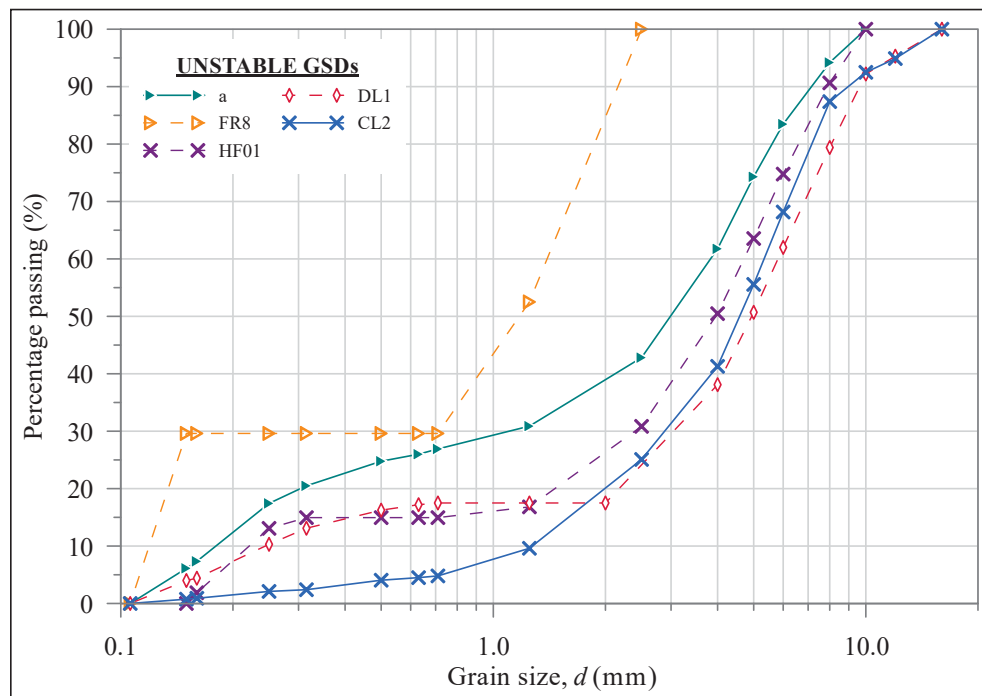


Figure 4.4 GSDs of materials considered unstable based on previous flow test results. Continuous and discontinuous GSDs are presented with continuous and dotted lines, respectively

These GSDs were slightly modified from those used by the different authors (Tableau 4.3). These changes were the result of the available glass beads diameters and the selected sieves used to separate the glass beads. They corresponded in general to either poorly graded sand (SP) with or without gravel or widely graded sand (SW) with or without gravel according to ASTM D2487. Only DL1 corresponded to a poorly graded gravel (GP) with sand. Before the flow tests, all the materials were reconstituted to measure their minimal and maximal void ratios according to ASTM D4253 and ASTM D4254 respectively (Tableau 4.3). The results of the Kezdi (1969), Sherard (1975) and Kenney & Lau (1985) geometric criteria applied to the reconstituted GSDs are available in Tableau 4.3.

The material was obtained by mixing glass beads with diameters varying from 0.106 mm to 12.0 mm. This maximum diameter was chosen to minimize preferential flow along the sidewall of the permeameter during flow tests (ASTM D2434-22).

4.3 Experimental results and laboratory criteria

Tableaux 4.4, 4.5, 4.6 and 4.7 present the results of the parameters affected by the migration of fine particles due to seepage flow for materials considered stable and unstable based on previous test results. Each type of material was divided into two categories: test results which are aligned with the criteria results, indicated in the tables as “Test & Criteria”, and test results which disagree with the criteria results, indicated in the tables as “Test vs. Criteria”.

4.3.1 Repeatability tests

The results of the repeatability tests on FR8 are summarized in Tableaux 4.5 and 4.7.

One of the two specimens was slightly looser than the other (Tableau 4.7), but the quantity of eroded glass beads in both tests was similar (11.3 and 10.1 %). Moreover, the value for ΔP_f was the same (Tableau 4.5). With regard to the migration of the glass beads within the two specimens, the loss of fines across the three portions was identical (Tableau 4.5). Similar volume changes were observed ($\Delta V_{tf} = 9.6$ and 8.0 %). Although the settlement of both

specimens was significant, the final void ratio increased. The settlement can be attributed to a significant restructuring of the coarse particles resulting from the loss of fines ($\Delta e_f = 7.2$ and 10.2 %). Even if some parameters, such as the void ratio, vary between FR8 and FR8-R, the overall results are comparable and the testing method is repeatable.

4.3.2 Results of parameters affected by the fines erosion

Fines migration was observed for all tests, but the proportion of eroded fines and their redistribution within the materials differed between the stable and unstable materials (Tableaux 4.4 and 4.5). All materials that were determined to be stable based on the flow tests presented in the literature had P_{fines} values below or equal to 4.4 %. The P_{fines} values were below or equal to this threshold irrespective of the GSD criteria results. Materials that were deemed unstable based on previous test results all had P_{fines} values above or equal to 4.4 %. The ΔP_f values were correlated to the P_{fines} values. The eroded fines were concentrated at the top and at the bottom of unstable specimens (ΔP_{up} and ΔP_{lo}). The ΔP_{lo} values show a clearer distinction between stable and unstable materials. All stable materials had ΔP_{lo} values below or equal to 5.6 %, whereas all unstable materials had ΔP_{lo} values above or equal to 5.0 %. The stable material all showed very little erosion in the middle of the specimen with ΔP_{mi} values below 1 %. These results suggest that the seepage flow initiated the migration of fine particles from the bottom of the materials, followed by migration from an upper region. This supports the findings of Moffat (2002) on fine particle movement in unstable materials.

Tableau 4.4 Loss of fines and evolution of the GSD between the initial and final tested materials for the materials considered stable based on previous flow tests

GSD		P_{fines} (%)	ΔP_f (%)	ΔP_{up} (%)	ΔP_{mi} (%)	ΔP_{lo} (%)
Test & Criteria ^a	21	1.1	0.6	1.1	- 0.1	0.9
	FR3	0.9	0.5	0	0.1	1.3
	CL1	4.4	2.6	1.9	0.7	5.6
	G2-a	0.6	0.4	1.3	- 0.4	0.3
	G2-b	0.7	0.5	1.1	- 0.2	0.8
Test vs. Criteria ^b	K	4.1	1.5	2.7	-0.25	2.3
	C	4.3	2.0	3.0	0.5	2.5
	D	4.1	2.0	3.0	0	3.0
	CL3	4.4	2.7	2.0	1.0	5.5
	G1-a	0.7	0.8	1.3	0.2	0.8
	G1-b	1.1	0.9	1.0	0.2	1.7
	G1-c	0.9	0.6	1.0	-0.5	1.3
	G1-d	1.8	1.1	0.3	0.1	3.0
	G3-a	2.6	2.2	3.3	0.2	3.3

Notes: ^a Materials with consistent internal stability assessment between previous flow tests and the three selected criteria (Kozdi, Sherard, and Kenney & Lau criteria). ^b Materials with inconsistent internal stability assessment between previous flow tests and at least one of the three criteria.

Tableau 4.5 Loss of fines and evolution of the GSD between the initial and final tested materials for the materials considered unstable based on previous flow tests

GSD		P_{fines} (%)	ΔP_f (%)	ΔP_{up} (%)	ΔP_{mi} (%)	ΔP_{lo} (%)
Test & Criteria ^a	a	4.4	3.0	3.0	- 0.3	6.5
	DL1	13.6	13.1	11.9	11.3	15.7
	FR8	11.3	7.9	2.0	6.9	16.7
	FR8-R	10.1	7.9	1.9	4.9	16.0
	HF01	10.2	9.6	12.1	8.3	8.7
Test vs. Criteria ^b	CL2	4.8	3.0	4.5	-0.5	5.0

Notes: ^a Materials with consistent internal stability assessment between previous flow tests and the three selected criteria (Kezdi, Sherard, and Kenney & Lau criteria). ^b Materials with inconsistent internal stability assessment between previous flow tests and at least one of the three criteria.

The specimen volume decreased during the flow tests, regardless of the material internal stability. However, the volume reductions were generally less significant for the stable materials than for the unstable materials (Tableaux 4.6 and 4.7), and even less pronounced for stable materials whose test results aligned with the criteria results. Among all the unstable materials, the smallest volume reduction was observed for “a”, with a ΔV_{tf} value of 2.7 %. Only four stable materials exhibited a ΔV_{tf} greater than 2.7 %, but less than 4.4 %, the greatest volume reduction observed for stable materials (CL3). Three of these four were stable materials whose test results contrasted with the criteria results. A proportion of the reduction in volume can be attributed to the densification of the materials resulting from the seepage flow. The more pronounced reductions observed in the unstable materials may be attributed to a restructuring of the coarse glass beads caused by the significant loss of fines outside the material. However, a significant loss of fines does not necessarily correlate with a proportional decrease in volume, as evidenced by the unstable material HF01 ($P_{\text{fines}} = 10.2\%$ and $\Delta V_{\text{tf}} = 3.3\%$).

Tableau 4.6 Evolution of the total volume and the void ratio of the tested materials for materials considered stable based on previous flow tests

GSD		ΔV_{tf} (%)	Void ratio of the specimen		Δe_f (%)	Δe_{up} (%)	Δe_{mi} (%)	Δe_{lo} (%)
			Before test, e_i (-)	After test, e_f (-)				
Test & Criteria ^a	21	1.3	0.416	0.414	-0.5	14.9	-1.0	-13.5
	FR3	2.0	0.361	0.350	-3.0	-0.3	-6.4	-2.8
	CL1	3.5	0.475	0.491	3.2	11.7	-9.3	8.1
	G2-a	1.2	0.419	0.420	0.2	14.3	-4.1	-10.0
	G2-b	2.1	0.403	0.385	-4.6	5.6	-9.5	-9.3
Test vs. Criteria ^b	K	2.2	0.460	0.489	6.4	16.4	-11.7	16.4
	C	2.0	0.394	0.428	8.7	13.1	-0.4	13.6
	D	1.8	0.446	0.480	7.7	12.3	-8.5	20.6
	CL3	4.4	0.279	0.279	0	10.6	-18.0	9.5
	G1-a	2.7	0.497	0.467	-5.9	6.1	-11.6	-11.8
	G1-b	4.1	0.404	0.362	-10.4	-2.8	-13.2	-14.9
	G1-c	2.4	0.360	0.339	-5.6	5.4	-11.0	-10.5
	G1-d	3.7	0.390	0.364	-6.5	-0.7	-10.7	-7.7
	G3-a	2.5	0.326	0.328	0.6	27.9	-14.7	-6.4

Notes: ^a Materials with consistent internal stability assessment between previous flow tests and the three selected criteria (Kazdi, Sherard, and Kenney & Lau criteria). ^b Materials with inconsistent internal stability assessment between previous flow tests and at least one of the three criteria.

Tableau 4.7 Evolution of the total volume and the void ratio of the tested materials for the materials considered unstable based on previous flow tests

GSD		ΔV_{if} (%)	Void ratio of the specimen		Δe_f (%)	Δe_{up} (%)	Δe_{mi} (%)	Δe_{lo} (%)
			Before test, e_i (-)	After test, e_f (-)				
Test & Criteria ^a	a	2.7	0.225	0.250	11.1	15.2	-27.0	19.3
	DL1	5.1	0.301	0.431	43.2	56.8	53.2	21.6
	FR8	9.6	0.321	0.346	7.8	15.3	-4.7	15.3
	FR8-R	8.0	0.295	0.325	10.2	16.3	-3.4	20.0
	HF01	3.3	0.322	0.425	31.7	74.3	13.5	10.7
Test vs. Criteria ^b	CL2	3.1	0.409	0.433	5.8	14.8	-4.9	7.8

Notes: ^a Materials with consistent internal stability assessment between previous flow tests and the three selected criteria (Kazdi, Sherard, and Kenney & Lau criteria). ^b Materials with inconsistent internal stability assessment between previous flow tests and at least one of the three criteria.

The void ratio of the total material was generally unchanged or decreased for the stable materials (Tableaux 4.4 and 4.6), which can be attributed to a combination of a minor loss of fines and a small settlement. The exceptions were mainly stable materials whose tests results contrasted with criteria results, showing a positive Δe_f but remaining below 8.7 %. In contrast, all the unstable materials had a positive Δe_f (Tableau 4.7). A similar trend was observed for the lower portion of the materials, with generally negative Δe_{lo} for the stable materials and positive Δe_{lo} for the unstable materials. The positive Δe_{lo} for the stable materials were again associated with cases where test results generally contrasted with the criteria result. In the middle portion, Δe_{mi} was negative or remained below 1.0 % for most of the materials, except for the unstable materials DL1 and HF01. The most significant reduction among the stable material was -18 %, observed in a material whose test results contrasted with the criteria results (CL3). However, the greatest overall reduction was -27.0 % recorded for the unstable

material “a”. Finally, the void ratio in the upper portion increased for all materials (Tableaux 4.6 and 4.7), with the most pronounced increases observed in the unstable group.

4.3.3 Proposed thresholds for flow tests

This section examines the relevance of parameters and their threshold values in differentiating between materials considered stable and unstable based on previous test results. A total of four threshold conditions, parameters in combination, have been selected to be incorporated into a single laboratory criterion.

The first threshold condition is a combination of the total percentage mass loss of fines (P_{fines}) and the difference of the percentage passing D_{screen} between the initial and final GSD (ΔP_f). These two parameters are theoretical related as $\Delta P_f = C P_{\text{fines}}$, where C is a constant that depends on the initial percentage of fines in the material. P_{fines} was considered in most studies using an open system (Tableau 4.2). However, no explicit threshold value for fines loss was established to differentiate between stable and unstable materials. According to Lafleur et al. (1989), P_{fines} should be small in stable materials, as it is a necessary consequence of achieving stability. The P_{fines} value was less than 4.4 % for the stable materials, but exceeded this threshold for the unstable materials. The value of 4.4 % may be considered a threshold for the loss of fines, as it is consistent with the observed values for stable material K (3.7 %) and unstable material A (5.6 %), respectively tested in Moffat (2002) and in Skempton & Brogan (1994). This parameter is combined with ΔP_f . A value of 2.7 % distinguished the stable materials from the unstable materials. Therefore, the threshold value for ΔP_f could be equal to 2.7 %. Consequently, materials should exhibit a P_{fines} at or below 4.4 % with a ΔP_f below 2.7 % in order to demonstrate stable behavior.

The second threshold condition is a combination of the difference in the percentage passing D_{screen} between the initial material and its upper portion (ΔP_{up}) and the difference in the percentage passing D_{screen} between the initial material and its lower portion (ΔP_{lo}). The stable materials generally exhibited a ΔP_{up} and a ΔP_{lo} that were both smaller than 3.3 % whereas the

unstable materials generally exhibited values that were larger than 3.3 %. The 3.3 % value appears to be a reasonable discriminator for differentiating between stable and unstable materials for both ΔP_{up} and ΔP_{lo} .

The third threshold condition was based on the evolution of the middle portion of the material. This choice was in accordance with the statement of Kenney & Lau (1985), which postulated that the central portion of a stable material should be homogenous. It combined the percentage difference between the void ratios of the initial material and its middle portion (Δe_{mi}) and the percentage difference in material passing D_{screen} between the initial material and its middle portion (ΔP_{mi}). The stable materials exhibited a Δe_{mi} between -18.0 % and 1.0 %, accompanied by a ΔP_{mi} that was negligible (Tableaux 4.4 and 4.6). In contrast, the unstable materials presented a broad range of values (Tableaux 4.5 and 4.7). Materials DL1 and HF01 showed an important migration, as indicated by large positive ΔP_{mi} and Δe_{mi} values. Material “a” exhibited a negligible ΔP_{mi} , despite a significant reduction of Δe_{mi} . This reduction was more pronounced than that observed in any stable materials. Material FR8 exhibited a positive and important ΔP_{mi} , yet it was combined with a negative Δe_{mi} . Therefore, it can be concluded that unstable materials presented either a significant increase of ΔP_{mi} or a significant change of Δe_{mi} . Consequently, materials should exhibit a ΔP_{mi} under 1.0 % with a Δe_{mi} between -18.0 and 1.0 % in order to demonstrate stable behavior.

The fourth and final threshold condition was based both on the percentage difference between the initial and final material volumes (ΔV_{tf}) and the percentage difference between the initial and final material void ratios (Δe_f). For stable materials, the reduction in volume was less than 4.4 % and was generally accompanied by a reduction in void ratio. The latter was less pronounced for stable materials whose tests results contrasted with criteria results. For some of these stable materials, the void ratio increased but it was less than 8.7 %. For unstable materials, the void ratio always increased despite a reduction in volume. Specifically, the increase in void ratio was at least 7.8 % with a reduction in volume of up to 9.6 %. Therefore, stable materials should present a ΔV_{tf} no greater than 4.4 % with a Δe_f that is less than 8.7 %.

4.3.4 Application of the laboratory criteria

In this section, the results obtained at the end of flow tests for the materials considered stable and unstable based on previous flow test results are compared with the threshold values obtained for the four threshold conditions of the laboratory criterion. These results are presented in Figure 4.5, while the results of the application of the laboratory criterion are summarised in Tableau 4.8. Both are grouped into four categories according to test results and criteria results. The first category corresponds to stable materials based on both flow tests and geometric criteria (21, FR3, CL1, G2-a and G2-b). The second and third categories correspond to stable (K, C, D, CL3, G1-a, G1-b, G1-c, G1-d, G3-a) and unstable (CL2) materials whose test results contrasted with at least one criteria result, respectively. The fourth category corresponds to unstable materials based on both flow tests and geometric criteria (a, DL1, FR8 and HF01).

If the threshold condition had a value below the threshold, the response was deemed to be “stable”. When a material demonstrated four responses corresponding to a “stable” behaviour, it was classified as stable. With three “stable” responses, the material was classified as a “marginally stable material”. Finally, with two or fewer “stable” responses, the material was classified as “unstable”. According to this laboratory criterion, materials 21, FR3, G2-a, G2-b, K, C, D, G1-a, G1-b, G1-c, G1-d and G3-a are classified as stable materials. Materials CL1 and CL3 are considered as marginally stable materials. Materials a, DL1, FR8, HF01 and CL2 are classified as unstable materials.

The classification of materials CL1 and CL3, as determined by the laboratory criterion, differs from that previously documented in Andrianatrehina et al. (2015). The comparison of laboratory results across different studies is challenging due to the variability in the apparatus and testing procedures used (Tableau 4.1), as highlighted by Fannin & Moffat (2006) and Zhou et al. (2016). However, despite this variability, an explanation can be derived. Materials CL1 and CL3 were classified as stable by Andrianatrehina et al. (2015) after applying their own laboratory criterion. However, the parameters values obtained for these two materials were

close to the threshold of the laboratory criterion. As noted by Andrianatrehina et al. (2015) noted, CL1 and CL3 can be classified as marginally stable materials.

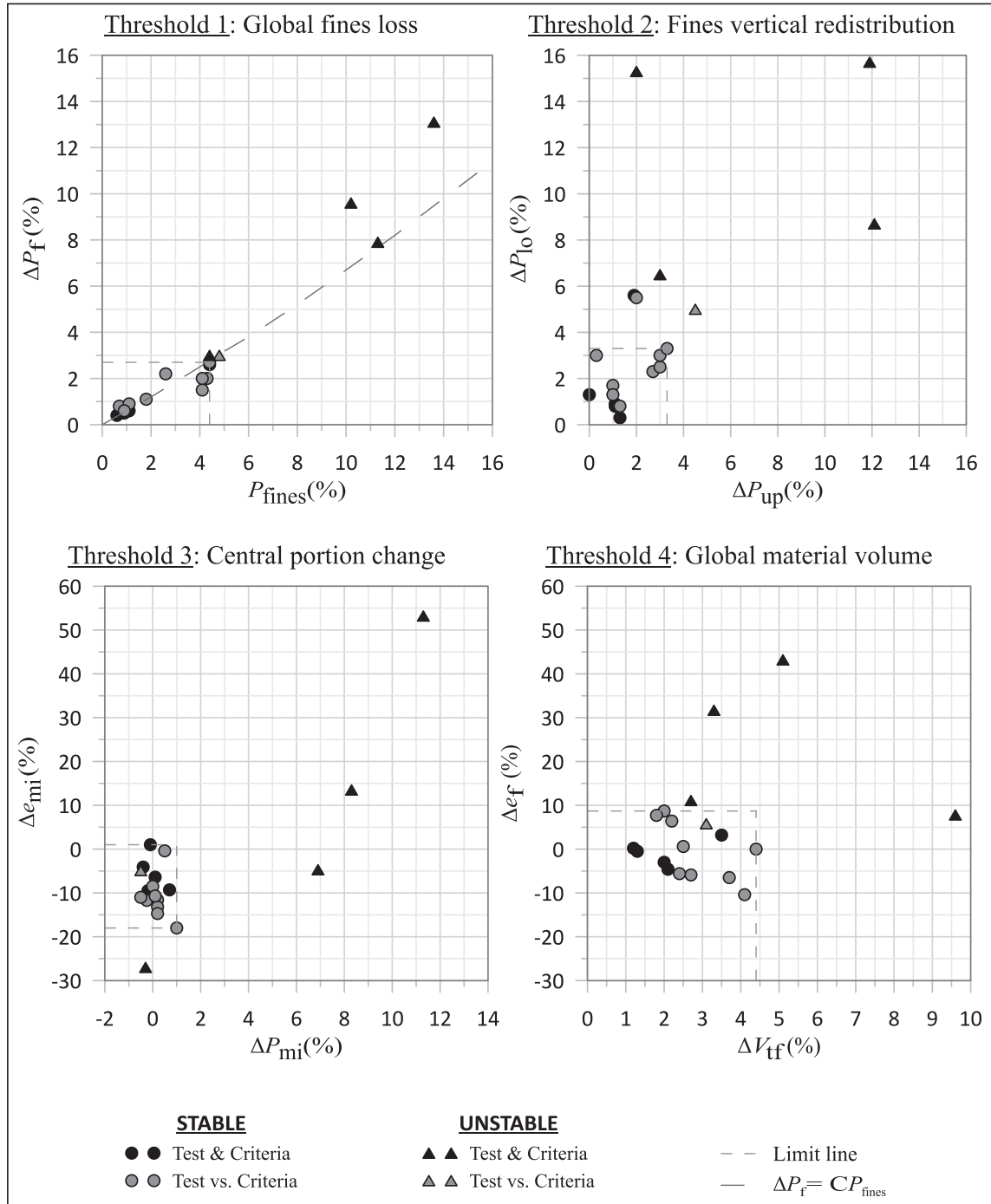


Figure 4.5 Results of the four threshold conditions for the materials considered stable and unstable based on previous flow test results

Tableau 4.8 Assessment of the internal stability of the materials after the application of the laboratory criterion

GSD			Laboratory threshold conditions ^a				Laboratory criterion ^a
			1st $P_{\text{fines}} \& \Delta P_f$	2nd $\Delta P_{\text{up}} \& \Delta P_{\text{lo}}$	3th $\Delta P_{\text{mi}} \& \Delta e_{\text{mi}}$	4th $\Delta V_{\text{tf}} \& \Delta e_f$	
STABLE	Test & Criteria ^b	21	S	S	S	S	S
		FR3	S	S	S	S	S
		CL1	S	U	S	S	MS
		G2-a	S	S	S	S	S
		G2-b	S	S	S	S	S
	Test vs. Criteria ^c	K	S	S	S	S	S
		C	S	S	S	S	S
		D	S	S	S	S	S
		CL3	S	U	S	S	MS
		G1-a	S	S	S	S	S
		G1-b	S	S	S	S	S
		G1-c	S	S	S	S	S
		G1-d	S	S	S	S	S
		G3-a	S	S	S	S	S
UNSTABLE	Test & Criteria ^b	a	U	U	U	U	U
		DL1	U	U	U	U	U
		FR8	U	U	U	U	U
		HF01	U	U	U	U	U
	Test vs. Criteria ^c	CL2	U	U	S	S	U

Notes: ^a S: stable, MS: marginally stable, U: unstable. ^b Materials with consistent internal stability assessment between previous flow tests and the three selected criteria (Kazdi, Sherard, and Kenney & Lau criteria). ^c Materials with inconsistent internal stability assessment between previous flow tests and at least one of the three criteria.

4.4 Discussion

4.4.1 Apparatus limitation

In their studies, Moffat (2002), Khan (2003), and Fannin & Moffat (2006) used a seepage cell with a funnel-shaped collector, coupled to a flexible silicone tube that could be clamped at different stages. This design provided additional information on fines migration, including the differentiation between fines lost during the saturation step and those lost during seepage. A funnel-shaped collector design was initially selected for this study. However, it was incompatible with the soluble filter placed under the granular material to limit the migration of fines out of the granular material during reconstitution. Indeed, preliminary flow tests showed that the fines mixed with the soluble filter tended to clog the funnel opening, making collection of the fines impossible. A simple collector design was then preferred over a funnel shape to allow the use of a soluble filter. Limiting the migration of fines during reconstitution was considered more essential than differentiating the fines loss at different stages.

4.4.2 Testing procedures limitations

The surface trimming could induce the migration of the fines of the lower portion towards the collector, leading to a coarser GSD for this portion (ΔP_{lo}) and an overestimation of the total fines mass loss (P_{fines}). It was more significant for a material with a lower filter screen opening greater than 1.75 mm, due to the migration of coarser glass beads during the trimming. Although, these potential sources of error were minimized by careful handling in the laboratory, it was estimated that the loss of fines due to the migration of the glass beads during trimming could be approximately between 0.5 % and 1 %. While some overestimation of the fines loss may still have occurred, the mass of the fines collected in the collector after flow tests provided the most reliable measurement. As both P_{fines} and ΔP_f were based on this consistent measure, they provided the more accurate threshold condition for the laboratory criterion.

The selected hydraulic gradient (0.2) may be insufficient to induce suffusion in some materials, specifically those whose test results contrasted with criteria results. Moreover, a larger hydraulic gradient would facilitate the observation of a notable variation in the hydraulic parameters for the unstable materials. This could be used to develop additional criteria for differentiating between stable and unstable materials, or even between diverse forms of selective internal erosion (suffusion, suffosion, and fluidization) as proposed by Fannin & Slangen (2014). But the value of the selected hydraulic gradient was appropriate in this study for two reasons. Firstly, the occurrence of suffusion was documented in materials subjected to a seepage flow with a hydraulic gradient of less than 0.3 (Skempton & Brogan, 1994; Wan & Fell, 2004; Ataii & Fannin, 2016). Moreover, Wan & Fell (2004, 2008) postulate that if the material is loose, exhibits a discontinuous GSD, and contains non-cohesive fine particles, a low hydraulic gradient may be sufficient to induce the migration of fine particles. This is applicable to the granular materials selected for this study, which exhibit two or three of these characteristics. Secondly, a greater hydraulic gradient would be inappropriate for the coarsest granular materials of this study. The parasitic head loss would be considerable in the valves and pipes, and the volume of the Mariotte bottle would be insufficient to perform the test. The apparatus used was more suitable for the finest materials selected in this study.

4.4.3 Laboratory flow tests results versus geometric criteria results

The granular materials, which were subjected to a seepage flow in this study, exhibited distinctive characteristics in accordance with their internal stability, as assessed by the Kezdi, Sherard, and Kenney & Lau geometric criteria.

A granular material classified as unstable by the aforementioned geometric criteria exhibits high fine particle migration, even when subjected to a low hydraulic gradient in the absence of vibration. The fine particles from the base of the granular material initially migrate, subsequently followed by those from an upper region. This fines migration may result in a redistribution of the coarser particles, leading to a notable settlement. In contrast, a material classified as stable by the three geometric criteria exhibits a slight migration of fine particles.

This migration mainly affects the upper portion, while the middle portion remains homogeneous.

With regard to stable materials classified differently according to the three geometric criteria, a more pronounced migration of fine particles may be observed. The stability in question appears to be less pronounced. The divergence of the geometric criteria on the internal stability may indicate that these materials would exhibit a more significant migration of fines despite being considered stable.

4.5 Conclusion

The laboratory methods of flow tests used to assess the internal stability of the granular materials vary considerably between studies. This diversity in flow testing is accompanied by a subjectivity in the criteria used to differentiate between stable and unstable materials. As a result, a given material may be classified differently with respect to its internal stability, depending on the laboratory criteria used by the researchers in their own investigations. The approach presented in this study combines multiple parameters and their threshold values to identify a more robust method for assessing the internal stability of coarse granular materials. The resulting criterion is based on the characteristics of the unstable granular materials affected by the migration of the fine particles (GSD, loss of fines, void ratio and total volume). The four threshold conditions are as follows: (a) the combination of the loss of fines and the difference in the percentage passing of the filter opening diameter (D_{screen}) for the entire material, (b) the combination of the difference in the percentage passing D_{screen} for the upper and lower portions of the material, (c) the combination of the difference in void ratio and percentage passing D_{screen} between the initial material and the middle portion of the flow cell after testing (d) the combination of the reduction in material volume and percentage difference in void ratio for the entire test specimen. A response is considered “stable” if the condition value is below the threshold. A material is classified as stable if it exhibits four “stable” responses, marginally stable with three “stable” responses, and unstable with two or fewer “stable” responses.

The granular materials classified as stable by the criteria established by Kezdi, Sherard, and Kenney & Lau exhibit a slight migration of fine particles, which is only discernible in the upper layer. Conversely, when there is a discrepancy in the aforementioned criteria, fine particles exhibit a greater degree of migration. Prior to conducting flow tests, a preliminary selection of stable granular materials may be made based on an assessment of their internal stability with respect to all the three aforementioned geometric criteria.

CHAPITRE 5

PROPOSITION OF A NEW GEOMETRIC METHOD TO ASSESS THE INTERNAL STABILITY OF COARSE GRANULAR MATERIALS

Céline Bouin^a, Yannic A. Ethier^b, Jean-Sébastien Dubé^c, François Duhaime^d, and Simon Weber^e

^{a,b,c,d,e} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis pour publication dans « Acta Geotechnica », octobre 2025

ABSTRACT

Geometric criteria based on grain size distribution (GSD) curves are widely used to assess the internal stability of granular materials. Criteria may be grouped into two families, those developed from the retention filter criterion, called self-filtration criteria, and those based on the shape of the GSD. In this study, several common criteria and derived approaches were applied to 37 GSDs of coarse granular materials. These GSDs were selected according to their internal stability as determined from flow tests and the application of three common geometric criteria, namely the Kezdi, Sherard, and Kenney and Lau criteria. The GSDs were divided into two groups: 21 continuous GSDs and 16 discontinuous GSDs. The assessment of the internal stability of the GSDs by the geometric criteria reveals that two methods are needed to properly assess the internal stability, depending on the type of the GSDs. For discontinuous GSDs, the method developed by De Mello is adopted without modification. For continuous GSDs, a method that combines the Sherard criterion, slightly modified to make it less conservative, with the Kenney and Lau criterion correctly assesses their internal stability.

Keywords: Internal stability; flow tests; geometric criteria; coarse granular material; continuous GSDs; discontinuous GSDs

5.1 Introduction

Suffusion is defined as a selective internal erosion in which the loose fine particles of a granular material are transported by seepage through the pores formed by the coarse particles (e.g. Chapuis, 1992; Kenney & Lau, 1985; Rönnqvist & Viklander, 2016; Wan & Fell, 2004). Two adverse conditions are required to observe suffusion in a granular material, as illustrated in the Venn diagram of Garner & Fannin (2010): a critical hydraulic load for the seepage flow and a high susceptibility to suffusion for the granular material (Kenney & Lau, 1985; Kezdi, 1969; Khan, 2003; Li, 2008). The latter condition is geometrical. It depends on several properties of the granular material, including its porosity and the internal stability of its grain size distribution (GSD) (Garner & Fannin, 2010; Israr & Irfan, 2020; Khan, 2003).

To prevent suffusion, the internal stability of granular materials must be assessed. This can be done by performing a laboratory flow test directly on the granular material, which is considered as the best method by Kenney & Lau (1985). An alternative is the use of a geometric criterion applied to granular material GSD. A number of geometric criteria based on theoretical analyses and/or experimental results have been proposed since the 1950s. The internal stability of granular materials was first explained by its coefficient of uniformity (C_u), as outlined by USACE (1953) and Istomina (1957). However, Lubochkov (1962) postulated that this parameter is insufficient for assessing the potential migration of fine particles within the pores formed by the coarse particles. The shape of the GSD should also be considered. Criteria which consider the shape of the GSD include those established by Kenney & Lau (1985, 1986), Burenkova (1993), and Honjo et al. (1996). A second family of criteria was proposed on the postulate that the internal stability of granular materials could be assessed using Terzaghi's (1939) retention filter rule. This approach divides the GSD of the granular material into a fine fraction and a coarse fraction. The retention filter rule is applied by considering the coarse fraction as a filter for the fine fraction. This family includes the criteria developed by De Mello (1975), Kezdi (1979) and Sherard (1979).

No consensus exists as to the geometric criterion to be applied in assessing the internal stability of granular materials used in dam construction. However, the three most adopted criteria are those established by Kezdi (1979), Sherard (1979) and Kenney & Lau (1985, 1986). These three criteria are also commonly used in the literature to assess the internal stability of granular materials in experimental studies of suffusion. In the 1990s, modifications were proposed for these criteria. Most modifications concerned the presentation of the results of the geometric criteria (Fannin & Moffat, 2006; Li, 2008; Skempton & Brogan, 1994), the methods used to determine the different parameters to assess the internal stability (Chapuis, 1992; Lai et al., 2022; Sherard, 1979; USACE, 1953; Wan & Fell, 2004), or the range of GSD for which the geometric criteria can be applied (Andrianatrehina et al., 2016; Moraci et al., 2015). In addition to modifications, studies have combined geometric criteria with the objective of developing alternative criteria (Lai et al., 2022; Li & Fannin, 2008; Mandaglio et al., 2018; Moraci et al., 2014, 2015; Ni et al., 2018; Zhou et al., 2017). These changes depend on the effectiveness of the different criteria in assessing the internal stability of granular materials, previously evaluated by flow tests. In general, the semi-empirical criteria of Kezdi (1979), Sherard (1979) and Kenney & Lau (1985, 1986) are considered to be conservative (e.g. Chang & Zhang, 2013; Moraci et al., 2014, 2015; Ni et al., 2018; Rönnqvist & Viklander, 2016; Wan & Fell, 2004, 2008; Zhou et al., 2017).

This paper presents a review of the geometric criteria proposed in the literature to assess the internal stability of granular materials. These methods were applied to the GSDs of 37 coarse granular materials with flow test results in the literature. The study evaluates the geometric criteria by comparing their internal stability assessment with the flow test results. This analysis resulted in a new geometric criterion to assess the internal stability of coarse granular materials.

5.2 Geometric criteria

5.2.1 Semi-empirical criteria

5.2.1.1 Criteria based on the shape of the GSD

The Kenney & Lau (1985) criterion involves drawing a graph referred to as the “ $H:F$ shape curve”, wherein F (also referred to as F_d) represents the percentage passing at particle size d , and H represents the mass percentage between particle sizes d and $4d$. The value of H is calculated as $H = F_{4d} - F_d$ (Figure 5.1), where F_{4d} represents the percentage passing at particle size $4d$. This method assumes that the granular material must contain a certain quantity of particles with a diameter between d and $4d$ to prevent the particles of diameter d from being washed out. In terms of parameters, it means H must be greater than $1.0F$ for granular materials, exhibiting medium to high density (Kenney & Lau, 1985, 1986). Verification of this inequality is required for a specific percentage of the granular material GSD, depending on the shape of its coarse fraction. In the case of a narrow gradation ($C_u \leq 3$) for the coarse fraction, H is compared to F for F less than 30 %. Conversely, in the case of a wide gradation ($C_u > 3$), H is only compared to F for F less than 20 %.

Burenkova (1993) proposed a geometric criterion based on particle size ratios $h' = d_{90}/d_{60}$ and $h'' = d_{90}/d_{15}$, where sizes d_{15} , d_{60} , and d_{90} correspond to 15 %, 60 %, and 90 % passing by weight, respectively. By plotting h'' versus $\log(h')$ for different granular materials, Burenkova (1993) identified four zones of different internal stability. The zone for stable granular materials is delimited by the following inequalities as shown in Eq. (5.1).

$$0.76\log(h') + 1 < h'' < 1.86\log(h') + 1 \quad (5.1)$$

Honjo et al. (1996) performed flow tests on gap-graded materials, which differed by the values of the minimal and maximal diameters of the gap, $d_{\min}$ and $d_{\max}$ respectively, the width of the gap, and by the proportions of the fine and coarse fractions. Granular materials with a gap ratio ($d_{\max}/d_{\min}$) larger than 4.0 were considered more susceptible to suffusion.

fraction. According to Kezdi (1979), a granular material is considered stable if all the diameter ratios are less than 4 or 5.

De Mello (1975) proposed a similar approach to assess the internal stability of gap-graded materials. The GSD was only split at the discontinuity, with $d_{\min}$ used as the splitting diameter. The method proposed by De Mello (1975) was later employed by Sherard (1979) to explain the erosion observed in dams constructed from broadly graded soils. Sherard (1979) proposed that a granular material was stable when the diameter ratios were less than 4 or 5.

5.2.2 Implementation of semi-empirical criteria

In studies on internal stability, a fixed threshold of 4 is commonly adopted for the Kezdi (1979) criterion (e.g. Chang & Zhang, 2013; Fannin & Moffat, 2006; Li & Fannin, 2008; Moraci et al., 2014, 2015) and 5 for the Sherard (1979) criterion (e.g. Moraci et al., 2014, 2015), even though both authors originally suggested a range between 4 and 5.

Chapuis (1992) proposed a novel approach to implementing the criteria established by Kezdi (1979), Sherard (1979) and Kenney & Lau (1985, 1986). This approach involves the calculation of the secant slope of the GSD, denoted S , for the different diameters. For the Kezdi (1979) and Sherard (1979) criteria, S is calculated as $0.15/\log(D'_{15}/d'_{85})$. For the Kenney & Lau (1985, 1986) criterion, S is calculated as $(F_{4d}-F_d)/(4d-d)$. The calculated S derived from the GSD are then compared to the threshold values of the slope calculated for the three criteria. In accordance with the criteria proposed by Sherard (1979) and Kezdi (1979), S must exceed 21.5 % or 24.9 % per cycle to have a stable granular material, respectively. The implementation of the Kenney & Lau (1985, 1986) criterion necessitates S per cycle exceeding $1.66F$ to ensure granular material stability, with F less than 20 % or 30 % depending on the C_u of the material coarse fraction. Figure 5.1 provides a visual reference of the threshold secant slopes calculated for the three criteria using the methods proposed by Chapuis (1992).

After developing a method to assess the probability of internal instability of the material using the criteria developed by Kenney & Lau (1985, 1986) and Burenkova (1993), Wan & Fell

(2004, 2008) proposed equations of probability contours for the $\log(h''):h'$ graph originally proposed by Burenkova (1993). These equations are dependent on a combination of the type of particles, the value of the plasticity index and the percentage of the cohesive or non-cohesive fines fraction in the material. Rönqvist & Viklander (2016) posited that if the probability exceeds 0.70, the material is unstable.

Andrianatrehina et al. (2016) proposed a novel approach to implement the Kezdi (1979) criterion. The value of D'_{15}/d'_{85} is calculated for all the splitting diameters d and are plotted against d , as well as the percentage passing F . If the F value corresponding to $D'_{15}/d'_{85} = 4$ exceeds 5 %, the granular material is considered unstable.

5.2.3 Implementation of semi-empirical criteria

5.2.3.1 Secant slope approaches

The calculation of S has emerged as a valuable tool to assess the internal stability of granular materials (Mandaglio et al., 2018; Moraci et al., 2014; Zhou et al., 2017). In general, S is obtained according to the formulas developed by Chapuis (1992), as presented in section 5.2.2, and then a criterion based on the calculated S is developed.

The criterion developed by Zhou et al. (2017) consists of drawing a three-point curve on the $F:S$ graph (Figure 5.2), where each point corresponds to one of the three criteria. The points for the Sherard (1979) and Kezdi (1979) criteria correspond to $S = 21.5$ % and $S = 24.9$ %, respectively, with the corresponding F values. The point representing the Kenney & Lau (1985, 1986) criterion correspond to the S and F values obtained at $(S/F)_{\min}$. The granular material is considered stable if the three-point curve is above the Kenney & Lau (1985, 1986) criterion ($S = 1.66F$).

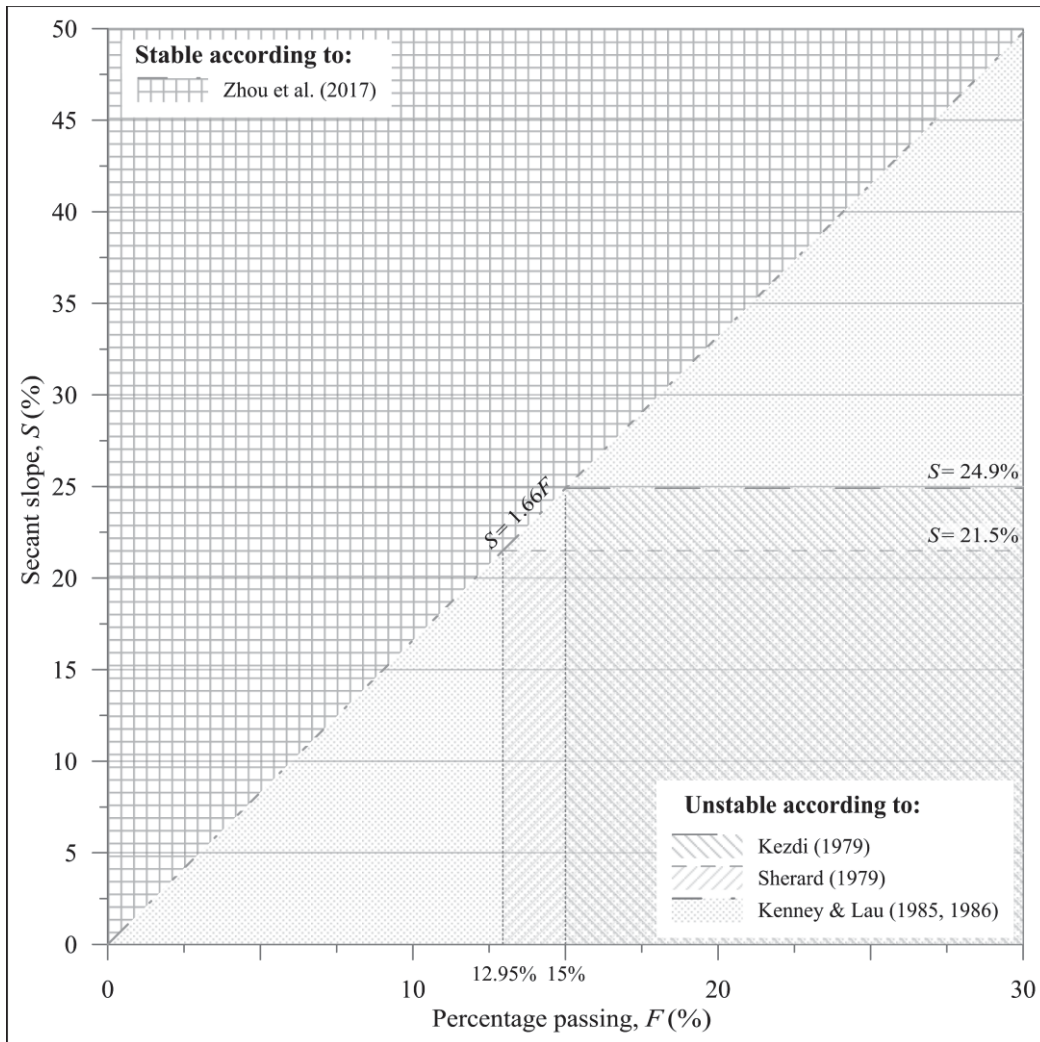


Figure 5.2 Synthetic graph developed by Zhou et al. (2016) to combine three commonly used semi-empirical criteria, using the secant slope methods proposed by Chapuis (1992)

The criterion established by Mandaglio et al. (2018) is an improved version of the one established by Moraci et al. (2014, 2015) (Figure 5.3). In order to assess the internal stability of a granular material, the S and F values corresponding to the minimum of (H/F) and to the maximum of $I_r = D'_{15}/d'_{85}$ are determined. These parameters are only evaluated for F values below 35 %, which is the maximum F of the finer fraction according to Skempton & Brogan (1994). The maximum I_r depends on the shape of the $F:I_r$ graph and its position relative to the limit line $I_r = 5.0$ (Moraci et al., 2015). The mean value of S and the mean value of F are then plotted on the graph called the “butterfly wings chart” of Moraci et al. (2014; Figure 5.3). The

position of the point in relation to different limit lines determines the internal stability of the granular material. Mandaglio et al. (2018) redefined the limit line used to distinguish stable and unstable materials. The granular material is considered stable if the point corresponding to the mean S and F values is located above $S = 1.66F$.

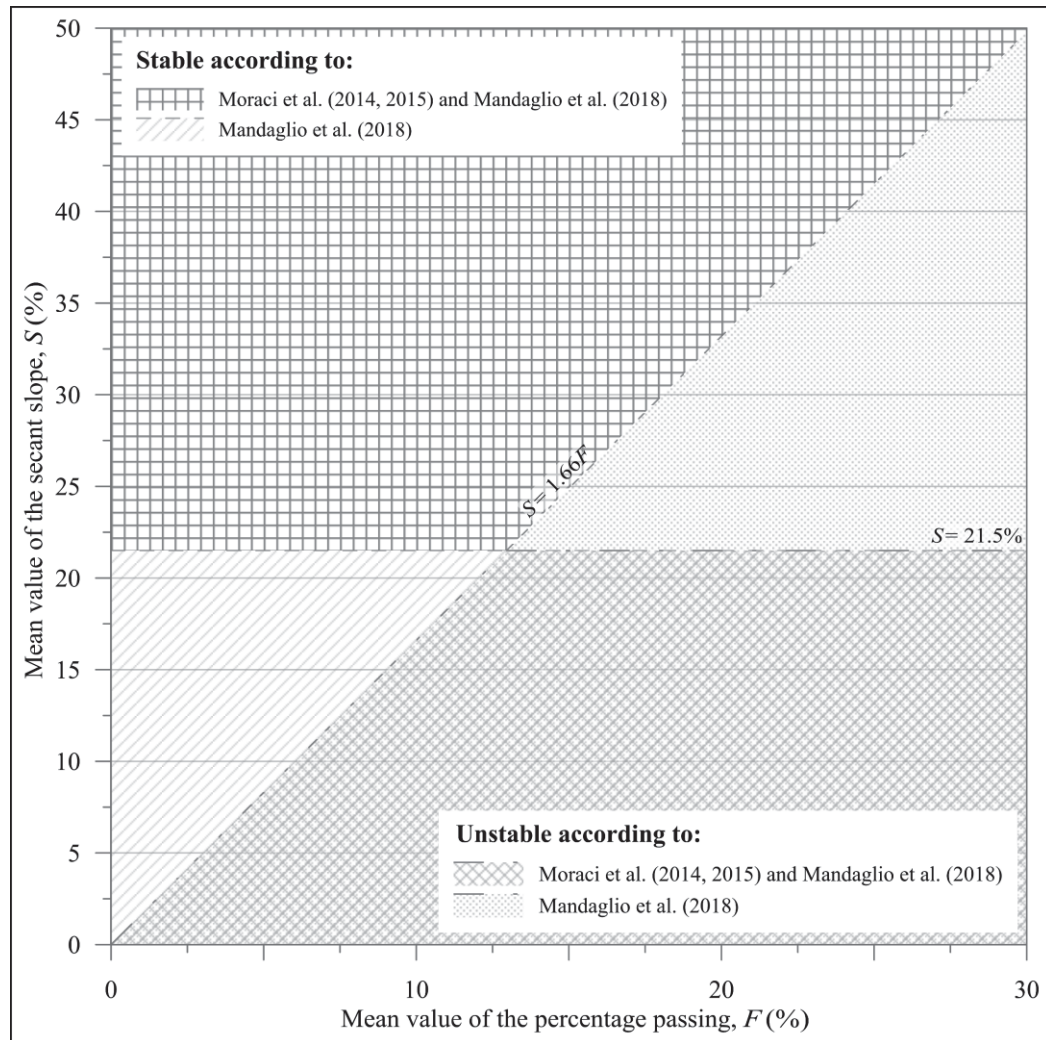


Figure 5.3 “Butterfly wings chart” proposed by Moraci et al. (2014, 2015) and later improved by Mandaglio et al. (2018), using the secant slope methods proposed by Chapuis (1992)

5.2.3.2 Other combined approaches

Li & Fannin (2008) proposed a unified method that integrates the approaches outlined by Kezdi (1979) and Kenney & Lau (1985, 1986) for assessing internal stability. A point

corresponding to the H and F values obtained at $(H/F)_{\min}$ is plotted on the $F:H$ graph (Figure 5.4). This point is then compared with two limit lines in order to assess the internal stability. One of the limit is the $H = F$ line proposed by Kenney & Lau (1986). The other line is derived from the Kezdi (1979) criterion, namely $H = 15\%$. According to Li & Fannin (2008), internal stability is better assessed by comparing H with F for F values below 15% , and by comparing H with 15% for F values above 15% .

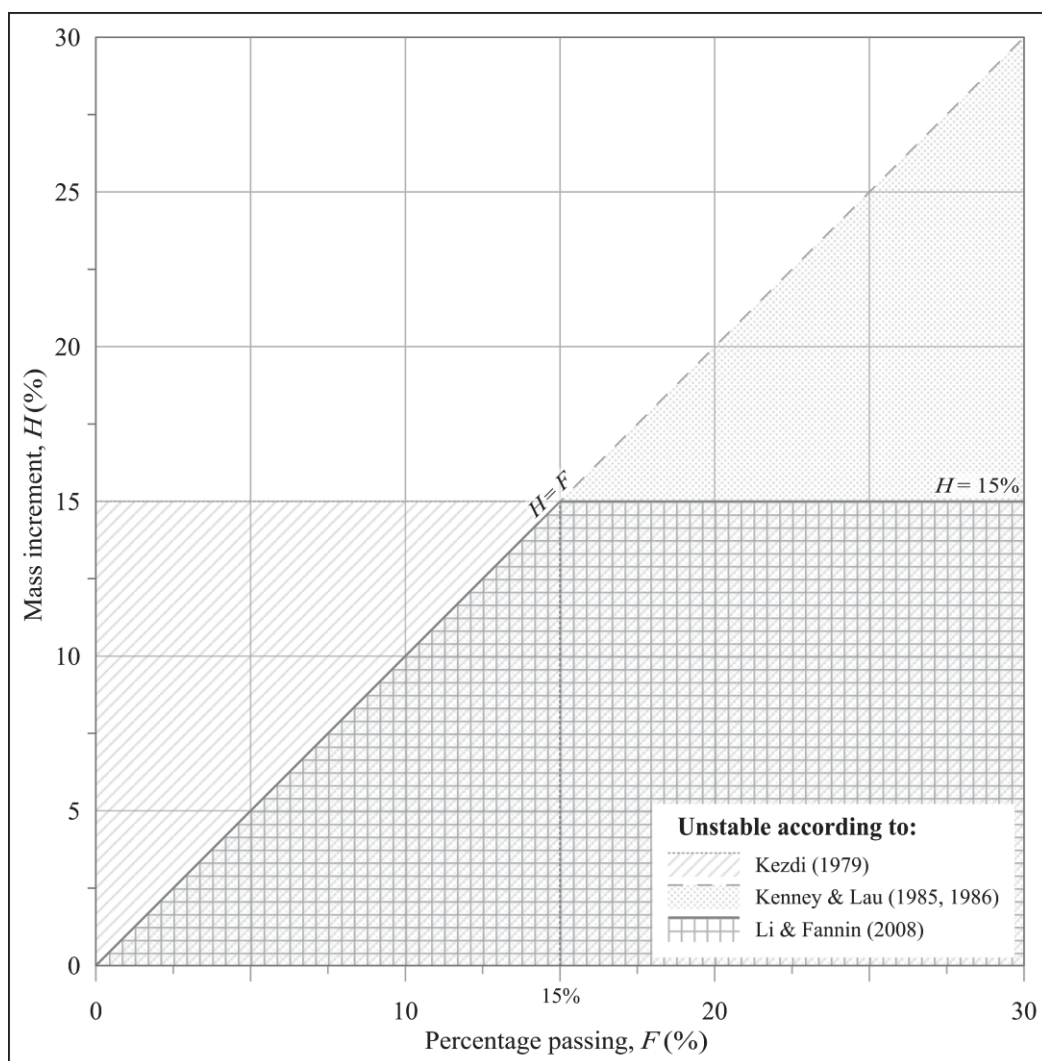


Figure 5.4 Synthetic graph developed by Li & Fannin (2008) to combine two commonly used semi-empirical criteria, using the parameter H defined by Kenney & Lau (1985, 1986)

Chang & Zhang (2013) proposed a new approach to assess the internal stability of materials, with particles ranging from clay to gravel. In this approach, the internal stability of well-graded materials is distinguished from that of gap-graded materials. Both are based on a combination of fines content ($P < 0.063$ mm, %) and a geometric parameter, which differs according to the shape of the GSD. For well-graded materials, the geometric parameter corresponds to $(H/F)_{\min}$, derived from the criterion of Kenney & Lau (1985, 1986), while for gap-graded materials, the geometric parameter is the ratio of the diameters $d_{\max}$ and $d_{\min}$ of the gap, denoted G_r . Figure 5.5 combines the two graphs of the appropriate geometric parameter versus fines content developed by Chang & Zhang (2013), one for continuous GSDs and one for discontinuous GSDs. For each type of material, three zones corresponding to different internal stability regimes are identified. These zones are presented in Figure 5.5: zone A where internal stability depends only on the appropriate geometric parameter, zone B where it depends on both the appropriate geometric parameter and the fines content, and zone C where it depends only on the fines content.

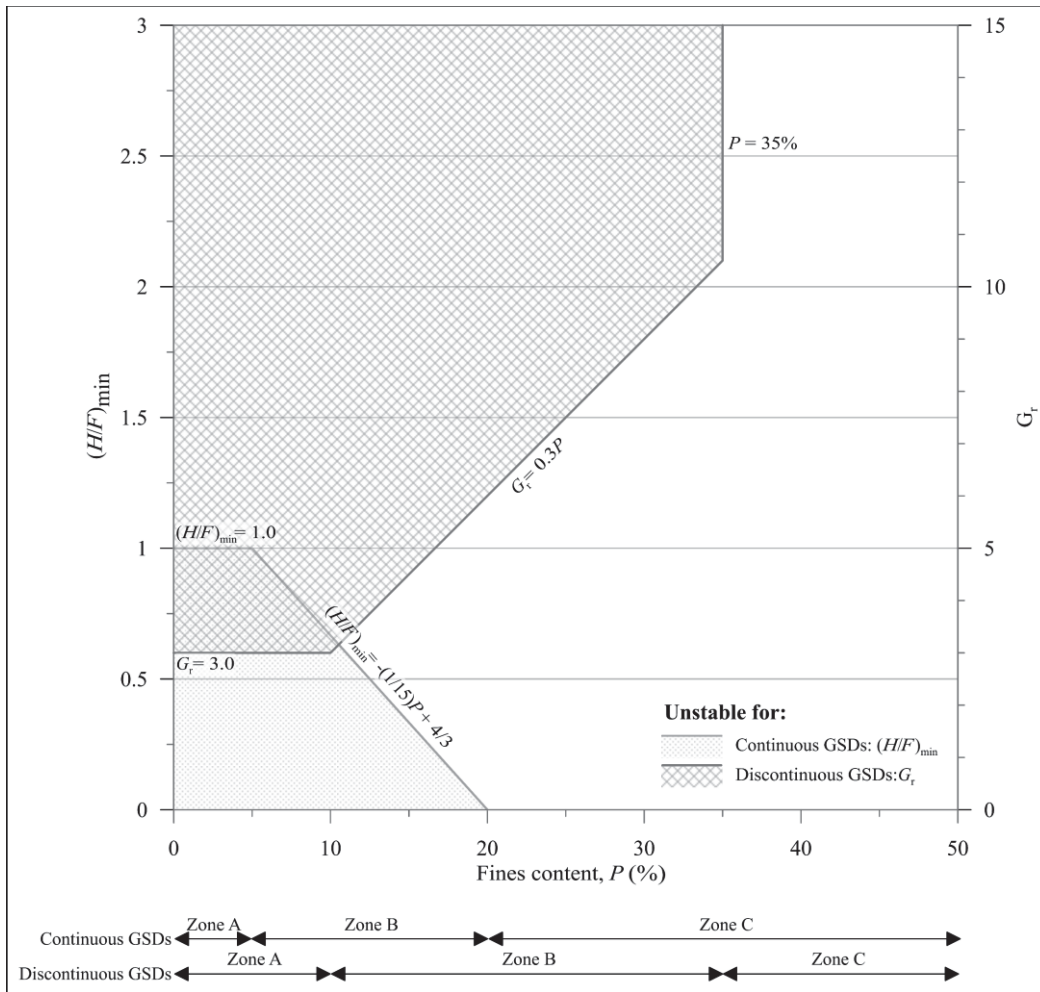


Figure 5.5 Synthetic graph combining the two methods of the Chang & Zhang (2013) criterion for continuous and discontinuous GSDs, using the parameters $(H/F)_{\min}$ and G_r , respectively. Internal stability depends on the appropriate geometric parameter and/or the fines content, defining three distinct zones (A, B and C)

5.3 Database and flow tests

A total of 37 GSDs were analysed to identify a geometric criterion for assessing the internal stability of coarse granular materials. The GSDs were selected based on their minimum particle diameter, which had to be greater than 0.075 mm. The decision to exclude granular materials containing fines was supported by the fact that internal stability of such materials, especially when the fines are cohesive, is more complex to assess (Wan & Fell, 2004, 2008; Chang & Zhang, 2013). Of the 37 GSDs, eight exhibited identical internal stability responses

following the application of the three geometric criteria developed by Kezdi (1979), Sherard (1979), and Kenney & Lau (1985, 1986) and the performance of the flow tests. The remaining 29 GSDs exhibited contrasting responses (Tableau 5.1). The GSDs were then divided into two categories: 16 discontinuous GSDs (Figure 5.6) and 21 continuous GSDs (Figure 5.7).

The 37 GSDs were selected from nine previous studies that investigated suffusion through laboratory flow tests. Based on these flow tests, 19 granular materials were assessed as stable and 18 as unstable.

Most of these tests were performed on compacted materials with natural particles. The materials were placed within seepage cells, which were typically modified permeameters or triaxial cells. The principal modification consisted in integrating an open system for monitoring the migration of fine particles out of the material. The dimensions of the square opening of the filter screen varied according to the shape of the GSD: the smallest particle size of the coarse fraction was generally selected for discontinuous GSD, whereas the d_{40} or a d_{50} was generally selected for continuous GSD. The materials were generally subjected to a downward seepage flow in order to investigate suffusion. The hydraulic gradient was either constant or incrementally increased, depending on the specific objective of each study. A constant hydraulic gradient was commonly employed to examine the internal stability of materials, while an increasing hydraulic gradient was commonly employed to determine the value of the critical hydraulic gradient necessary for the onset of suffusion.

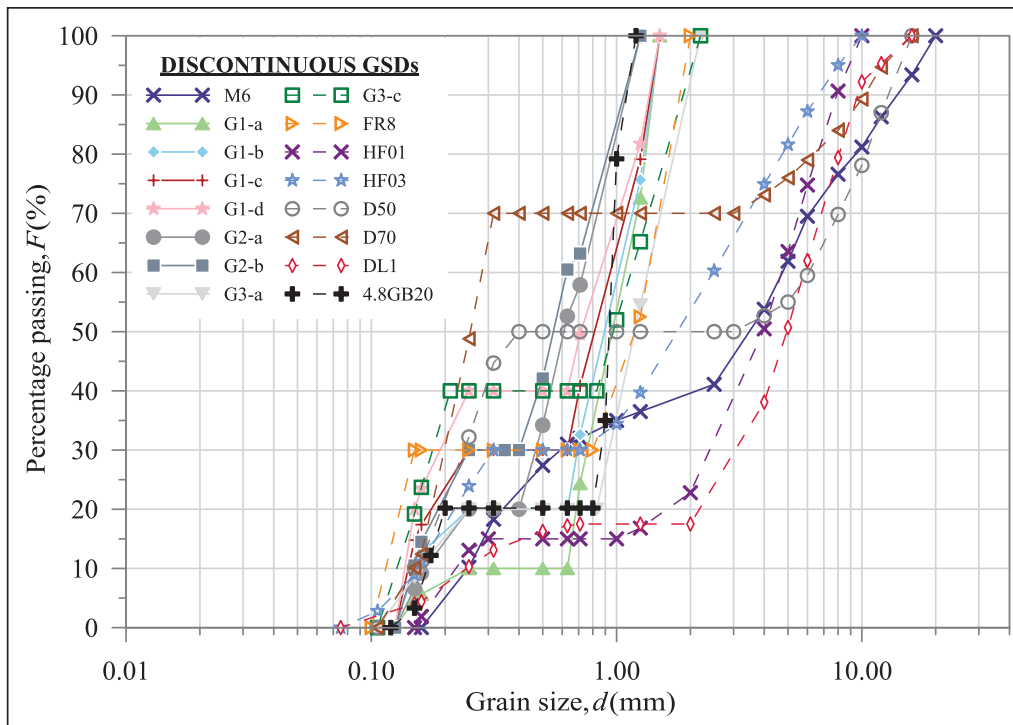


Figure 5.6 Discontinuous GSDs of the internally stable (solid line and markers) and unstable (dotted line and empty markers) granular materials

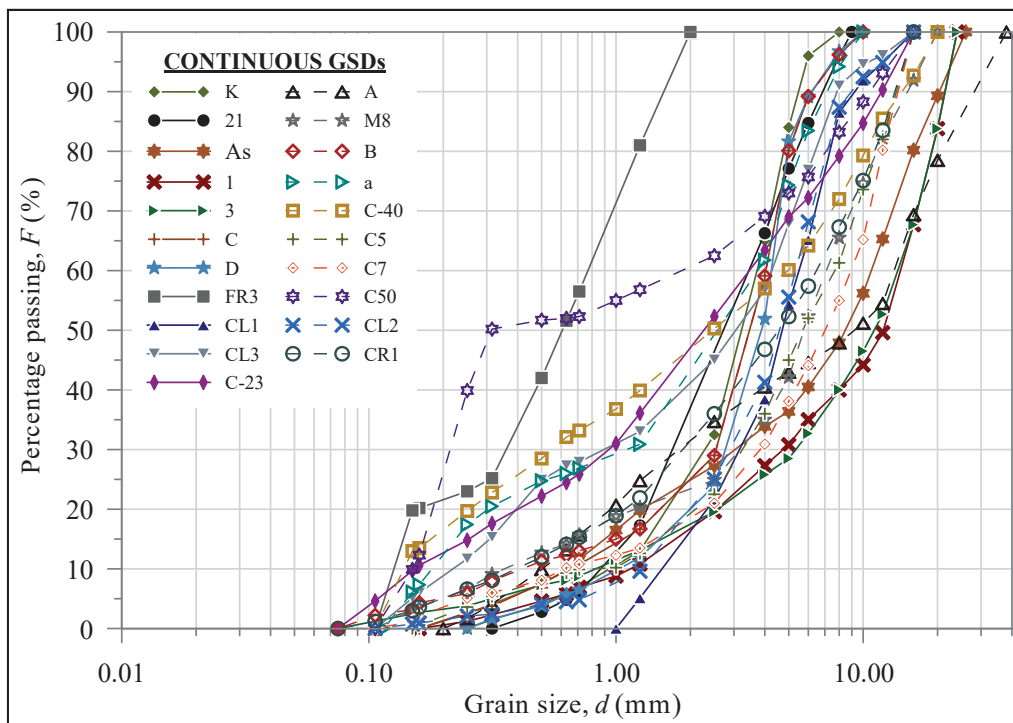


Figure 5.7 Continuous GSDs of the internally stable (solid line and markers) and unstable (dotted line and empty markers) granular materials

Despite these similarities, some differences were noted. Lafleur et al. (1989) used glass beads to reconstitute the materials. The materials examined by Li (2008) and Slangen & Fannin (2016) were placed in a loose state within the seepage cell and then consolidated at different pressures. For compacted materials, different relative densities were targeted. This characteristic was examined in Indraratna, Israr, & Rujikiatkamjorn (2015), as it plays a role in the susceptibility of the material to suffusion. In Skempton & Brogan (1994), an upward water flow was employed to investigate the critical hydraulic gradient while assessing the internal stability of the granular materials. Kenney & Lau (1985), Lafleur et al. (1989) and Honjo et al. (1996) applied vibrations in addition to a water flow to induce erosion in unstable materials. Finally, Andrianatrehina et al. (2016) investigated the internal stability of granular materials using a seepage cell with a closed system.

5.4 Assessment of internal stability using existing methods

Tableau 5.1 presents the internal stability assessments for the 37 GSDs based on flow tests and geometric criteria, including both the semi-empirical criteria and the derived approaches. The semi-empirical criteria include those of Kezdi (1979; K^*), Sherard (1979; S^*), Kenney & Lau (1985, 1986; $K\&L$), De Mello (1975; DM), Burenkova (1993; B^*), and Honjo et al. (1996; $H\&al$). The derived approaches, which modified or combined these methods, include the criteria of Andrianatrehina et al. (2016; $A\&al$), Wan & Fell (2004, 2008; $W\&F$), Zhou et al. (2017; $Z\&al$), Mandaglio et al. (2018; $M\&al$), Li & Fannin (2008; $L\&F$), and Chang & Zhang (2013; $C\&Z$). Additionally, a new internal stability criterion developed in this study was applied. This method is explained in section 5.5.

The percentage of stability assessments that were consistent with the flow test results was calculated for each geometric criterion. Consistency percentages were calculated for continuous (P_C , %) and discontinuous (P_D , %) GSDs. For each type of GSD, consistency percentages were also calculated for stable (P_{C-S} and P_{D-S} , %) and unstable (P_{C-U} and P_{D-U} , %) GSDs as determined by the flow tests.

Tableau 5.1 Internal stability of coarse granular materials (suite)

GSDs	Laboratory results	Semi-empirical criteria ^{a,b}					Derived approaches ^{a,b}					New method		
		K*	S*	K&L	DM ^c	B*	H&al ^c	A&al	W&F	Z&al	M&al		L&F	C&Z
DISCONTINUOUS	M6	U	U	U	S	S	U	U	S	U	U	S	U	S
	G1-a	U	U	U	S	S	S	U	S	S	S	S	S	S
	G1-b	U	S	U	S	S	S	U	S	U	S	U	S	S
	G1-c	U	S	U	S	U	S	U	S	U	U	U	S	S
	G1-d	S	S	U	S	U	S	S	S	U	U	S	S	S
	G2-a	S	S	S	S	U	S	S	S	S	S	S	S	S
	G2-b	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	G3-a	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
	$P_{D,S}$	38 %	63 %	25 %	88 %	50 %	75 %	38 %	88 %	38 %	50 %	63 %	75 %	88 %
	G3-c	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
	FR8	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
	HF01	U	U	U	U	U	S	U	U	U	U	U	U	U
	HF03	U	S	U	U	S	S	U	S	U	U	S	S	U
	D50	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S	S	U	U
	D70	U	U	S	U	U	U	U	S	S	S	S	U	U
	DL1	U	U	U	U	U	S	U	U	U	U	U	S	U
	4.8GB20	U	S	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
	$P_{D,U}$	100 %	75 %	88 %	100 %	88 %	63 %	100 %	75 %	88 %	75 %	63 %	75 %	100 %
	P_D	69 %	69 %	56 %	94 %	69 %	69 %	69 %	81 %	63 %	63 %	63 %	75 %	94 %
Percentage of correct assessment		62 %	68 %	59 %	N/A	59 %	N/A	70 %	59 %	62 %	62 %	68 %	86 %	

Notes: ^a S means stable. U means unstable. Shaded box means incorrect prediction. ^b The highest consistency percentages for each category are shown in bold. ^c Criteria only applicable on discontinuous GSDs.

5.4.1 Conservatism of the semi-empirical methods

Of the 18 unstable GSDs, 16 exhibited $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ values greater than 4.0, with 14 surpassing 5.0 (thresholds for instability). Conversely, only 11 of the 19 stable GSDs had a $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ below 5.0, and this number dropped to seven when the 4.0 threshold was applied. These results indicated that the self-filtration methods tend to be overly conservative, a trend previously observed in several studies (Moraci et al., 2014, 2015; Ni et al., 2018; Wan & Fell, 2004, 2008; Zhou et al., 2017). This conservatism was also observed for B*. Among the semi-empirical methods, K&L was the only one that showed a similar consistency in identifying both the stable and unstable GSDs (Tableau 5.1). Overall, S* proved to be the most reliable semi-empirical method, with a consistency of 68 % (Tableau 5.1).

5.4.2 Comparison between semi-empirical methods and recent approaches

The modifications introduced by the derived approaches did not enhance the consistency of the semi-empirical methods. For instance, Z&al and M&al, which combined two or three semi-empirical criteria, followed a trend similar to that of K&L (Tableau 5.1). This is probably because both approaches rely on a limit line originally derived from the K&L to distinguish stable from unstable GSDs. The probabilistic approach of W&F, which incorporated parameters from B* along with a threshold of 0.70 (Rönnqvist & Viklander, 2016), achieved a consistency similar to that of B* (59 %). L&F, which was developed to overcome the limitations of K* and K&L, reached a consistency of 62 %, comparable to K* (62 %) and slightly higher than K&L (59 %). Only A&al and C&Z demonstrated better overall consistency than the semi-empirical methods from which they were derived (Tableau 5.1). C&Z applied K&L exclusively to the continuous GSDs and used a gap ratio approach similar to H&al (with a threshold of 3.0) for the discontinuous GSDs, resulting in a higher overall consistency. A&al mitigated the conservative nature of K* by considering a GSD as unstable only when the F value corresponding to $D'_{15}/d'_{85} = 4$ exceeded 5 % (Tableau 5.1). These adjustments made C&Z and A&al the most reliable derived approaches, even surpassing S, the most consistent among the semi-empirical methods.

5.4.3 Comparison of methods for discontinuous and continuous GSDs

For the discontinuous GSDs, several methods achieved at least 75 % of correct assessment. These included two of the three methods specifically applicable to discontinuous GSDs, DM (94 %) and C&Z (75 %), as well as the derived approach of W&F (81 %). Conversely, the remaining methods exhibited lower consistency percentages, with an average of 66 % (Tableau 5.1).

Both the semi-empirical methods and the derived approaches generally achieved a lower percentage of correct assessment for continuous GSDs compared to discontinuous GSDs (Tableau 5.1). The highest consistency percentages were obtained with the criteria of A&al (71 %) followed by S* (67 %). When stable and unstable continuous GSDs are considered separately, different methods proved to be effective. K&L and the derived approaches of Z&al, M&al, L&F, and C&Z showed the highest consistency percentages in identifying the stable continuous GSDs (over 82 %), while K* and S* were more effective in identifying unstable GSDs (80 %).

5.5 Assessment of internal stability using existing methods

Based on the consistency percentages (Tableau 5.1), it appears preferable to adopt distinct methods for evaluating the internal stability of the discontinuous and the continuous GSDs, such as C&Z. DM, which achieved the highest consistency percentage for discontinuous GSDs, was selected as part of the proposed geometric criterion. For continuous GSDs, combining K* or S* with K&L appears to be an effective approach.

Tableaux 5.2 and 5.3 present the values of (D'_{15}/d'_{85}) and $(H/F)_{\min}$ for the discontinuous GSDs and the continuous GSDs, respectively. The $(H/F)_{\min}$ values were evaluated following the method described by K&L. For (D'_{15}/d'_{85}) , the value of the gap, noted $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$, was evaluated as in DM for the discontinuous GSDs (Tableau 5.2). For the continuous GSDs, the maximum value, denoted $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{max}}$, was evaluated according to the methods described by K* and S* (Tableau 5.3). However, as these self-filtration criteria were found to be overly

conservative, the $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ was also evaluated for $F \geq 5\%$ (Tableau 5.3), matching the percentage passing threshold used by A&al.

5.5.1 Selection of a semi-empirical criterion for discontinuous GSDs

Among the 16 discontinuous GSDs, all unstable GSDs exhibited a $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$ greater than 4.0 (threshold for instability), while seven of the eight stable GSDs had a value below this threshold (Tableau 5.2). Concerning $(H/F)_{\min}$, seven of the eight unstable GSDs revealed a value less than 1.0 (threshold for instability), whereas only three of the eight stable GSDs exceeded this threshold. Consequently, the internal stability of the discontinuous GSDs will be assessed using $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$, without modification or combination with other parameters, in the proposed geometric criterion.

Tableau 5.2 Evaluation of $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$ and $(H/F)_{\min}$ for the discontinuous GSDs

UNSTABLE					STABLE				
GSDs	$(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}^{\text{a,b}}$		$(H/F)_{\text{min}}^{\text{a,b}}$		GSDs	$(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}^{\text{a,b}}$		$(H/F)_{\text{min}}^{\text{a,b}}$	
G3-c	5.1	@ 40	0.33	@ 30	M6	3.4	@ 25	0.86	@ 20
FR8	7.0	@ 30	0	@ 30	G1-a	3.3	@ 10	1.0	@ 5
HF01	9.2	@ 15	0.07	@ 15	G1-b	3.4	@ 20	0.75	@ 13
HF03	4.9	@ 30	0.77	@ 20	G1-c	3.3	@ 30	0.81	@ 17
D50	17.7	@ 50	0.67	@ 30	G1-d	3.3	@ 40	0.77	@ 24
D70	15.7	@ 70	1.33	@ 30	G2-a	2.1	@ 20	2.33	@ 30
DL1	7.6	@ 18	0.08	@ 16	G2-b	2.2	@ 30	1.87	@ 30
4.8GB20	4.8	@ 20	0	@ 20	G3-a	4.4	@ 20	0.33	@ 15

Notes: ^a @ correspond to the percent passing F of $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$ or $(H/F)_{\min}$. ^b Bold values indicate inconsistency with the results of the flow tests.

Tableau 5.3 Evaluation of $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ and $(H/F)_{\min}$ for the continuous GSDs

UNSTABLE					STABLE								
GSDs	$(D'_{15}/d'_{85})_{\max}^{a,b}$			$(H/F)_{\min}^{a,b}$		GSDs	$(D'_{15}/d'_{85})_{\max}^{a,b}$			$(H/F)_{\min}^{a,b}$			
	Whole GSDs	$F \geq 5\%$					Whole GSDs	$F \geq 5\%$					
A	3.5	@ 41	3.5	@ 41	0.57	@ 30	K	9.0	@ 2	3.0	@ 5	2.33	@ 30
M8	6.5	@ 13	6.5	@ 13	0.75	@ 16	21	2.7	@ 3	2.2	@ 5	2.02	@ 30
B	12.5	@ 2	5.9	@ 5	1.09	@ 8	As	4.6	@ 3	3.9	@ 5	0.92	@ 20
a	5.4	@ 20	5.4	@ 20	0.51	@ 21	1	7.6	@ 1	4.9	@ 5	1.26	@ 20
C-40	3.4	@ 29	3.4	@ 29	0.62	@ 30	3	14.3	@ 3	8.9	@ 5	1.18	@ 13
C5	9.7	@ 1	7.5	@ 5	1.33	@ 5	C	5.5	@ 3	4.0	@ 5	2.12	@ 30
C7	11.4	@ 1	9.8	@ 5	1.06	@ 10	D	5.3	@ 1	2.8	@ 6	2.33	@ 30
C50	6.1	@ 9	8.7	@ 57	1.63	@ 20	FR3	2.8	@ 23	2.8	@ 23	1.53	@ 20
CL2	11.5	@ 1	3.2	@ 20	2.12	@ 30	CL1	1.7	@ 5	1.7	@ 5	2.19	@ 30
CR1	8.0	@ 1	5.7	@ 5	1.44	@ 20	CL3	3.5	@ 25	3.5	@ 25	0.89	@ 25
							C-23	4.1	@ 10	4.1	@ 10	1.05	@ 18

Notes: ^a@ correspond to the percent passing F of $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ or $(H/F)_{\min}$. ^bBold values indicate inconsistency with the results of the flow tests.

5.5.2 Combination of two semi-empirical criteria for continuous GSDs

Establishing $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for the 21 continuous GSDs revealed that only four of the eleven stable GSDs had values less than 4.0 (threshold for stability) over the entire GSD. This number increased to seven when considering $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$, and to ten when applying the 5.0 threshold from S. Conversely, evaluating $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ increased the number of unstable continuous GSDs with values below 5.0 from two to three. However, further analysis revealed that these unstable continuous GSDs generally had a value of $(H/F)_{\min}$ less than 1.0 (threshold for instability; Tableau 5.3).

Tableau 5.4, inspired by W&F (2004), presents the probability of continuous GSDs being unstable based on $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ (thresholds of 4.0 and 5.0), and $(H/F)_{\min}$ (threshold of 1.0). Continuous GSDs with both $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ less than 5.0 and $(H/F)_{\min}$ greater than 1.0 (thresholds for stability) were generally stable (Tableau 5.4). In contrast, the GSDs with $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ greater than 5.0 were unstable, regardless of $(H/F)_{\min}$ being greater or less than 1.0 (83 % and 100 %, respectively). When both $(D'_{15}/d'_{85})_{\max} < 5.0$ and $(H/F)_{\min} < 1.0$, the probability of instability was 50 %.

Tableau 5.4 Probability of internal instability of continuous GSDs based on the combined parameters $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F > 5\%$ and $(H/F)_{\min}$ from the three commonly used semi-empirical criteria

Probability of the 21 continuous GSDs to be internally unstable			$(H/F)_{\min}$	
			≥ 1.0	< 1.0
$(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$	< 4.0	S	5	2
		U	1 (17 %)	2 (50 %)
	Between 4.0 and 5.0	S	3	0
		U	0 (0 %)	0 (0 %)
	> 5.0	S	1	0
		U	5 (83 %)	2 (100 %)

Thus, the 5.0 threshold for $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ was adopted in the proposed geometric criterion, as the 4.0 threshold was overly conservative even though $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ was only evaluated for $F \geq 5\%$. However, relying solely on $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ would misclassify three unstable GSDs as stable, two of which also had $(H/F)_{\min}$ less than 1.0 (threshold for instability). Therefore, the proposed geometric criterion integrates both $(H/F)_{\min}$ and $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ to ensure a more consistent assessment of continuous GSD stability.

5.5.3 Formulation of the unified criterion

The proposed geometric criterion assesses discontinuous GSDs as stable if $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$ is less than 4.0 and continuous GSDs as stable if both $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ is less than 5.0 and $(H/F)_{\min}$ is greater than 1.0. Applying this method to 37 GSDs results in 86 % consistency with respect to flow tests (Tableau 5.1).

5.6 Discussion

Only the discontinuous GSD G3-a was not properly assessed by the proposed geometric criterion ($(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}} > 4.0$; Tableau 5.2). Honjo et al. (1996) classified G3-a as unstable according to their geometric criterion ($d_{\max}/d_{\min} > 4.0$), although it exhibited stable behavior in flow test results (minimal fine erosion and settlement). In this study, G3-a was considered stable based on its experimental behavior. This discrepancy probably reflects its marginal stability rather than a truly stable condition.

Among the 21 continuous GSDs, four were not correctly assessed (Tableaux 5.1 1 and 5.3): three stable GSDs (As, 3 and CL3) and one unstable GSD (CL2). As with G3-a, the three stable GSDs may be marginally stable. GSD As, initially classified as unstable by Kenney & Lau (1985), was later classified as stable after further reinterpretation of the flow tests by Kenney & Lau (1986), which highlights the difficulty of assessing its internal stability with certainty. GSD 3 had a $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ for $F \geq 5\%$ greater than 5.0, but a $(H/F)_{\min}$ greater than 1.0. According to Kenney & Lau (1985), GSD 3 was originally tested by Loebotsjkov (1969) and was on the limit between stable and unstable GSDs, which may explain its

misclassification. For CL3, Andrianatrehina et al. (2016) reported a laboratory value close to their threshold, suggesting that it may also be marginally stable. In the case of GSD CL2, $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ was 11.5 when considering the entire GSD but dropped to 3.2 for $F \geq 5\%$. This drop led to an incorrect classification as stable, demonstrating the limitation of evaluating $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ only for $F \geq 5\%$.

Except for CL2, which was unstable but misclassified as stable by applying the proposed geometric criterion, the other four were stable GSDs misclassified as unstable. In these cases, the proposed geometric criterion remained conservative.

5.7 Conclusion

The semi-empirical criteria tend to assess the internal stability of the coarse granular materials differently from the flow test results. The self-filtration criteria of Kezdi (1979; K*) and Sherard (1979; S*) are overly conservative, whereas the criterion of Kenney & Lau (1985, 1986; K&L) tends to be insufficiently conservative, specifically for the continuous GSDs. The derived approaches, developed in the past two decades, have performed as well as, or slightly better than, the semi-empirical criteria from which they were derived. A more consistent assessment is often achieved by applying geometric criteria over a restricted percentage passing range, or by distinguishing between continuous and discontinuous grain size distributions (GSDs).

To improve consistency, a new geometric criterion which differentiates between discontinuous and continuous GSDs is proposed for assessing the internal stability of coarse granular materials:

- 1) discontinuous GSDs are considered stable if the value of $(D'_{15}/d'_{85})_{\text{gap}}$ is less than 4.0, following the criterion of De Mello (1975; DM), which was found to be the most reliable for such distributions;
- 2) continuous GSDs are considered stable if $(D'_{15}/d'_{85})_{\max}$ (evaluated for $F \geq 5\%$) is less than 5.0 and $(H/F)_{\min}$ is greater than 1.0. This combined approach is based on a modified version

of Sherard's criterion (1979; S^*) to reduce its conservativeness, together with the criterion of Kenney & Lau (1985, 1986; K&L).

This proposed method offers a more balanced and reliable framework for assessing the internal stability of coarse granular materials. Its distinction between continuous and discontinuous GSDs, combined with targeted thresholds, enhances both the clarity and consistency of the assessment. While further validation with larger datasets would be beneficial, the current results demonstrate promising potential for practical application in geotechnical design.

Author contributions Céline Bouin: Conceptualization, Methodology, Formal analysis and investigation, Writing-review and editing. Yannic Ethier: Writing-review and editing, Supervision, Funding acquisition, Resources. Jean-Sébastien Dubé: Writing-review and editing, Supervision. François Duhaime: Writing-review and editing, Supervision. Simon Weber: Writing-review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding This research was funded by MITACS:IT02503

Data availability The data that support the finding of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgments This research was supported by the Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ). The authors wish to express their gratitude for the above financial support.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no conflict of interest.

CONCLUSION

Le travail présenté dans cette thèse avait pour objectif principal d'améliorer l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires destinés à être utilisés comme matériaux de remblai, la stabilité interne représentant une condition essentielle pour limiter les phénomènes d'érosions internes, notamment la suffusion.

La revue de la littérature sur la suffusion, et plus particulièrement sur l'évaluation de la stabilité interne, a mis en évidence de nombreuses limites dans les deux approches actuellement utilisées en recherche et en pratique, à savoir l'approche expérimentale, fondée sur des essais d'écoulement, et l'approche géométrique, reposant sur l'application de critères géométriques. Les essais d'écoulement présentent une forte hétérogénéité dans les dispositifs expérimentaux utilisés pour étudier la suffusion, tant au niveau des montages que des procédures de préparation appliquées aux matériaux. De plus, les critères utilisés pour distinguer les matériaux stables des matériaux instables sont souvent imprécis, voire subjectifs, et aucun consensus ne se dégage quant aux paramètres à observer ni aux valeurs seuils à appliquer. Quant aux critères géométriques, ils sont nombreux et dérivent de plus en plus d'approches semi-empiriques, en particulier celles de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, qui comptent parmi les critères historiques les plus couramment utilisés en recherche et en pratique. Ces critères dérivés modifient et/ou combinent les approches semi-empiriques dans l'objectif de réduire leur caractère souvent jugé trop conservateur, notamment les trois précitées. Malgré la multiplication des critères géométriques, aucun consensus ne se dégage quant à celui ou ceux à privilégier pour évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires. En définitive, qu'il s'agisse de l'approche expérimentale ou de l'approche géométrique, l'absence d'unification et la variabilité des méthodes peuvent mener à des évaluations divergentes de la stabilité interne pour un même matériau.

Ces constats ont conduit à structurer la recherche autour de deux sous-objectifs, chacun correspondant à l'une des approches existantes pour évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires. Le premier, abordé dans les articles 1 et 2 (Chapitres 3 et 4), visait à développer

un critère expérimental rigoureux, fondé sur des essais d'écoulement réalisés notamment selon une procédure assurant une saturation complète des matériaux testés. Le second, présenté dans l'article 3 (Chapitre 5), portait sur l'élaboration d'un critère géométrique plus fiable, issu d'une évaluation critique d'approches historiques, en particulier celles de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau, qui constituent une base solide pour ce développement, ainsi que de leurs dérivés.

Plus spécifiquement, la première étape du premier sous-objectif, présentée dans l'article 1 (Chapitre 3), consistait à évaluer diverses méthodes de désaération de l'eau de percolation et de saturation, recommandées par les normes et rapportées dans la littérature lors d'essais d'écoulement. Une saturation complète est généralement recherchée en laboratoire lors des essais d'écoulement, quelle que soit la finalité de l'étude, car elle correspond à un état généralement atteint dans les ouvrages en remblai. L'évaluation des méthodes a permis de confirmer qu'une eau de percolation doit être désaérée pour assurer une saturation complète des matériaux granulaires. La méthode de désaération par cavitation sous vide a été retenue pour la suite de la recherche, en raison de sa simplicité et de sa rapidité de mise en œuvre. En tenant compte de cette méthode, deux méthodes de saturation ont été identifiées comme optimales, quel que soit le matériau testé : l'une reposant sur un écoulement ascendant d'eau désaérée combiné à une mise sous vide et l'autre couplant une purge de CO₂ préalable avec un écoulement ascendant d'eau désaérée. Cette dernière permet également de saturer un matériau granulaire en un temps réduit, y compris en présence de particules de diamètre inférieur à 0,075 mm. Ce gain de temps constitue un avantage significatif pour ce type d'essais d'écoulement, dont la durée peut s'avérer considérable selon les procédures employées, les matériaux testés et/ou les objectifs poursuivis. Par ailleurs, le système hydraulique utilisé dans cette recherche s'est révélé essentiel pour fournir de l'eau désaérée tout en limitant sa réaération. Quant au dispositif expérimental mis en place pour suivre l'évolution du degré de saturation, il s'est avéré pertinent pour déterminer avec précision le moment où la saturation complète est atteinte. Enfin, l'étude a permis de confirmer que les matériaux reconstitués avec des billes de verre peuvent être saturés par un simple écoulement ascendant d'eau désaérée.

À noter que les informations issues de la norme ASTM D2434 utilisées dans l'article 1 (Chapitre 3) proviennent de la version de 2019, en vigueur au moment de l'écriture de l'article. Une nouvelle version, publiée en 2022, comporte de nombreuses modifications. Elle inclut notamment des recommandations sur certains aspects abordés dans l'article 1 (Chapitre 3), tels que l'utilisation d'un réservoir à charge constante de type cellule de Mariotte pour contrôler l'entrée d'eau, la possibilité de combiner l'écoulement d'eau avec une purge de CO₂ pour saturer les matériaux granulaires, ou encore l'application de la méthode proposée par Chapuis et al. (1989) et Chapuis (2004) pour évaluer la saturation de matériaux mis en place dans un perméamètre à parois rigides. Ainsi, les nouvelles recommandations relatives à l'étape de saturation dans cette version de la norme ASTM D2434 sont en adéquation avec les conclusions dégagées de l'article 1 (Chapitre 3).

Les constats établis dans le cadre de la recherche de l'article 1 (Chapitre 3) ont directement orienté le choix des procédures expérimentales mises en œuvre dans la phase expérimentale de l'article 2 (Chapitre 4). Bien que les matériaux y soient reconstitués à partir de billes de verre, la méthode utilisant une purge de CO₂ a été retenue en raison de son efficacité à assurer une saturation complète en un temps réduit, indépendamment de la courbe granulométrique du matériau. Le dispositif de suivi du degré de saturation a également été conservé, afin de déterminer avec précision le moment où la saturation complète est atteinte et de démarrer ainsi l'essai d'écoulement. Quant à l'eau de percolation utilisée pour la suite de l'essai, elle a été désaérée par cavitation sous vide, en raison de l'efficacité de cette méthode, puis fournie par le même système hydraulique afin d'appliquer une charge constante tout en limitant la réaération de l'eau.

La deuxième étape du premier sous-objectif, présentée dans l'article 2 (Chapitre 4), visait à développer un critère expérimental rigoureux permettant d'évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires au moyen d'essais d'écoulement. Ce critère a été établi à partir de plusieurs paramètres sensibles à la migration des particules fines, caractérisant essentiellement l'état interne des matériaux. Pour qu'un matériau soit considéré comme stable, il doit satisfaire simultanément quatre conditions, portant sur : la perte globale des particules fines, leur

redistribution verticale dans le matériau, l'évolution de la portion centrale du matériau et son volume global. Chacune de ces conditions repose sur deux paramètres expérimentaux. Les valeurs seuils ont été établies par comparaison des résultats d'essais d'écoulement réalisés dans le cadre de cette recherche sur des matériaux sélectionnés dans la littérature et classés selon leur stabilité interne, telle qu'elle a été établie expérimentalement dans les études d'origine. Par ailleurs, le développement de ce critère expérimental a permis de mettre en évidence une forte cohérence entre les réponses expérimentales et les évaluations issues des critères géométriques de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau. Ces résultats confirment que ces trois approches historiques constituent une base pertinente pour le développement du critère géométrique dérivé proposé dans l'article 3 (Chapitre 5).

Le second sous-objectif, présenté dans l'article 3 (Chapitre 5), consistait à évaluer l'efficacité de différents critères géométriques, en s'appuyant en particulier sur les critères semi-empiriques de Kezdi, Sherard et Kenney & Lau ainsi que leurs dérivés proposés dans la littérature, en vue de développer un critère plus fiable pour évaluer la stabilité interne des matériaux grossiers à partir de caractéristiques granulométriques. L'analyse de pourcentages de concordance entre les évaluations expérimentales et géométriques de la stabilité interne de matériaux granulaires grossiers, sélectionnés dans la littérature et dont la stabilité avait été préalablement établie par des essais d'écoulement, a mis en évidence que cette stabilité reste imparfaitement prédite, même par les critères dérivés censés améliorer cette évaluation. Toutefois, cette analyse a révélé que la forme de la courbe granulométrique constitue un facteur déterminant dans cette évaluation. Elle a également permis d'identifier certains critères comme étant plus performants pour évaluer la stabilité interne, et d'autres pour identifier l'instabilité. Ces constats ont conduit au développement d'un nouveau critère géométrique reposant sur deux méthodes distinctes. La première correspond au critère semi-empirique de De Mello, basé sur le même principe que le critère de Kezdi, identifié comme le plus performant pour les matériaux à courbe granulométrique discontinue, auxquels il est exclusivement destiné. La seconde, destinée aux courbes continues, a nécessité au préalable un ajustement des critères de Kezdi et de Sherard, afin de les rendre moins conservateurs. Cet ajustement s'inspire d'une approche dérivée du critère de Kezdi, proposée pour en réduire le caractère conservateur.

L'efficacité à prédire l'instabilité interne des matériaux granulaires a ensuite été évaluée pour les versions ajustées, ainsi que pour le critère original de Kenney & Lau, à l'aide d'une analyse probabiliste. À l'issue de cette analyse, il a été déterminé qu'une méthode combinant uniquement le critère ajusté de Sherard et le critère original de Kenney & Lau permettait une évaluation plus fiable de la stabilité interne pour les matériaux à courbe granulométrique continue. Cette méthode conserve toutefois une certaine prudence, puisque l'ajustement du critère de Sherard, visant à en réduire le caractère trop conservateur, est compensé par une exigence de validation conjointe avec celui de Kenney & Lau. L'utilisation différenciée de ces deux méthodes selon la forme de la courbe granulométrique, ainsi que leur combinaison, tenant compte des limites et des avantages des approches historiques, a permis de proposer un critère plus fiable pour l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires grossiers.

En résumé, les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse sur l'évaluation de la stabilité interne ont permis :

- 1) d'identifier des limites majeures des approches expérimentales et géométriques actuellement utilisées en recherche et en pratique;
- 2) de proposer des méthodes de saturation efficaces et reproductibles;
- 3) de développer un critère expérimental rigoureux, fondé sur des paramètres mesurables;
- 4) de développer un critère géométrique dérivé plus fiable, tenant compte de la forme de la courbe granulométrique.

En définitive, l'ensemble de ces outils, développés séparément mais de manière complémentaire, constitue une base solide pour améliorer la fiabilité de l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires, tant en recherche qu'en pratique, et pour orienter les recherches futures vers une standardisation des méthodes d'évaluation.

RECOMMANDATIONS

Afin d'approfondir l'évaluation de la stabilité interne des matériaux granulaires à des fins d'utilisation comme remblais de construction, plusieurs recommandations sont proposées à la suite de ce travail. Elles découlent en grande partie de choix méthodologiques effectués au cours de cette recherche (mise en place à sec et de façon lâche, utilisation de billes de verre et sélection de courbes granulométriques dépourvues de particules de diamètre inférieur à 0,075 mm), souvent dictés par des contraintes expérimentales, mais qui permettent malgré tout de rester du côté conservateur.

Il serait pertinent d'évaluer l'efficacité des méthodes de saturation couplant un écoulement ascendant d'eau désaérée à une mise sous vide ou à une purge de CO₂ sur des matériaux humides, état représentatif de la mise en place et du compactage des remblais. Une telle étude permettrait de vérifier si ces méthodes demeurent performantes en conditions initiales humides et, le cas échéant, d'estimer le temps nécessaire pour atteindre une saturation complète. La comparaison permettrait d'identifier la méthode la plus efficace, à savoir celle qui parvient à saturer complètement des matériaux granulaires dans un délai réduit.

Le critère expérimental a été développé à partir de matériaux lâches, alors que les remblais sont généralement mis en place et compactés pour respecter un certain indice de densité relative. Il serait donc pertinent de réaliser des essais d'écoulement sur les mêmes matériaux, mais reconstitués de manière dense à des indices proches de ceux utilisés en pratique, afin de vérifier si leur stabilité est évaluée de la même façon par le critère expérimental proposé dans cette recherche. Comme le compactage risquerait de briser les billes de verre, ces essais devraient être réalisés avec des particules naturelles. L'utilisation de celles-ci introduirait toutefois des variables additionnelles (texture et forme des particules, variation de la densité des solides ou présence de cohésion) susceptibles d'influencer la stabilité interne du matériau. Les résultats pourraient mener à un ajustement du critère expérimental en intégrant une composante liée à la densité des matériaux testés.

Le critère expérimental a aussi été établi à partir d'essais réalisés sous un faible gradient hydraulique, afin de maintenir un écoulement laminaire et de limiter les contraintes liées au montage, particulièrement pour les matériaux les plus grossiers. Or, l'application de gradients plus élevés pourrait faciliter l'observation de variations notables des paramètres hydrauliques pour les matériaux instables. De tels essais permettraient à la fois de déterminer si certains matériaux instables présentent une migration de particules fines dès la saturation et de proposer une cinquième condition au critère expérimental, directement liée aux paramètres hydrauliques. Cette nouvelle condition pourrait également contribuer à mieux différencier le type d'érosion interne sélective, entre la suffusion ou la suffosion, cette dernière étant reconnue comme plus dommageable.

Le critère expérimental a été développé à partir d'essais d'écoulement réalisés sur des matériaux mis en place dans un perméamètre à parois rigides. Or, de plus en plus d'études sur la suffusion utilisent des cellules d'écoulement à parois souples pour mieux comprendre ce phénomène, notamment pour établir des critères hydromécaniques. Ce type de cellule est intégré dans la version de 2022 de la norme ASTM D2434 sur les essais de perméabilité, en raison de sa capacité à réduire les effets de parois et, par conséquent, le développement possible de chemins préférentiels, ainsi qu'à appliquer une contrainte de confinement sur le matériau, reproduisant ainsi des conditions plus représentatives du terrain. Il serait donc pertinent, dans de futures études sur l'évaluation de la stabilité interne, de privilégier une cellule d'écoulement à parois souples afin d'intégrer l'effet du confinement tout en limitant les chemins préférentiels.

Le critère géométrique proposé a été développé sur des matériaux dépourvus de particules de diamètre inférieur à 0,075 mm, alors que de nombreux remblais au Québec sont constitués de tills, généralement riches en ce type de particules. L'application du critère géométrique à de tels matériaux et la comparaison des résultats avec ceux obtenus lors d'essais d'écoulement représenteraient une étape importante de validation. Cette démarche pourrait mener à l'ajout d'une condition spécifique aux matériaux contenant des particules de diamètre inférieur à 0,075 mm, ce qui élargirait la portée pratique du critère.

Les critères expérimental et géométrique ont été développés séparément dans cette recherche. Le critère géométrique a été établi à partir de résultats d'essais d'écoulement provenant d'études sur la suffusion, présentant des dispositifs expérimentaux variés et une évaluation expérimentale de la stabilité interne parfois imprécise. Pour vérifier la fiabilité du critère géométrique développé dans cette recherche, il pourrait être appliqué à des matériaux dont la stabilité interne aurait d'abord été évaluée au moyen du critère expérimental établi dans ce travail, jugé plus rigoureux, puis ajusté si nécessaire.

Depuis plusieurs années, des modélisations 3D sont utilisées pour simuler des écoulements d'eau dans des matériaux granulaires afin de mieux comprendre les interactions fluide-particules. Elles reposent notamment sur la méthode des éléments finis (MEF), parfois combinée à la méthode des éléments discrets (MED) pour analyser ces interactions au niveau microscopique. Des modélisations 3D simulant un écoulement dans des matériaux granulaires, recréés à partir de courbes granulométriques générées de manière à représenter des matériaux situés à la limite de la stabilité interne, pourraient ainsi permettre d'identifier plus aisément les caractéristiques granulométriques influençant cette stabilité. Les matériaux testés dans cette étude, reconstitués à partir de billes de verre présentant des propriétés idéales (sphéricité, surface lisse, densité des solides uniforme), pourraient servir en partie à valider le modèle 3D. Une fois ce modèle validé, le critère expérimental développé dans cette recherche pourrait alors être appliqué à l'évaluation de la stabilité interne de nouveaux matériaux, reconstitués virtuellement à partir de courbes granulométriques générées numériquement et soumis à un écoulement simulé.

Enfin, les critères expérimental et géométrique développés dans cette recherche permettent d'évaluer les matériaux comme stables ou instables. Or, pour une utilisation en ingénierie, il pourrait être pertinent de développer, à partir de ces critères, une façon d'exprimer le potentiel de rupture d'un matériau vis-à-vis de la suffusion. Celle-ci pourrait prendre la forme d'un coefficient de sécurité ou encore d'un indice de vulnérabilité traduisant la marge pour laquelle un matériau satisfait, ou non, les conditions de stabilité. De tels outils permettraient non seulement d'évaluer la stabilité interne, mais aussi d'en quantifier le degré.

ANNEXE I

EXEMPLE DE JEU DE DONNÉES POUR ÉVALUER S_r ARTICLE 1 – CHAPITRE 3

L'Annexe I présente un exemple de jeu de données mesurées et enregistrées pendant un essai de saturation pour évaluer et suivre l'évolution de S_r du matériau au cours de t selon la méthode adaptée de Chapuis et al. (1989) et de Chapuis (2004) dans l'étude de l'article 1 (Chapitre 3). Les données proviennent de l'essai de saturation réalisé avec un écoulement d'eau vers le haut en équilibre à T ambiante et à pression atmosphérique (P_{atm} , kPa) combiné à une mise sous vide appliquée sur le matériau reconstitué avec des billes de verre selon la courbe granulométrique (A) (Figure 3.2).

Le Tableau-A I-1 présente les paramètres du perméamètre et du matériau mesurés dans cette étude, dont ceux nécessaires à l'évaluation de S_r selon l'équation 3.1, ainsi que ceux requis pour corriger les valeurs de M_{tot} enregistrées au cours de t en raison du montage expérimental utilisé pour saturer le matériau, en particulier la présence des tuyaux d'eau et/ou de vide connectés au perméamètre. Les mesures sur le perméamètre et sur le matériau ont été effectuées avant le début de l'essai de saturation, tandis que les autres mesures sont prises pendant l'essai à l'aide de la balance située sous le perméamètre contenant le matériau à saturer.

Le Tableau-A I-2 rassemble les mesures de T et de M_{tot} enregistrées au cours de t , ainsi que les valeurs corrigées de S_r . Ces paramètres sont exprimés à la fois en fonction du t depuis le début de l'essai de saturation et du t à partir duquel la première goutte d'eau sort de la valve de sortie du perméamètre (Figure 3.6), ce dernier étant celui retenu pour présenter l'évolution de S_r au cours de t sur les Figures 3.7 à 3.9. Les cellules hachurées correspondent à la période de 15 minutes où un vide de 68 kPa est appliqué au sommet du perméamètre contenant le matériau à saturer. À partir de 15 min, un écoulement d'eau vers le haut est appliqué en combinaison avec la mise sous vide. Les valeurs de S_r sont alors corrigées en soustrayant le poids dû aux tuyaux d'eau et de vide connectés au perméamètre des valeurs enregistrées de M_{tot} . Lorsque la

première goutte d'eau sort du perméamètre, ici à 60 min depuis le début d'essai de saturation, l'application du vide est arrêtée. Les valeurs de S_r ne sont alors corrigées que du poids du tuyau d'eau connecté au perméamètre. Enfin, la différence entre les colonnes (6) et (7) du Tableau-A I-2 est que la colonne (7) présente les valeurs de S_r corrigées en ajoutant la masse d'eau injectée pour évacuer les bulles d'air piégées au sommet du perméamètre, au niveau du ressort (Figure 3.3A).

Pour alléger la présentation, l'ensemble des données enregistrées n'est pas reproduit dans le Tableau-A I-2. Seules des valeurs représentatives ont été conservées.

Tableau-A I-1 Paramètres mesurés au cours de l'essai de saturation, incluant ceux utilisés pour l'évaluation de S_r et la correction de M_{tot}

Mesures sur le perméamètre	
Masse du perméamètre saturé d'eau, M_e (g)	6538,11
Mesures sur le matériau	
Diamètre du matériau, D (cm)	10,111
Longueur du matériau, L (cm)	11,89
Volume du matériau, V_t (cm ³)	954,68
Masse du matériau humide, M_t (g)	1800,17
Masse du matériau sec, M_s (g)	1798,80
Teneur en eau, w (%)	0,03
Densité des solides, G_s	2,5
Indice des vides, e	0,327
Mesures à prendre avant la première goutte d'eau sortie : perméamètre contenant le matériau à saturer	
Masse du perméamètre (g)	6809,0
Masse du perméamètre connecté au tuyau d'arrivée d'eau (g)	6835,4
Écart de masse entre le perméamètre seul et connecté au tuyau d'arrivée d'eau (g)	26,4
Masse du perméamètre connecté aux tuyaux d'eau et du vide (g)	6902,4
Écart de masse entre le perméamètre connecté au tuyau d'arrivée d'eau et aux tuyaux d'arrivée d'eau et du vide (g)	67,0
Mesures à prendre à la fin de l'essai : perméamètre contenant le matériau saturé	
Masse du perméamètre seul et connecté au tuyau d'arrivée d'eau (g)	7629,9
Masse du perméamètre (avec bulles d'air piégées, g)	7605,4
Écart de masse entre le perméamètre seul et connecté au tuyau d'arrivée d'eau (g)	24,5
Masse du perméamètre avec bulles d'air évacuées (g)	7610,3
Masse d'eau ajoutée pour évacuer les bulles d'air piégées (g)	4,9

Tableau-A I-2 Données de T et de M_{tot} mesurées au cours de t et valeurs correspondantes de S_r corrigée

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Heure	t (min)		T (°C)	M_{tot} (g)	S_r corrigée (%)*	
	Depuis le début de l'essai de saturation	Depuis la 1 ^{ère} goutte d'eau sortie			Avec bulles d'air piégées	Avec bulles d'air évacuées
16:20:00	0		21,4	6903,4	N/A	N/A
15:35:00	5		21,4	6902,0	N/A	N/A
15:40:00	10		21,4	6901,7	N/A	N/A
15:45:00	15		21,4	6902,4	N/A	N/A
15:50:00	20		21,4	6967,3	N/A	N/A
15:55:00	25		21,4	7068,3	N/A	N/A
16:00:00	30		21,4	7165,9	N/A	N/A
16:05:00	35		21,4	7261,6	N/A	N/A
16:10:00	40		21,4	7347,1	N/A	N/A
16:15:00	45		21,4	7436,8	N/A	N/A
16:20:00	50		21,4	7519,7	18,9	21,0
16:25:00	55		21,4	7557,5	35,1	37,2
16:30:00	60	0	21,4	7621,1	91,1	93,2
16:35:00	65	5	20,8	7621,3	91,2	93,3
16:40:00	70	10	20,8	7621,6	91,3	93,4
16:45:00	75	15	20,9	7621,7	91,3	93,4
16:50:00	80	20	20,7	7622,0	91,5	93,6
16:55:00	85	25	21,1	7622,1	91,5	93,6
17:00:00	90	30	20,8	7622,3	91,6	93,7
17:05:00	95	35	20,7	7622,5	91,7	93,8
17:10:00	100	40	20,6	7622,7	91,8	93,9
17:15:00	105	45	20,5	7622,9	91,9	94,0
17:20:00	110	50	20,5	7623,1	91,9	94,0
17:25:00	115	55	20,5	7623,3	92,0	94,1
17:30:00	120	60	20,5	7623,5	92,1	94,2
17:35:00	125	65	20,5	7623,7	92,2	94,3
17:40:00	130	70	20,5	7623,9	92,3	94,4
11:25:00	1195	1135	20,0	7629,8	94,8	96,9
11:30:00	1200	1140	20,0	7629,8	94,8	96,9
11:35:00	1205	1145	20,0	7629,8	94,8	96,9
11:40:00	1210	1150	20,0	7629,9	94,9	97,0
11:45:00	1215	1155	20,0	7629,8	94,8	96,9
11:50:00	1220	1160	19,9	7629,8	94,8	96,9
11:55:00	1225	1165	19,9	7629,9	94,9	97,0
12:00:00	1230	1170	19,9	7629,8	94,8	96,9
12:05:00	1235	1175	19,8	7629,8	94,8	96,9
12:10:00	1240	1180	19,8	7629,9	94,9	97,0
12:15:00	1245	1185	19,8	7629,8	94,8	96,9
12:20:00	1250	1190	19,8	7629,8	94,8	96,9
12:25:00	1255	1195	19,8	7629,6	94,7	96,8

* N/A – Non applicable : aucune valeur de S_r n'est disponible en raison du remplissage des parties du perméamètre ne contenant pas le matériau.

ANNEXE II

CARACTÉRISATION D'UN MODÈLE DE SOL CONSTITUÉ DE BILLES DE VERRE POLYDISPERSÉES POUR L'ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS EN MILIEU POREUX

Céline Bouin^a, Yannic A. Ethier^b, Jean-Sébastien Dubé^c, et Mohamed Chekired^d

^{a,b,c} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^d Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ),
1800 Boul. Lionel-Boulet, Varennes, Québec, Canada H3C 1K3

Article présenté à la conférence Géo Montréal 2013

RÉSUMÉ

Un projet d'étude du problème d'érosion interne dans les remblais de sols pulvérulents a été entrepris par l'IREQ et l'ÉTS. Il implique d'une part des essais d'écoulement en laboratoire et d'autre part des modélisations numériques utilisant un outil appelé SIMSOLS. Afin de simplifier les comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques, les sols considérés par les deux approches sont constitués, dans un premier temps, de particules sphériques polydispersées. Des billes de verre sodocalciques sont en fait utilisées au laboratoire. Or, il convient de caractériser ce modèle de sol. Cet article traite de la caractérisation de ces sols modèles, en termes notamment de l'angle de repos, des limites de consistance, du coefficient de restitution, des paramètres Mohr-Coulomb et des conditions de perméabilité. La caractérisation est en outre nécessaire pour apprécier la représentativité du modèle de sol et pour l'obtention de données à utiliser dans les modèles numériques.

ABSTRACT

A research project has been undertaken by IREQ and ÉTS to revisit the problem of internal erosion in granular fill. The issues are being investigated on the basis of laboratory flow tests and with a numerical model in development at IREQ called SIMSOLS. In the first instance, a model of soil made of polydisperse spherical particles has been adopted in order to simplify comparisons between both approaches. Soda-lime glass beads have been used in laboratory tests. Therefore, it is required to characterize this idealized soil. This paper presents characterization data of the idealized soil used in terms of angle of repose, Atterberg limits, coefficient of restitution, Mohr-Coulomb parameters and permeability conditions. Characterization is required for data input in numerical models and also to assess the representative character of the idealized soil.

I.1 Introduction

Depuis Terzaghi (1926), des critères ont été établis pour contrôler les problèmes d'érosion dans les ouvrages en remblais. Ce projet s'intéresse spécifiquement à l'érosion interne à l'intérieur d'un sol faisant partie de l'ouvrage. L'écoulement d'eau dans le milieu poreux exerce des forces qui peuvent produire une migration des particules fines à travers le réseau de pores, laissant en place les particules grossières du squelette de sol. Ce type de migration est appelé suffusion (Wan & Fell, 2004). Les critères destinés à prévenir la suffusion sont généralement de nature granulométrique (Kenney & Lau, 1986; Lafleur et al., 1989; Sherard & Dunningan, 1989).

Cet article s'inscrit dans le cadre plus large d'un projet de recherche qui vise à approfondir spécifiquement le problème de stabilité interne des sols pulvérulents composant les remblais du noyau d'un barrage ou d'une digue. Les critères existants pour déterminer si un sol est stable sont empiriques. Ils sont fonction soit de rapports des diamètres passant des particules fines et grossières du noyau (Sherard, 1979 ; Burenkova, 1993), soit de l'aspect de la courbe granulométrique (Kezdi, 1981 ; Kenney & Lau, 1985, 1986). Or, Wan & Fell (2008) ont mis en évidence que l'occurrence d'érosion interne n'est pas toujours prédite correctement par les critères de stabilité de Sherard (1979), de Kenney et Lau (1985, 1986) ou de Burenkova (1993) en comparaison avec des essais d'écoulement réalisés en perméamètres (Wan & Fell, 2004, 2008). En effet, certains sols jugés stables par les critères se sont avérés instables lors des essais d'écoulement alors que d'autres sols déterminés instables par les critères n'ont pas montré de migration lors des essais d'écoulement. De plus, d'après Indraratna & Locke (1999), des problèmes de robustesse des critères de stabilité sont dus au fait que chaque critère n'est défini que pour un nombre limité de points sur une courbe granulométrique alors qu'il faudrait plutôt prendre en compte l'ensemble de la courbe.

Il paraît ainsi pertinent d'examiner la validité des critères de stabilité interne déjà cités. L'approche proposée intègre des modélisations physiques et numériques afin de mieux comprendre les phénomènes mis en cause lors de la suffusion. La modélisation numérique sera

réalisée avec un outil numérique appelé SIMSOLS, en développement à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) et qui utilise la méthode des éléments discrets. Cet outil traite du comportement des sols à l'échelle du pore et de la particule par une approche Eulérienne-Lagrangienne pour l'étude de l'interaction fluide-particules. L'ensemble du milieu est ainsi considéré. Les équations du fluide de Navier-Stokes en formulation Eulérienne sont résolues par la méthode Marker et Cell (Harlow & Welch, 1965). Les équations de mouvement des particules, en formulation Lagrangienne sont déduites du principe fondamental de la dynamique (Roubtsova, Chekired, Ethier, & Avendano, 2012). À ce jour, les développements de SIMSOLS permettent de générer des sols idéalisés à l'aide du concept des fractales. L'outil est conçu pour reproduire plusieurs phénomènes rencontrés dans la nature incluant les écoulements dans un milieu poreux et la stabilité des sols sous l'effet des forces hydrodynamiques générées par un écoulement. Le calibrage s'effectue à partir d'essais menés en laboratoire ou à partir d'études documentées dans la littérature.

La poursuite du développement de l'outil numérique pour les applications envisagées nécessite de reproduire le phénomène de suffusion en laboratoire sur un sol idéalisé afin d'en isoler les causes granulométriques. Ainsi, des billes de verre de diamètre variant du micromètre au centimètre sont utilisées pour constituer des modèles physiques de sols dont il est possible de contrôler précisément la granulométrie. Il s'ensuit une simplification notamment au niveau de la forme des particules.

Cet article porte sur la caractérisation des billes de verres utilisées pour constituer les modèles physiques de sol idéalisé. Cette caractérisation est nécessaire afin de préciser les intrants du modèle numérique et aussi pour apprécier les similitudes avec un sol pulvérulent réel. La caractérisation présentée ici porte sur la composition des particules (billes de verre), leur granulométrie, leur texture, leurs limites de consistance, leur coefficient de restitution et leurs paramètres de résistance (cohésion, angles de repos et de friction). Elle porte également sur la porosité et la perméabilité du modèle physique de sol constitué des billes de verre.

Cette caractérisation permettra une appréciation de la représentativité des sols idéalisés ainsi qu'une discussion sur la pertinence de recourir à ce type de milieu poreux pour l'étude de l'érosion interne dans les sols granulaires.

I.2 Méthodologie

Des paramètres des billes de verre et du sol idéalisé ont été déterminés expérimentalement et comparés avec des valeurs tirées de la littérature. Pour fins de comparaison, quelques mesures sur un sable naturel provenant du banc Colette (Saint-Roch sur Richelieu, Qc) sont également présentées. La composition des billes de verre est rapportée comme indiqué par les fournisseurs. Aussi, la conductivité électrique d'un mélange contenant des particules fines des billes de verre a été mesurée pour apprécier leur réactivité en présence d'eau distillée et désaérée. Des modèles de sol ont été constitués à partir de courbes granulométriques obtenues de la littérature et une de ces courbes est présentée. La sphéricité des particules les plus fines des billes de verre a été observée au microscope électronique. Ces mêmes particules ont été soumises à la détermination de leurs limites de consistance. La mesure de l'angle de repos des billes a été effectuée à l'état sec. Enfin, l'utilisation de l'outil numérique requiert l'introduction du coefficient de restitution et cette mesure a été effectuée sur les billes de verre. Des détails sur les essais effectués sont fournis aux sections suivantes.

I.2.1 Conductivité électrique

La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un appareil de marque Oakton, modèle 510 Benchtop Meter, sur plusieurs types de mélanges: 1- de l'eau distillée, 2- de l'eau distillée et désaérée, 3- de l'eau distillée et des billes de verre (mélange des plus fines, P2011SL, section 3.3) et 4- de l'eau distillée et désaérée et des billes de verre P2011SL. Pour désaérer l'eau, 0,0625 g de sulfite de sodium anhydre, Na_2SO_3 est mélangé dans un litre d'eau distillée.

Pour les différentes solutions présentées précédemment, la conductivité est mesurée au temps zéro puis au bout de 24h. Ces deux mesures espacées permettent d'apprécier si des réactions ont lieu entre les billes de verre et les autres constituants.

I.2.2 Microscopie électronique à balayage

La portion la plus fine des billes de verre a été observée au microscope électronique. Il s'agit d'un microscope électronique à balayage à pression variable S-3600N. Il a été utilisé pour observer la morphologie de la surface des échantillons. La résolution maximale atteinte est 4.5 nm. Avant d'examiner les billes de verre, qui sont des particules non métalliques, une fine couche d'or est pulvérisée sur la surface de l'échantillon à l'aide d'un métalliseur.

I.2.3 Limites de consistance

Des essais ont été réalisés afin de connaître le comportement des billes de verre P2011SL mélangées à l'eau. Pour déterminer la limite de liquidité, deux techniques ont été utilisées : la coupelle de Casagrande (Bureau de normalisation du Québec (BNQ) 2501-090) et le pénétromètre à cône suédois (BNQ 2501-092). La limite de plasticité a été déterminée selon la norme BNQ 2501-092.

I.2.4 Angle de repos

L'angle de repos des billes de verre a été mesuré pour plusieurs gammes de diamètres de billes de verre: P2011SL, 0 à 50 μm , 40 à 70 μm , 150 à 250 μm et 400 à 600 μm . Pour fins de comparaison, il a été aussi mesuré pour du sable fin à moyen originaire du banc Colette.

À l'aide d'un entonnoir, dont la sortie est située à 1,5 et 2,5 cm de hauteur, les particules sont versées sur une surface plane. La mesure de l'angle est prise grâce à un rapporteur placé en arrière du tas conique formé par les billes. Dans tous les cas, un mélange à sec a été utilisé.

I.2.5 Coefficient de restitution

Le coefficient de restitution des billes de verre a été mesuré à partir de particules de 10 mm de diamètre. La manipulation est la suivante : une bille de verre est collée au fond d'un b cher en verre rempli d'eau distillée désaérée, tandis qu'une autre est maintenue   une certaine hauteur

au-dessus à l'aide de la succion appliquée via un cylindre creux. Lorsque la succion est arrêtée, la bille supérieure, submergée, tombe en chute libre et entre en contact avec la bille collée au fond. La Figure-A II-1 montre un des essais. Deux béchers et plusieurs hauteurs de chute ont été utilisés pour cette manipulation: deux hauteurs de chute de 30 et 50 mm pour le bécher de 250 ml et trois de 30, 50 et 70 mm de hauteur pour le cas du bécher de 600 ml. La hauteur et la durée du parcours avant et après le choc entre les deux billes sont mesurés grâce à un papier millimétré installé au dos du bécher et aux photographies prises au moyen d'une caméra haute vitesse, modèle Motion Xtra NR3S1 de Integrated Desing Tools inc., munie d'un objectif Fujinon 1:1.4/25 mm modèle CF25HA-1. Les essais ont été faits avec différentes précisions en termes de vitesse d'images qui sont de 500, 700 ou 960 images par seconde (fps).

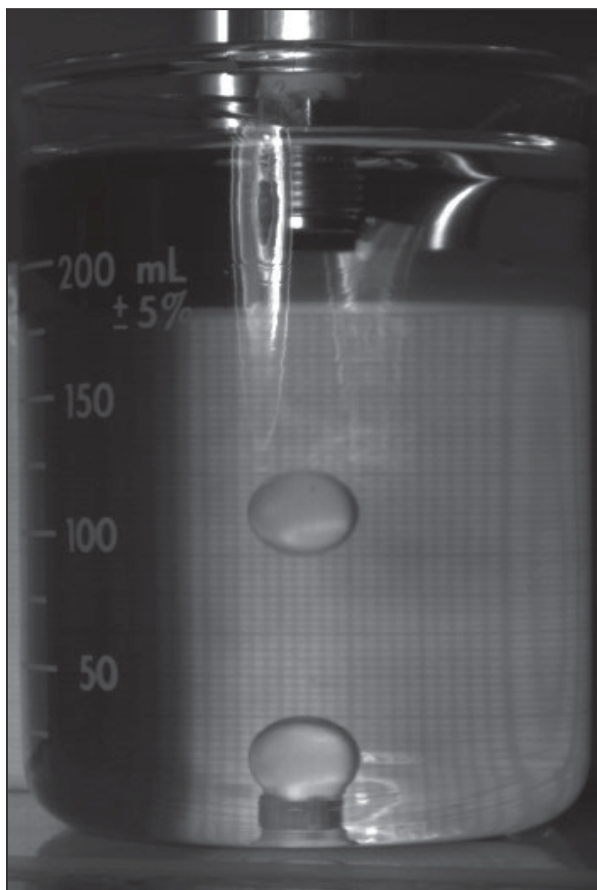


Figure-A II-1 Photographie d'une chute de bille obtenue avec la caméra haute vitesse pour calculer le coefficient de restitution, bécher de 250 ml

Connaissant la fréquence d'images pour chaque essai, les délais entre le début de la chute et le contact entre les deux billes de même qu'entre le choc et la fin de la remontée de la bille sont déterminés. La vitesse est obtenue à partir de la distance parcourue durant le délai. Ainsi pour chaque cas, une vitesse incidente et une vitesse restituée sont obtenues. Le coefficient de restitution s'obtient par le rapport entre la vitesse restituée et la vitesse incidente (équation A II-1).

$$e = \frac{v_r}{v_i} \quad (\text{A II-1})$$

Dans l'équation A II-1, v_i est la vitesse incidente (mm/s) et v_r est la vitesse restituée après le choc (mm/s).

I.3 Propriétés du modèle de sol

I.3.1 Composition

Les particules utilisées pour former le modèle de sol testé sont des billes de verre de nature sodocalciques. Elles proviennent de trois fournisseurs : Kisher Biotech, Cospheric Innovations in Microtechnology-Prizmalite et GlenMills Inc. Les compositions chimiques des billes de verre des deux premiers fournisseurs sont fournies au Tableau-A II-1. Quel que soit leur provenance, la masse volumique des particules, notée, ρ_s , est égale à 2,5 g/cm³ telle qu'indiquée par les trois fournisseurs. Pour un sable, elle s'établit entre 2,6 et 2,7 g/cm³. Le minéral le plus fréquent dans les sables est le quartz, dont la masse volumique est 2,65 g/cm³ (Holtz & Kovacs, 1991).

Tableau-A II-1 Compositions chimiques des billes de verre

Fournisseurs	Kisker-Biotech GmbH & Co		Cospheric Innovations in Microtechnology – Prizmalite
Composition chimique (%)	Billes de verre notées PGB	Billes de verre haute précision notées PGBP	Poudre P2011SL ¹
SiO ₂	72	69.2	Oui
Na ₂ O	13	6.85	Oui
CaO	9	9	Oui
PbO	Libre	2.45	Non
K ₂ O	0	11.4	Oui
BaO	0	5.98	Non
Al ₂ O ₃	0	41	Oui
TiO ₂	0	0.95	Non
ZnO	0	0.95	Non
B ₂ O ₃	0	0.48	Non
Sb ₂ O ₃	0	0.25	Non
Fe ₂ O ₃	0	0.014	Non
MgO	0	0	Oui

Note: ¹ Le pourcentage des composés chimiques n'est pas donné par le fournisseur.

D'après le fournisseur Kisker-Biotech GmbH & Co, les sachets contenant les billes de verre ne présentent aucun fragment étranger ou de verre brisé, ni aucune autre impureté. Par ailleurs, les billes de plus petit diamètre, notées P2011SL, peuvent contenir des microorganismes non pathogènes en quantité inférieure à 10 unités de colonies par gramme.

I.3.2 Conductivité électrique

Les mesures de conductivité sont reportées dans le Tableau-A II-2.

Tableau-A II-2 Valeurs de la conductivité des différents mélanges à temps zéro et à 24 h

Type de mélange	Conductivité à T=0 h (μS)	Conductivité à T=24 h (μS)
Eau distillée	355	360
Eau distillée avec billes de verre	425	445
Eau distillée et désaérée (Na ₂ SO ₃)	850	840
Eau distillée et désaérée avec billes de verre	900	930

La conductivité électrique augmente légèrement de 70 à 85 μS avec l'ajout des billes de verre à l'eau distillée. En présence de sulfite de sodium, l'augmentation due à l'ajout des billes est de 50 à 90 μS , ce qui est quasiment identique à ce qui a été mesuré dans l'eau seulement distillée. La présence de sulfite de sodium n'affecte pas l'augmentation de la conductivité électrique par les billes de verre. Les billes ne sont donc pas inertes au contact avec l'eau, mais la présence du produit désaérant n'accentue pas leur réactivité.

I.3.3 Granulométrie

Des granulométries identifiées comme stables ou instables sont présentées dans Wan & Fell (2008). Parmi celles-ci, la granulométrie numéro 10 qui est discontinue a servi d'inspiration (Figure-A II-2 a). La courbe b) de la Figure-A II-2 a été confectionnée avec des billes de verre de diamètres compris entre 1 μm et 16 mm à partir des mélanges présentés au Tableau-A II-3.

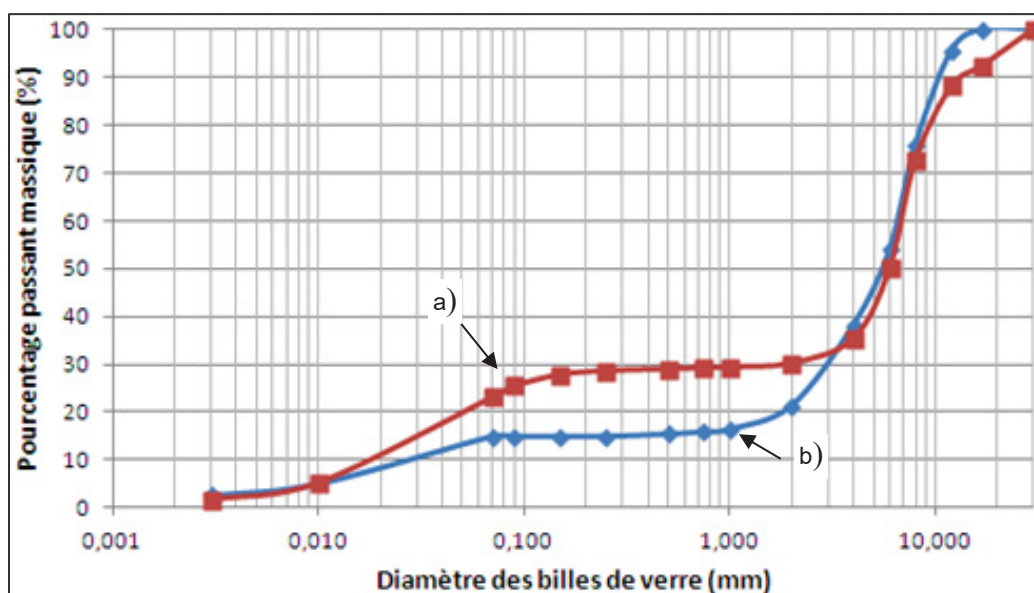


Figure-A II-2 Courbes granulométriques a) numéro 10 tirée de Wan & Fell (2008) et b) utilisée comme modèle de sol avec des billes de verre

Tableau-A II-3 Tailles et types de billes de verre, utilisées pour former la granulométrie numéro 10, selon le fournisseur

Fournisseurs	Diamètre des billes de verre	Type de billes de verre
Cospheric Innovations in Microtechnology- Prizmalite	$d_{50}=3\text{ }\mu\text{m}$, $d_{90}=6\text{ }\mu\text{m}$, le diamètre maximum atteint étant $20\text{ }\mu\text{m}$	P2011SL
Kisker-biotech GmbH & Co	10 à $50\text{ }\mu\text{m}$	PGB-05
	40 à $70\text{ }\mu\text{m}$	PGB-07
	90 à $150\text{ }\mu\text{m}$	PGB-015
	150 à $250\text{ }\mu\text{m}$	PGB-025
	250 à $500\text{ }\mu\text{m}$	PGB-050
	500 à $750\text{ }\mu\text{m}$	PGB-075
	750 à $1000\text{ }\mu\text{m}$	PGB-100
	$2,0\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$	PGBP-2
	$4,0\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$	PGBP-4
	$6,0\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$	PGBP-6
	$8,0\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$	PGBP-8
	$12,0\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$	PGBP-12
GlenMills Inc.	$16,0\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$	Type B

I.3.4 Texture

Le microscope électronique à balayage à pression variable a permis de vérifier qualitativement la forme des billes de verre et la présence d'impuretés dans la poudre P2011SL. Malgré leur petit diamètre atteint (jusqu'à $1\text{ }\mu\text{m}$), les billes de verre observées ont toutes une forme sphérique bien dessinée (voir le cercle noir de la Figure-A II-3). Leur surface est homogène et lisse. En revanche, des impuretés ont été observées parmi les particules, quoique sous forme de traces (voir les ellipses en rouge de la Figure-A II-3).

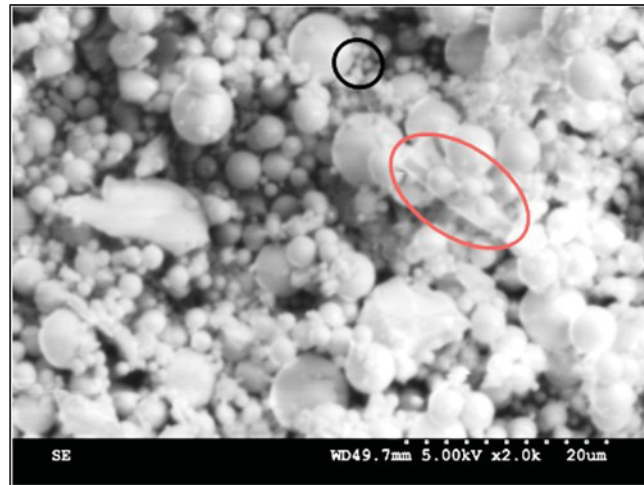


Figure-A II-3 Photographie des billes de verre P2011SL obtenue au microscope électronique

I.3.5 Limites de consistance

En ce qui concerne le cône suédois, la détermination de la limite de liquidité se fait à partir des valeurs moyennes des pénétrations du cône pour différentes teneurs en eau. Elles doivent être comprises entre 7 et 15 mm. Avec une teneur en eau de 24 %, les pénétrations obtenues étaient aux alentours de 5,5 mm. Ces valeurs étant inférieures à 7, la teneur en eau a été augmentée de 1 %. Les pénétrations correspondantes ont alors diminué d'environ 3 mm. L'ajout de 2 % de teneur en eau additionnelle a entraîné une pénétration de 20 mm. La limite de liquidité paraît se situer entre 24 et 27 %. Ce changement marqué du comportement suite à un faible ajout d'eau rend toutefois difficile l'exploitation de l'essai. Le même constat a été fait avec l'utilisation de la coupelle de Casagrande.

Les billes mélangées avec de l'eau ont un comportement particulier. Lorsque l'échantillon est légèrement secoué, une portion de l'eau présente à la base de l'échantillon remonte à la surface. Une partie inférieure de l'échantillon se solidifie tandis qu'une partie supérieure passe pratiquement à l'état liquide. Dans un même échantillon, la consistance est à la fois molle et ferme. Le mélange n'est plus homogène. Et à partir d'un mélange en apparence relativement sec, un tel comportement est atteint suite à l'ajout d'une faible quantité d'eau. Autrement dit, le mélange est particulièrement sensible à l'ajout d'eau.

Quant à la détermination de la limite plastique, il n'a pas été possible d'obtenir un rouleau de billes de verre de 3 mm de diamètre. Elles ont donc été considérées non plastiques, tels un sable ou un gravier.

I.3.6 Paramètres de résistance

Les mesures d'angle de repos ont été effectuées pour les gammes de tailles 40 à 70 μm et 150 à 250 μm . Pour les particules les plus fines, c'est-à-dire la poudre P2011SL et celles dont le diamètre varie de 0 à 50 μm , les billes ne s'écoulaient pas de façon continue lorsqu'elles étaient versées dans l'entonnoir. Pour ces particules de faible diamètre, l'essai ne paraît pas approprié. Pour les billes de verre de 400 à 600 μm , elles roulaient et en conséquence, l'essai ne paraît pas non plus approprié. La valeur retenue pour l'angle de repos est une moyenne des angles mesurés pour les gammes de tailles 40 à 70 μm et 150 à 250 μm . Elle est de 27° (Figure-A II-4 b). L'angle de repos des billes de verre est plus petit que celui du sable fin à grossier (banc Colette) mesuré expérimentalement (Figure-A II-4 a) et ceux du sable et gravier disponibles dans la littérature (Tableau-A II-4). Cette valeur plus faible peut s'expliquer par l'absence d'angularité et de rugosité des billes de verre.

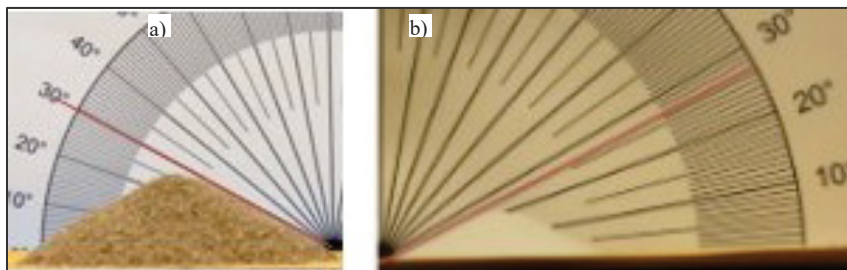


Figure-A II-4 Photographies de deux valeurs de mesures d'angle de repos prises expérimentalement a) sable fin à grossier du banc Colette et b) billes de verre P2011SL

Tableau-A II-4 Valeurs des angles de repos pour les billes de verre de différents diamètres, du sable fin à grossier et du gravier

Nature des particules	Diamètre moyen	Angle de repos (°)
Billes de verre	$d=0.23 \text{ mm}^2$	24,3
	$d=0.50 \text{ mm}^1$	25,0
	$d=1.65 \text{ mm}^2$	25,7
Sable (mesuré et littérature) ³	Matériau fin à moyen	26 à 30
Sable et gravier ³	Matériau fin à grossier	32 à 36

Notes: ¹ D'après Métayer (2008) ² D'après Courrech du Pont (2003) ³ D'après Lambe & Whitman (1969).

En utilisant une méthode humide, Santamarina & Cho (2004) indiquent un angle de repos de 25° pour des particules sphériques.

Des mesures de cohésion et d'angle de frottement ont été réalisées à l'aide d'une cellule de cisaillement annulaire de Schulz par Soria-Hoyo, Valverde, & Castellanos (2008) sur des billes de verre sodocalciques de diamètre 40 μm +/- 10 μm . Lorsque la contrainte normale appliquée était augmentée, l'angle de frottement diminuait de 25.6 à 23.9° tandis que la cohésion augmentait de 12.9 à 48.4 Pa. Pour des sables fins à moyens, l'angle de frottement est compris entre 30 et 36° et la cohésion entre 0 à 10 kPa (Lambe & Whitman, 1969). Les billes de verre ont donc un angle de frottement comparable ou inférieur à la valeur minimale des sables et une cohésion pratiquement nulle.

I.3.7 Coefficient de restitution

Un milieu granulaire est un milieu dissipatif, c'est-à-dire que l'impact entre deux grains va s'accompagner d'une perte d'énergie cinétique. La valeur de cette dissipation est fonction du coefficient de restitution de l'énergie ou d'inélasticité, noté e . Il dépend de la nature, de la dimension et de la vitesse des particules qui entrent en contact. Pour les billes d'acier, le coefficient de restitution est égal à 0,9 alors que pour les billes de verre, il est de 0,8. Celui des particules d'aluminium est plus faible, de l'ordre de 0,6 (Andreotti, Forterre, & Pouliquen,

2011). Plus la valeur du coefficient est forte, moins l'énergie sera dissipée. Ainsi, une bille de verre en mouvement sera peu ralentie par une particule immobile.

A l'aide des différents essais effectués à partir des béchers 250 ml et 600 ml et des valeurs de chutes de 30, 50 ou 70 mm, le coefficient de restitution est calculé pour les billes de verre. Des valeurs atteignant jusqu'à 0,82 ont été mesurées. Ces mesures concordent bien avec celles de la littérature.

I.3.8 Porosité

La perméabilité d'un milieu granulaire dépend de sa porosité, des connexions entre les pores, appelées tortuosité, et de sa saturation en eau.

Quelle que soit la taille des billes de verre monodisperses considérée, l'indice des vides est 0,35 pour un milieu dense et 0,92 pour un milieu lâche, ce qui correspond à une porosité variant de 26 à 48 %, respectivement (Lambe & Whitman, 1969). Pour Scoot (1960, cité par Zou, Gan, & Yu, 2011), il est nécessaire de distinguer la porosité des billes grossières de celle des billes fines. Dans un milieu poreux formé de particules fines, les forces d'attraction, telles que les forces de Van Der Waals et les forces électrostatiques contrent les forces de gravité, ce qui modifie légèrement la porosité. En 2003, Yu et al. (cité par Zou et al., 2011) ont proposé deux équations de la porosité d'un milieu monodisperse formé de particules fines : l'équation A II-2 pour un milieu granulaire dense et l'équation A II-3 pour un sol lâche. La partie gauche de ces équations correspond aux valeurs de la porosité pour un milieu poreux dépendant de la gravité et la partie droite à l'influence des forces d'attraction.

$$n = 0,36 + 0,64 \times \exp(-0,178 \left(\frac{\rho_p}{A}\right)^{0,129} d^{0,457}) \quad (\text{A II-2})$$

$$n = 0,40 + 0,60 \times \exp(-0,106 \left(\frac{\rho_p}{A}\right)^{0,156} d^{0,552}) \quad (\text{A II-3})$$

A est la constante de Hamaker égale à $6,5 \times 10^{-20}$ J, ρ_s est la masse volumique des particules (kg/m^3) et d est le diamètre des particules (m). Zou et al. (2011) considèrent que les forces d'attraction contrent les forces de gravité pour des particules dont le diamètre est inférieur à $150 \mu\text{m}$. Dans cet article, les billes de verre fines considérées ont un diamètre de $1 \mu\text{m}$, soit approximativement le diamètre effectif de la poudre P2011SL, selon une interpolation à partir des données granulométriques du fournisseur. Le diamètre effectif du sol idéalisé de la courbe b) (Figure-A II-2) est égal à $28 \mu\text{m}$. En considérant ce diamètre, la porosité d'un milieu poreux monodisperse en fonction de la compacité est présentée dans le Tableau-A II-5. Le Tableau-A II-5 montre aussi les porosités d'un milieu poreux monodisperse pour un diamètre de $1 \mu\text{m}$ et $150 \mu\text{m}$.

Tableau-A II-5 : Porosité estimée à partir des équations A II-2 et A II-3

Diamètre des billes de verre (μm)	Porosité du milieu poreux (%)	
	Dense (Éq. A I-2)	Lâche (Éq. A I-3)
1	85	90
28	55	60
150	41	44

Pour le modèle de sol physique, représenté par la Figure-A II-2 b), la porosité a aussi été calculée suivant l'équation A II-4 à partir du volume total du perméamètre, V_T (m^3), de la masse volumique des particules (kg/m^3) et de la masse de billes de verre sèche utilisée, M_s (kg). D'après les trois fournisseurs, la masse volumique des particules de verre est la même.

$$n = 1 - \frac{M_s}{\rho_p V_T} \quad (\text{A II-4})$$

La porosité ainsi obtenue pour ce modèle de sol physique est de 15 %, ce qui est inférieur à la valeur de porosité estimée pour le sol idéalisé à partir du diamètre effectif.

Ces porosités peuvent être comparées à celles d'un sable fin à grossier. D'après Lambe & Whitman (1969), les indices des vides minimum et maximum sont respectivement 0,20 et 0,95, ce qui correspond à une porosité minimale de 17 % et une porosité maximale de 49 %. La porosité estimée pour le sol idéalisé est légèrement inférieure à celle d'un sable fin à grossier dense et considérablement moindre que dans le cas monodisperse.

I.3.9 Conductivité hydraulique

La détermination de la porosité permet d'obtenir la perméabilité du milieu, k (m^2) suivant l'équation de Kozeny-Carman (Corapcioglu & Fedirchuk, 1998).

$$k = \frac{d_m^2}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (\text{A II-5})$$

Avec d_m étant la taille moyenne des particules (m) composant le milieu granulaire. À partir de la perméabilité, la conductivité hydraulique, K (m/s) peut être obtenue (Freeze & Cherry, 1979) avec l'équation A II-6.

$$K = \frac{k \rho_w g}{\mu_w} \quad (\text{A II-6})$$

Avec ρ_w la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3) et μ_w la viscosité dynamique de l'eau à 20°C ($1.0 \times 10^{-4} \text{ N.s/m}^2$). La conductivité hydraulique pour les porosités du Tableau-A II-5 est fournie au Tableau-A II-6.

Tableau-A II-6 Conductivité hydraulique calculée à partir des équations A II-5 et A II-6 pour des particules sphériques

Diamètre des billes de verre (µm)	Conductivité hydraulique du milieu poreux (m/s)	
	Dense	Lâche
1	$1,5 \times 10^{-5}$	$4,5 \times 10^{-5}$
28	$4,4 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$
150	$2,4 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$

Pour le sol représenté par la Figure-A II-2b), la conductivité hydraulique, K (m/s) peut aussi être calculée à partir de l'équation A II-7 (Koffi et al., 2008).

$$K = 981 \frac{e^{3+x}}{1+e} C_u^{1/3} d_{10}^2 \quad (\text{A II-7})$$

Avec e l'indice des vides, x le facteur qui tient compte de la tortuosité de l'écoulement et qui est égal, en pratique, à 2 (Koffi et al., 2008), C_u le coefficient d'uniformité et d_{10} le diamètre du tamis correspondant à 10 % des particules passantes (m). La conductivité hydraulique ainsi obtenue se chiffre à $7,6 \times 10^{-6}$ m/s. Cette valeur est inférieure à celles des conductivités hydrauliques des milieux poreux monodisperses de 1 µm et 150 µm de diamètre présentées dans le Tableau-A II-6. Cette différence peut s'expliquer par l'imbrication des billes de verre fines et grossières dans un même mélange : les pores formés par les particules grossières sont obstrués, en partie, par des particules plus fines. Concernant la conductivité hydraulique estimée à partir du diamètre effectif du sol idéalisé, la différence peut s'expliquer dans un premier temps par les valeurs de porosités obtenues à l'aide des équations A II-2 et A II-3. Elles sont établies pour des milieux poreux monodisperses. Enfin, les équations A II-5, A II-6 et A II-7 utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique d'un milieu poreux polydisperse ne prennent pas en compte les mêmes hypothèses. L'équation A II-7 tient compte de la tortuosité et du coefficient d'uniformité.

I.4 Conclusion

Les sols pulvérulents composant les remblais des ouvrages hydrauliques peuvent présenter une instabilité interne menant à une suffusion. Pour prévenir ce problème, des critères de stabilité interne (Sherard, 1979 ; Kezdi, 1981 ; Kenney & Lau, 1985, 1986; Burenkova, 1993) sont appliqués sur les granulométries des sols. Wan & Fell (2004, 2008) ont mis en évidence que l'occurrence d'érosion interne n'est pas toujours prédite correctement par ces critères. D'après Indraratna & Locke (1999), un programme considérant la forme entière de la courbe de distribution des particules, leur forme et la densité relative du matériau sont nécessaires pour améliorer la compréhension de ce phénomène de suffusion. L'outil numérique appelé SIMSOLS, en développement à l'IREQ, s'inscrit dans cette optique. Afin de le calibrer, des essais d'écoulement en milieu poreux menés en laboratoire à l'ETS sont effectués. Le sol modélisé numériquement est formé, dans un premier temps, de sphères. Afin de pouvoir comparer les résultats numériques et expérimentaux, les modèles de sols physiques sont formés de billes de verre de diamètre variant du micromètre au centimètre. Une caractérisation de ce type de particules et du sol idéalisé est nécessaire pour préciser les intrants du modèle numérique et aussi pour apprécier les similitudes avec un sol pulvérulent réel.

Les caractéristiques telles que la texture, les limites de consistance, l'angle de repos et le coefficient de restitution ont été obtenues expérimentalement. Quant à l'angle de frottement, la cohésion, la porosité et la conductivité hydraulique, leurs valeurs sont tirées soit de la littérature soit d'équations tirées elles-mêmes de la littérature. Ces valeurs ont été comparées à celles obtenues avec du sable de granulométrie comparable.

Les billes de verre utilisées pour former les modèles de sols physiques sont de nature sodocalciques. Leur masse volumique est $2,5 \text{ g/cm}^3$ ce qui est inférieur à la masse volumique des particules de $2,65 \text{ g/cm}^3$ qui prévaut dans un sable quartzique.

Les mesures de la conductivité électrique d'un mélange des billes de verre les plus fines, notées P2011SL, dans de l'eau distillée et de l'eau distillée désaérée ont permis de mettre en évidence

que les particules de verre ne sont pas inertes au contact de l'eau, mais que par ailleurs l'ajout de sulfite de sodium pour désaérer l'eau n'augmente pas la réactivité des billes.

L'examen des particules au moyen d'un microscope électronique a permis de confirmer la sphéricité et la texture des particules les plus fines, et la présence, sous forme de traces, d'impuretés. La limite de liquidité de la même portion fine des billes se situe entre 24 et 27 %, mais il n'a pas été possible de former un rouleau de 3 mm pour déterminer la limite de plasticité. Le matériau serait non plastique.

L'angle de repos à sec s'est établi en moyenne à 27° pour les billes de verre de diamètre 40 à 70 μm et 150 à 250 μm . Cette valeur est semblable à celles tirées de la littérature, mais légèrement inférieure à celle du sable. Quant à l'angle de frottement, il est comparable ou inférieur à la valeur minimale des sables et la cohésion est pratiquement nulle.

Le coefficient de restitution s'est établi au plus à 0,82, ce qui concorde bien avec les valeurs de la littérature.

Pour un milieu monodisperse grossier, c'est-à-dire dont le diamètre des sphères est supérieur à 150 μm , la porosité est de 26 % pour un sol dense et de 48 % pour un sol lâche. Pour des milieux poreux monodisperses plus fins ($1 \mu\text{m} < d < 150 \mu\text{m}$), la porosité est déterminée à partir des équations tirées de Zou et al. (2011) qui tiennent compte des forces d'attraction qui prédominent les forces de gravité pour des particules fines. Les valeurs calculées sont plus importantes que pour le cas d'un sable (17 à 49 %). La porosité du modèle de sol physique est de 15 %. Enfin, la conductivité hydraulique a été calculée à partir de deux formes de l'équation de Kozeny-Carman. La conductivité hydraulique du modèle de sol physique calculée à partir de l'équation A II-7 est inférieure à celles obtenues pour les milieux poreux monodisperses et celle calculée à partir du diamètre effectif du modèle de sol physique à partir des équations A II-5 et A II-6. Ces différences peuvent s'expliquer par les hypothèses de base. Les deux dernières prennent en compte le diamètre moyen du mélange tandis que la première utilise le diamètre effectif. De plus, les paramètres, tels que la tortuosité et le coefficient d'uniformité

sont pris en compte dans l'équation A II-7 qui révèle une conductivité hydraulique de $7,6 \times 10^{-6}$ m/s pour le modèle de sol.

Cette caractérisation a permis de mettre en évidence que les billes de verre possèdent des propriétés qui se rapprochent généralement de celles d'un sable de granulométrie comparable. L'utilisation de ce type de particules pour l'étude de l'érosion interne dans les sols granulaires paraît donc justifiée. Les modèles de sols numériques et physiques considérés utilisent des billes de verre qui sont des particules sphériques dont la masse volumique, la texture et le coefficient de restitution, notamment, sont connus. Cette simplification est en accord avec des propositions de la littérature orientées vers une compréhension accrue du phénomène de suffusion. Suite à l'amélioration des connaissances des phénomènes liés à la stabilité interne à partir de modèles de sols numériques et physiques constitués de billes de verre, un modèle numérique plus évolué incorporant la génération de particules de formes et textures diverses pourra être utilisé afin de s'approcher davantage des cas réels, en vue de mettre au point des critères de stabilité tenant compte de l'ensemble du milieu granulaire.

ANNEXE III

COURBES GRANULOMÉTRIQUES AVANT ET APRÈS ESSAI ARTICLE 2 – CHAPITRE 4

Les Figures-A III-1 à III-20 présentent les courbes granulométriques des 19 matériaux retenus dans l'article 2 (Chapitre 4), ainsi que du réplica du matériau FR8 (noté FR8-R dans le Chapitre 4). Elles comprennent :

- 1) la courbe granulométrique initiale du matériau global, représentée par une ligne pleine et un symbole rond plein;
- 2) la courbe granulométrique finale de la portion du haut du matériau (up), représentée par une ligne en tirets et un symbole triangle plein orienté vers le haut;
- 3) la courbe granulométrique finale pour la portion du milieu (mi), représentée par une ligne pointillée et un symbole losange plein;
- 4) la courbe granulométrique finale de la portion du bas (lo), représentée par une ligne en tirets et un symbole triangle plein orienté vers le bas;
- 5) la courbe granulométrique finale du matériau global, représentée par une ligne en tirets et un symbole rectangle plein.

Le diamètre d'ouverture du grillage (D_{grillage}) utilisé pour chaque matériau est également indiqué en pointillé sur les Figures-A III-1 à III-20.

Pour la Figure-A III-19, représentant les courbes granulométriques du matériau DL1, des doubles flèches ont été ajoutées pour illustrer les paramètres ΔP_f , ΔP_{up} , ΔP_{mi} et ΔP_{lo} évalués pour chaque matériau (Tableaux 4.4 et 4.5) à partir des courbes granulométriques. Ce matériau a été retenu car ses courbes présentent des variations marquées, ce qui permet d'illustrer clairement ces paramètres.

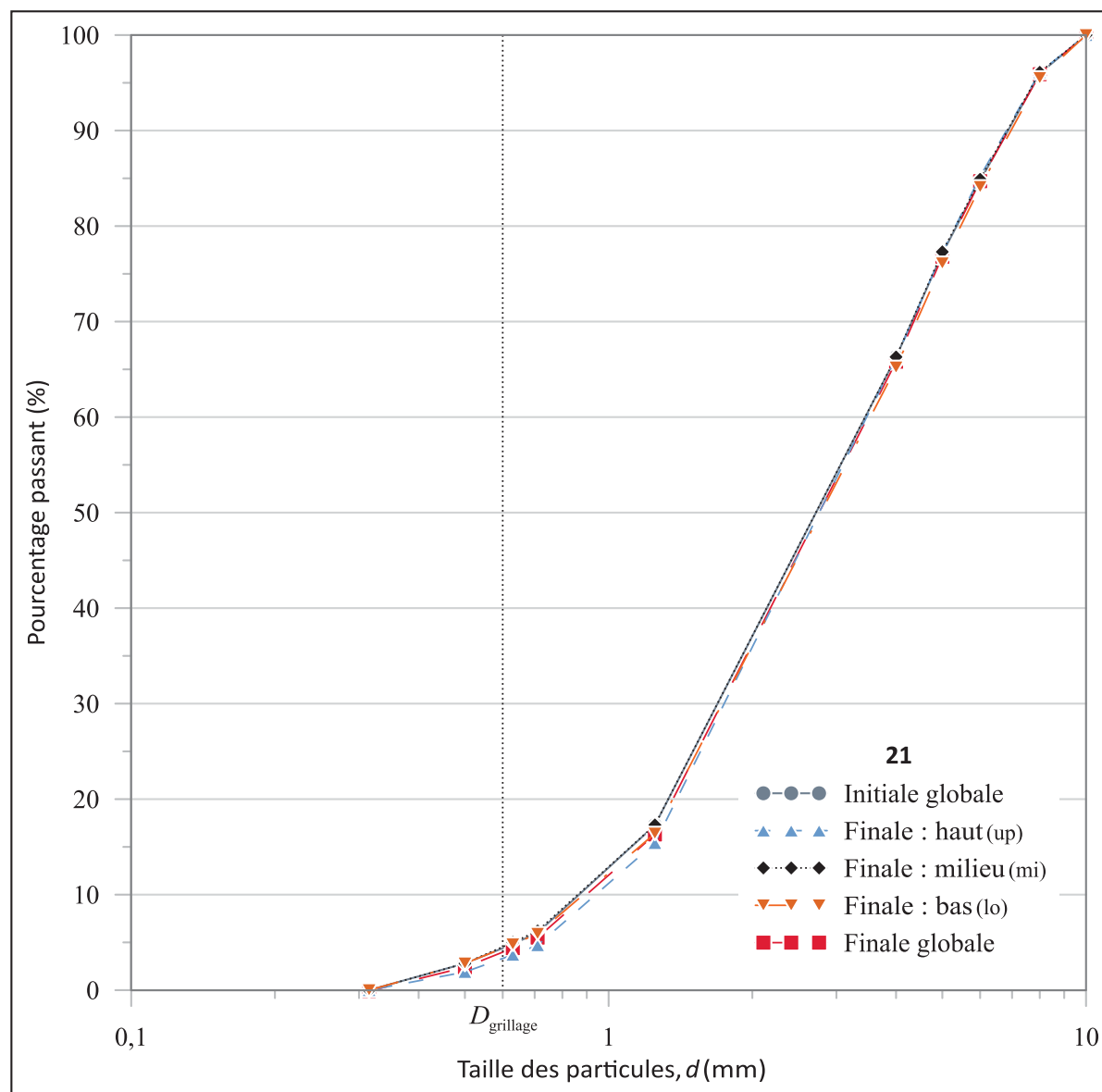


Figure-A III-1 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau 21 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

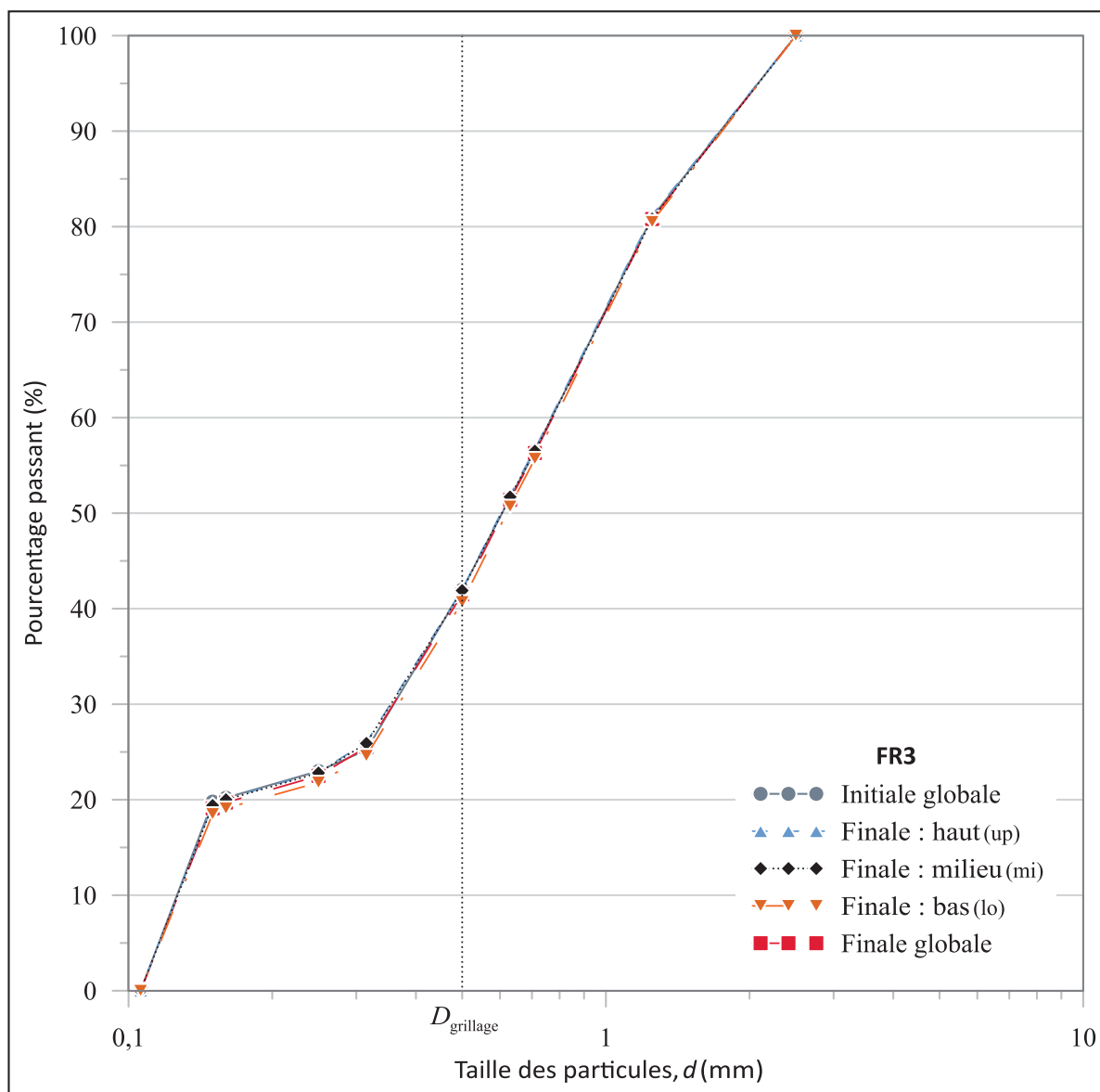


Figure-A III-2 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau FR3 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

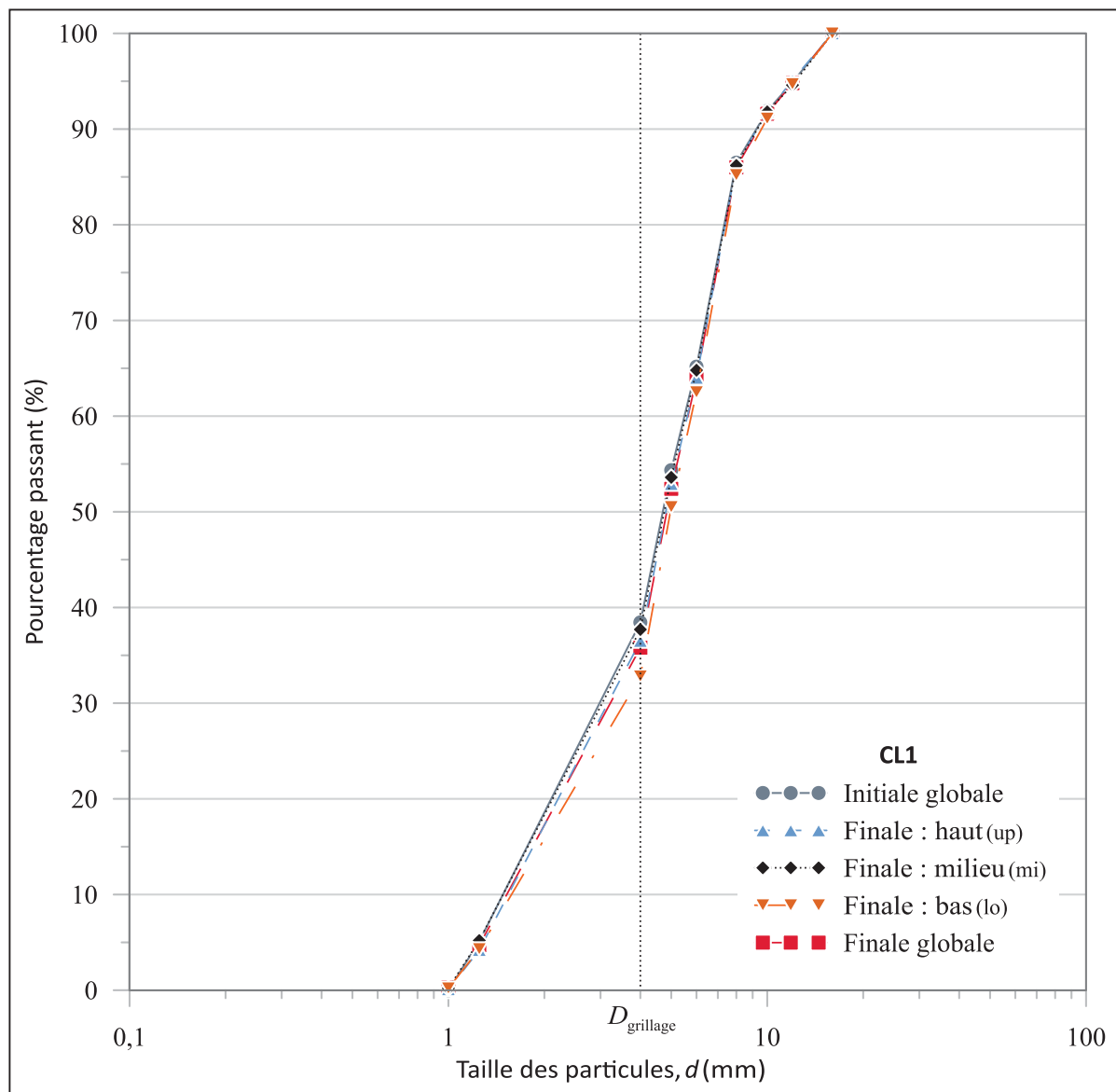


Figure-A III-3 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau CL1 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

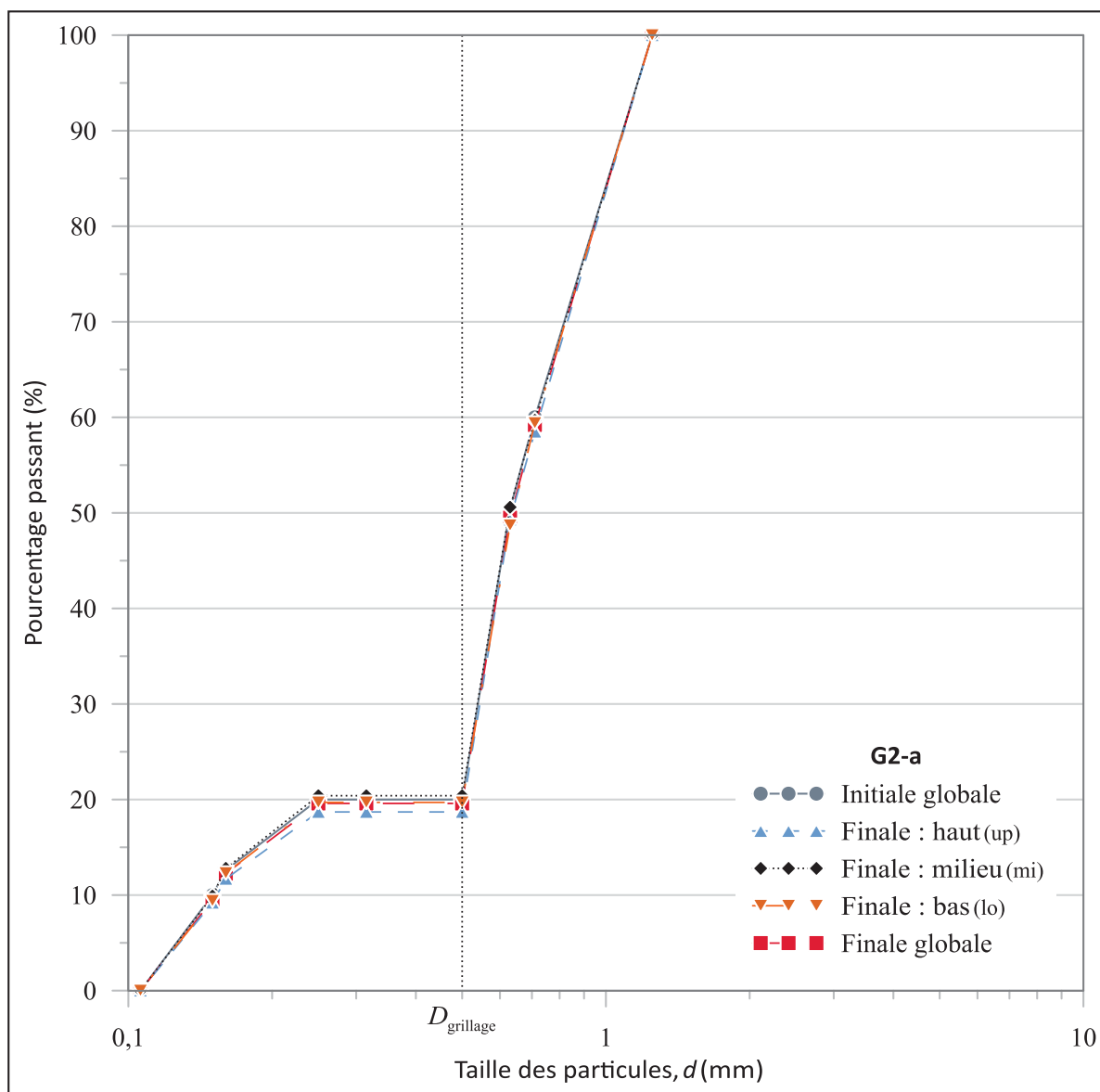


Figure-A III-4 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau G2-a (global, portions du haut, du milieu et du bas)

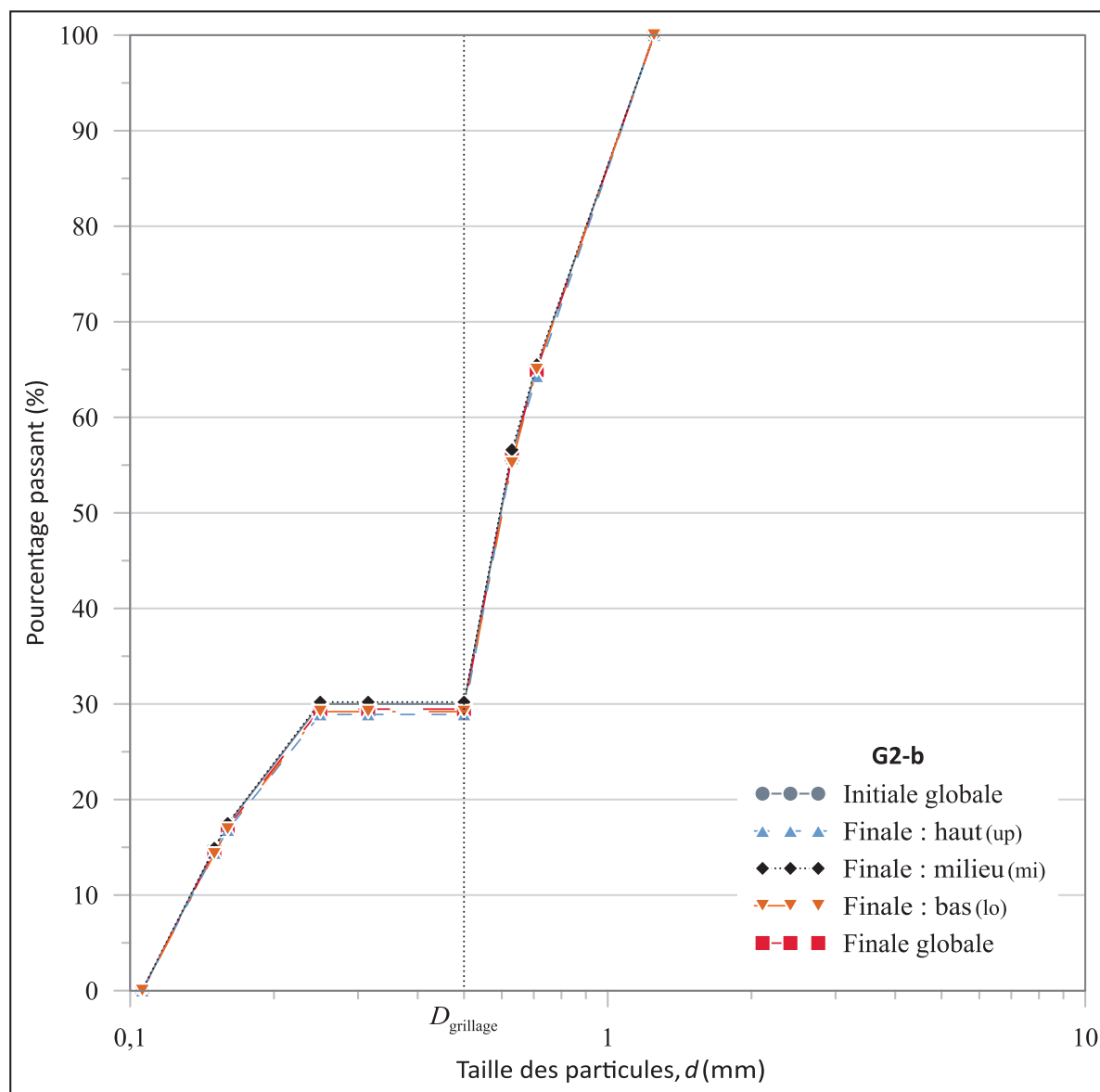


Figure-A III-5 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau G2-b (global, portions du haut, du milieu et du bas)

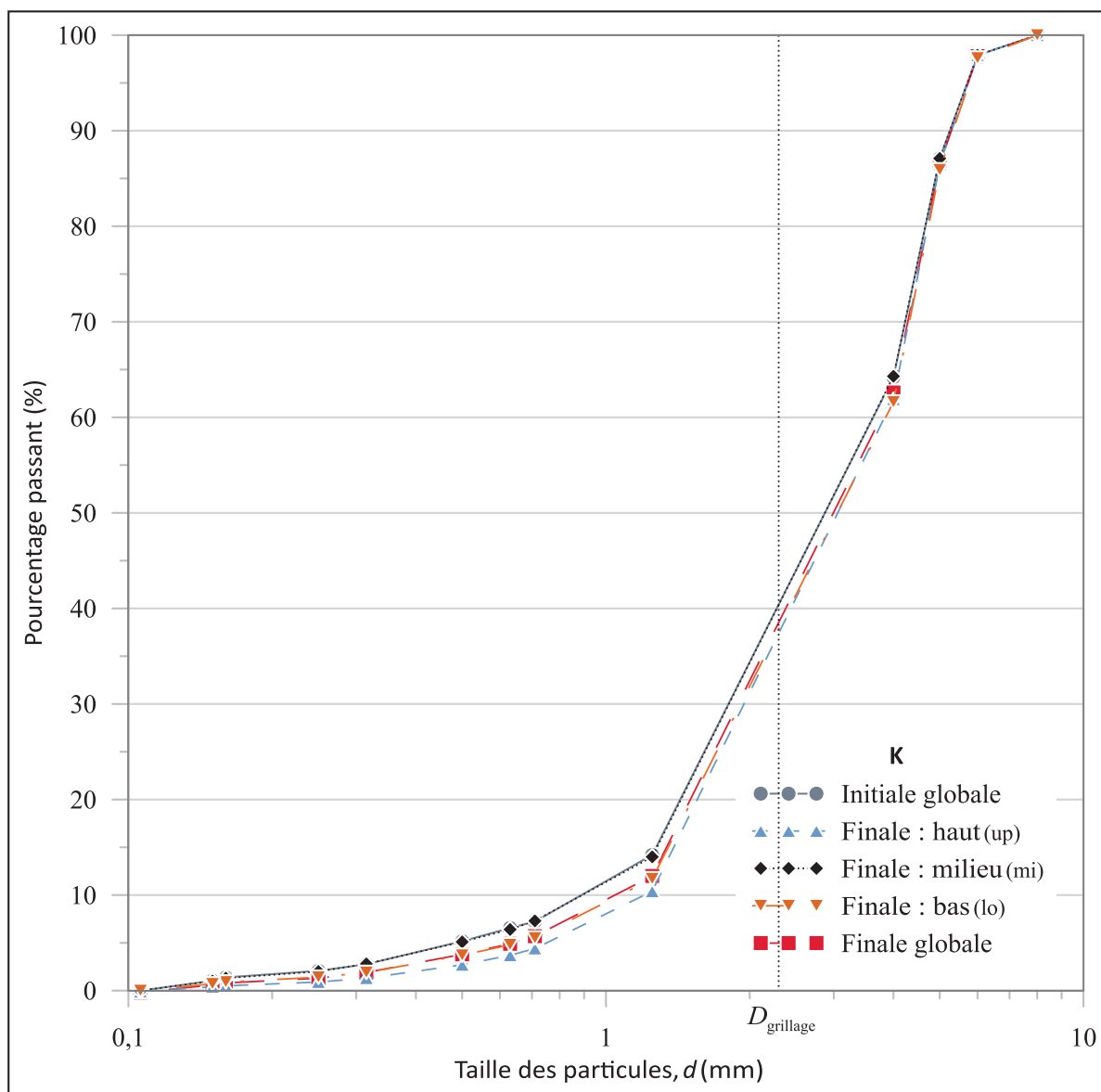


Figure-A III-6 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau K (global, portions du haut, du milieu et du bas)

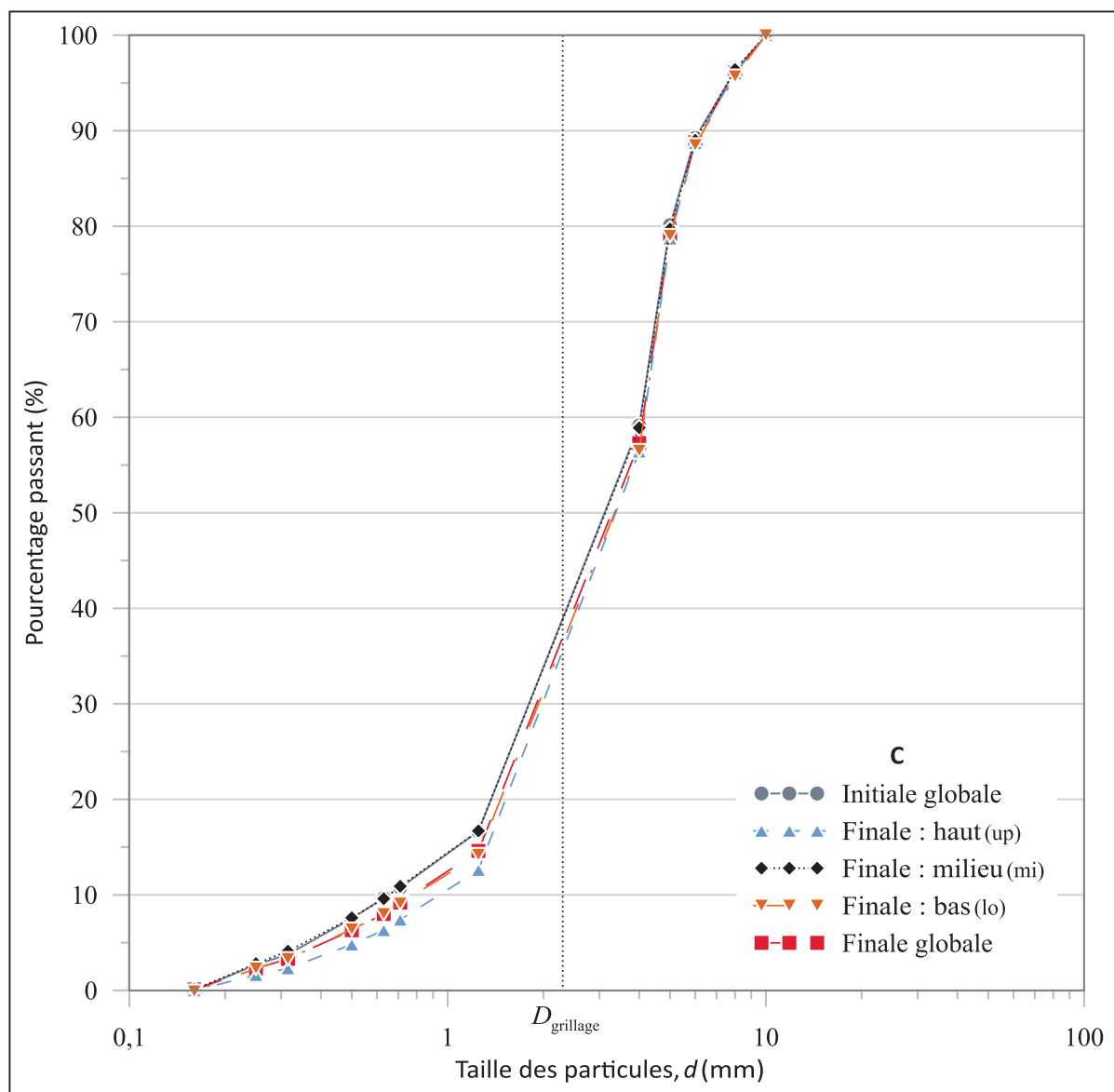


Figure-A III-7 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau C (global, portions du haut, du milieu et du bas)

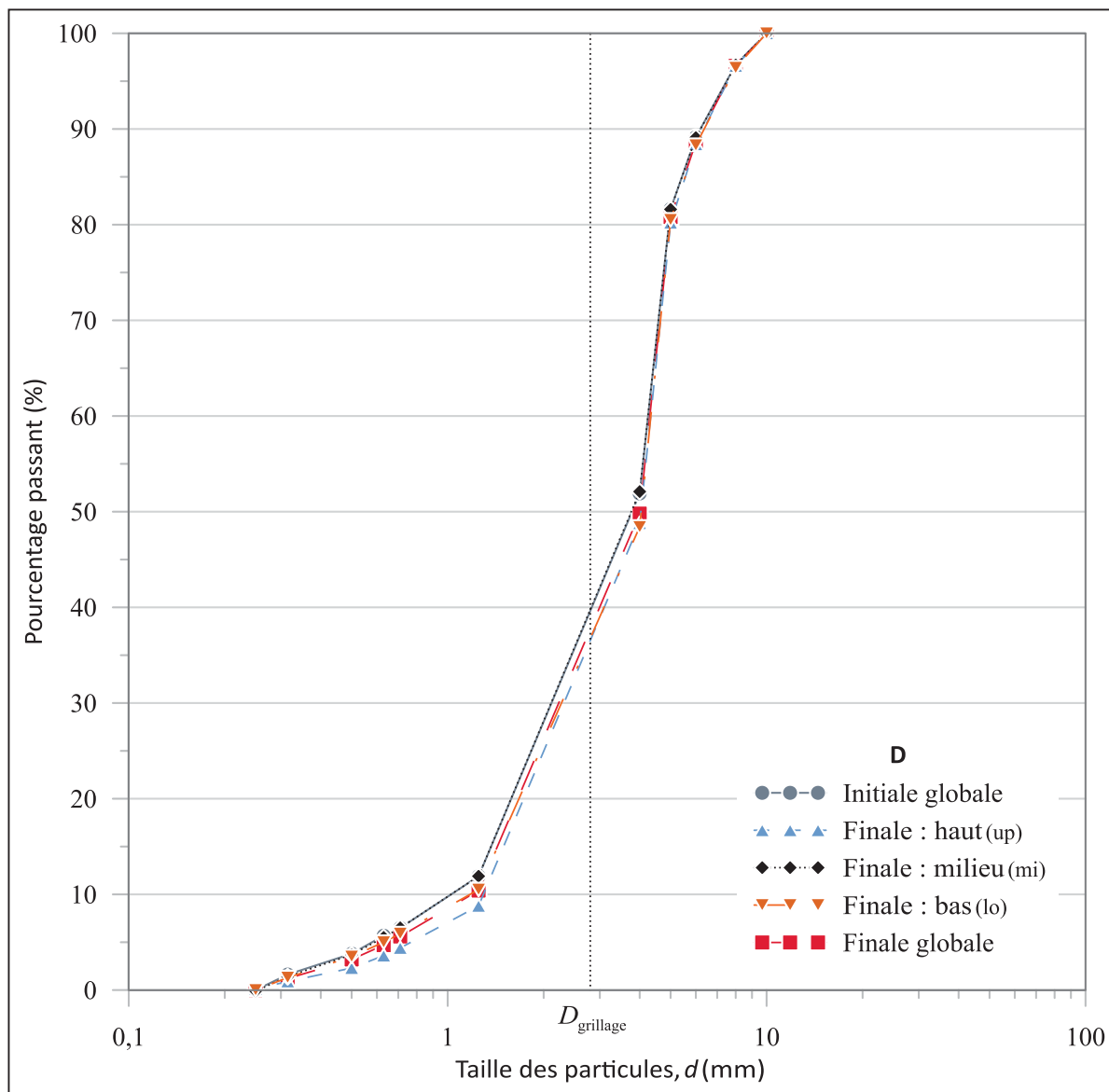


Figure-A III-8 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau D (global, portions du haut, du milieu et du bas)

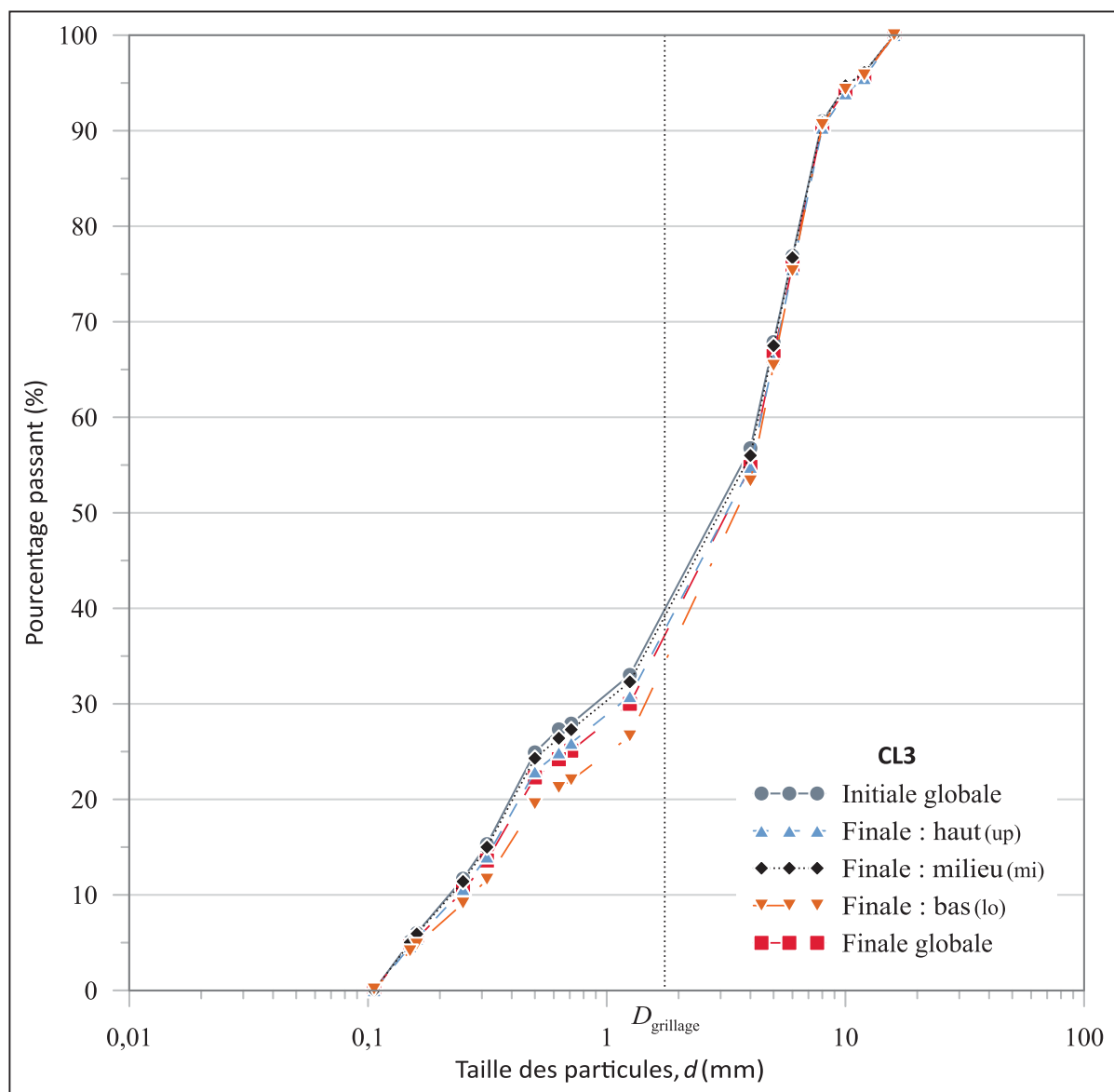


Figure-A III-9 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau CL3 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

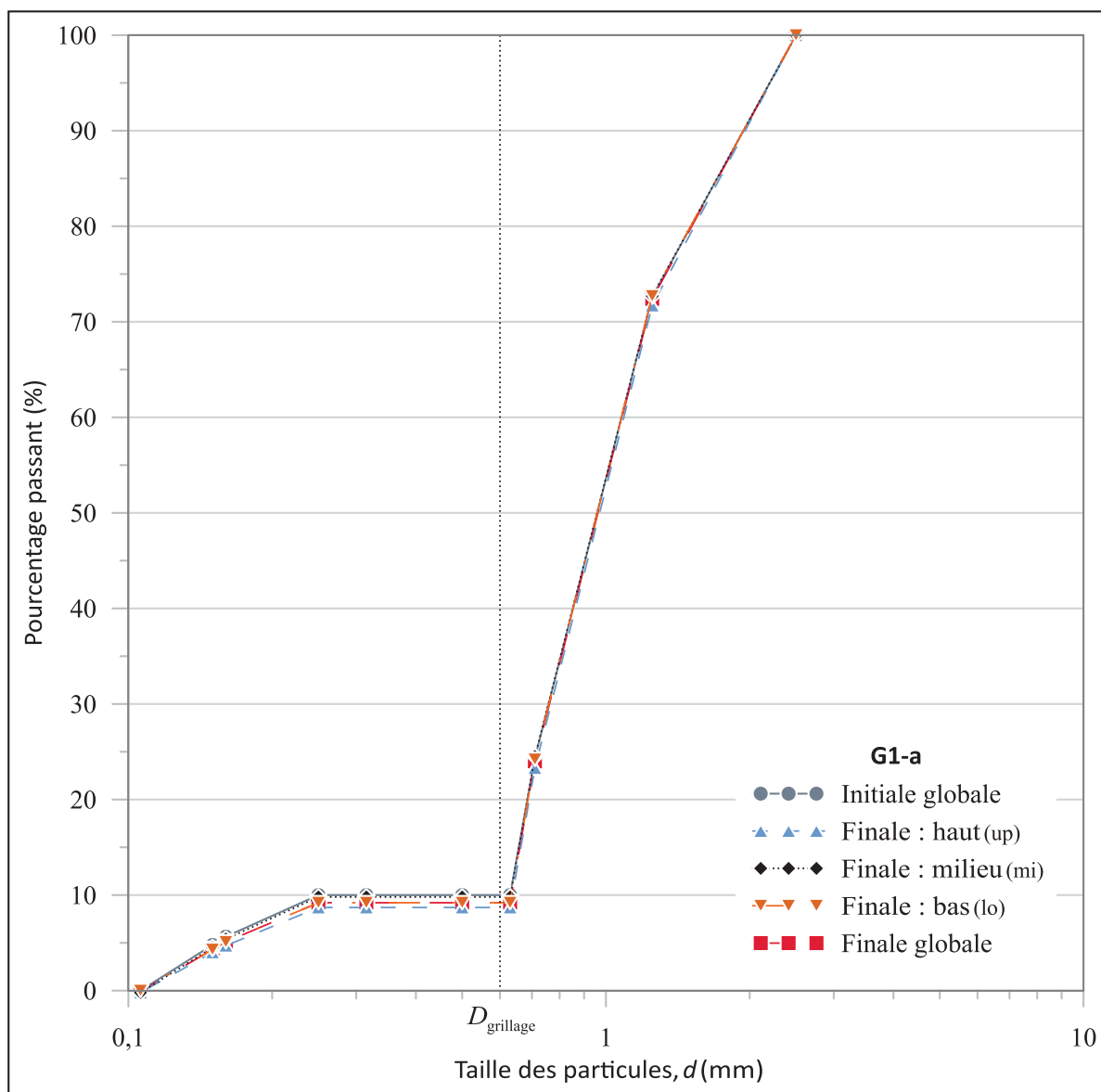


Figure-A III-10 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau G1-a (global, portions du haut, du milieu et du bas)

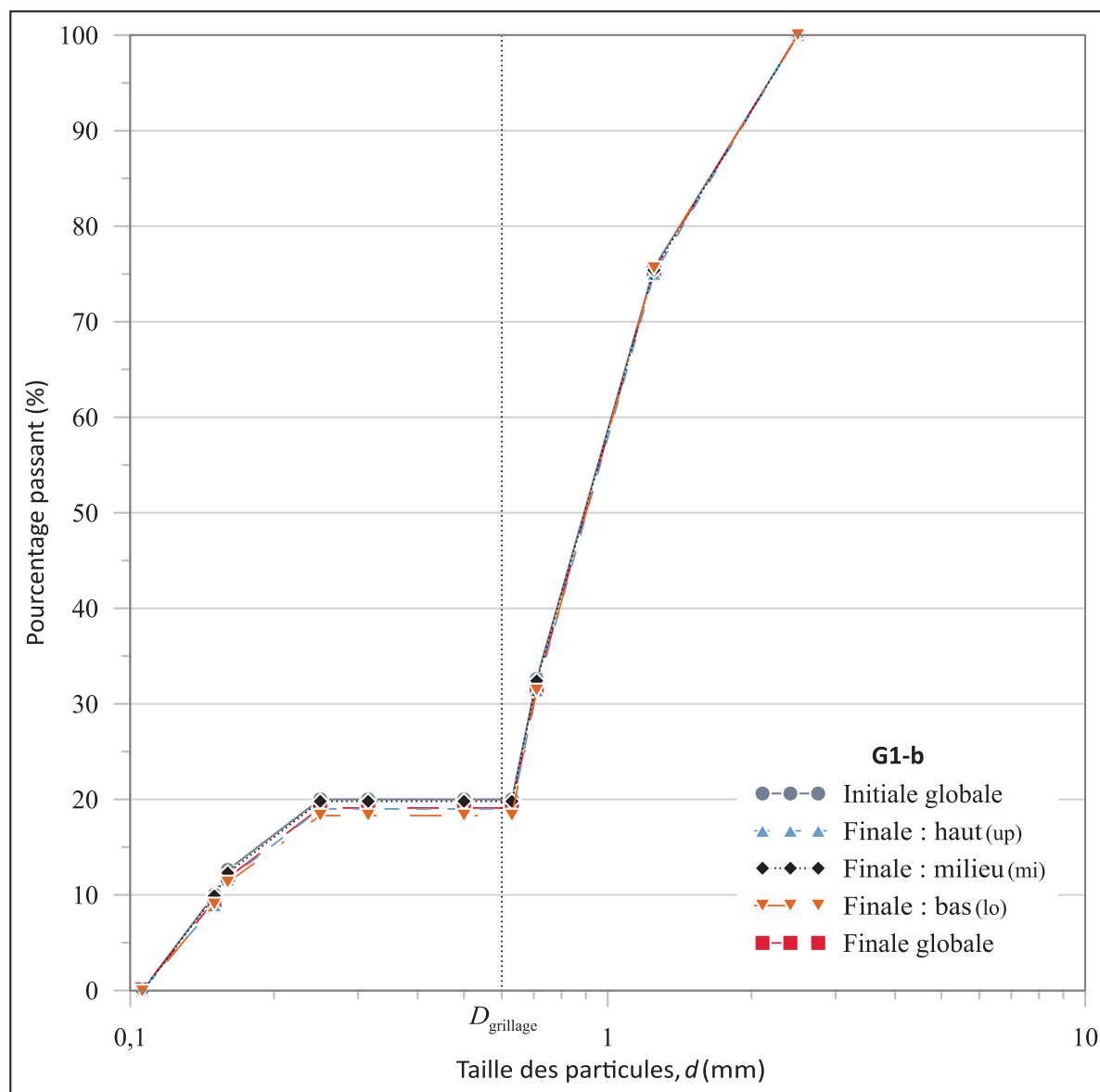


Figure-A III-11 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau G1-b (global, portions du haut, du milieu et du bas)

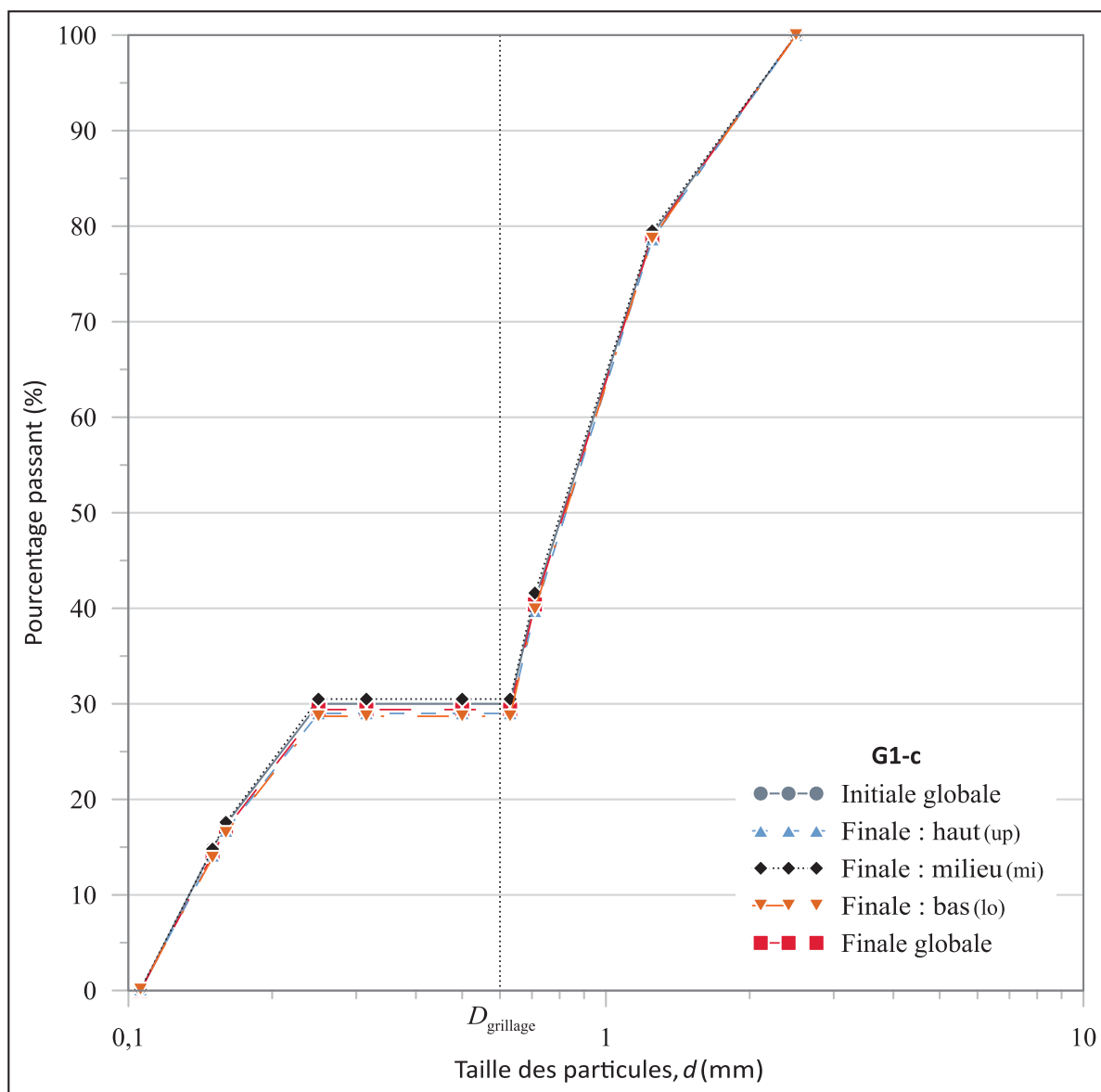


Figure-A III-12 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau G1-c (global, portions du haut, du milieu et du bas)

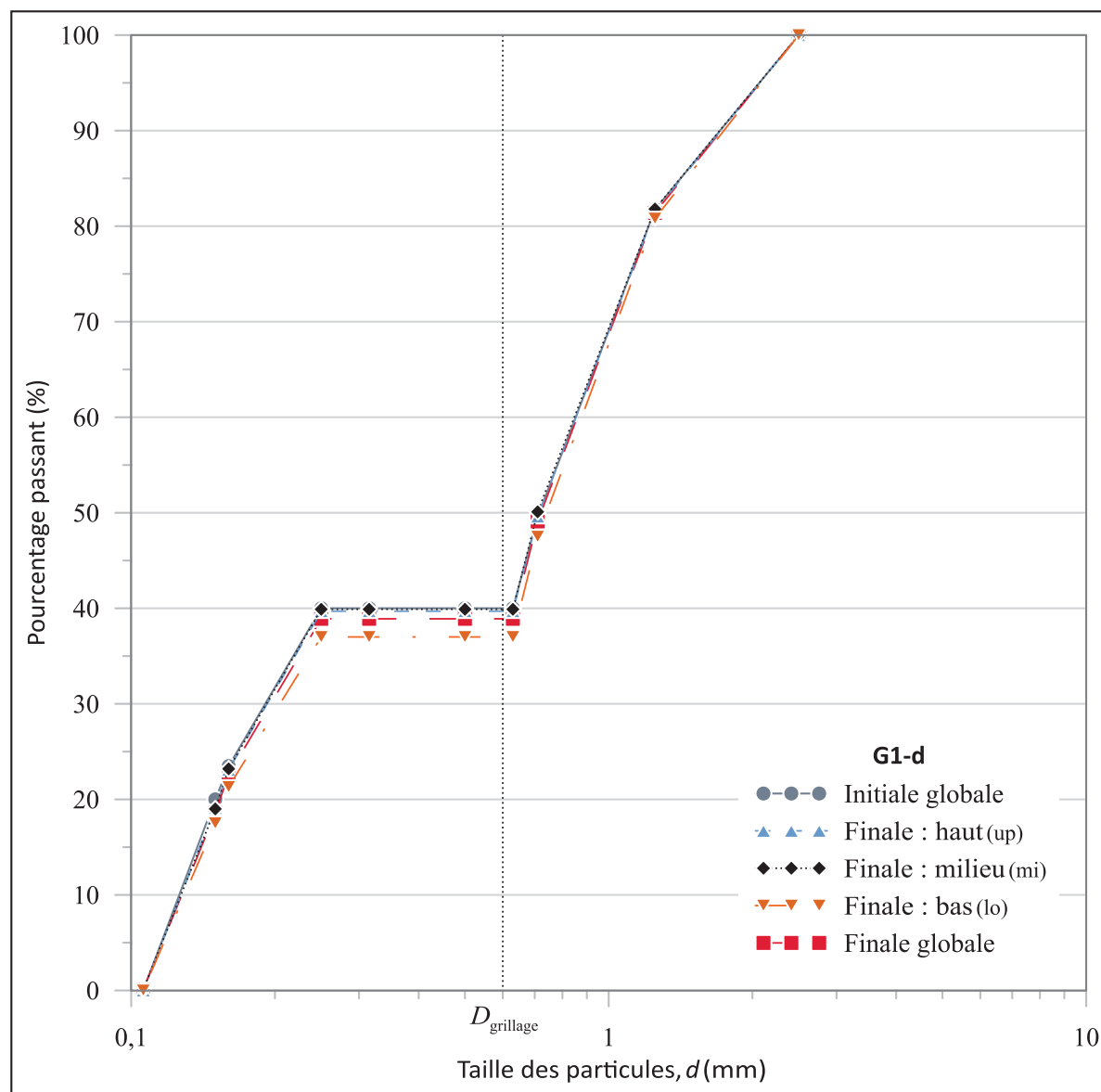


Figure-A III-13 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau G1-d (global, portions du haut, du milieu et du bas)

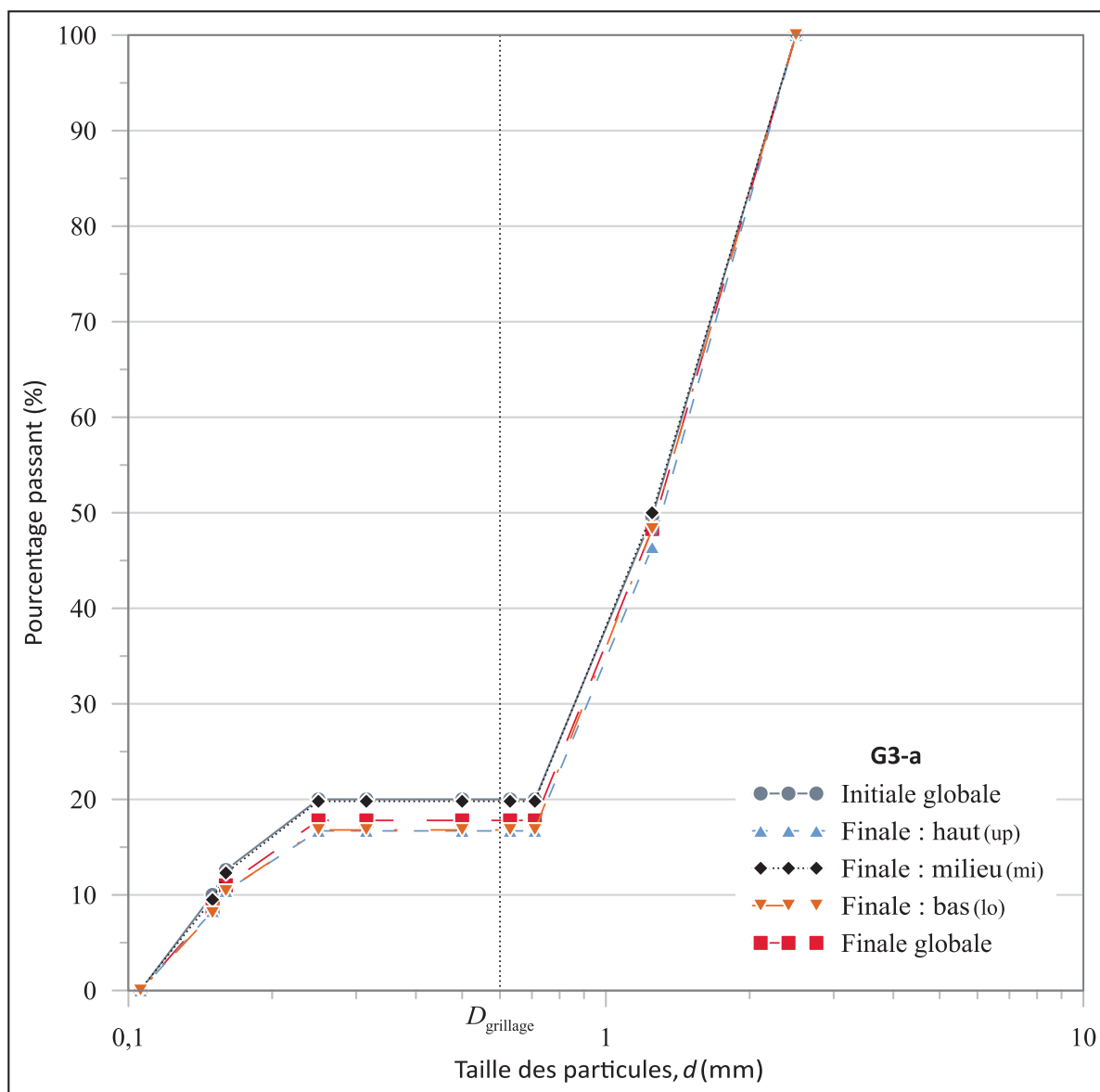


Figure-A III-14 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau G3-a (global, portions du haut, du milieu et du bas)

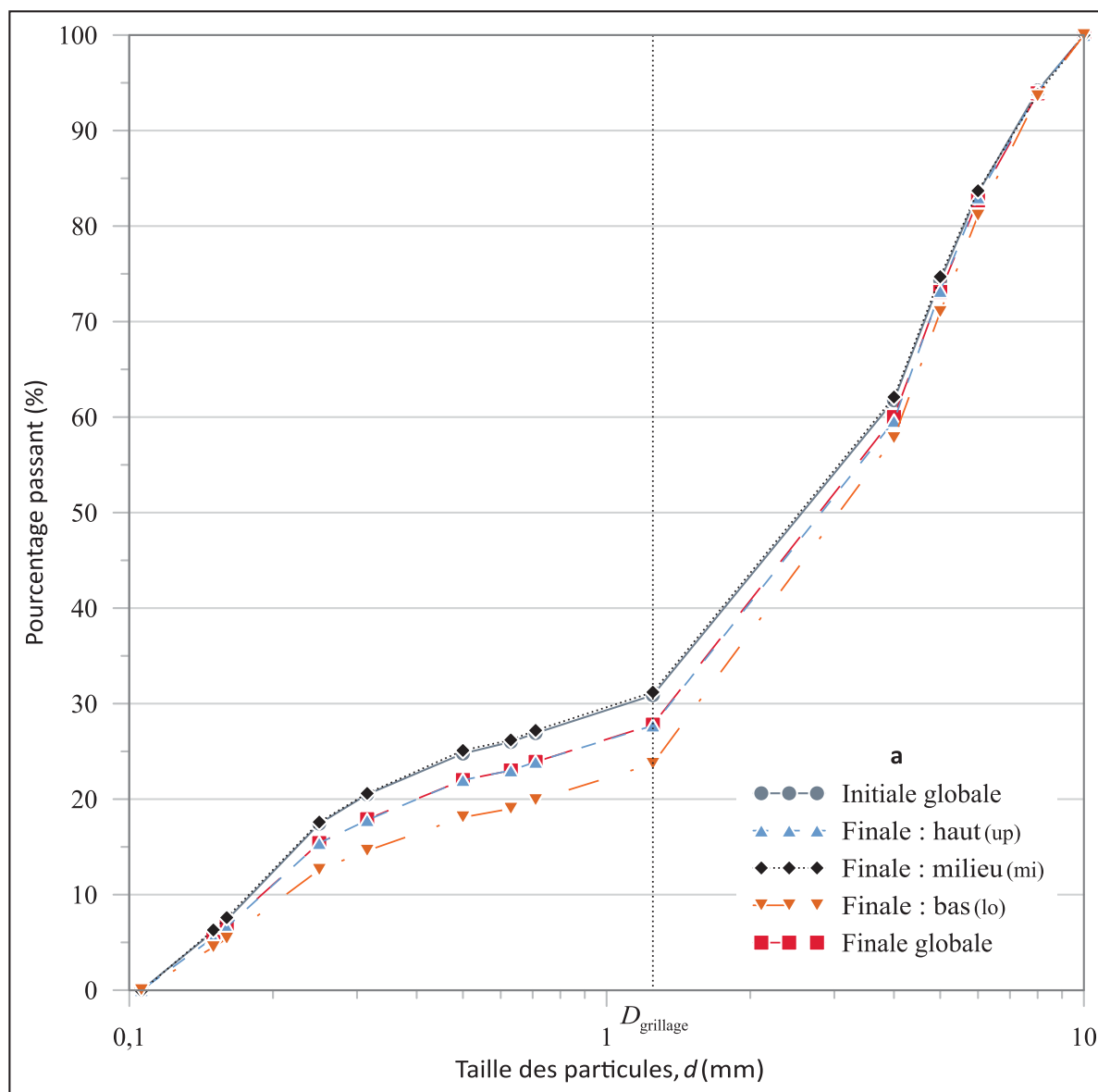


Figure-A III-15 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau a (global, portions du haut, du milieu et du bas)

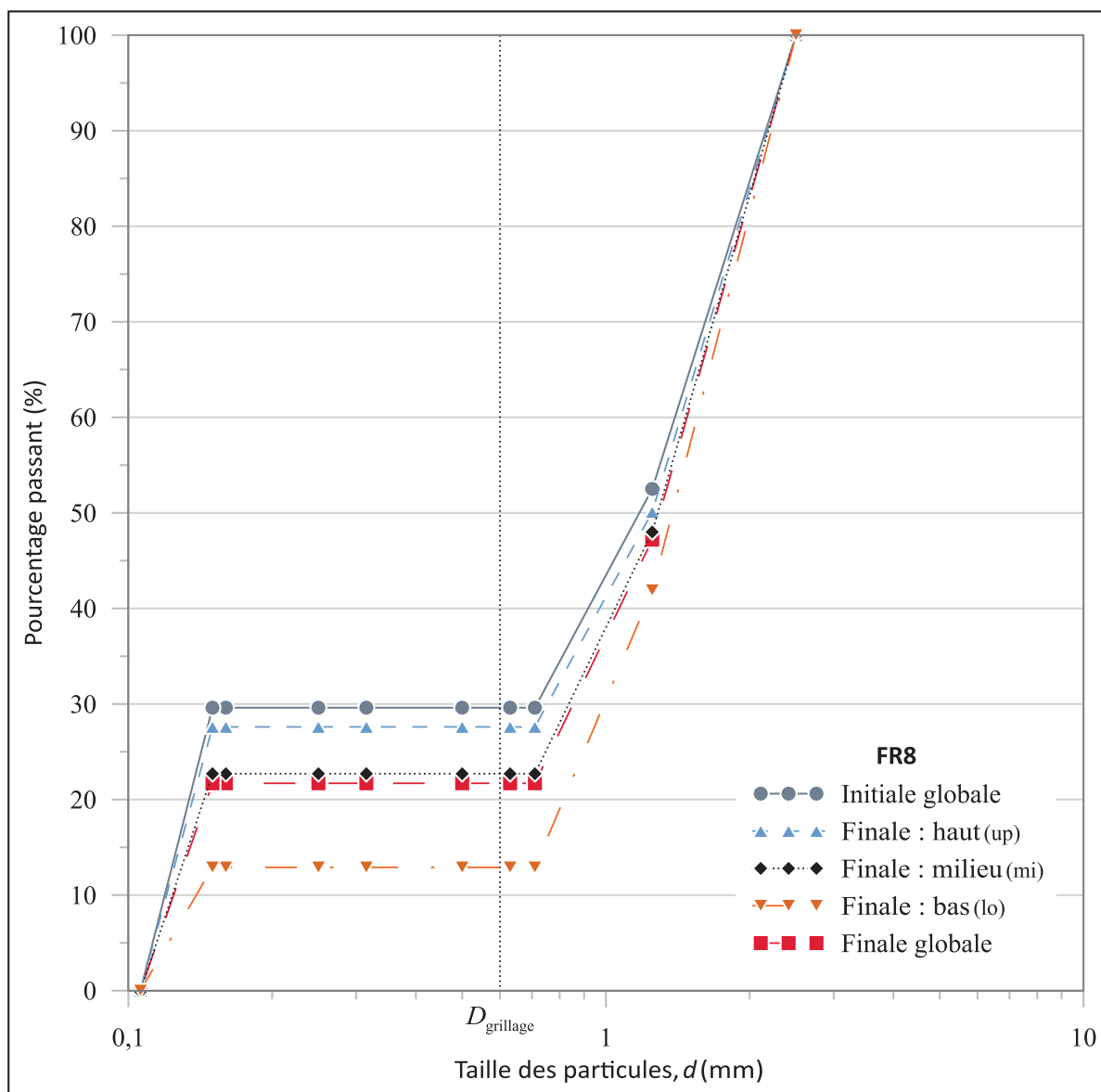


Figure-A III-16 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau FR8 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

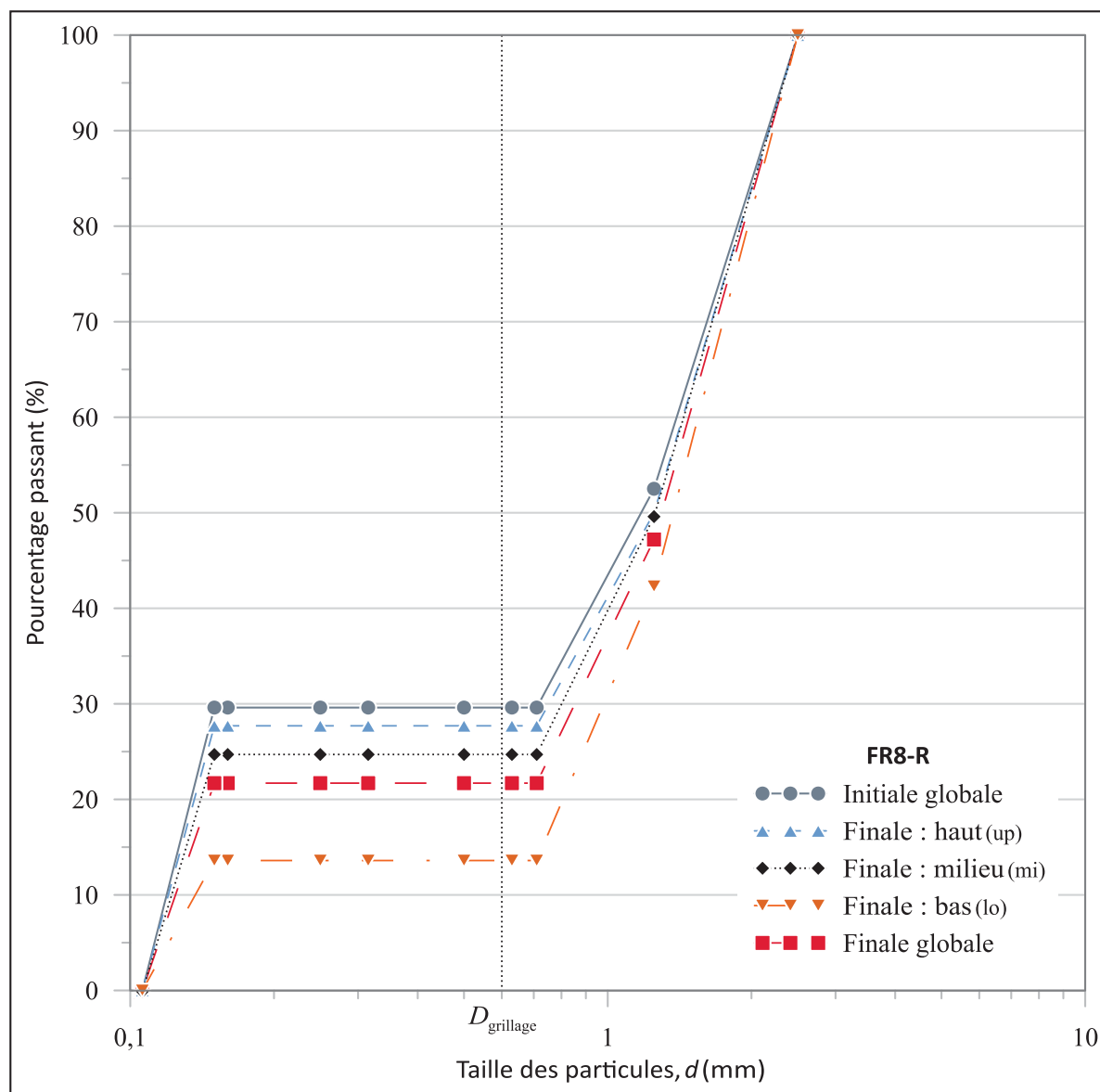


Figure-A III-17 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau FR8-R (global, portions du haut, du milieu et du bas)

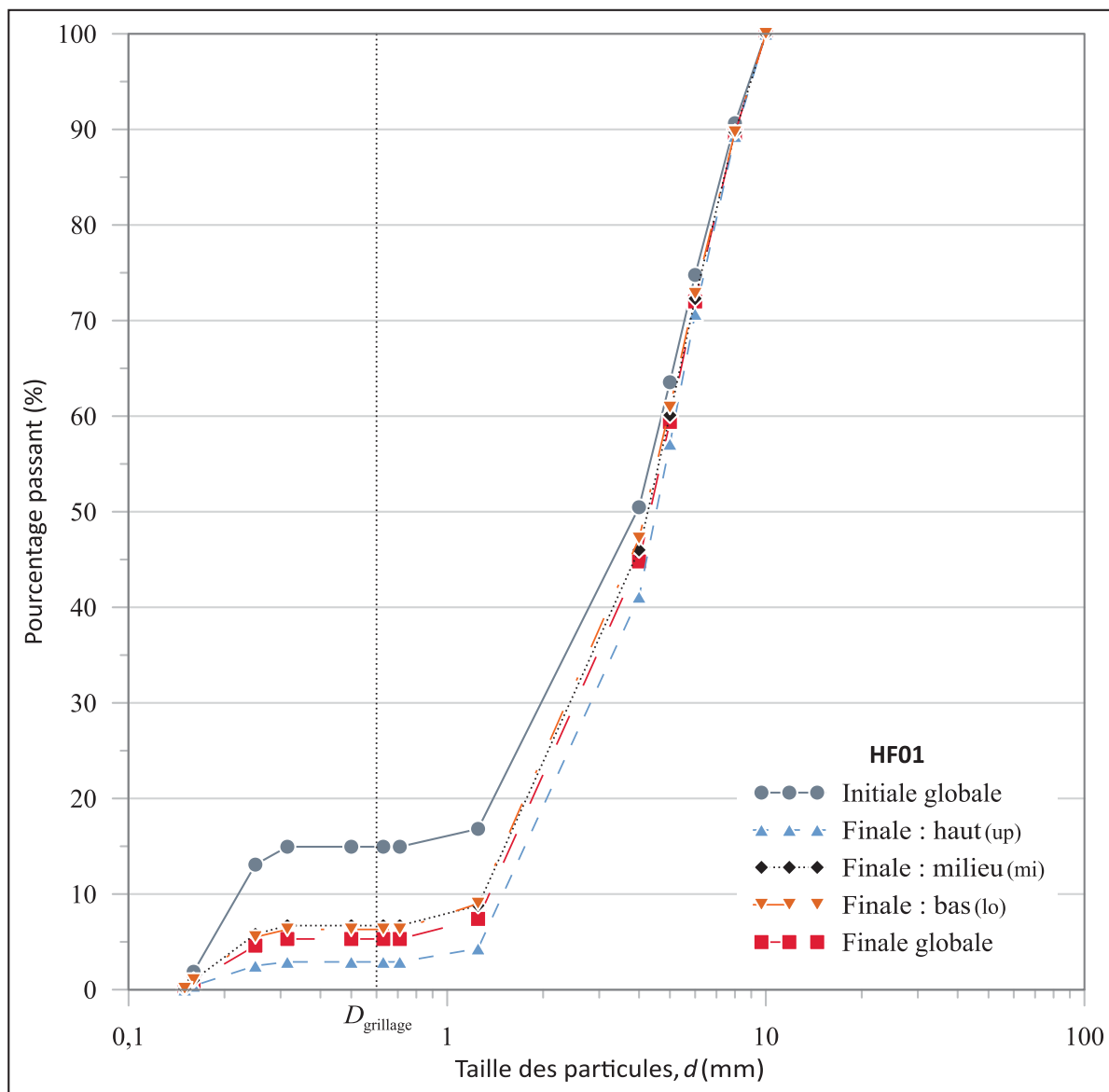


Figure-A III-18 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau HF01 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

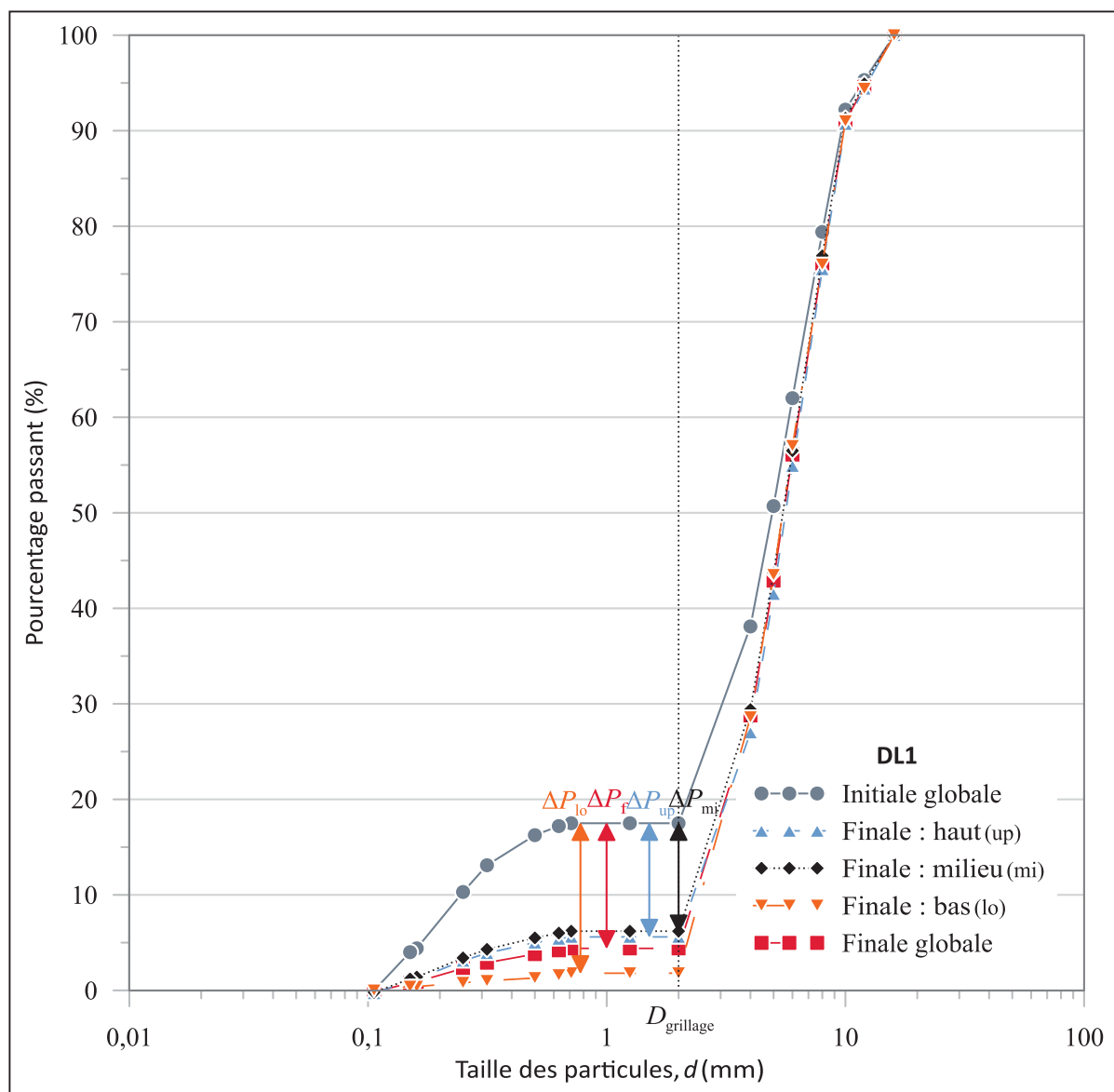


Figure-A III-19 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau DL1 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

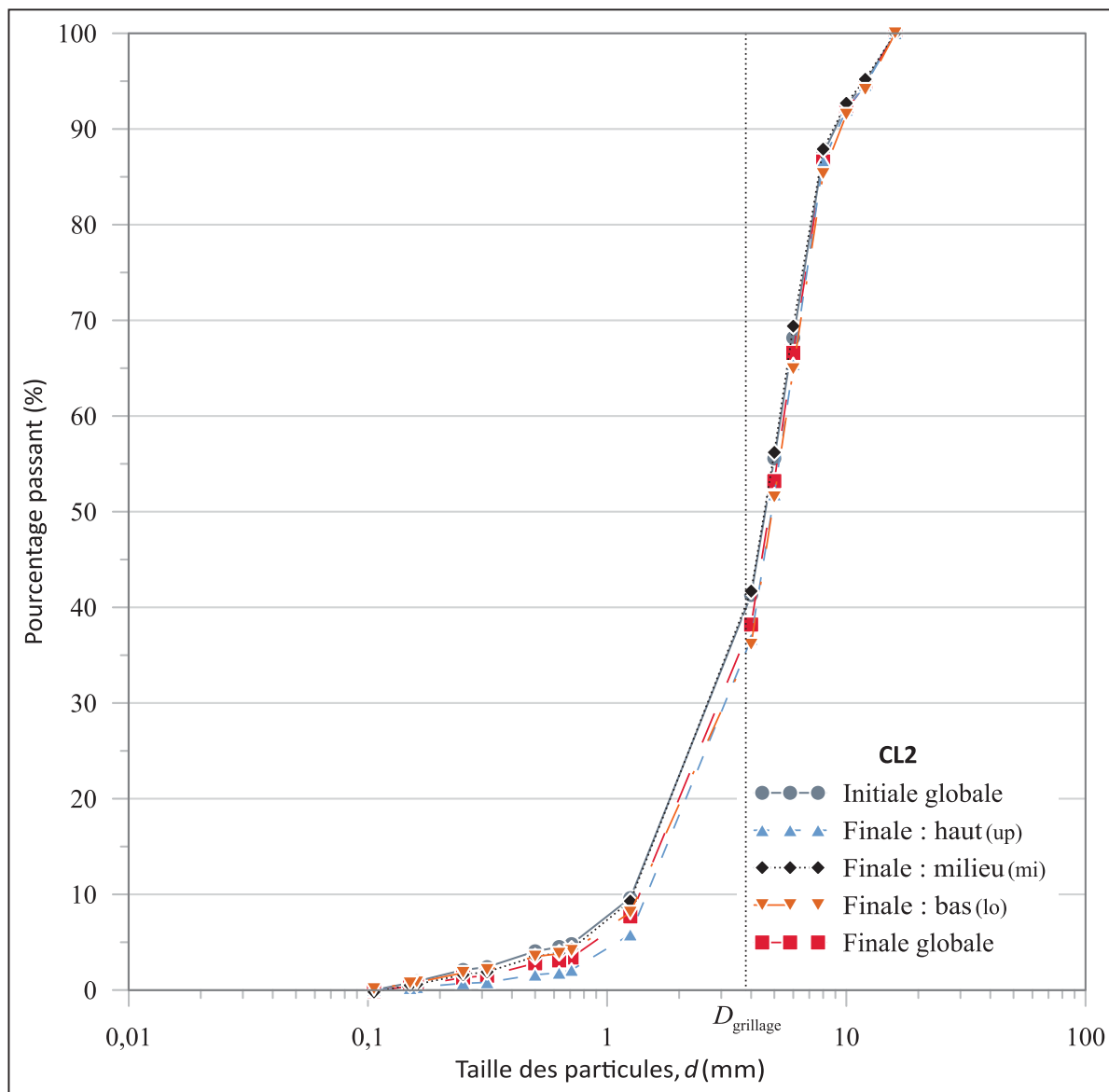


Figure-A III-20 Courbes granulométriques initiale et finales du matériau CL2 (global, portions du haut, du milieu et du bas)

ANNEXE IV

CALCUL DU VOLUME TOTAL ET DE L'INDICES DES VIDES ARTICLE 2 – CHAPITRE 4

Les Tableaux-A IV-1 à IV-40 présentent les mesures des hauteurs du vide (distance entre le haut du perméamètre et le haut de la plaque perforée concernée) et des épaisseurs de la plaque perforée et du grillage, utilisées pour calculer les longueurs (L , cm), V_t et e du matériau global, ainsi que de ses portions du haut (up), du milieu (mi) et du bas (lo), de même que leurs valeurs correspondantes pour les 19 matériaux retenus dans l'étude de l'article 2 (Chapitre 4) et pour le réplica du matériau FR8 (noté FR8-R dans le Chapitre 4). Ces mesures ont été effectuées, et les valeurs calculées, à la fin de l'essai, à l'exception du matériau global, pour lequel des mesures initiales ont également été réalisées avant l'essai.

À partir de ces mesures, les paramètres ΔV_{tf} , Δe_f , Δe_{up} , Δe_{mi} , et Δe_{lo} ont été calculés, également présentés dans les Tableaux 4.6 et 4.7 du Chapitre 4. Dans les tableaux de la présente Annexe IV, les paramètres Δe_f , Δe_{up} , Δe_{mi} , et Δe_{lo} , sont regroupés sous la notation générique Δe afin d'en simplifier la présentation.

Pour rappel, les matériaux sont placés dans un perméamètre de diamètre interne de 10,140 cm, dont l'aire correspondante est de 80,754 cm².

Tableau-A IV-1 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau 21

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	15,951	3,366	3,645	0,636	0,041
2	16,003	3,233	3,513	0,642	0,040
3	15,965	3,519	3,534	0,641	0,041
4	16,046	3,351	3,471	0,643	0,043
Moyenne	15,99	3,37	3,54	0,64	0,04

Tableau-A IV-2 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau 21

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	11,94	11,79	3,84	4,00	3,95
V_t (cm ³)	956,61	944,6	307,66	320,48	316,47
ΔV_{tf} (%)	1,3				
e	0,416	0,414	0,478	0,412	0,360
Δe (%)	-0,5		14,9	-1,0	-13,5

Tableau-A IV-3 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau FR3

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
		Avant essai	Après essai		
1	16,003	3,145	3,605	0,636	0,056
2	16,011	3,350	3,523	0,642	0,056
3	15,979	3,191	3,566	0,641	0,057
4	16,025	3,410	3,434	0,643	0,056
Moyenne	16,00	3,27	3,53	0,64	0,06

Tableau-A IV-4 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau FR3

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,03	11,79	3,84	4,00	3,95
V_t (cm ³)	971,47	952,09	310,1	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	2				
e	0,361	0,350	0,360	0,338	0,351
Δe (%)	-3,0		-0,3	-6,4	-2,8

Tableau-A IV-5 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau CL1

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
		Avant essai	Après essai		
1	15,927	2,840	3,402	0,636	0,067
2	15,898	2,859	3,371	0,642	0,067
3	16,023	2,948	3,348	0,641	0,067
4	15,977	2,967	3,284	0,643	0,067
Moyenne	15,96	2,9	3,35	0,64	0,07

Tableau-A IV-6 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau CL1

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,35	11,92	3,97	4,00	3,95
V_t (cm ³)	989,46	955,01	318,07	320,47	316,47
ΔV_{tf} (%)	3,5				
e	0,475	0,491	0,531	0,431	0,514
Δe (%)	3,2		11,7	-9,3	8,1

Tableau-A IV-7 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G2-a

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,043	3,276	3,401	0,636	0,056
2	16,050	3,102	3,385	0,642	0,056
3	16,065	3,426	3,493	0,641	0,057
4	16,067	3,272	3,436	0,643	0,056
Moyenne	16,06	3,27	3,43	0,64	0,06

Tableau-A IV-8 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G2-a

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,09	11,95	4	4	3,95
V_t (cm ³)	968,63	957,42	320,47	320,47	316,47
ΔV_{tf} (%)	1,2				
e	0,419	0,420	0,479	0,402	0,377
Δe (%)	0,2		14,3	-4,1	-10

Tableau-A IV-9 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G2-b

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,018	3,360	3,743	0,636	0,056
2	16,048	3,075	3,669	0,642	0,056
3	16,028	3,517	3,381	0,641	0,057
4	16,079	3,306	3,545	0,643	0,056
Moyenne	16,04	3,31	3,58	0,64	0,06

Tableau-A IV-10 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G2-b

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,03	11,78	3,83	4	3,95
V_t (cm ³)	963,83	943,8	306,85	320,47	316,47
ΔV_{tf} (%)	2,1				
e	0,403	0,385	0,426	0,365	0,366
Δe (%)	-4,6		5,6	-9,5	-9,3

Tableau-A IV-11 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau K

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	15,963	2,952	3,470	0,636	0,068
2	15,952	3,022	3,206	0,642	0,069
3	16,009	3,229	3,579	0,641	0,068
4	15,982	3,249	3,334	0,643	0,068
Moyenne	15,98	3,11	3,4	0,64	0,07

Tableau-A IV-12 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau K

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,21	11,94	3,99	4,00	3,95
V_t (cm ³)	986,01	964,21	322,21	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	2,2				
e	0,460	0,489	0,535	0,406	0,535
Δe (%)	6,4		16,4	-11,7	16,4

Tableau-A IV-13 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau C

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,018	3,088	3,492	0,636	0,068
2	15,981	3,196	3,353	0,642	0,069
3	16,055	3,182	3,373	0,641	0,068
4	16,019	3,043	3,346	0,643	0,068
Moyenne	16,02	3,13	3,39	0,64	0,07

Tableau-A IV-14 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau C

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,18	11,94	3,99	4,00	3,95
V_t (cm ³)	983,59	964,21	322,21	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	2,0				
e	0,394	0,428	0,445	0,392	0,447
Δe (%)	8,7		13,1	-0,4	13,6

Tableau-A IV-15 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau D

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{\text{grillage}} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	15,985	2,973	3,278	0,636	0,065
2	15,954	3,088	3,326	0,642	0,063
3	16,021	3,101	3,287	0,641	0,064
4	16,030	3,071	3,297	0,643	0,064
Moyenne	16,00	3,06	3,3	0,64	0,06

Tableau-A IV-16 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau D

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,24	12,02	4,07	4,00	3,95
V_t (cm ³)	988,43	970,67	328,67	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	1,8				
e	0,446	0,480	0,501	0,408	0,538
Δe (%)	7,7		12,3	-8,5	20,6

Tableau-A IV-17 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau CL3

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{\text{grillage}} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,004	3,311	3,801	0,636	0,073
2	15,935	2,926	3,345	0,642	0,072
3	16,020	2,929	4,096	0,641	0,074
4	16,005	3,295	3,461	0,643	0,073
Moyenne	15,99	3,12	3,68	0,64	0,07

Tableau-A IV-18 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau CL3

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,16	11,62	3,67	4,00	3,95
V_t (cm ³)	981,97	938,37	296,37	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	4,4				
e	0,279	0,279	0,309	0,229	0,306
Δe (%)	0		10,6	-18,0	9,5

Tableau-A IV-19 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-a

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,036	3,043	3,592	0,636	0,041
2	16,025	3,058	3,491	0,642	0,04
3	16,030	3,040	3,338	0,641	0,041
4	16,010	3,088	3,234	0,643	0,043
Moyenne	16,03	3,06	3,41	0,64	0,04

Tableau-A IV-20 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-a

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,29	11,96	4,01	4,00	3,95
V_t (cm ³)	992,47	965,82	323,82	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	2,7				
e	0,497	0,467	0,527	0,439	0,438
Δe (%)	-5,9		6,1	-11,6	-11,8

Tableau-A IV-21 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-b

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	15,970	2,846	3,458	0,636	0,041
2	16,003	2,812	3,449	0,642	0,04
3	15,976	3,161	3,664	0,641	0,041
4	16,055	3,229	3,578	0,643	0,043
Moyenne	16,00	3,01	3,54	0,64	0,04

Tableau-A IV-22 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-b

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,31	11,8	3,85	4,00	3,95
V_t (cm ³)	994,09	952,9	310,9	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	4,1				
e	0,404	0,362	0,393	0,351	0,344
Δe (%)	-10,4		-2,8	-13,2	-14,9

Tableau-A IV-23 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-c

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{\text{grillage}} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,019	3,133	3,548	0,636	0,041
2	16,012	3,263	3,429	0,642	0,04
3	16,045	3,191	3,627	0,641	0,041
4	15,998	3,274	3,507	0,643	0,043
Moyenne	16,02	3,22	3,53	0,64	0,04

Tableau-A IV-24 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-c

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,12	11,83	3,88	4,00	3,95
V_t (cm ³)	978,74	955,32	313,33	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	2,4				
e	0,360	0,339	0,379	0,320	0,322
Δe (%)	-5,6		5,4	-11,0	-10,5

Tableau-A IV-25 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-d

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{\text{grillage}} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,023	3,187	3,723	0,636	0,041
2	16,005	3,207	3,499	0,642	0,04
3	16,029	3,044	3,680	0,641	0,041
4	16,026	3,074	3,481	0,643	0,043
Moyenne	16,02	3,13	3,6	0,64	0,04

Tableau-A IV-26 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G1-d

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,21	11,76	3,81	4,00	3,95
V_t (cm ³)	986,01	949,67	307,67	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	3,7				
e	0,390	0,364	0,387	0,348	0,360
Δe (%)	6,5		-0,7	-10,7	-7,7

Tableau-A IV-27 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G3-a

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,034	3,302	3,748	0,636	0,041
2	16,000	3,419	3,672	0,642	0,04
3	16,024	3,464	3,747	0,641	0,041
4	16,026	3,524	3,814	0,643	0,043
Moyenne	16,02	3,43	3,75	0,64	0,04

Tableau-A IV-28 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau G3-a

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	11,91	11,61	3,66	4	3,95
V_t (cm ³)	954,21	930,18	293,23	320,47	316,47
ΔV_{tf} (%)	2,5				
e	0,326	0,328	0,417	0,278	0,305
Δe (%)	0,6		27,9	14,7	6,4

Tableau-A IV-29 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau a

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,038	3,206	3,683	0,636	0,073
2	15,982	3,261	3,795	0,642	0,072
3	16,048	3,338	3,494	0,641	0,074
4	15,998	3,345	3,531	0,643	0,073
Moyenne	16,02	3,29	3,63	0,64	0,07

Tableau-A IV-30 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau a

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,02	11,7	3,75	4,00	3,95
V_t (cm ³)	970,67	944,83	302,83	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	2,7				
e	0,225	0,250	0,281	0,178	0,291
Δe (%)	11,1		15,2	-27,0	19,3

Tableau-A IV-31 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau FR8

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,026	3,052	4,320	0,636	0,041
2	16,028	2,919	4,139	0,642	0,04
3	16,103	3,055	4,334	0,641	0,041
4	16,057	3,152	4,165	0,643	0,043
Moyenne	16,05	3,04	4,24	0,64	0,04

Tableau-A IV-32 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau FR8

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,33	11,15	3,2	4,00	3,95
V_t (cm ³)	987,86	893,32	256,38	320,47	316,47
ΔV_{tf} (%)	9,6				
e	0,321	0,346	0,370	0,306	0,370
Δe (%)	7,8		15,3	-4,7	15,3

Tableau-A IV-33 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau FR8-R

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	16,017	3,071	4,358	0,636	0,041
2	16,005	3,423	4,160	0,642	0,04
3	16,034	3,098	4,302	0,641	0,041
4	16,024	3,412	4,127	0,643	0,043
Moyenne	16,02	3,25	4,24	0,64	0,04

Tableau-A IV-34 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau FR8-R

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,09	11,12	3,17	4,00	3,95
V_t (cm ³)	968,63	890,92	253,98	320,47	316,47
ΔV_{tf} (%)	8,0				
e	0,295	0,325	0,343	0,285	0,354
Δe (%)	10,2		16,3	-3,4	20,0

Tableau-A IV-35 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau HF01

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	15,990	2,779	3,385	0,636	0,04
2	15,970	2,857	3,323	0,642	0,041
3	16,059	2,791	3,124	0,641	0,043
4	16,044	2,707	3,047	0,643	0,042
Moyenne	16,02	2,78	3,22	0,64	0,04

Tableau-A IV-36 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau HF01

	Global		Portion du haut (up)	Portion du milieu (mi)	Portion du bas (lo)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,56	12,14	4,19	4	3,95
V_t (cm ³)	1006,29	972,64	335,7	320,47	316,47
ΔV_{tf} (%)	3,3				
e	0,322	0,425	0,562	0,366	0,357
Δe (%)	31,7		74,3	13,5	10,7

Tableau-A IV-37 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau DL1

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{grillage} = 0,600$ mm
	Avant essai		Après essai		
1	15,963	2,828	3,354	0,636	0,069
2	15,947	2,623	3,374	0,642	0,07
3	15,984	2,633	3,410	0,641	0,069
4	16,052	2,845	3,430	0,643	0,072
Moyenne	15,99	2,73	3,39	0,64	0,07

Tableau-A IV-38 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau DL1

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,55	11,91	3,96	4,00	3,95
V_t (cm ³)	1005,49	954,21	317,27	320,48	316,47
ΔV_{tf} (%)	5,1				
e	0,301	0,431	0,472	0,461	0,366
Δe (%)	43,2		56,8	53,2	21,6

Tableau-A IV-39 Mesures utilisées pour calculer L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau CL2

Mesure	Hauteur du vide (cm)			Épaisseur (cm)	
	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du bas	Haut du perméamètre au haut de la plaque perforée du haut		Plaque perforée du haut	Grillage de $D_{\text{grillage}} = 0,600$ mm
		Avant essai	Après essai		
1	16,009	2,910	3,323	0,636	0,07
2	15,940	2,885	3,183	0,642	0,07
3	16,004	2,871	3,347	0,641	0,072
4	15,986	2,904	3,289	0,643	0,072
Moyenne					

Tableau-A IV-40 Valeurs calculées de L , V_t et e , ainsi que ΔV_{tf} et Δe , pour le matériau CL2

	Global		Portion du haut (<i>up</i>)	Portion du milieu (<i>mi</i>)	Portion du bas (<i>lo</i>)
	Initial	Final	Final		
L (cm)	12,38	12	4,05	4,00	3,95
V_t (cm ³)	999,74	969,05	327,06	323,02	318,98
ΔV_{tf} (%)	3,1				
e	0,409	0,433	0,470	0,389	0,441
Δe (%)	5,8		14,8	-4,9	7,8

ANNEXE V

APPLICATION DES CRITÈRES GÉOMÉTRIQUES ARTICLE 3 – CHAPITRE 5

Les Figures-A V-1 à V-10 présentent, sous forme de graphiques, les résultats de l'application des douze critères géométriques, six critères semi-empiriques et six critères dérivés, sur les 37 matériaux granulaires retenus dans l'article 3 (Chapitre 5). Chaque point représenté sur ces graphiques correspond à un matériau. Les symboles pleins correspondent aux matériaux évalués stables, tandis que les symboles vides représentent les matériaux instables, selon les évaluations expérimentales rapportées dans les études d'origine.

Les résultats des critères semi-empiriques de Kezdi (1979) et de Sherard (1979) sont regroupés sur un même graphique (Figure-A V-1). Ces derniers reposent le même principe d'évaluation de la stabilité interne, seule la valeur seuil retenue diffère (Tableau 1.2).

Les résultats du critère semi-empirique de Burenkova (1993) et du critère dérivé de Wan & Fell (2004, 2008) sont également présentés sur le même graphique (Figure-A V-4). Pour rappel, les limites permettant d'évaluer la stabilité interne des matériaux diffèrent : Burenkova (1993) s'appuie sur deux droites établies à partir de résultats expérimentaux, tandis que Wan & Fell (2008) compare les résultats à des droites de probabilité (Tableau 1.3). Seule la droite de probabilité correspondant à une probabilité d'instabilité de 70 %, valeur retenue par Roonqvist et Viklander (2016), est tracée ici. L'équation proposée pour les sables-graviers contenant moins de 10 % de particules fines non plastiques ($d < 0,075$ mm) a été utilisée, compte tenu de la nature des matériaux retenus.

Les résultats des méthodes proposées par Chang & Zhang (2013), qui diffèrent selon la forme de la courbe granulométrique, sont présentés dans des figures distinctes (Figure-A V-5 et Figure-A V-6). Pour les matériaux présentant des courbes granulométriques discontinues, la limite seuil de Honjo et al. (1996) a été ajoutée au graphique de Chang & Zhang (2013, Figure-A V-5). Pour rappel, ces deux approches évaluent la stabilité interne des matériaux avec une

courbe discontinue à partir du rapport granulométrique $d_{\max}/d_{\min}$ (Tableau 1.2 et 1.3), noté G_r dans Chang & Zhang (2013).

Pour les résultats du critère de Andrianatrehina et al. (2016), il a été choisi de les présenter sous forme de graphique, avec F correspondant à $(D'_{15}/d'_{85}) = 4$ en abscisses et (D'_{15}/d'_{85}) en ordonnées (Figure A V-7).

Enfin, les résultats des critères de Kenney & Lau (1985, 1986), de De Mello (1979), de Zhou et al. (2017), de Mandaglio et al. (2018) et de Li & Fannin (2008) sont présentés dans des graphiques distincts (Figure-A V-2, Figure-A V-3, Figure-A V-8, Figure-A V-9 et Figure-A V-10).

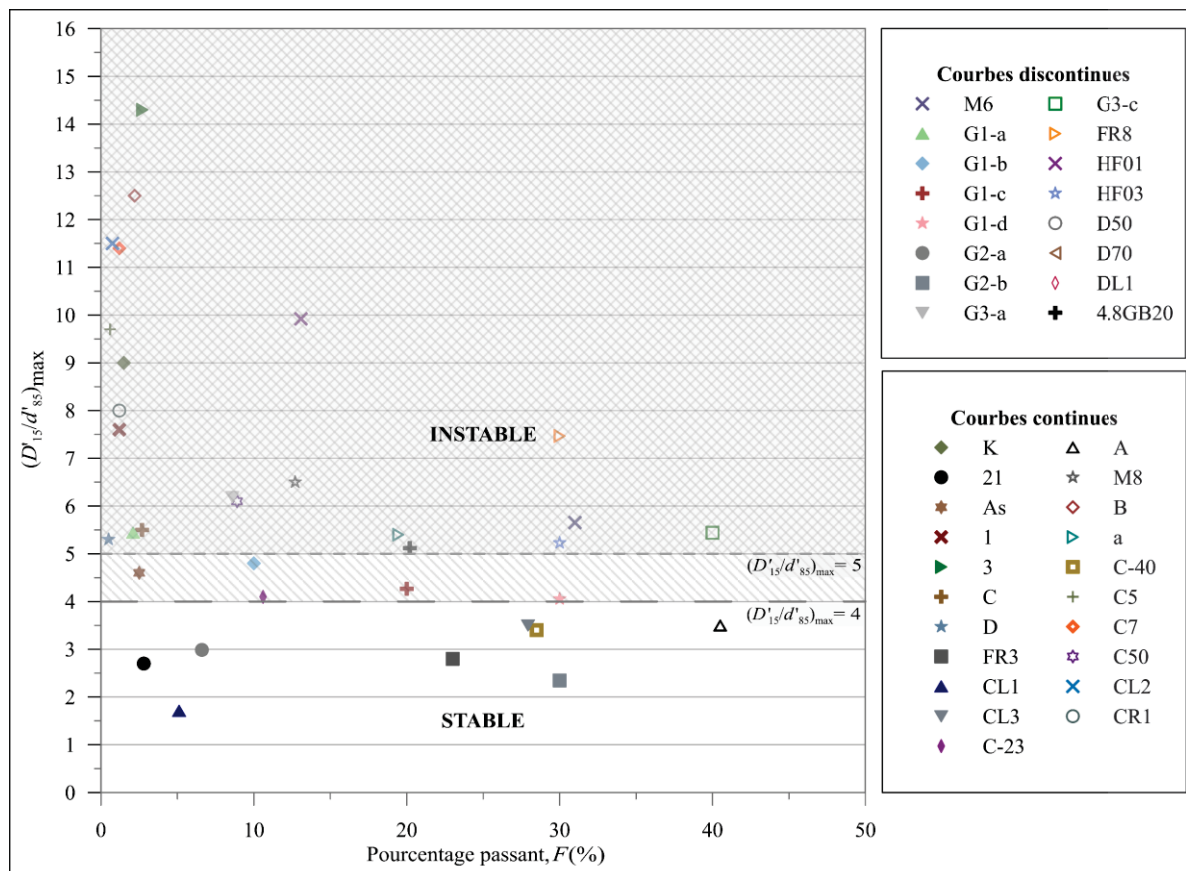


Figure-A V-1 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon les critères de Kezdi (1979) et de Sherard (1979)

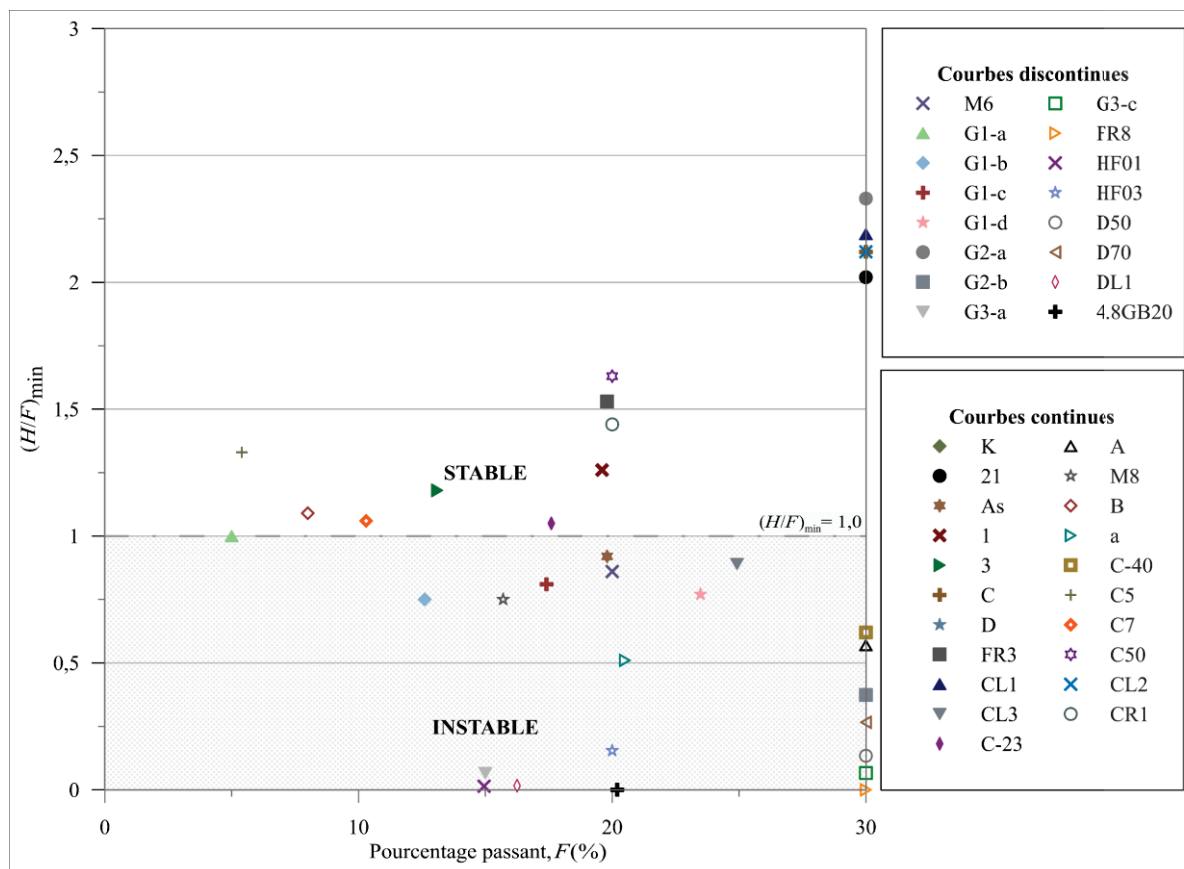


Figure-A V-2 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon le critère de Kenney & Lau (1985, 1986)

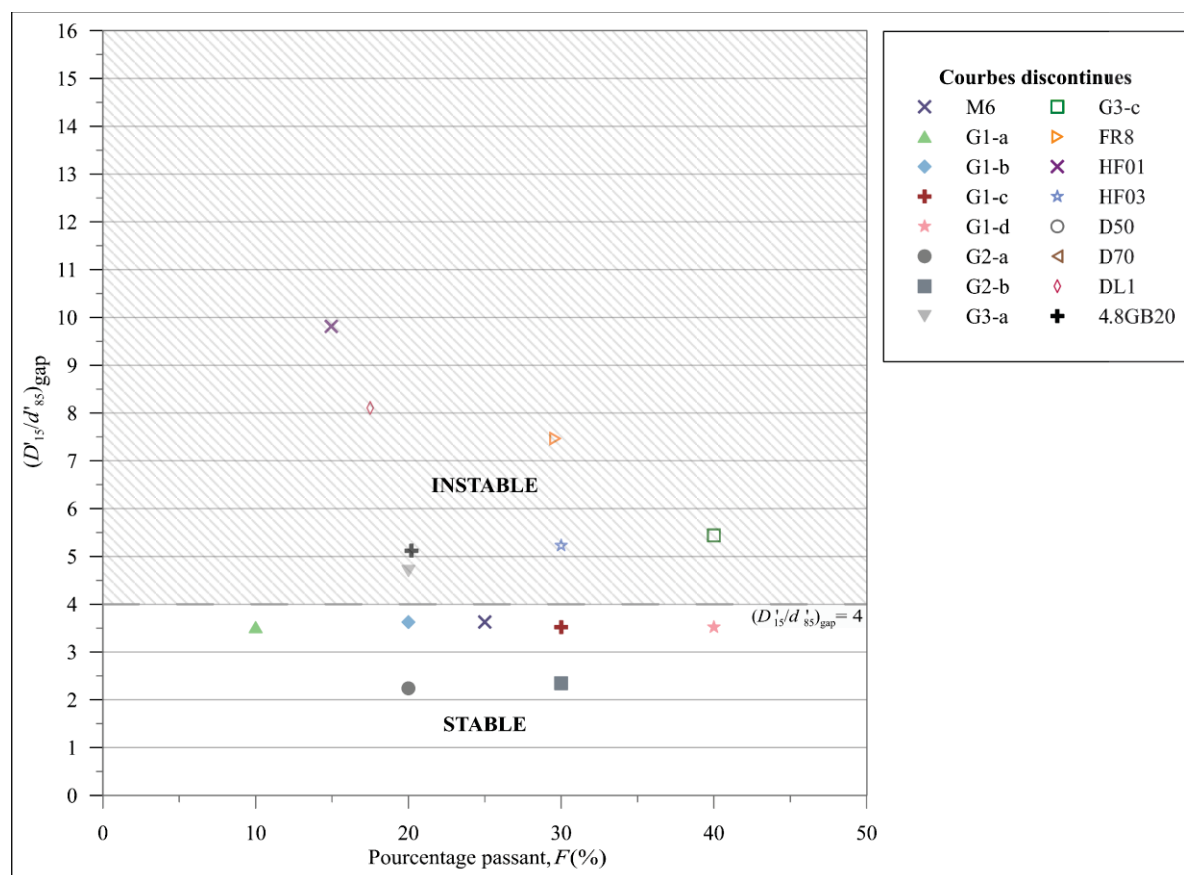


Figure-A V-3 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon le critère de De Mello (1979)

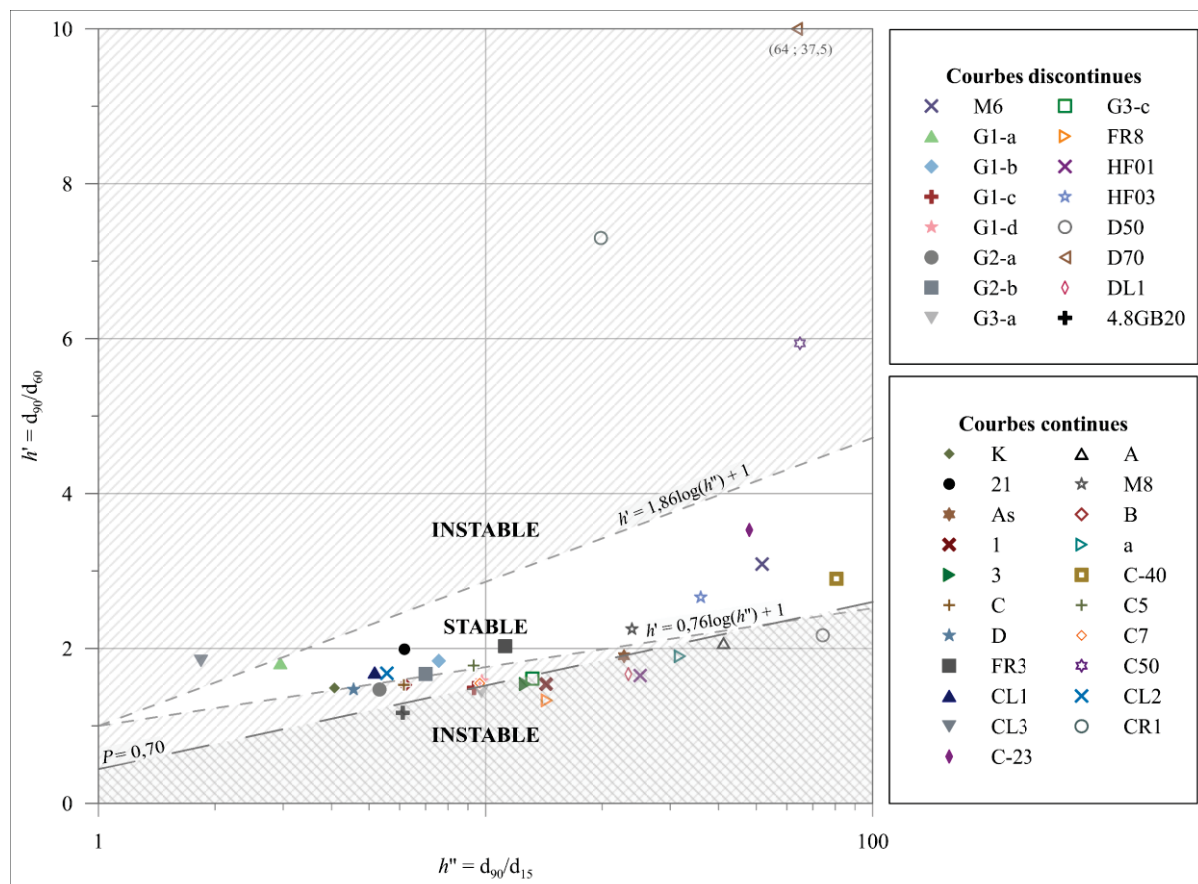


Figure-A V-4 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon le critère de Burenkova (1993) et de Wan & Fell (2004, 2008)

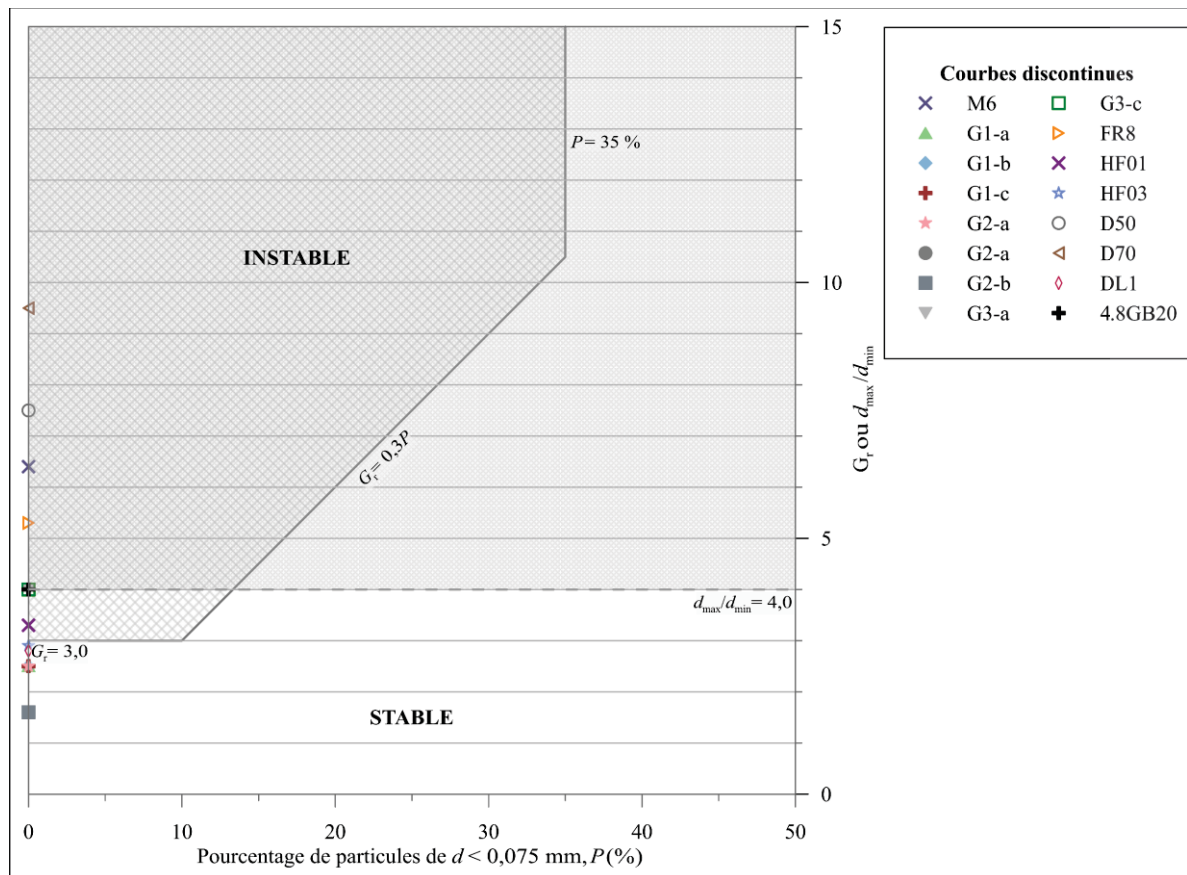


Figure-A V-5 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon le critère de Honjo et al. (1996) et de la méthode de Chang & Zhang (2016) pour les matériaux présentant une courbe granulométrique discontinue

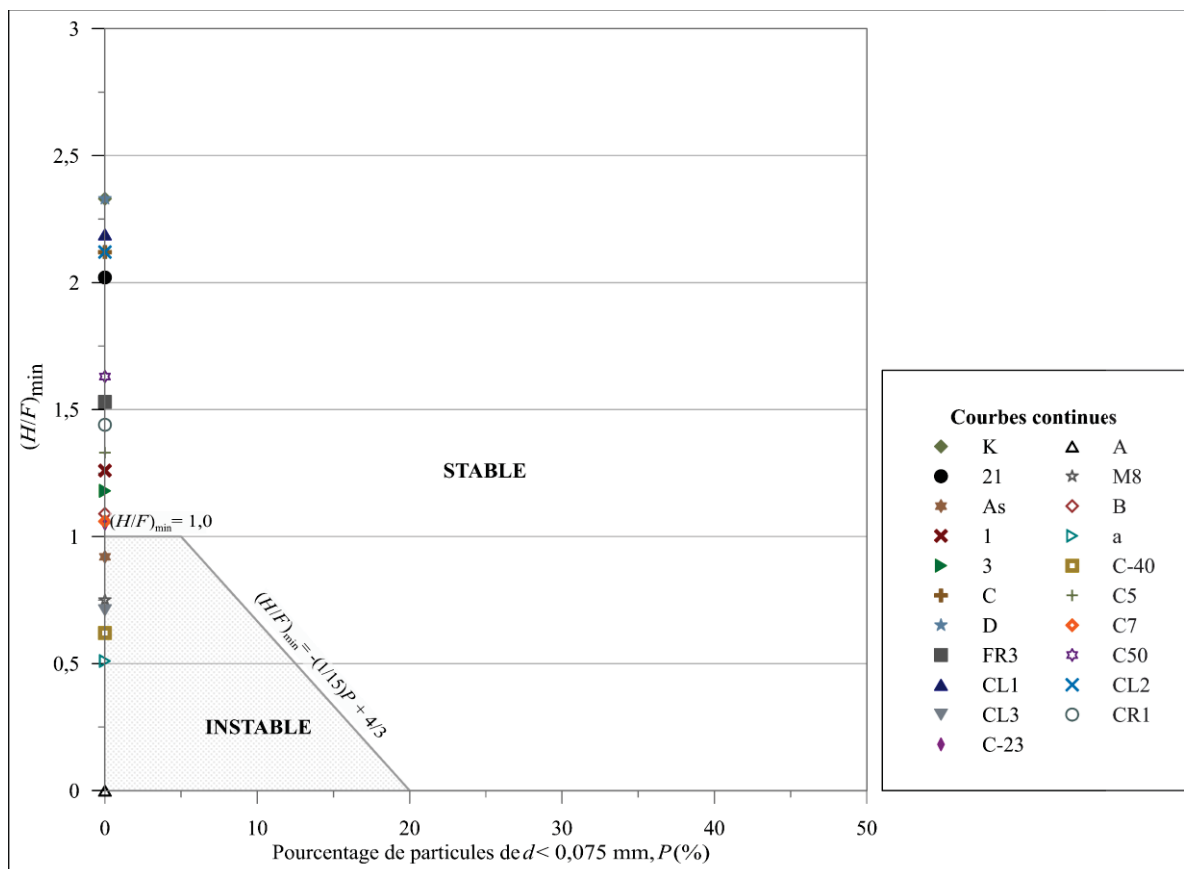


Figure-A V-6 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon la méthode de Chang & Zhang (2016) pour les matériaux présentant une courbe granulométrique continue

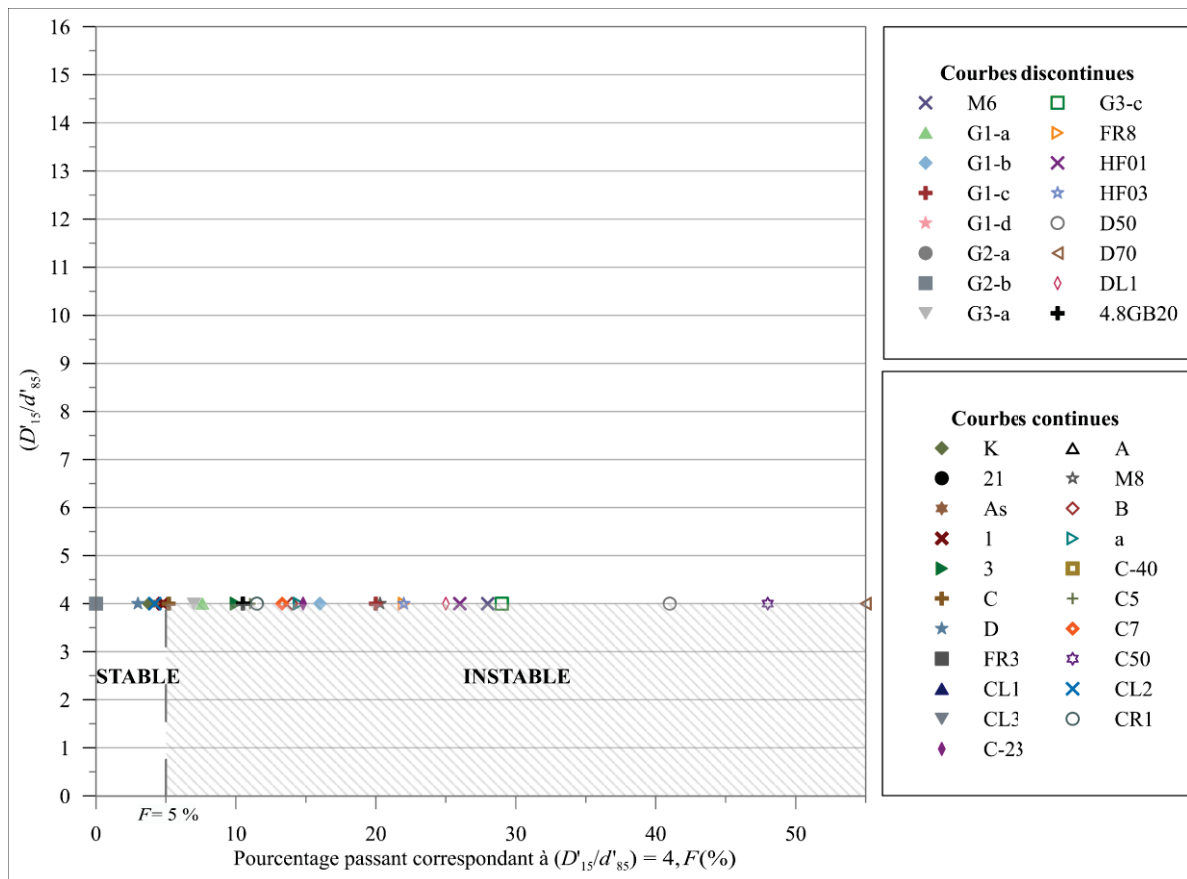
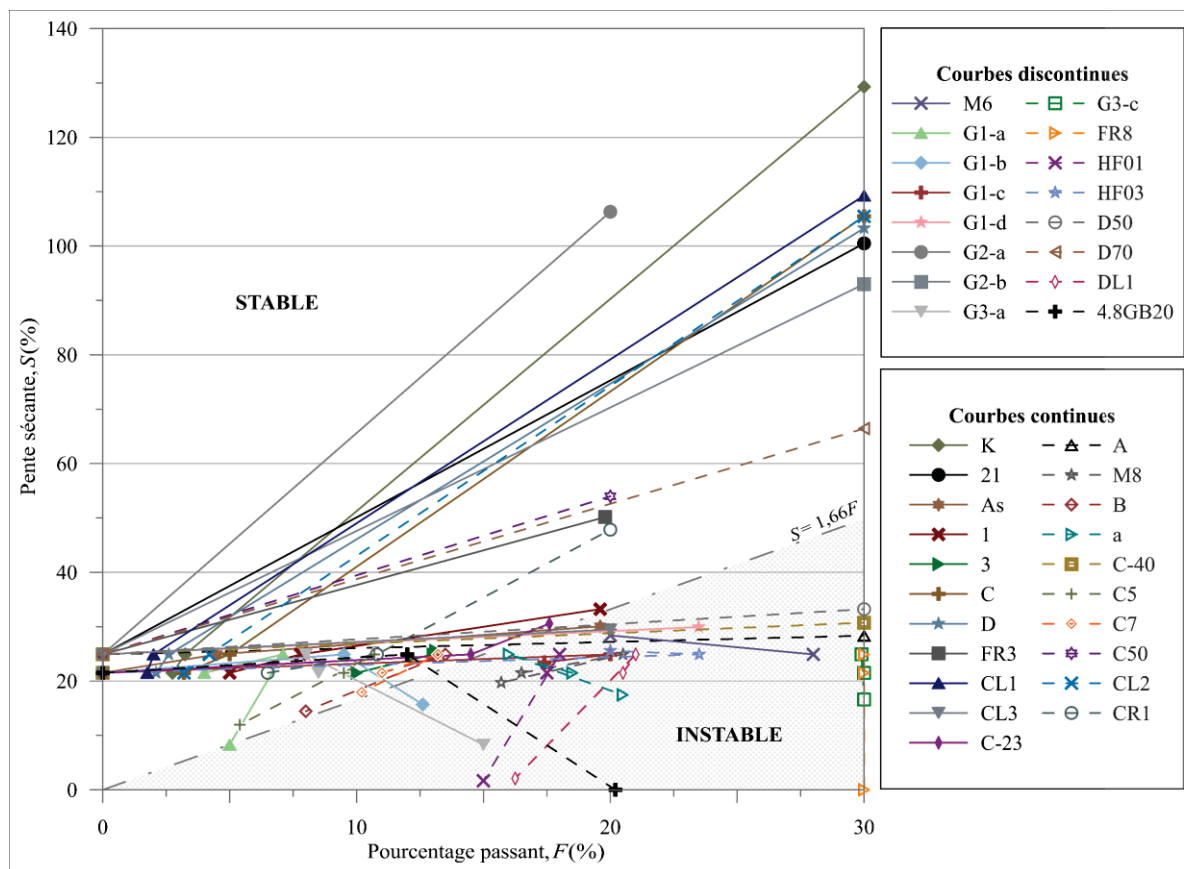


Figure A V-7 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon le critère de Andrianatrehina et al. (2016)



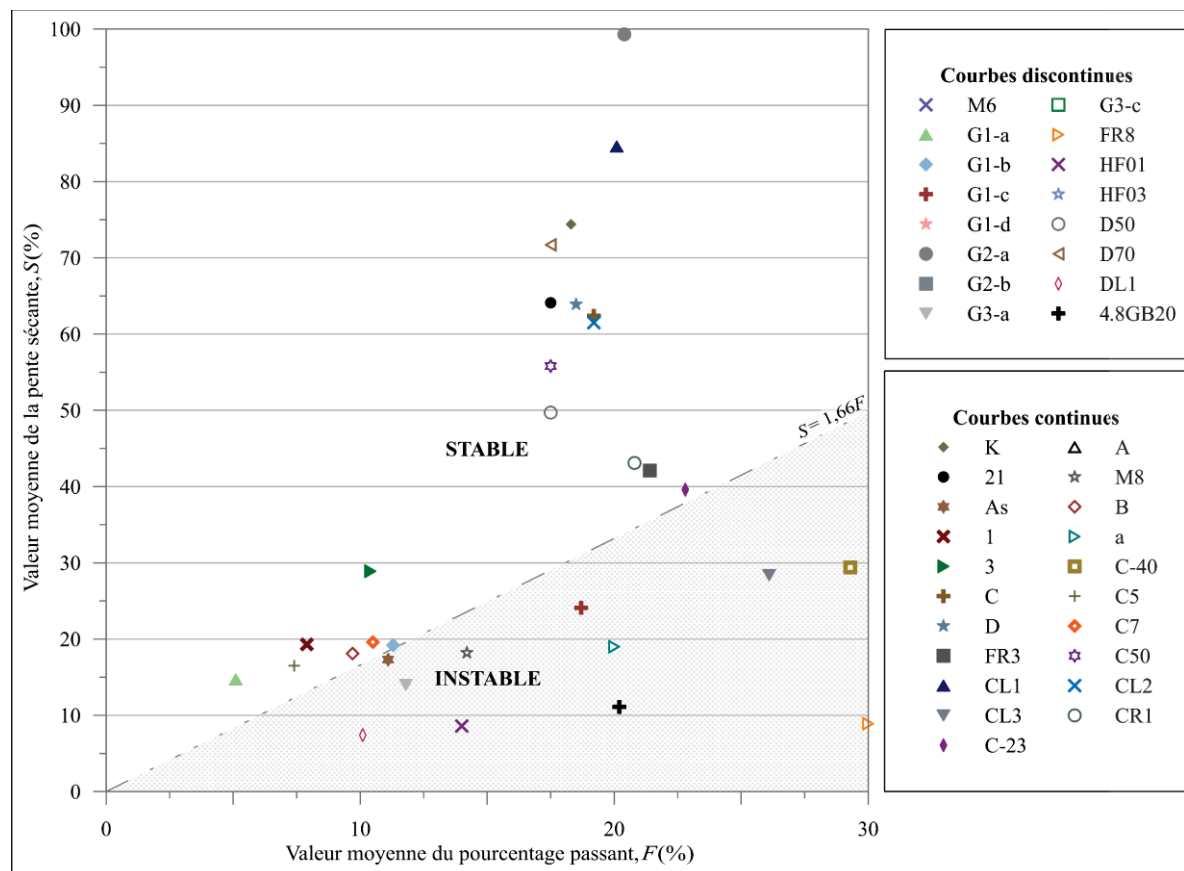


Figure A V-9 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon le critère de Mandaglio et al. (2018)

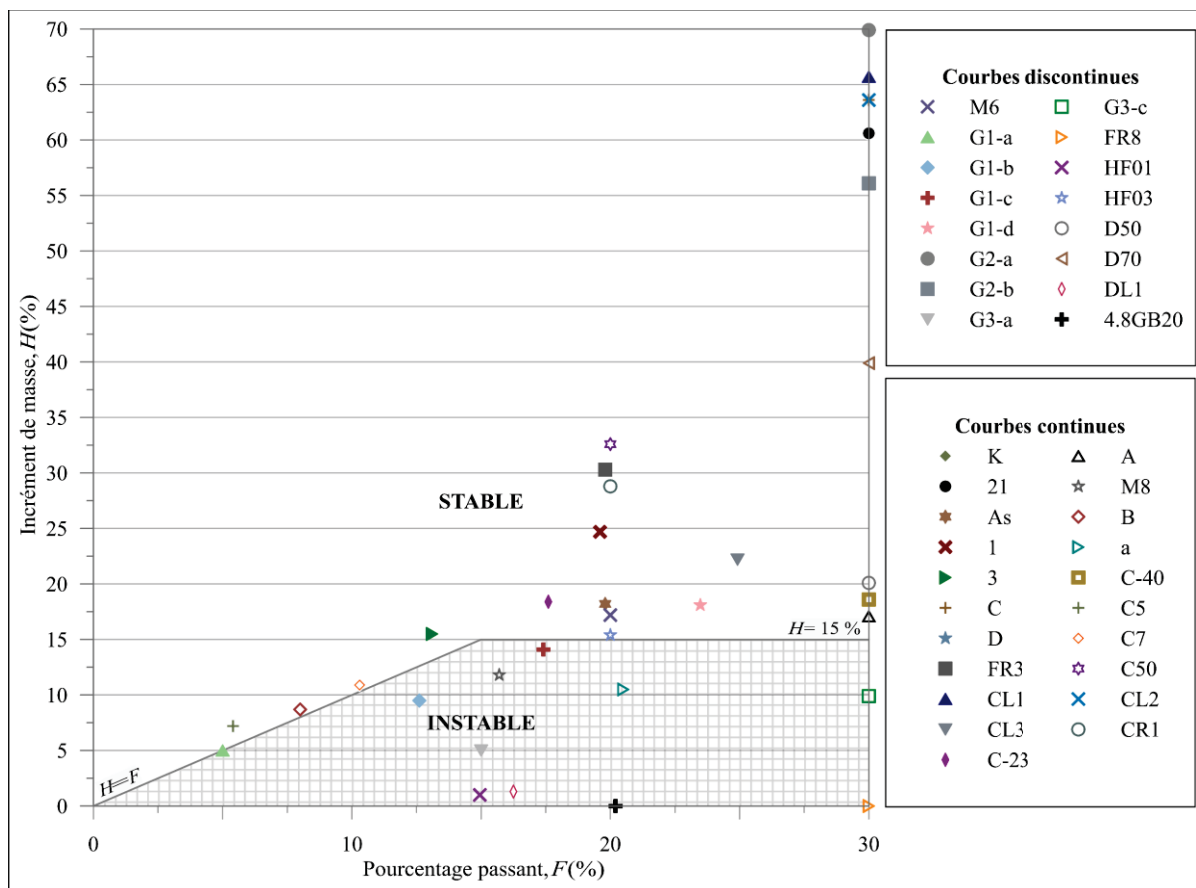


Figure A V-10 Évaluation de la stabilité interne des 37 matériaux granulaires selon le critère de Li & Fannin (2008)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- American Public Health Association. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21^{ème} éd.). Washington, D. C.: American Public Health Association.
- Andreotti, B., Forterre, Y., & Pouliquen, O. (2011). *Les milieux granulaires entre fluide et solide* (1ère éd.). Paris, France: EDP Sciences/CNRS Éditions.
- Andrianatrehina, L., Souli, H., Rech, J., Taibi, S., Fry, J.-J., Ding, L., & Fleureau, J.-M. (2016). Analysis of the internal stability of coarse granular materials according to various criteria. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(8), 936-953. doi: 10.1080/19648189.2015.1084385
- Association canadienne des barrages (ACB) (2019). *Les barrages au Canada*. Ottawa, Canada: Association canadienne des barrages.
- ASTM International. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM D854-14. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved May 1, 2014. doi: 10.1520/D0854-14
- ASTM International. (2015). *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter*. ASTM D5856-15. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved June 1, 2015. doi: 10.1520/D5856-15
- ASTM International. (2016). *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*. ASTM D4253-16e1. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved March 1, 2016. doi: 10.1520/D4253-16E01
- ASTM International. (2016). *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*. ASTM D4254-16. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved March 1, 2016. doi: 10.1520/D4254-16
- ASTM International. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. ASTM D2487-17e1. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved December 15, 2017. doi: 10.1520/D2487-17E01

- ASTM International. (2017). *Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems*. ASTM D5101-12 (2017). West Conshohocken, PA: ASTM International, approved February 15, 2017. doi: 10.1520/D5101-12R17
- ASTM International. (2017). *Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity*. ASTM D4491/D4491M-17. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved January 1, 2017. doi: 10.1520/D4491_D4491M-17
- ASTM International. (2019). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*. ASTM D2434-19. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved October 1, 2019. doi: 10.1520/D2434-19
- ASTM International. (2022). *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Coarse-Grained Soils*. ASTM D2434-22. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved March 15, 2022. doi: 10.1520/D2434-22
- Ataii, S. & Fannin, J. (2022). A triaxial permeameter to study the mechanical consequences of internal erosion. *GeoCalgary 2022*, 1-7.
- Aydilek, A. H. & Kutay M.E. (2004). Development of an Innovative Computer-Controlled Water Deairing System for Hydraulic Testing of Geosynthetics. *Journal of Testing and Evaluation*, 32(2), 161-166. doi: 10.1520/JTE11852
- Bardet, J.-P. (1997). *Experimental Soil Mechanics* (1^{ère} éd.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bertram, G. E. (1940). *An experimental investigation of protective filters*. (Soil Mechanics Series n° 7, Publication n° 267). Cambridge, MA: Graduate School of Engineering, Harvard University.
- Blais, J.-P. (2005). Typologie de l'érosion interne et érosion interne des digues fluviales : une courte revue bibliographique. *Sciences Eaux & Territoires*, (Spécial Ingénieries-EAT-21), 65-70.
- Bouin, C., Weber, S., Ethier, Y. A., Dubé, J.-S., & F. Duhaime. (2021). On Preferred Saturation Methods for Geotechnical Flow Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 44(4), 1135-1152. doi: 10.1520/GTJ20190181
- Brooks, R.H., & Corey, A.T. (1964). *Hydraulic properties of porous media* (Hydrology papers n°3). Fort Collins, Colorado: Colorado State University.

- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2006). *Sols - Détermination de la limite de liquidité à l'aide du pénétromètre à cône et de la limite de plasticité*. CAN/BNQ 2501-092. Québec: Ministère de l'industrie et du commerce.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2011). *Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande et de la limite de plasticité*. CAN/BNQ 2501-090. Québec: Ministère de l'industrie et du commerce.
- Burenkova, V. V. (1993). Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. Dans Brauns, Helbaum and Schuler (Éds), *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*. (pp. 357-360). Balkema, Rotterdam.
- Chang, D. S. & Zhang, L. M. (2011). A Stress-controlled Erosion Apparatus for Studying Internal Erosion in Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 579-589. doi: 10.1520/GTJ103889
- Chang, D. S. & Zhang, L. M. (2013). Extended internal stability criteria for soils under seepage. *Soils and Foundations*, 53(4), 569-583. doi: 10.1016/j.sandf.2013.06.008
- Chapuis, R. P. (1992). Similarity of Internal Stability Criteria for Granular Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 711-713. doi: 10.1139/t92-078
- Chapuis, R. P. (2004). Permeability Tests in Rigid-wall Permeameters: Determining the Degree of Saturation, its Evolution and Influence on Test Results. *Geotechnical Testing Journal*, 27(3), 304-313. doi: 10.1520/GTJ10905
- Chapuis, R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: A review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(3), 401-434. doi: 10.1007/s10064-012-0418-7
- Chapuis, R. P. (2017). Compacted Clay: Difficulties Obtaining Good Laboratory Permeability Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 40(2), 185-198. doi: 10.1520/GTJ20150286
- Chapuis, R.P., & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 616-628. doi: 10.1139/t03-013
- Chapuis, R. P., Baass, K., & Davenne, L. (1989). Granular soils in rigid-wall permeameters: method for determining the degree of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(1), 71-79. doi: 10.1139/t89-008

- Chapuis, R. P., Weber, S., & Duhaime, F. (2015). Permeability Test Results With Packed Spheres and Non-Plastic Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 38(6), 1-15. doi: 10.1520/GTJ20140124
- Charles, J. A. (2001). International erosion in european embankments dams. *Hydropower 01, ICOLD European Symposium*.
- Chen, L., Peng, H., & Yang, D. (2018). The Microstructure and Water Distribution of Partially Saturated Hard Clay. *Geotechnical Testing Journal*, 41(4), 830–835. doi: 10.1520/GTJ20160336
- Chu, T. Y., Davidson, D. T., & Wickstrom, A. E. (1955). Permeability Test for Sands. Dans Subcommittee R-4 (Éd.), *Symposium on Permeability of Soils* (STP163-EB, pp. 43-55). West Conshohocken, PA: ASTM International. doi: 10.1520/STP163-EB
- Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB). (2023). Synthèse Générale. Repéré à https://www.icold-cigb.org/FR/registre_des_barrages/synthese_generale.asp
- Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB). (Éds). (2011). *Constitution*. Paris, France: ICOLD/CIGB.
- Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB). (2017). *L'érosion interne dans les digues, barrages existants et leurs fondations* (Bulletin 164). Paris, France: ICOLD/CIGB.
- Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) - Committee on Dam Safety (CODS). (2019). *Statistical analysis of dam failures* (Incident database Bulletin 99 update). ICOLD/CIGB.
- Corapcioglu, M., & Fedirchuk, P. (1999). Glass bead micromodel study of solute transport. *Journal of contaminant hydrology*, 36(3-4), 209-230. doi: 10.1016/S0169-7722(98)00145-4
- Courrech de Pont, S. (2003). *Avalanches granulaires en milieu fluide*. (Thèse de doctorat, Université Paris XI, Paris, France).
- Daniel, D. E. (1994). State-of-the-Art: Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils. Dans Daniel D.E., & Trautwein, S.J. (Éds.), *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, (STP1142-EB, pp. 30-78). West Conshohocken, PA: ASTM international. doi: 10.1520/STP23884S

- De Mello, V. F. B. (1975). Some lessons from unsuspected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil. *6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanical and Foundation Engineering*, 11, 285-304.
- Duhaime, F., Chapuis, R. P., & Weber, S. (2015). Parasitic Head Losses During Laboratory Permeability Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 38(2), 255-260. doi: 10.1520/GTJ20130175
- Fannin, R. J. & Moffat, R. (2006). Observations on internal stability of cohesionless soils. *Geotechnique*, 56(7), 497-500. doi: 10.1680/geot.2006.56.7.497
- Fannin, R. J. & Slangen, P. (2014). On the distinct phenomena of suffusion and suffosion. *Géotechnique Letters*, 4(4), 289-294. doi: 10.1680/geolett.14.00051
- Fell, R. & Fry, J.-J. (2007). *Internal Erosion of Dams and Their Foundations* (1^{ère} éd.). Londres, Royaume-Uni: Taylor & Francis Group.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2014). *Geotechnical Engineering of Dams* (2^e éd.). Londres, Royaume-Uni: CRC Press.
- Fischer, G. R., Maré, A. D., & Holtz, R. D. (1999). Influence of Procedural Variables on the Gradient Ratio Test, *Geotechnical Testing Journal*, 22(1), 22-31. doi: 10.1520/GTJ11313J
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024. doi: 10.1139/t00-030
- Freeze, R., & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Fry, J.-J. (2016), Lessons on internal erosion in embankment dams from failures and physical models. *ICSE 2016: Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion*, 41-58. doi: 10.1201/9781315375045-6
- Garner, S. J. & Fannin, R. J. (2010). Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event. *The International Journal on Hydropower and Dams*, 17(3), 93-98.
- Halse, Y. H., Lord A. E. Jr., & Koerner R. M. (1988). Effect of Dissolved Oxygen (and Bubbles) on the Measured Permittivity of Geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, 11(2), 158-160. doi: 10.1520/GTJ10963J

- Harlow, F.H., & Welch, J.E. (1965). Numerical calculation of time dependent viscous incompressible flow fluid with free surface. *Physics of fluids*, 8(12), 2182-2189. doi: 10.1063/1.1761178
- Holtz, R.D., & Kovacs, W.D. Traduit par Lafleur, J. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Montréal, QC: Presses internationales Polytechnique.
- Honjo Y., Haque M. A., & Tsai K. A. (1996), Self-filtration behavior of broadly and gap-graded cohesionless soils. Dans Lafleur, J. & A. Rollin (Éds), *Proceedings of 2nd International Conference on geofilters 96* (pp. 227-236). Montréal, Canada: BiTech Publishers.
- Hunter, R. P., & Bowman, E. T. (2015). Visualisation of internal erosion of a granular material via a new transparent soil permeameter. Dans M.G. Winter, D.M. Smith & P.J.L. Eldred (Éds), *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE)* (pp.1965-1970). Edinburgh, Scotland: ICE Publishing.
- Hydro-Québec. (2023). Ouvrages de retenue. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite/ouvrages-retenue.html>
- Indraratna, B., Israr, J., & Rujikiatkamjorn, C. (2015). Geometrical Method for Evaluating the Internal Instability of Granular Filters Based on Constriction Size Distribution. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(10), 1-14. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001343
- Indraratna, B. & Locke, M. R. (1999). Design methods for granular filters - critical review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 137(3), 137-147. doi: 10.1680/gt.1999.370303
- Indraratna, B., Nguyen, V. T., & Rujikiatkamjom, C. (2011). Assessing the Potential of Internal Erosion and Suffusion of Granular Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(5), 550-554. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000447
- Israr, J. & Irfan, M. (2020). Effects of Compaction on Internal Stability of Granular Soils: An Experimental Evaluation of Particle-Based Methods. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(2), 990–1013. doi: 10.1520/JTE20170321
- Istomina, V. S. (1957). Filtration stability of soils (en Russe). Gostroizdat, Moscow, Leningrad.

- Ke, L. & Takahashi, A. (2014). Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil. *Soils and Foundations*, 54(4), 713-730. doi: 10.1016/j.sandf.2014.06.024
- Kenney, T. C. & Lau, D. (1985). Internal Stability of Granular Filters, *Canadian Geotechnical Journal*, 22(2), 215-225. doi: 10.1139/t85-029
- Kenney, T. C. & Lau, D. (1986). Internal Stability of Granular Filters: Reply. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(4), 420-423. doi: 10.1139/t86-068
- Kezdi, A. (1969). *Increase of protective capacity of flood control dikes* (in Hungarian). (Rapport n°1). Budapest: Département de Géotechnique, Université de technologie de Budapest.
- Kezdi, A. (1979). *Soil physics: selected topics* (1ère éd.). Amsterdam, NY: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Khan, A. S. (2003). *Experimental study for evaluating the internal stability of gap-graded soils*. (Thèse de doctorat, University Of British Columbia, Vancouver, BC).
- Koffi, K., Aubertin, M., Hernandez, M.A., Ouangrawa, M., Chapuis, R., & Bussiere, B. (2008). Étude de la conductivité hydraulique des mélanges à granulométrie étalée. *GéoEdmonton 2008*, 1478-1483.
- Kovacs, G. (1981). *Seepage hydraulics* (1ère éd.). Amsterdam, NY: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Kuerbis, R. H. & Vaid, Y. P. (1988). Sand Sample Preparation - The Slurry Deposition Method. *Soil foundations*, 28(4), 107-118. doi: 10.3208/sandf1972.28.4_107
- Kutzner, C. (1997). *Earth and Rockfill Dams: Principles of Design and Construction* (1ère éd.). Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema. doi: 10.1201/9780203758991
- La Société canadienne de géotechnique (2023). *Manuel Canadien d'Ingénierie des Fondations*. MCIF (5^e éd.). Surrey, BC: La Société canadienne de géotechnique.
- Lafleur, J., Mlynarek J., & Rollin, A. L. (1989). Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(12), 1747-1768. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:12(1747)

- Lai, Y., Bai, S., Hou, J., Zhou, Z., Wu, Q., Lv, X., ... Ren, Z. (2022). A Synthetic Chart for Internal Stability Assessment of Soils Based on Soil PSD Curves. *Processes*, 10(5), 807. doi: 10.3390/pr10050807
- Lambe, T.W., & Whitman, R.V. (1969). *Soil Mechanics*. Chichester, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Landon, M. E., Marchetti, C., & DeGroot, D. J. (2018). Constant Rate of Strain Consolidation Testing of Saturated Cohesive Soils Without Back Pressure Saturation. *Geotechnical Testing Journal*, 41(2), 425-433. doi: 10.1520/GTJ20170030
- Li, M. (2008). *Seepage Induced Instability in Widely Graded Soils*. (Thèse de doctorat, University Of British Columbia, Vancouver, BC).
- Li, M. & Fannin, J. R. (2008). Comparison of Two Criteria for Internal Stability of Granular Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(9), 1303-1309. doi:10.1139/T08-046
- Loebotsjkov, E. A. (1969). The calculation of suffosion properties of noncohesive soils when using the non-suffosion analog (en Russe). *Proceeding of the International Conference on Hydraulic Research*, 135-148.
- Lowe, J. (1988). *Seepage analysis, in advanced dam engineering, for design, construction and rehabilitation* (1ère éd.). New York, NY: Van Nostrand Reinhold.
- Lubochkov, E. A. (1962). The self-filtering behaviour of non-cohesive soils (en Russe). *Izvestia VNIIG*, 71.
- Lubochkov, E. A. (1965). Graphical and analytical methods for the determination of internal stability of filters constating of non-cohesive soil (en Russe). *Izvestia VNIIG*, 78: 255-280.
- Mandaglio M. C., Moraci, N., & Polimeni, E. (2018). Assessment of Internal Stability of Granular Soils by Means of Theoretical and Laboratory Methods. Dans Bonelli, S., Jommi, C. & D. Sterpi, *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Leveers: Proceedings of EWG-IE 26th Annual Meeting* (pp. 60-68). Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.
- Marche, C. (2008). *Barrages, crues de rupture et protection civile* (2e éd.). Montréal, Québec: Presses Internationales Polytechnique.

- McCarthy, E. L. (1934). Mariotte's Bottle. *Science*, 80(2065), 100. doi: 10.1126/science.80.2065.100
- Métayer, J.F. (2008). *Stabilité et propriétés rhéologiques d'empilements granulaires confinés*. (Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, France).
- Moffat, R. (2002). *A laboratory study of particle migration in cohesionless soils*. (Thèse de doctorat, University Of British Columbia, Vancouver, BC).
- Moraci, N., Mandaglio, M. C., & Ielo, D. (2014). Analysis of the internal stability of granular soils using different methods. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(9), 1063-1072. doi: 10.1139/cgj-2014-0006
- Moraci, N., Mandaglio, M. C., & Ielo, D. (2015). Reply to the discussion by Ni et al. on "Analysis of the internal stability of granular soils using different methods" *Canadian Geotechnical Journal*, 52(3), 385-391. doi: 10.1139/cgj-2014-0495
- Ni, X., Dallo, Y. A. H., & Wang, Y. (2018). Internal stability assessment of granular soils using the Kezdi and Sherard methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 171(4), 357-362. doi: 10.1680/jgeen.17.00033
- Orlob, G. T. & Radhakrishna, G. N. (1958). The effects of entrapped gases on the hydraulic characteristics of porous media. *Transactions of the American Geophysical Union*, 39(4), 648-659. doi: 10.1029/TR039i004p00648
- Rönnqvist, Hans. (2010). *Predicting surfacing internal erosion in moraine core dams*. (Thèse de doctorat, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Suède).
- Rönnqvist, H. & Viklander, P. (2016). Effect of suffusion in embankment dam filters. *Dams and Reservoirs*, 26(3), 118-125. doi: 10.1680/jdare.16.00023
- Roubtsova, V., Chekired, M., Ethier, Y., & Avendano, F. (2012). *SIMSOLS: A 3D virtual laboratory for geotechnical applications*. Communication présentée à ISCE6, Paris, France.
- Sherard, J. L. (1979). Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils. *Thirteenth International Congress on Large Dams*, (2), 325-335.
- Skempton, A. W. & Brogan, J. M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. *Geotechnique*, 44(3), 449-460. doi: 10.1680/geot.1994.44.3.449

- Slangen, P. & Fannin, R. J. (2017). A Flexible Wall Permeameter for Investigating Suffusion and Suffosion. *Geotechnical Testing Journal*, 40(1), 1-14. doi: 10.1520/GTJ20150287
- Soria-Hoyo, C., Valverde, J.M., & Castellanos, A. (2008). Effect of vibration on flow properties of fine glass beads. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 54(4): 886 – 896. doi: 10.1002/aic.11423
- Terzaghi, K. (1939). Soil mechanics: a new chapter in engineering science. *Journal Institution of Civil Engineers*, 12: 106-141.
- U. S. Army Corps of Engineers (1953). *Filter experiments and design criteria* (Rapport technique n° 3-360). Vicksburg: Waterways Experiment Station.
- United States Department of the Interior, Bureau of reclamation (USBR). (1987). *Design of small dams* (3^e éd.). Washington: United States Government Printing Office.
- USSD Committee on Materials for Embankment Dams (USSD). (2011). *Materials for Embankment Dams* (White Paper). Denver: U.S. Society on Dams.
- Wan, C. F. & Fell, R. (2004). *Experimental Investigation of Internal Instability of Soils in Embankment Dams and Their Foundation* (Rapport de recherche UNICIV n° R-429). Sydney, Australia: The University of New South Wales.
- 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(3), 401-407. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(401)
- Wang, G., Wei, X., & Zou, T. (2019). A Hollow Cylinder Radial-Seepage Apparatus for Evaluating Permeability of Sheared Compacted Clay. *Geotechnical Testing Journal*, 42(5), 1133-1149. doi: 10.1520/GTJ20170215
- Woo, S. I., Kim, J., & Chung., C.-K. (2018). Permeability Test Device for Soil with Automatic Water Head Control. *Geotechnical Testing Journal*, 41(1), 218-222. doi: 10.1520/GTJ20170047
- Youd, T. L. (1973). Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands. Dans Selig, E.T., & Ladd, R.S. (Éds.), *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils* (STP523-EB, pp, 98-112). West Conshohocken, PA: ASTM International. doi: 10.1520/STP37866S

- Zhou, Z.-Q., Ranjith, P. G., & Li, S.-C. (2016). Criteria for assessment of internal stability of granular soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 170(1), 73-83. doi: 10.1680/jgeen.15.00165
- Zou, R.P., Gan, M.L., & Yu, A.B. (2011). Prediction of the porosity of multi-component mixtures of cohesive and non cohesive particles. *Chemical Engineering Science*, 66(20): 4711-4721. doi: 10.1016/j.ces.2011.06.037