



HAL
open science

Phénomènes d'érosion interne dans les graves et les sols grossiers : Application aux digues et aux barrages

Rachid Fellag

► **To cite this version:**

Rachid Fellag. Phénomènes d'érosion interne dans les graves et les sols grossiers : Application aux digues et aux barrages. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Paris-Est, 2016. Français. NNT : 2016PESC1111 . tel-01541099

HAL Id: tel-01541099

<https://pastel.hal.science/tel-01541099v1>

Submitted on 17 Jun 2017

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

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

THÈSE

En vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Paris - Est
Spécialité : Géotechnique

Présentée par

Rachid FELLAG

Phénomènes d'érosion interne dans les graves et les sols grossiers : Application aux digues et aux barrages

Soutenu à l'ENPC (Champs-sur-Marne) le 15 décembre 2016

devant le jury composé de :

Ahmed BENAMAR	Université du Havre	Rapporteur
Farimah MASROURI	Université de Lorraine	Rapporteur
Nadia SAIYOURI	Université de Bordeaux	Examineur
Didier MAROT	Université de Nantes	Examineur
Christophe CHEVALIER	IFSTTAR	Examineur
Jean-Claude DUPLA	Ecole des Ponts-ParisTech	Directeur de thèse
Jean CANOU	Ecole des Ponts-ParisTech	Invité

Dédicaces

À mes parents qui ont toujours cru en moi,

À mon frère et à mes sœurs,

À ma femme,

À tous ceux qui ont cru en moi,

...

Remerciements

Je remercie chaleureusement mes encadrants, Jean-Claude DUPLA mon directeur de thèse, Jean CANOU et Christophe CHEVALIER pour votre confiance, votre disponibilité, vos orientations, vos conseils et votre aide.

Je remercie vivement tous les membres du jury, en commençant par la présidente du jury la professeur Nadia SAYOURI, puis la professeur Farimah MASROURI et le docteur Ahmed BENAMAR qui ont pris le temps pour rapporter mes travaux avec beaucoup de conseils constructifs, et finalement le professeur Didier MAROT d'avoir examiné mes travaux avec beaucoup d'attention. Je vous remercie pour vos commentaires et vos conseils précieux.

Je remercie également l'équipe technique de CERMES, Manu, Marine, Xavier, Baptiste et spécialement Hocine '*Dada*', pour votre disponibilité et votre aide pendant la réalisation de mon programme expérimental au cours de toutes ces années de thèse.

Un grand merci pour tous mes collègues du CERMES avec qui j'ai partagé de bons moments, Linh, JBex, Paco... avec vous j'ai passé des moments inoubliables, merci 😊.

Un grand merci à mon ami et frère Hubert, pour tes conseils et tes encouragements. Ton soutien m'a été très précieux pour arriver au terme de ma thèse, et encore merci pour tous ces moments qu'on a partagés ensemble, thanmirt-ik.

Je tiens à remercier mes amis Adem et Ouiza, merci pour toute votre aide, votre accueil et votre soutien, vous êtes juste géniaux 😊

Je remercie aussi mon ami et mon frère Faredj et sa Wiswis, un grand merci pour votre aide et votre soutien et pour tous les moments formidables qu'on a partagés ensemble entre Paris et Lyon, à suivre... ;)

Je remercie chaleureusement et vivement ma famille en Algérie, mes parents, mon frère et mes sœurs qui m'ont toujours soutenu et ont cru en moi, votre soutien était ma source d'énergie.

Et pour finir, je remercie ma femme Houria, ma source de bonheur et de force. Ta présence à mes côtés et tes encouragements, en particulier lors des gros coups de stress du sprint final étaient pour beaucoup pour arriver à la fin de cette thèse, tu es juste formidable 😊

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

Merci à vous tous...

Résumé

L'érosion interne est la cause principale de ruptures des ouvrages hydrauliques en terre, tels que les digues et les barrages. Les conséquences de telles ruptures sont conséquentes et coûteuses. L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre une catégorie particulière de processus d'érosion, la suffusion, en caractérisant son initiation et son évolution. Cette recherche, à dominante expérimentale, s'appuie sur une modélisation physique unidimensionnelle. Les essais sont réalisés dans une conduite en plexiglas de 18 cm de diamètre intérieur, équipée de capteurs de pression, d'un débitmètre et d'un turbidimètre. Un dispositif de collecte des particules érodées est installé à l'aval de la conduite pour quantifier les particules érodées à des intervalles de temps choisis. Dans cette étude, on a réalisé une série d'essais sur des matériaux pulvérulents. Dans ce type de matériaux, l'érosion se manifeste par suffusion. Elle correspond à l'arrachement et au transport des particules fines à travers l'espace poral des particules grossières. Dans un premier temps, un protocole de reconstitution de matériaux pulvérulents est élaboré. Le principe consiste à réaliser des mélanges humides avec une teneur en eau relative à la masse des particules fines. Pour surmonter les problèmes rencontrés dans la réalisation des essais, la conduite est disposée verticalement, et les matériaux testés sont reconstitués à partir de mélanges de particules sableuses. Une étude paramétrique est menée sur l'influence de certains paramètres, tels que la granulométrie, la pression d'écoulement, la nature et la teneur en particules argileuses ainsi que la densité de mise en place. Les résultats obtenus montrent que l'érodabilité des matériaux dépend de la forme des courbes granulométriques. En effet, l'érosion est plus accentuée pour les matériaux contenant moins de particules fines. Elle est également plus forte quand la courbe granulométrique est discontinue. L'ajout de particules argileuses augmente la résistance à la suffusion des matériaux testés. Trois catégories de matériaux argileux ou fins sont testées : une illite (argile verte de Velay), une kaolinite (Speswhite), et du sable broyé (C10). Les résultats montrent que les matériaux contenant de l'illite sont plus résistants à la suffusion que les matériaux contenant de la kaolinite, tandis que les matériaux contenant du sable broyé sont les moins résistants. Cette résistance à la suffusion augmente avec la teneur en particules argileuses. L'érosion des matériaux dépend aussi de la densité initiale des matériaux testés. En effet, pour la même pression d'eau appliquée sur la pompe, la quantité des particules érodées diminue en augmentant la densité de mise en place.

Mots clé : Erosion interne, Instabilité interne, Suffusion, Sols grossiers, Transport de particules, Barrages, digues

Abstract :

Internal erosion is the main cause of failure of hydraulic structures such dykes and dams. The consequences of such failures are substantial and costly. The objective of this thesis is to better understand one of the erosion phenomena, the suffusion, and to characterize the initiation and the evolution of this phenomenon. A physical modeling approach is used for this study. Tests are carried out in a Plexiglas pipe of 18 cm inner diameter, equipped with pressure sensors, flowmeter and turbidimeter. A device for collecting the eroded particles, at selected time intervals, is installed in the downstream part of the device. In this study, we performed a series of tests on coarse cohesionless soil. In this type of material, erosion is manifested by suffusion. It corresponds to the detachment and transport of fine particles through the pore space of the coarse particles. First, a cohesionless soil reconstitution protocol is developed. The idea is to make wet mixtures with water content depending on the fine particle content. To overcome some problems encountered in carrying out the tests, the device is arranged vertically, and the materials tested are reconstituted from mixtures of sand particles. A parametric study on the influence of several parameters such as particle size distribution, flow pressure, nature and content of clay particles and initial density are conducted. The results show that the erodibility of the material depends on the shape of the particle size distribution. Indeed, erosion is more pronounced for materials containing less fine particles. This erodability is more pronounced when the curve is gap-graded. Erodibility of the tested soils increases with the hydraulic load. The addition of clay particles increases the resistance to suffusion of the soils. Three categories of clayed or fine soils are tested: illite (Argile verte de Velay), kaolinite (Speswhite), and crushed sand (C10). The results show that materials containing illite are more resistant to suffusion than materials containing kaolinite, whereas materials containing crushed sand are less resistant. This resistance to suffusion increases with clay particle content. The erosion of materials also depends on the initial density of the soil tested. Indeed, for the same applied pressure, the quantity of eroded particles decreases with increasing the initial density.

Key words : Internal erosion, Internal instability, Suffusion, Coarse soils, Particles transport, Dams, dykes

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I ELEMETS BIBLIOGRAPHIQUES	4
I-1 LES OUVRAGES HYDRAULIQUES EN FRANCE.....	4
I-1-1 LE PARC DES OUVRAGES HYDRAULIQUES EN FRANCE, SON IMPORTANCE ET SES CARACTERISTIQUES.....	4
I-1-2 PATHOLOGIE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES	4
I-1-3 LA RUPTURE PAR EROSION INTERNE	5
I-2 DEFINITION DES MECANISMES DE L'EROSION.....	6
I-3 EROSION PAR SUFFUSION	9
I-3-1 TERMINOLOGIE ET ETAT DE L'ART	9
I-3-2 CRITERES D'EROSION	11
I-4 CONCLUSION ET OBJECTIFS DE LA THESE	42
CHAPITRE II DISPOSITIF EXPERIMENTAL, MATERIAUX UTILISES ET PROTOCOLE D'ESSAI.....	43
II-1 APPROCHE RETENUE	43
II-2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL	43
II-2-1 CONFIGURATION HORIZONTALE	44
II-2-2 CONFIGURATION VERTICALE	48
II-2-3 EQUIPEMENTS ANNEXES	52
II-2-4 INSTRUMENTATION.....	55
II-3 LES MATERIAUX ETUDIES.....	58
II-3-1 CHOIX DE MATERIAUX MODELES.....	58
II-3-2 PROTOCOLE DE RECONSTITUTION DES MATERIAUX	59
II-3-3 VERIFICATION DE L'HOMOGENEITE ET DE LA REPETABILITE	66
II-3-4 APPELLATION DES MATERIAUX	68
II-4 PROTOCOLE D'ESSAI	68
II-4-1 MISE EN PLACE DU SOL DANS LA CONDUITE	69
II-4-2 INSTALLATION DE LA CONDUITE SUR LE CIRCUIT.....	72
II-4-3 SATURATION DU SOL EN CONDUITE.....	75
II-4-4 EROSION DU SOL EN CONDUITE	77
II-4-5 DEMONTAGE DE LA CONDUITE ET ANALYSE GRANULOMETRIQUE POST-ESSAI.....	80

II-5	CONCLUSION	81
CHAPITRE III	<u>ESSAIS TYPIQUES ET VALIDATION.....</u>	83
III-1	CONFIGURATION HORIZONTALE	83
III-1-1	ESSAIS TYPIQUES	85
III-1-2	LIMITES DE LA CONFIGURATION HORIZONTALE	91
III-1-3	PHASE DE SATURATION	97
III-1-4	PHASE D'ÉROSION	98
III-2	CONFIGURATION VERTICALE.....	103
III-2-1	ESSAIS DE VALIDATION.....	103
III-2-2	ESSAIS SUR SOLS FINS « SIMPLIFIÉS »	105
III-2-3	ESSAIS SUR MATERIAUX SABLEUX.....	108
III-3	CONCLUSION	128
CHAPITRE IV	<u>ETUDE PARAMETRIQUE</u>	130
IV-1	LES TYPES DES ESSAIS RETENUS	130
IV-1-1	ESSAI AVEC DES PALIERS DE PRESSION	131
IV-1-2	ESSAI A DES PRESSIONS CONSTANTES APPLIQUEES SUR LA POMPE	136
IV-2	ETUDE PARAMETRIQUE	136
IV-2-1	CHOIX DES MATERIAUX ET CARACTERISTIQUES DES ESSAIS	136
IV-2-2	INFLUENCE DE LA FORME DE LA COURBE GRANULOMETRIQUE	137
IV-2-3	INFLUENCE DE LA PRESSION D'ÉCOULEMENT	159
IV-2-4	INFLUENCE DE LA NATURE DES FINES	168
IV-2-5	INFLUENCE DE LA QUANTITE DES FINES ARGILEUSES AJOUTEES	179
IV-2-6	INFLUENCE DE LA DENSITE	184
IV-2-7	APPLICATIONS AUX CRITERES D'ERODABILITE : CONFRONTATION AUX CRITERES EXISTANTS.....	187
IV-3	CONCLUSION	191
<u>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</u>		193
<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</u>		198
<u>ANNEXE 1.....</u>		202

Introduction générale

Les ouvrages hydrauliques tels que les barrages et les digues sont utilisés depuis toujours pour la rétention et la canalisation des eaux pour l'agriculture, pour l'alimentation en eau potable ou pour la production hydroélectrique. La France dispose d'un parc d'ouvrages hydrauliques important, avec plus de 9000 km de digues de protection contre les crues, 8000 km de digues de canaux de navigation, et 1000 km de canaux hydroélectriques. Sur l'ensemble des barrages, on recense environ 600 grands ouvrages et plusieurs dizaines de milliers de barrages dont la hauteur est inférieure à 15 m (*Bonelli (2012)*). La deuxième caractéristique du parc français des ouvrages hydrauliques, en plus de son importance, est son ancienneté. En effet, la majeure partie des barrages est âgée d'un demi-siècle environ, et la majorité des digues est âgée de plus d'un siècle. Si les grands barrages sont construits avec des matériaux bien sélectionnés avec ou sans liants hydrauliques, et mis en place dans les règles de l'art, une partie significative des petits barrages et des digues a été construite avec des matériaux naturels trouvés près des sites, qui n'ont pas toujours été suffisamment sélectionnés ni traités.

Ces caractéristiques d'ancienneté et de non-sélection de matériaux de construction favorisent la vulnérabilité de ces ouvrages hydrauliques, d'où la nécessité de réaliser des travaux de maintenance et d'entretien souvent conséquents et coûteux surtout sur un parc aussi important. A défaut d'entretien, l'apparition de dégradations sur la structure de ces ouvrages peut conduire à leur rupture. En effet, les structures des ouvrages de rétention d'eau (barrages et digues) sont soumises à des pressions d'eau proportionnelles à la hauteur des eaux retenues. Ces pressions peuvent augmenter instantanément et d'une façon agressive dans les cas de fortes précipitations et d'inondations. Ces fortes sollicitations, combinées avec des défauts dans la structure des ouvrages ou de leurs fondations (trous, racines d'arbres...), ou des défauts de construction (de compactage par exemple) peuvent conduire à la rupture de ces ouvrages. Sur 11192 ouvrages hydrauliques en terre recensés par *Foster et al. (2000)*, 136 ont subi des désordres, dont 6 % par glissement (instabilité globale), 46 % par érosion interne et 48 % par surverse (instabilité locale ou interne). Dans cette étude, on s'intéresse uniquement au phénomène d'érosion interne.

En France, on enregistre annuellement en moyenne une rupture d'un ouvrage majeur par érosion interne, et les conséquences de ces ruptures peuvent être importantes. En effet, la plupart de ces ouvrages ont été construits sur les hauteurs de zones habitées ou agricoles. Et donc les dommages liés à une rupture peuvent se chiffrer en centaines de milliers d'euros, voire même en pertes de vies humaines.

Dans un document établi par la *Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB)* en 1997 (*Fry et al. (1997)*), les auteurs ont décrit les différents mécanismes de l'érosion interne. L'érosion interne est définie par l'arrachement et le transport des particules fines d'un sol sous l'effet d'un écoulement d'eau le traversant. Les auteurs suggèrent que pour que l'érosion puisse apparaître, il faut combiner deux conditions nécessaires, à savoir l'arrachement des particules fines et leur transport. Six mécanismes d'arrachement sont définis et décrits et deux

mécanismes de transport sont identifiés à savoir le renard hydraulique et la suffusion. Pour le cas des sols grossiers, qui constituent le sujet de cette étude, l'érosion interne se manifeste principalement par suffusion, appelée aussi instabilité interne (*Kenney et Lau (1985)*). Ce phénomène se définit par l'arrachement et le transport des particules fines libres à travers l'espace poral des particules grossières sous l'effet d'un écoulement d'eau.

Le présent travail s'intéresse donc au phénomène d'érosion interne par suffusion dans les sols grossiers, le mémoire correspondant comporte quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, on présente une synthèse des éléments bibliographiques portant sur l'érosion interne en général et la suffusion en particulier. Après présentation des caractéristiques du parc des ouvrages hydrauliques français, on définit les différents mécanismes d'érosion interne qui peuvent se manifester dans la structure des ouvrages hydrauliques ou dans leurs fondations. L'accent est mis sur le mécanisme de suffusion, et on présente la terminologie utilisée par les différents auteurs pour décrire ce mécanisme. On se base, plus particulièrement, sur les différents critères déjà établis pour caractériser la suffusion. On trouve deux grandes classes de critères, ceux basés sur les caractéristiques granulométriques des sols testés, et ceux basés sur les caractéristiques hydrauliques des sollicitations appliquées. Ce premier chapitre se termine par la présentation de l'influence de certains paramètres sur l'évolution de la suffusion et notamment la teneur en fines ainsi que des objectifs de la thèse.

Dans le deuxième chapitre, on présente le dispositif expérimental utilisé dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'une conduite d'écoulement équipée de capteurs de pression, de débitmètres et d'un turbidimètre, le tout relié à un système d'acquisition de données. Pour des raisons expérimentales qui seront détaillées dans le chapitre 3, la conduite installée initialement dans une configuration horizontale a été positionnée, par la suite, verticalement. Ensuite, on présente les différents matériaux utilisés. Il s'agit de matériaux reconstitués à partir de matériaux disponibles au laboratoire, et dont la dimension des particules va de la kaolinite au gravier. Un procédé de reconstitution a été développé pour assurer l'homogénéité et la répétabilité des matériaux reconstitués. La dernière partie de ce chapitre s'intéresse à la procédure des essais, en commençant par la mise en place des matériaux dans la conduite, la saturation du sol, les essais d'érosion, le démontage et le traitement des données.

Dans le troisième chapitre, on présente les résultats de quelques essais typiques et la validation du dispositif et de la procédure d'essai retenue. Initialement, sept essais sur cinq matériaux ont été réalisés dans le cas de la configuration horizontale, qui modélise d'une façon plus proche les écoulements parasites qui peuvent traverser les structures des ouvrages hydrauliques ou leur fondation. Cependant, des problèmes de saturation et de dépôt de fines ont été constatés au cours de ces essais, malgré des modifications apportées aux matériaux. Ceci nous a conduits à changer la disposition de la conduite et à adopter, pour la suite de l'étude, la configuration verticale. Ceci a permis au départ de résoudre le problème de dépôt de fines dans la conduite, mais pas le problème de la saturation. Après une réflexion, le choix s'est porté sur le changement du type de matériaux testés, en travaillant sur des matériaux qui ne contiennent pas de particules argileuses, ce qui facilite leur saturation. Finalement, sept

matériaux sableux ont été retenus pour la suite. Les essais de validation comportent deux phases, une phase de saturation et une phase d'érosion. Dans la phase d'érosion, les écoulements sont appliqués par la pompe qui permet d'appliquer des pressions constantes. Deux types d'écoulements sont générés, soit des écoulements par paliers de pression, soit des écoulements sous une seule pression maintenue constante jusqu'à la fin de l'essai. Les essais sont analysés en fonction de l'évolution des pressions le long de la conduite, l'évolution du débit d'écoulement et de la masse des particules fines érodée. A la fin de l'essai, le sol dans la conduite est récupéré par tranches pour réaliser des analyses granulométriques que l'on compare à la granulométrie initiale.

Dans le quatrième et dernier chapitre, on présente les résultats d'une étude paramétrique réalisée sur le phénomène d'érosion interne. En effet, après la validation du dispositif expérimental et le choix des matériaux, on a cherché à étudier l'influence de paramètres significatifs sur le phénomène de suffusion. Les paramètres étudiés ont été les suivants : la granulométrie des matériaux testés, la pression d'entrée appliquée, la nature et la teneur en particules fines ainsi que la densité initiale de mise en place du matériau. Les premiers essais ont été réalisés avec des paliers de pression. Ensuite, c'est la procédure sous une seule pression, maintenue constante sur toute la durée de l'essai, qui a été retenue pour poursuivre l'étude paramétrique. Une synthèse de l'influence de l'ensemble des paramètres étudiés est présentée à la fin de ce chapitre.

Le mémoire se termine par la présentation des conclusions et des enseignements que l'on a pu tirer de ce travail, ainsi que la présentation de différentes perspectives de poursuite de ces recherches.

Chapitre I Eléments bibliographiques

I-1 Les ouvrages hydrauliques en France

I-1-1 Le parc des ouvrages hydrauliques en France, son importance et ses caractéristiques

La France dispose d'un patrimoine d'ouvrages hydrauliques en terre important, avec les 600 grands barrages, les dizaines de milliers de petits barrages d'une hauteur inférieure à 15 m, 9 000 km de digues de protection contre les crues, les inondations et les submersions marines, plus de 1000 km de digues d'aménagement hydraulique, et 8 000 km de voies navigables endiguées et de levées de canalisation (*Bonelli(2012)*). Cela constitue un parc très important. Bien que ces ouvrages soient de très grandes utilités pour la société : réserves d'eau potable, protection de certaines zones habitées, protection et irrigation des champs agricoles, production de l'électricité... Ces ouvrages sont aussi des ouvrages relativement anciens (plus de 50 ans en moyenne pour les barrages et plus d'un siècle pour les digues) et de ce fait ils nécessitent une surveillance, une maintenance et un entretien spécifiques pour éviter l'endommagement de leur structure qui pourrait conduire à leur rupture.

I-1-2 Pathologie des ouvrages hydrauliques

Les ouvrages en terre sont construits par le compactage de couches de sols de différentes natures sans liant spécifique. Dans le cas des grands barrages, l'ouvrage est souvent constitué d'un noyau en argiles compacté, équipé du côté aval ou des deux côtés, amont et aval, d'un filtre pour éviter que les particules fines d'argile ne migrent sous l'effet des pressions d'eau qui règnent dans l'ouvrage. Pour certains petits barrages, mais également certaines digues, les matériaux utilisés pour leur construction sont des matériaux naturels disponibles sur les sites de construction et ils ne sont pas toujours bien sélectionnés. Ces ouvrages sont en général construits ou traversent des endroits qui surplombent soit des zones habitées, des champs agricoles ou les deux à la fois. De ce fait la rupture de ce type d'ouvrages peut conduire à des pertes de vies humaines et de dégâts matériels qui peuvent se chiffrer par des dizaines de milliers d'euros.

En effet, le *Comité Français des Barrages et des Réservoirs (Fry et al. (1997))* a recensé plus de 71 incidents d'érosion interne sur les 550 grands barrages, quelques milliers de petits barrages, et 1000 km de digues hydroélectriques entre 1970 et 1995, dont 23 par renard hydraulique et 48 par suffusion. La définition de ces mécanismes, ainsi que d'autres, sera donnée d'une façon détaillée dans la partie §1-2. Dans l'étude réalisée par *Foster et al.*

(2000), sur 11192 ouvrages hydrauliques en terre, 136 ont subi des désordres, dont 6% par glissement (instabilité globale), 46% par érosion interne et 48% par surverse (instabilité locale ou interne). En France, l'érosion interne est responsable en moyenne d'une rupture d'ouvrage hydraulique par an.

Les ruptures récentes des digues en France, à la suite des inondations dans les départements de l'Aude en 1999 et du Gard en 2002 et de la tempête Xynthia en 2010 qui a provoqué des ruptures de digues en Vendée, en Gironde et en Charente-Maritime, ont amené les autorités concernées et les organismes gérants ces ouvrages à lancer différentes études approfondies sur l'érosion et les différents mécanismes de rupture de ces ouvrages. On peut citer, entre autres, le projet national et ANR « Érosion Interne de Ouvrages Hydrauliques » (ERINOH) et le projet Ifsttar-Cerema « Dignes et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Affouillements et Séismes(DOFEAS) pour mieux comprendre les mécanismes régissant l'érosion interne entre autres, et proposer des solutions techniques afin de réduire les dégâts. Dans cette étude on va s'intéresser aussi au phénomène d'érosion interne dans les sols grossiers, et notamment au phénomène de suffusion qui est le mécanisme le plus répandu dans ce type de matériau.

I-1-3 La rupture par érosion interne

Globalement, l'érosion interne se manifeste par l'arrachement et le transport de certaines particules composant l'ouvrage sous l'effet d'un écoulement 'parasite' traversant sa structure ou ses fondations. L'origine de cet écoulement peut être liée à la construction (défaut de compactage, mauvais contact entre deux couches adjacentes de même nature ou pas...) ou pathologique (trous pouvant se créer pour différentes raisons comme par les animaux fouisseurs, des racines d'arbres pourries) ... Ces écoulements, souvent locaux, s'ils ne sont pas détectés à temps ou mal maîtrisés peuvent induire un entrainement d'une quantité considérable de matériaux de l'ouvrage, ou créer des instabilités hydrauliques ou mécaniques dans la structure de l'ouvrage qui peuvent, dans le cas extrême, causer la rupture de l'ouvrage en question par érosion interne.

Bien que l'érosion soit définie par l'arrachement et le transport des particules fines dans la structure de l'ouvrage ou dans ses fondations, les retours d'expériences (*Fry et al. (1997), Bonelli(2012)* ...) montrent que les mécanismes de cette érosion sont multiples, différents et complexes, et dépendent de la nature des matériaux et des conditions d'écoulement. Dans ce qui suit, nous allons présenter plus en détail ces mécanismes.

I-2 Définition des mécanismes de l'érosion

La définition de l'érosion est étroitement liée à l'échelle choisie pour cette définition. En fonction de l'échelle de temps et d'espace, on passe d'une définition naturaliste (observation et compréhension) pour les grandes échelles, aux domaines des sciences, notamment de la Mécanique des Sols et de la Mécanique des Fluides, à l'échelle du réseau poral (*Guide ERINOH (2015)*).

Dans le rapport du *Comité Français des Grands Barrages (Fry et al. (1997))* six phénomènes d'arrachement des particules ont été définis (entraînement, érosion régressive, boulangerie, débouillage, dissolution, défloculation), auxquels on ajoute l'ex-solution décrite par *Garner et Sobscowics (2002)*, ainsi que deux phénomènes de transport (renard et suffusion).

Shuler et Brauns (1997) ont présenté un schéma des mécanismes d'érosion en fonction notamment de leur localisation (*Figure I-1*).

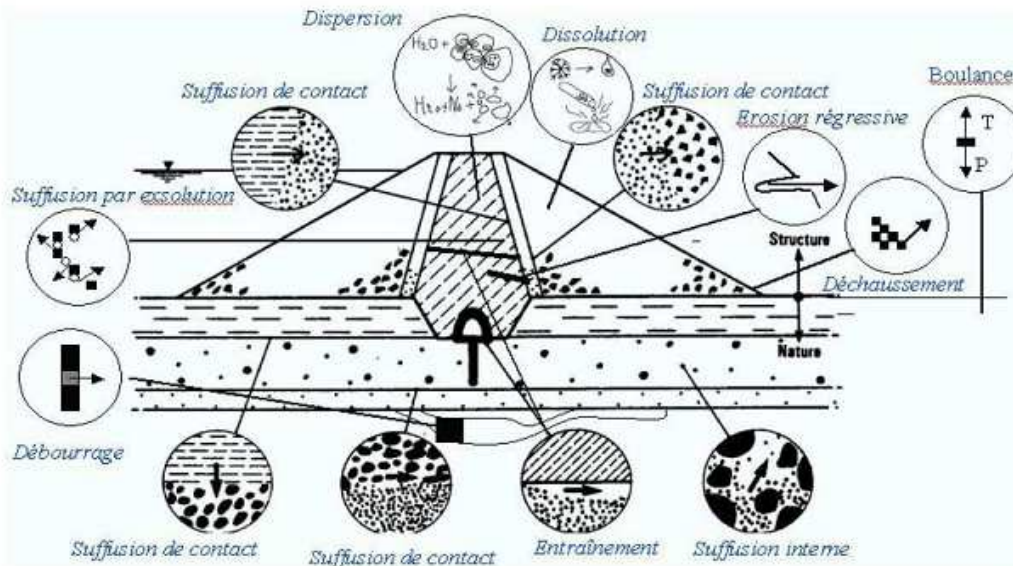


Figure I-1 Schéma des différents mécanismes initiateurs d'érosion interne dans un barrage (Shuler et Brauns (1997))

L'entraînement : Il correspond au détachement des particules au niveau des parois d'un canal ou d'une rivière à partir d'une certaine valeur de la contrainte de cisaillement engendrée par l'écoulement d'eau traversant cet ouvrage. *Shields (1936)* a défini cette contrainte critique de charriage comme le produit de la masse volumique de liquide par la carrée de sa vitesse critique d'initiation d'érosion ($\tau_c = \rho * U_c^2$). Cette contrainte critique est proportionnelle au diamètre des grains des sols pulvérulents, et fortement croissante avec la cohésion des sols cohérents.

L'érosion régressive : Elle correspond à l'arrachage des particules en surface à l'aval de l'ouvrage et progressant vers son amont sous l'effet de la poussée de l'écoulement d'eau traversant le matériau de cet ouvrage. A cet arrachement des particules à l'aval correspond une diminution de la distance à parcourir par l'eau pour atteindre la surface et donc une augmentation locale de gradient hydraulique. Ceci peut conduire à la rupture de l'ouvrage par la formation d'un renard (trou) notamment si ce dernier est constitué uniquement de matériau homogène. En effet, l'hétérogénéité du sol peut atténuer momentanément le développement de ce phénomène en diminuant le gradient hydraulique local, mais dans cette configuration potentiellement instable l'érosion risque de se régénérer si on a une augmentation de la charge hydraulique.

La boullance : Elle survient quand les contraintes effectives d'un volume de sol sont annulées sous l'effet d'un écoulement vertical ascendant le traversant. Dans cette configuration, les particules de ce sol deviennent flottantes et elles sont facilement transportables par l'écoulement.

Le débouillage : Ce mécanisme correspond au déplacement massif d'un volume de matériau sous l'effet d'une pression d'eau que la résistance de cisaillement sur le pourtour du volume ne parvient plus à compenser. C'est le cas notamment d'une fissure rocheuse ou d'un conduit karstique rempli par un matériau argileux dans lesquelles une infiltration d'eau peut exercer une pression considérable pour chasser ce matériau argileux provoquant ainsi un élargissement de la fissure.

La défloculation ou dispersion : C'est un phénomène physico-chimique qui correspond à la diminution (désagrégation) de la taille des agglomérats de particules argileuses et la dispersion des plaquettes d'argiles sous une action physico-chimique facilitant ainsi leurs mobilités sous l'effet des écoulements d'eau.

La dissolution : Contrairement à la défloculation, la dissolution correspond à la disparition d'une partie des constituants des particules sous une action chimique ou thermique. Cette disparition de matériaux peut créer localement des vides et diminuer la densité ce qui peut être un facteur déclencheur de l'érosion.

L'ex-solution : C'est l'expulsion d'air piégé dans le noyau d'un barrage lors de la mise en eau. En effet, l'air comprimé et partiellement dissout dans l'eau en partie amont est transporté

par l'eau vers l'aval du noyau où la pression interstitielle est plus faible. Ce transport génère un colmatage par la désorganisation des 'voûtes' reconstituées par les particules des sols qui induit une diminution locale de la perméabilité et une augmentation nette de la pression interstitielle en aval du noyau. Cette explication a été fournie par *St Arnaud (1995)* lorsqu'il a observé une augmentation de la piézométrie dans la partie aval des noyaux de barrages canadiens. *Garner et Sobkowicz (2002)* montrent que l'ex-solution peut provoquer la suffusion et le renard.

Ces phénomènes d'arrachement peuvent se combiner entre eux lors d'un incident, mais n'aboutissent pas nécessairement à une rupture de l'ouvrage. Pour que l'érosion interne survienne, il faut assurer les conditions de transport qui sont soit concentrées dans un conduit (renard), soit diffuses, dans l'espace poreux interparticulaire (suffusion).

Le renard : C'est l'apparition d'un trou localisé dans la structure d'un ouvrage suite à l'arrachage et au transport des particules de l'aval de l'ouvrage vers un milieu extérieur en progressant vers l'amont. En effet, il suffit qu'il existe un chemin préférentiel le long duquel sont répartis un certain nombre de points faibles (défauts de compactage, couches perméables non identifiées dans la structure de l'ouvrage ou de ses fondations...), et entre ces points faibles se trouvent des zones saines conformes aux exigences de l'ouvrage qui sont par conséquent le siège de gradients hydrauliques supérieurs à ceux prévus et seront donc affectées par des érosions régressives ou des bouillances. Ces écoulements s'ils ne sont pas stoppés, par un point dur dans l'ouvrage, arrachent des matériaux des zones saines jusqu'à la formation d'un conduit continu.

La suffusion : Le transport par suffusion se développe au sein d'un volume de remblais d'un ouvrage, ou dans sa fondation ou à l'interface de deux milieux où la condition d'auto-filtration n'est pas assurée. L'écoulement transporte ainsi les petites particules 'libres' à travers la porosité des particules grossières qui constituent le squelette de massif. On n'aboutit pas nécessairement à des situations très instables, mais à des configurations différentes de celles prévues à la construction de l'ouvrage et qui peuvent présenter des marges de sécurité très faibles. En fonction de la localisation des écoulements, on peut parler de la suffusion volumique si le transport des fines se produit au sein de massif de sol, ou de la suffusion de contact et de surface si le transport se produit à l'interface entre des sols de granulométries différentes ou à surface libre.

La distinction de tous ces mécanismes d'érosion et leur classification est très importante pour mieux comprendre l'évolution du phénomène d'érosion dans la structure de l'ouvrage. C'est dans cette perspective que la classification de ces phénomènes est revue par un comité de scientifiques et d'experts dans le domaine lors de la rencontre d'*Aussois (2005)* organisée par *Fry et Fell*. A l'issue de cette rencontre, la classification de ces mécanismes d'érosion est revue, et quatre types d'érosion sont finalement retenus :

- Erosion interne régressive
- Erosion interne de trou ou de fissures
- Erosion interne de contact entre deux sols
- Suffusion

La représentation schématique de ces mécanismes est donnée sur la *Figure I-2*, et les définitions détaillées de ces mécanismes retenus est donnée dans *Bonelli(2012)*.

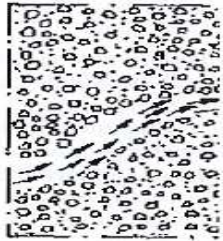
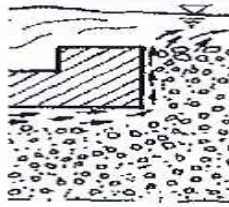
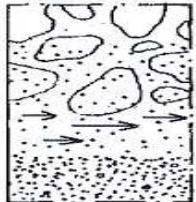
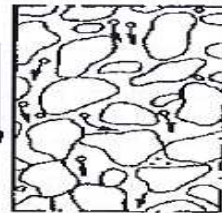
<p>Erosion interne de conduit ou de fissure</p>  <p>Entraînement des particules des lèvres de la fissure ou de la surface de la cavité sous l'action de l'écoulement de l'eau</p>	<p>Erosion interne régressive (généralisée ou locale au fond d'un conduit)</p>  <p>Entraînement des particules sous une surface cohésive ou rigide à l'exutoire de l'écoulement souterrain d'abord à la paroi aval et ensuite au fond du conduit creusé de l'aval vers l'amont</p>
<p>Erosion interne de contact (entre un gravier et un limon)</p>  <p>Entraînement des particules d'un sol fin le long de son contact avec un sol grossier par l'écoulement traversant le sol grossier</p>	<p>Suffusion (suffosion) ou instabilité interne d'un sol ou érosion volumique</p>  <p>Entraînement des particules fines libres de se mouvoir à travers les vides des particules grossières d'un sol à granulométrie discontinue</p>

Figure I-2 Représentations schématiques des mécanismes d'érosion retenus après l'atelier d'Aussois (Fell et Fry (2007))

Pour le cas des sols grossiers, qui sont le sujet de cette étude, l'érosion se manifeste d'abord par suffusion (*Fell et Fry (2007)*). C'est pour cela que dans la suite de ce chapitre, on va s'intéresser aux différents travaux qui sont portés sur la suffusion.

I-3 Erosion par suffusion

I-3-1 Terminologie et état de l'art

Dans la littérature, plusieurs termes sont utilisés pour définir le phénomène d'érosion par suffusion de volume, bien que la définition reste la même : l'arrachement et le transport des

particules fines libres à travers la porosité des particules grossières qui constituent le squelette solide. Pour définir ce phénomène, *Kenney et Lau (1985)*, utilisent le terme suffusion pour décrire les matériaux qui sont instables vis-à-vis de l'érosion. On trouve également le terme instabilité interne (Internal instability) pour décrire la susceptibilité d'un sol vis-à-vis de la suffusion, utilisé entre autres par *Wan et Fell (2004, 2008)*, *Moffat et Fannin (2006)*. Les termes suffusion et soffusion sont utilisés dans la littérature d'une manière parfois interchangeable. Les termes stabilité et instabilité mettent en avant la sensibilité de la structure porale, sans pour autant mentionner son origine, ce qui pourrait conduire à une confusion avec la stabilité globale par glissement par exemple (qui est d'origine mécanique ou hydraulique). *Richard et Reddi (2007)* ont utilisé le terme 'suffusion' pour caractériser le transport de particules fines à travers un squelette grossier stable, et le terme 'soffusion' pour caractériser le transport de fines à travers un squelette grossier instable. D'un autre côté *Moffat et al. (2011)* font la distinction entre la suffusion qui n'entraîne pas la variation de volume de sol et la soffusion qui peut entraîner l'effondrement de la matrice solide.

Devant cette complexité des termes utilisés et pour enlever toute confusion sur le terme à utiliser, à l'issue de la rencontre d'*Aussois en 2005*, les différents intervenants ont adopté le terme 'suffusion', pour désigner le processus d'arrachement et de transport des particules fines à travers la structure porale des particules grossières considérées comme immobiles.

L'évolution de la suffusion est conditionnée par les caractéristiques de la phase solide (le sol) et de la phase liquide (l'eau), et cette évolution entraîne une modification de l'état et des caractéristiques des deux phases. La complexité de l'étude de l'érosion réside dans la multitude et l'interaction des paramètres dont elle dépend : granulométriques, hydrauliques, minéralogiques et physico-chimiques. (*Wan et Fell(2008)*) ont défini trois conditions nécessaires pour l'initiation de l'érosion dans un massif de sol :

1. La structure de sol doit être bimodale, où les particules grossières constituent le squelette solide qui reprend les charges mécaniques, et les petites particules, qui remplissent la porosité des particules grossières, peuvent sous l'effet de l'écoulement d'eau être entraînées à travers cette porosité. On note que pour que les particules grossières assurent la fonction de squelette solide, il faut qu'elles soient en contact, d'où la nécessité de définir un seuil maximal de la fraction volumique des petites particules, au-delà duquel les particules grossières deviennent 'flottantes'.
2. La taille des pores formés par les particules grossières et de leurs constriction (pores) d'accès doit être suffisamment grande pour permettre le déplacement des particules fines détachables sous l'effet de l'écoulement d'eau.

3. La vitesse de l'écoulement doit être suffisante pour arracher les petites particules et les transporter à travers la porosité des particules grossières.

Ces trois conditions montrent bien que l'initiation et l'évolution de la suffusion dépendent aussi bien des caractéristiques de sols (notamment sa granulométrie, densité, porosité...) que des caractéristiques de l'écoulement (vitesse d'écoulement, gradient hydraulique...). La première condition permet de distinguer les matériaux érodables (ou suffusibles) en fonction de la composition de matériau et donne naissance à une catégorie de critères d'érosion appelée les critères granulométriques, et la deuxième condition permet de déterminer à partir de quel seuil de la sollicitation hydraulique l'érosion s'initie, et aussi de caractériser l'évolution de cette érosion, ce sont les critères hydrauliques.

1-3-2 Critères d'érosion

Dans la littérature, on trouve plusieurs études expérimentales menées sur la caractérisation de phénomènes d'érosion par suffusion. Pour cela, plusieurs dispositifs de différentes tailles ont été développés, dans lesquels différentes classes de matériaux ont été testées. L'objectif de ces études est de caractériser l'érosion des sols testés, en étudiant l'influence de la granulométrie, des sollicitations hydrauliques ainsi que de la teneur en particules argileuses. Dans ce qui suit, on présente les résultats les plus importants sur les critères granulométriques, les critères hydrauliques et sur certains paramètres qui influencent l'évolution de la suffusion.

1-3-2-1 Critères granulométriques

Les critères granulométriques qu'on va décrire ci-dessous sont basés sur certains diamètres caractéristiques des courbes granulométriques des matériaux testés et sur la forme de ces courbes granulométriques ainsi que des singularités qui peuvent y exister, discontinuité(s) sur les courbes granulométriques par exemple. On va mettre l'accent surtout sur les critères les plus utilisés.

United States Army Corps of Engineers (1953) (cité par Maoxin (2008))

L'*USACE* (1953) a réalisé des essais d'érosion sur des mélanges de sables et de graviers dans le but de tester la possibilité de les utiliser comme un filtre en place au lieu de deux couches de ces matériaux placées séparément. Quatre mélanges sables-graviers ont été testés pour déterminer la combinaison la plus appropriée, en respectant les conditions de stabilité interne et de perméabilité. Les matériaux sont placés d'une façon homogène et dans un état lâche

(faible densité) dans un perméamètre de 12,7 cm de diamètre. Les essais sont réalisés à charge constante sous un écoulement unidirectionnel descendant, en commençant par un gradient de 0,5 puis en augmentant par paliers jusqu'à 16. Des vibrations ont été appliquées sur le dispositif pour accélérer la perte des particules fines lors des essais. La classification des matériaux testés est basée sur la comparaison de la distribution granulométrique des matériaux avant et après les essais. Les résultats indiquent que les matériaux A (50% de sable + 50% de gravier) et D (30% de sable + 70% de gravier) étaient instables et inappropriés à l'utilisation comme matériau de filtre, et les matériaux B (70% de sable + 30% de gravier) et C (90% de sable + 10% de gravier) étaient stable. Le matériau B est finalement choisi, car il avait une perméabilité plus appropriée que le matériau C.

Istomina (1957)

Istomina (1957) a proposé une méthode simple pour l'évaluation de l'instabilité interne en utilisant le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$) qui caractérise la répartition en taille des éléments qui composent un sol donné. Le coefficient d'uniformité est considéré comme une valeur caractéristique des courbes de distribution granulométrique. La classification ainsi obtenue est synthétisée dans le *Tableau I-1*.

C_u	Classification de stabilité interne
$C_u < 10$	Stable
$10 < C_u < 20$	Matériau de transition
$C_u > 20$	Instable

Tableau I-1 Classification de stabilité interne selon Istomina (1957)

Kezdi (1979), Sherard (1979)

Kezdi (1979) a proposé une méthode d'évaluation de la susceptibilité à l'érosion interne des matériaux qui consiste à diviser leurs courbes granulométriques en deux parties, une partie grossière (dont la taille des particules est notée D') et une partie fine (dont la taille des particules est notée d'), en un diamètre arbitraire (point S_0 sur la *Figure I-3*), et de vérifier la capacité des particules grossières de retenir ou pas les particules fines sous l'effet d'un écoulement. Si les granulométries des deux parties satisfont le critère ($D'_{15}/d'_{85} \leq 4$), élaboré par *Terzaghi (1939)* pour caractériser les filtres, alors le matériau est dit stable, et

inversement. Dans ce critère, le paramètre D'_{15} est le diamètre correspondant à 15% de passant sur la courbe granulométrique de la partie des particules grossières, et le paramètre d'_{85} est le diamètre correspondant à 85% de passant sur la courbe granulométrique de la partie des particules fines. Etant donné qu'on ne connaît pas exactement le diamètre exact de séparation de ces deux parties, les auteurs font varier la position du point S_0 sur la courbe et vérifient ce critère pour les différents points.

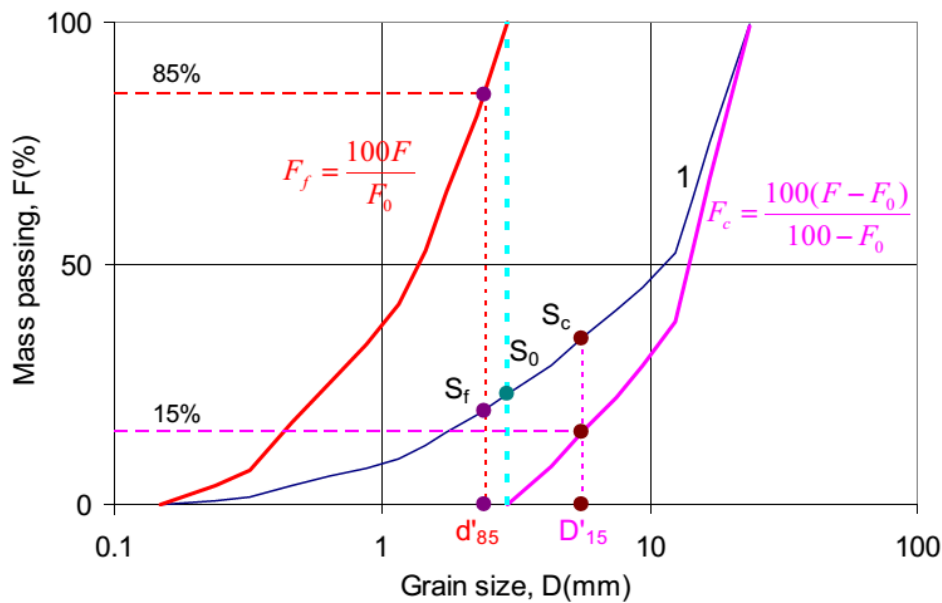


Figure I-3 Représentation des paramètres utilisés dans la méthode de Kezdi (1979)

Cette même méthode a été aussi proposée par *De Mello (1975)*, en réalisant des essais d'érosion interne sur des matériaux ayant des courbes granulométriques discontinues. Ce critère est confirmé aussi par les travaux de *Kenney et Lau (1985) et (1986)*, *Lowe (1988)* et *Honjo (1996)*.

Sherard (1979) signale que les matériaux avec des courbes granulométriques étalées sont plus favorables à l'érosion. Il suggère une valeur limite pour le rapport de filtre $\frac{D'_{15}}{d'_{85}} \approx 4$ à 5.

Kovacs (1981)

Kovacs (1981) a modélisé le milieu poral des sols par un ensemble de tubes capillaires pour lesquelles le diamètre des pores est calculé par l'expression :

$$d_0 = 4 * \frac{n_c}{1 - n_c} \frac{D_h^c}{\alpha_D}$$

Où α_D coefficient de forme, qui vaut 6 pour les particules sphériques et 7 à 9 pour les particules angulaires.

n_c est la porosité de la fraction grossière, calculée par l'expression :

$$n_c = n + F_n (1 - n)$$

Où n est la porosité de sol et F_n le pourcentage de particules fines

D_h^c est le diamètre effectif de la fraction grossière, donné par l'expression :

$$D_h^c = \frac{1}{\sum \frac{\Delta F_i^c}{D_i^c}}$$

Où D_i^c est le diamètre moyen dans l'intervalle i de la courbe granulométrique de la fraction grossière, et F_i^c est le pourcentage correspondant.

Pour la fraction fine, le diamètre caractéristique correspond à d_{85}^f . De ce fait, *Kovacs (1981)* compare le diamètre d_0 au diamètre des fines d_{85}^f , et a établi le critère suivant :

- Si $d_0 < d_{85}^f$ le matériau est instable (érodable) et inversement.

Ce critère est néanmoins très peu utilisé dans les travaux postérieurs, vu qu'il n'a pas été validé par des résultats expérimentaux.

Kenney et Lau (1985 et 1986)

En se basant sur les travaux de l'*USACE (1953)*, *Kenney et Lau (1985)* ont réalisé des essais d'érosion sur une vingtaine de matériaux. Les courbes granulométriques des matériaux testés sont regroupées sur la *Figure I-4*. Deux dispositifs d'essais sont utilisés, avec les dimensions de 245 mm de diamètre et 450 mm de hauteur pour le premier, et 580 mm de diamètre et 860 mm de hauteur pour le deuxième, les schémas des deux dispositifs sont montrés sur la *Figure I-5*. Le principe des essais consiste à générer des écoulements verticaux descendants, avec un nombre de *Reynolds* est supérieur à 10 ($Re > 10$), associés à des vibrations avec un marteau sur le support des cellules pour accentuer la perte des particules fines. Une fois l'essai terminé, le matériau dans les cellules est récupéré par tranches pour faire des analyses granulométriques comparatives à la granulométrie initiale de chaque matériau.

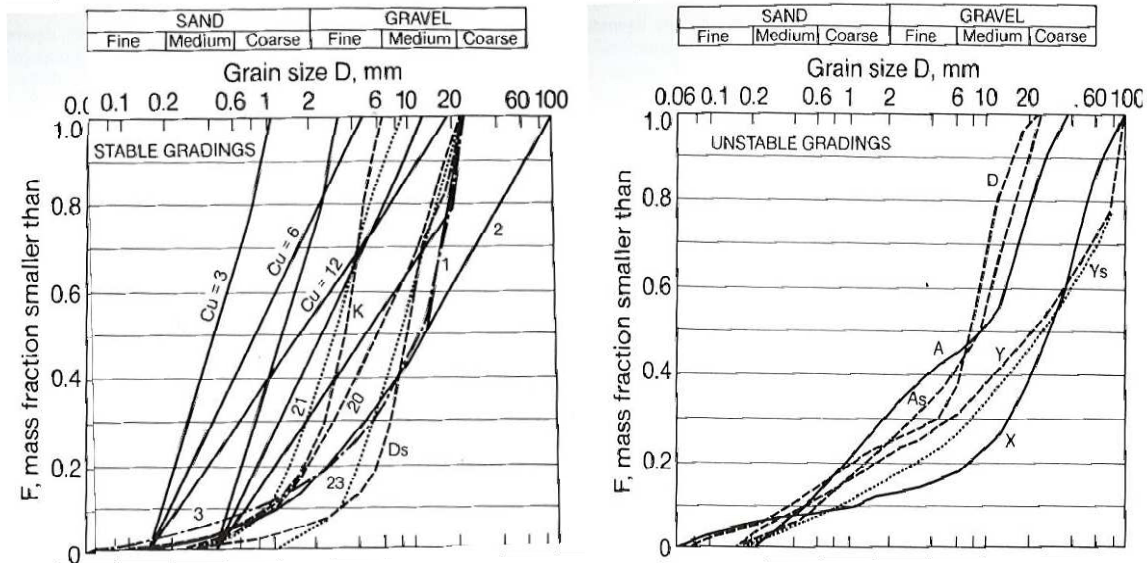


Figure I-4 Courbes granulométriques des matériaux utilisés par Kenney et Lau (1985)

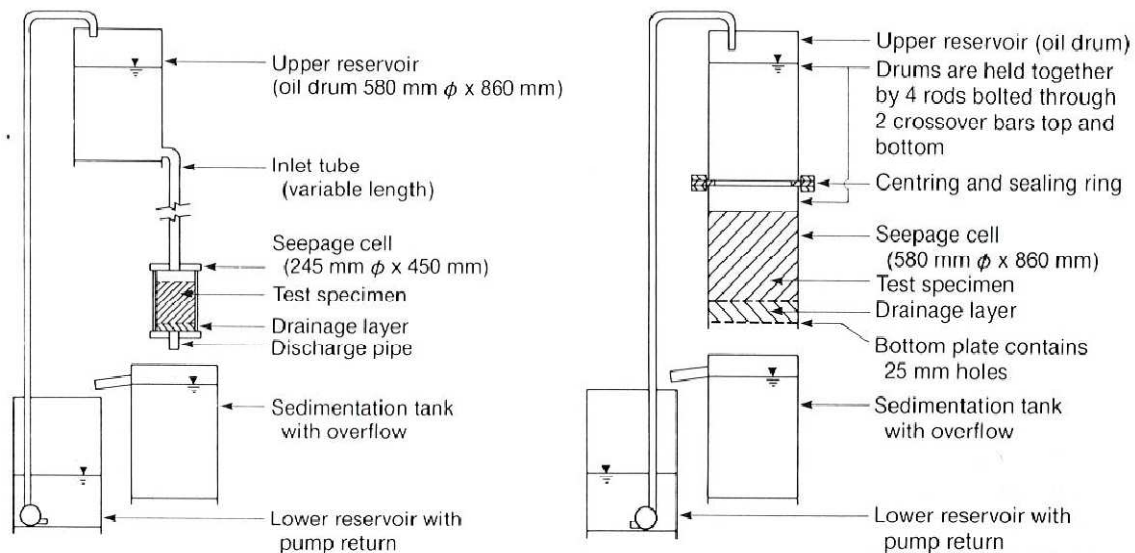


Figure I-5 dispositifs expérimentaux utilisés par Kenney et Lau (1985)

En se basant notamment sur l'évolution de la granulométrie des couches intermédiaires des matériaux récupérés par rapport à l'état initial d'un côté, et sur les travaux de *Loebotsjkov (1969)* sur la dérivation d'une expression décrivant la densité d'un sol modèle constitué de fractions de particules de taille identique d'un autre côté, *Kenney et Lau (1985)* ont proposé un critère de classification des matériaux testés vis-à-vis de la suffusion. L'idée est de comparer la quantité des matériaux dont la taille est inférieure à diamètre D , qu'on note F , et celle des matériaux dont la taille est comprise entre D et $4D$, qu'on note H ($H = F_{4D} - F_D$). Ce calcul doit se faire en faisant varier D sur les 20% de passant pour les granulométries étalées et sur les 30% de passant pour granulométries serrées. Les courbes obtenues sont regroupées

sur la *Figure I-6*. En 1985, *Kenny et Lau* ont défini l'indice de stabilité comme le rapport de H/F , et ont proposé le critère $H/F \geq 1,3$ pour les matériaux stables, après discussion des résultats proposés en 1986, cette limite a été abaissée à 1. En fait, si la quantité de matériaux dont la taille entre D et $4D$ est supérieure à celle du matériau dont la taille est inférieure à D , alors le matériau est dit stable et inversement. Ce qui veut dire aussi qu'une particule de taille D ne peut passer qu'à travers de pores constitués par des particules dont la taille minimale est de $4D$, ce qui va dans les sens des critères de *Kezdi (1979)* et de *Sherard (1979)*.

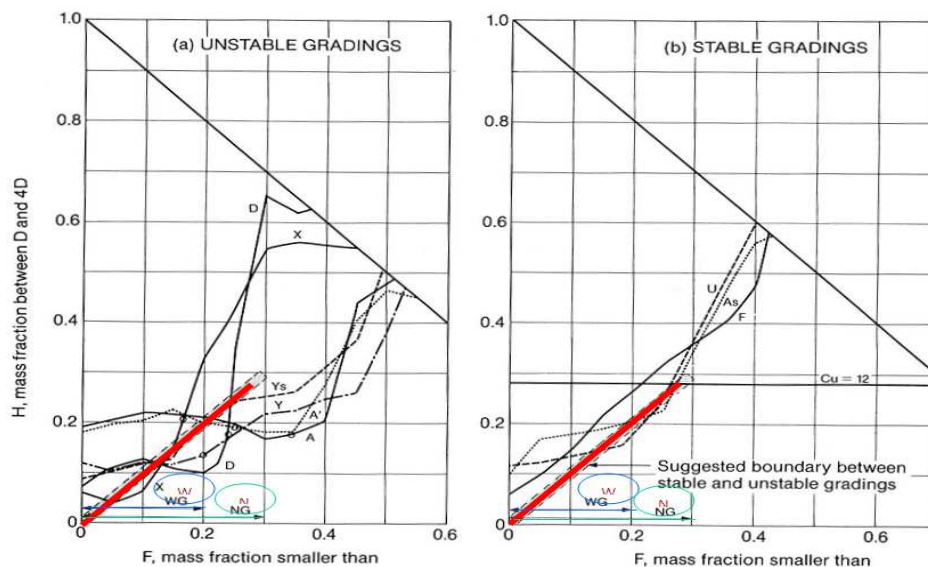


Figure I-6 Critère d'érosion selon Kenney et Lau (1985), modifié en 1986

Lafleur et al. (1989)

En se basant sur la forme de la courbe de distribution granulométrique, *Lafleur et al. (1989)* ont mis en place une classification des matériaux vis-à-vis de leur stabilité interne, et donc leur érodabilité. Les formes des courbes granulométriques retenues sont regroupées sur la *Figure I-7*. Les matériaux avec des courbes granulométriques ayant une forme linéaire en totalité ou en partie (courbes 1 et 2) sont classés comme stables. Les matériaux avec des courbes granulométriques discontinues (courbe 3) ou étalées (courbe 4) sont par contre classés comme instables vis-à-vis de l'érosion. Bien que cette classification soit qualitative, elle permet de donner une première appréciation de comportement des matériaux en fonction des granulométries qui y sont associées.

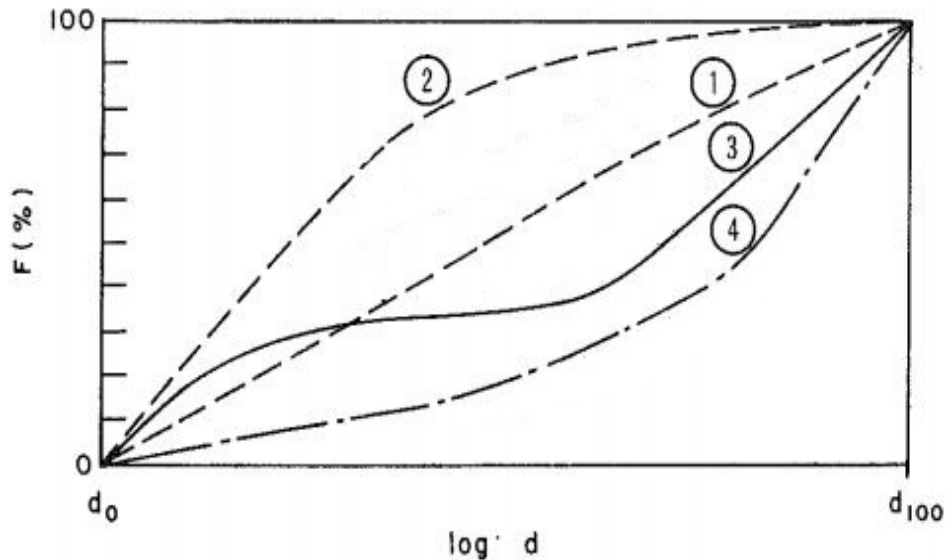


Figure I-7 Courbes granulométriques analysées par Lafleur (1989)

Burenkuva (1993)

Burenkuva (1993) a réalisé une étude sur 22 matériaux de granulométries différentes, dont le D_{max} est de 100 mm et avec un C_u allant jusqu'à 200. Les courbes des matériaux sont divisées arbitrairement en une série de tranches classées des particules les plus grossières aux particules les plus fines. Le principe de classification des matériaux testés vis-à-vis de la suffusion consiste à vérifier l'évolution du volume des matériaux reconstitués. Pour ce faire, les grosses particules sont introduites dans un récipient et on mesure le volume, les autres tranches de particules sont ensuite ajoutées en allant des plus grossières aux plus fines tout en mesurant le volume de l'ensemble à chaque ajout. Si le volume de l'échantillon augmente avec l'ajout de la tranche de particules alors ces particules ajoutées font partie du squelette grossier de sol, et au contraire, si le volume n'augmente pas, ces particules ajoutées feront partie des particules fines érodables.

En se basant sur les diamètres D_{15} , D_{60} et D_{90} qui désignent les diamètres correspondant au passage de 15%, 60% et 90% respectivement, *Burenkuva* définit deux ratios pour décrire l'hétérogénéité des sols étudiés appelés "facteurs conditionnels d'uniformité":

$$\bullet \quad h' = D_{90}/D_{60} \text{ et } h'' = D_{90}/D_{15}$$

Le paramètre h' caractérise la capacité de filtre de matériau testé, et le paramètre h'' caractérise la pente de la partie grossière de ce même matériau.

En représentant les points sur une échelle semi-logarithmique sur la *Figure I-8*, *Burenkuva* définit 4 zones en fonction de l'érodabilité des matériaux, les zones I et III correspondent aux

matériaux suffusifs, la zone II correspond aux matériaux non suffusifs et la zone IV correspond seulement à des matériaux qualifiés d'« artificiels ».

La zone des matériaux non suffusifs (II) est délimitée par l'inégalité suivante :

$$\bullet \quad 0,76 \log h'' + 1 < h' < 1,86 \log h'' + 1$$

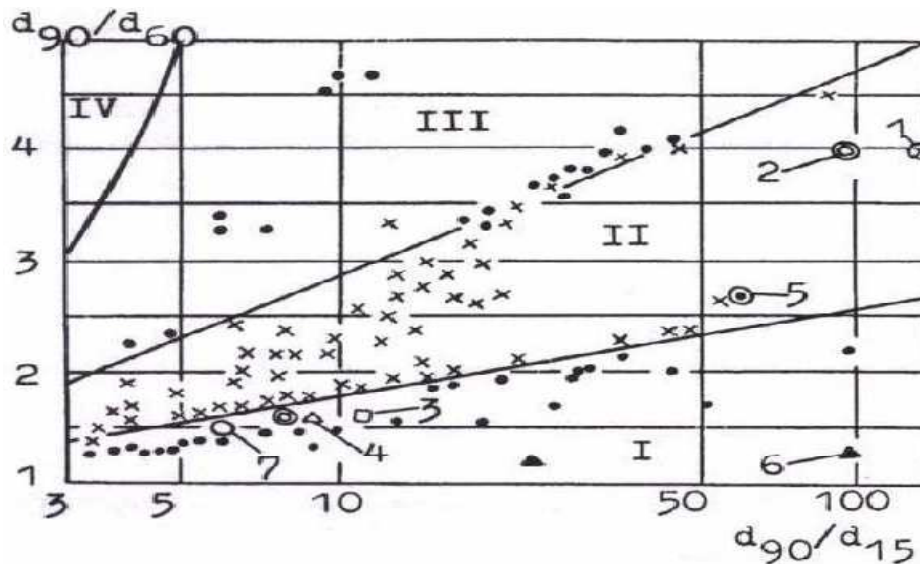


Figure-8 Critère d'érosion de Burenkuva(1993)

Chapuis et al. (1996)

En réalisant des essais d'écoulement vertical descendant sur trois matériaux de courbes granulométriques différentes, *Chapuis et al. (1996)* ont constaté que les matériaux avec des courbes granulométriques linéaires ou faiblement concaves (Courbes 3 et 1 de la *Figure I-9* respectivement) sont stables à l'érosion, la sensibilité des matériaux augmente en augmentant la concavité des courbes granulométriques de ces matériaux (Courbe 2 de la *Figure I-9*). Ces résultats sont proches de ceux obtenus par *Lafleur et al. (1989)*.

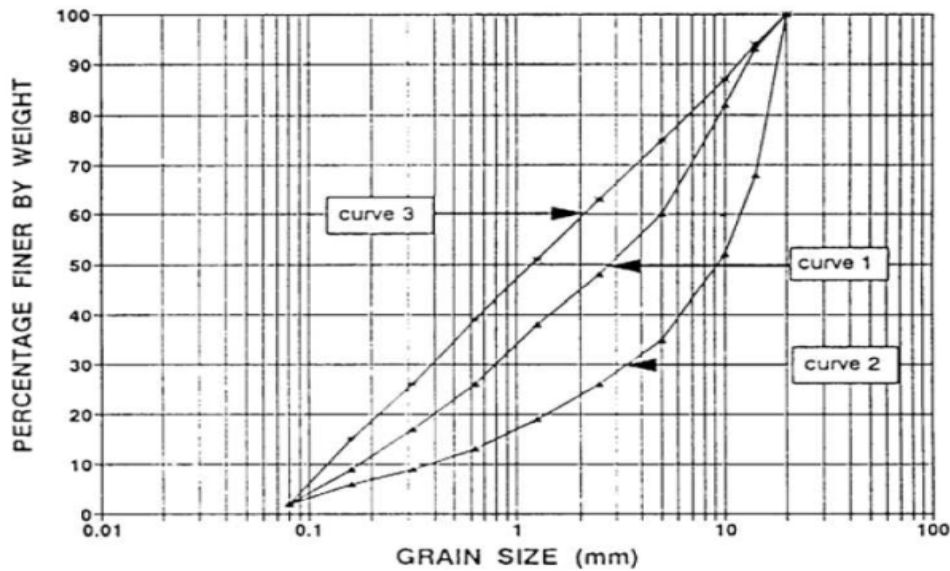


Figure I-9 Courbes granulométriques des matériaux testés par Chapuis (1996)

Li et Fannin (2008)

Li et Fannin (2008) ont élaboré un critère en combinant le critère de Kezdi (1979), et le critère de Kenney et Lau (1986). Les auteurs ont regroupé les résultats de plusieurs auteurs sur la courbe H-F de Kenney et Lau (1986), la synthèse obtenue est montrée sur la Figure I-10. On rappelle que sur cette représentation le critère de Kezdi (1979) donne des matériaux instables pour $H < 15$, et pour Kenney et Lau (1986) le critère est $H/F < 1$. Sur le critère obtenu on conclut que la méthode de Kenney et Lau (1986) est plus conservative pour des valeurs de $F > 15$, et la méthode de Kezdi (1979) est plus conservative pour des valeurs de $F < 15$.

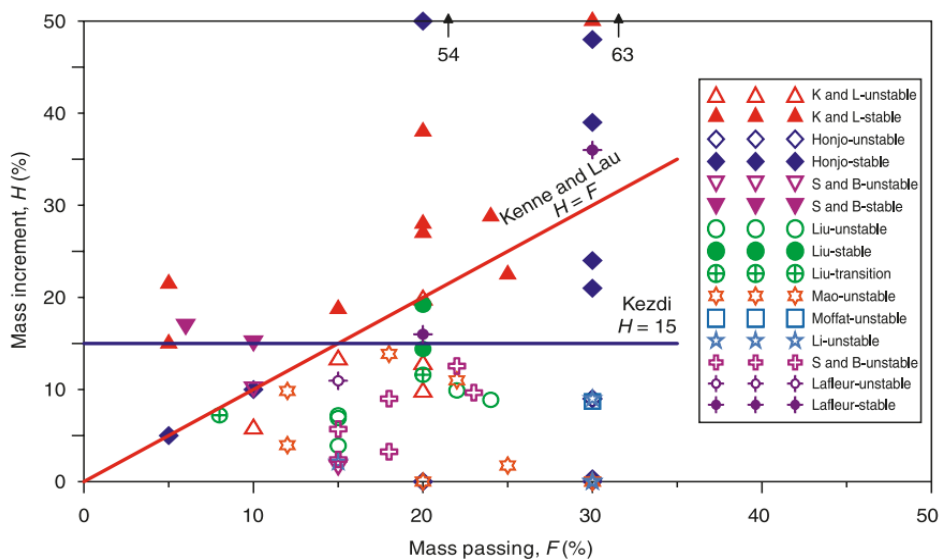


Figure I-10 Critère combiné de Kezdi (1979) et Kenney et Lau (1986) élaboré par Li et Fannin (2008)

Wan et Fell (2008)

Wan et Fell (2008) ont réalisé des essais de suffusion sur 20 matériaux dont les courbes granulométriques sont regroupées dans la *Figure I-11*. Les matériaux sont testés dans un perméamètre de 30 cm de diamètre et 30 cm de hauteur, et sont soumis à des écoulements descendants sous un gradient hydraulique constant de 8 (voir *Figure I-12*). En bas de l'échantillon, on trouve une couche d'agrégat de 20 mm de diamètre, qui permet le passage des particules fines tout en bloquant les grosses particules.

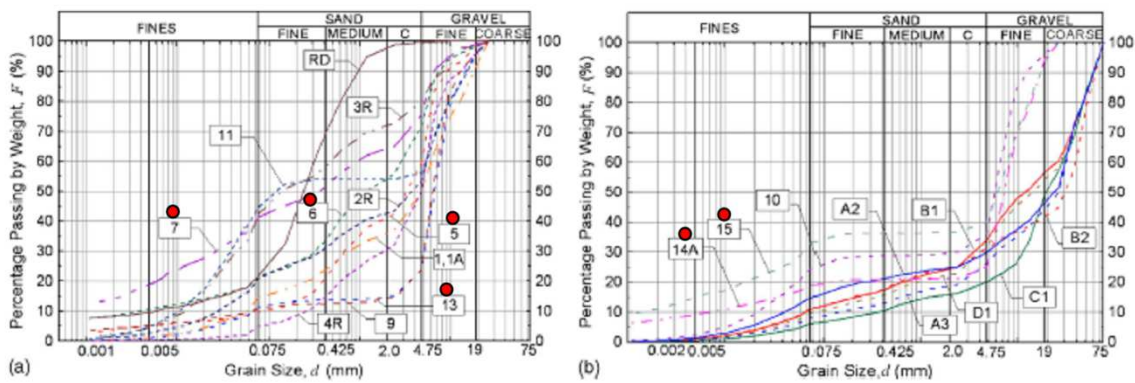


Figure I-11 Courbes granulométriques des matériaux testés par Wan et Fell (2008) : (a) Matériaux stables; (b) Matériaux instables

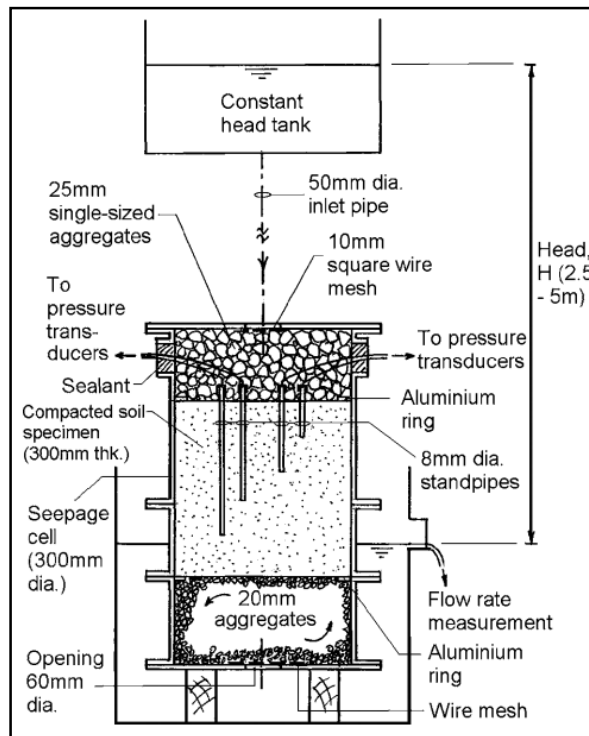


Figure I-12 Dispositif expérimental de Wan et Fell (2008)

L'érodabilité des matériaux est déduite uniquement à partir de l'aspect trouble ou non de l'effluent. Les essais sont arrêtés lorsque l'eau en sortie de l'essai devient claire, de ce fait les auteurs se sont intéressés à l'érosion par suffusion des matériaux testés.

En se basant sur les travaux de *Burenkuva (1993)*, les auteurs ont proposé une méthode de classification de l'érodabilité des matériaux en effectuant des calculs de probabilité de l'érosion définie comme suit :

$$P = \frac{\exp(Z)}{1 - \exp(Z)}$$

Plus la probabilité est grande, plus le matériau est érodable.

Pour les mélanges limon-sable-gravier et les mélanges argile-limon-sable-gravier, avec un indice de plasticité inférieur à 13% et une teneur en argile inférieure à 10 %, Z est défini comme suit:

$$Z = 2,378 \log h'' - 3,648h' + 3,701$$

Pour les mélanges sable-gravier contenant moins de 10 % de fines non plastiques (inférieure à 0,075 mm), Z est défini comme suit :

$$Z = 3,875 \log h'' - 3,59h' + 2,436$$

Les paramètres h' et h'' sont ceux définis dans le critère de *Burenkuva (1993)*.

Wan et Fell (2008) ont comparé leur critère aux critères les plus répandus déjà établis, et ils ont constaté que le critère de *Sherard (1979)*, et celui de *Kenney et Lau (1986)* sont conservatifs, et que le critère de *Burenkuva (1993)* est plus proche des résultats obtenus. La synthèse de la comparaison est présentée dans le *Tableau I-2*.

Pour les mélanges limon-sable-gravier avec une granulométrie étalée, les auteurs ont proposé une méthode alternative en modifiant le critère *Burenkuva (1993)*, ce critère est présenté sur la *Figure I-13*. En fait, les matériaux avec une pente raide de la fraction grossière (D_{90}/D_{60}) et une pente plate de la fraction fine (D_{20}/D_5) sont les plus susceptibles à la suffusion. Sur le critère on distingue trois zones ; une zone des matériaux stables, une zone des matériaux instables et entre les deux, une zone de transition.

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

^aS=stable; U=unstable; M=marginal. Boldface means incorrect prediction.

Tableau I-2 Comparaison des critères d'érosion déjà établis par Wan et Fell(2008)

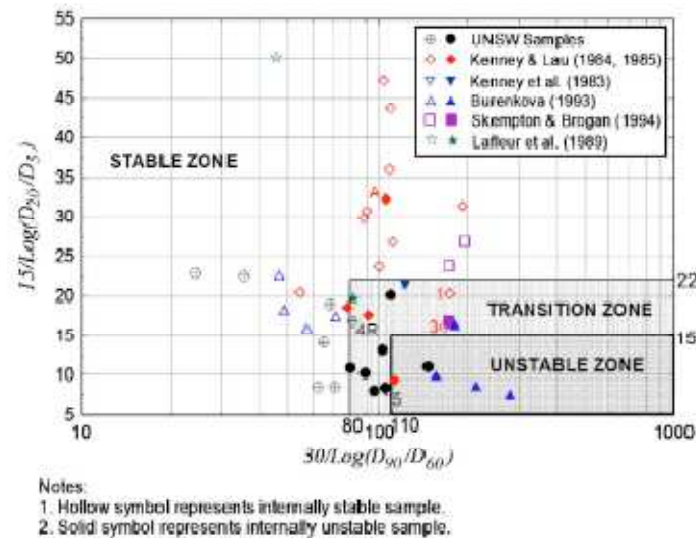


Figure I-13 Méthode alternative pour l'évaluation de la stabilité interne des mélanges limon-sable-gravier à granulométrie étalée (Wan et Fell (2008))

Ahlinhan et al. (2010 et 2012)

Dans leurs travaux entre 2010 et 2012 Ahlinhan et al. ont réalisé des essais d'érosion sur des mélanges de sables pour étudier l'influence de la granulométrie, de la densité et de la direction de l'écoulement sur l'érodabilité de ces matériaux. Pour ce faire, deux dispositifs ont été utilisés, un perméamètre de 285 mm de diamètre et 300 mm de hauteur équipé de piézomètres dans lequel sont générés des écoulements verticaux ascendants, et un parallélépipède d'une section de 100*300 mm et de 600 mm de longueur équipé aussi de piézomètres pour les écoulements horizontaux, les dispositifs sont présentés sur la Figure I-14.

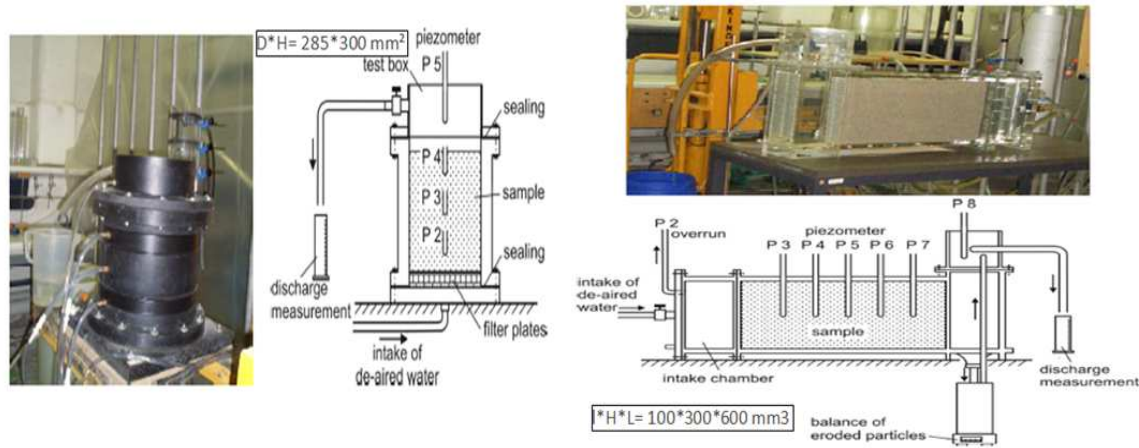


Figure I-14 Dispositifs utilisés par Ahlinhan et al. (2010, 2012)

La rupture par érosion est caractérisée par une augmentation rapide et brutale sur la courbe vitesse d'écoulement-gradient hydraulique. Par exemple, pour le matériau A1 qui est classé comme non érodable, le gradient d'érosion est proche de 1, qui correspond au gradient de la bouillie. Par contre pour le matériau E1, classé comme instable, le gradient critique est de l'ordre de 0,3, ce qui confirme sa classification comme instable comme montré sur la *Figure I-15 (a)*. L'influence de la densité est synthétisée sur la *Figure I-15(b)*. Les auteurs ont montré que pour les matériaux stables, l'augmentation de la densité fait augmenter le gradient hydraulique critique (cas des matériaux A1 et A2). Alors que pour les matériaux E2 et E3 classés comme instables, le gradient hydraulique n'est pas influencé par la densité de mise en place. Le sens d'écoulement a aussi une influence sur l'érosion des matériaux. En effet, les matériaux soumis à des écoulements horizontaux s'érodent sous des gradients inférieurs à ceux des matériaux soumis à des écoulements verticaux ascendants comme montré sur la *Figure I-15 (c)*. Ceci peut être dû à l'influence la gravité qui s'oppose au transport des particules dans le sens vertical ascendant.

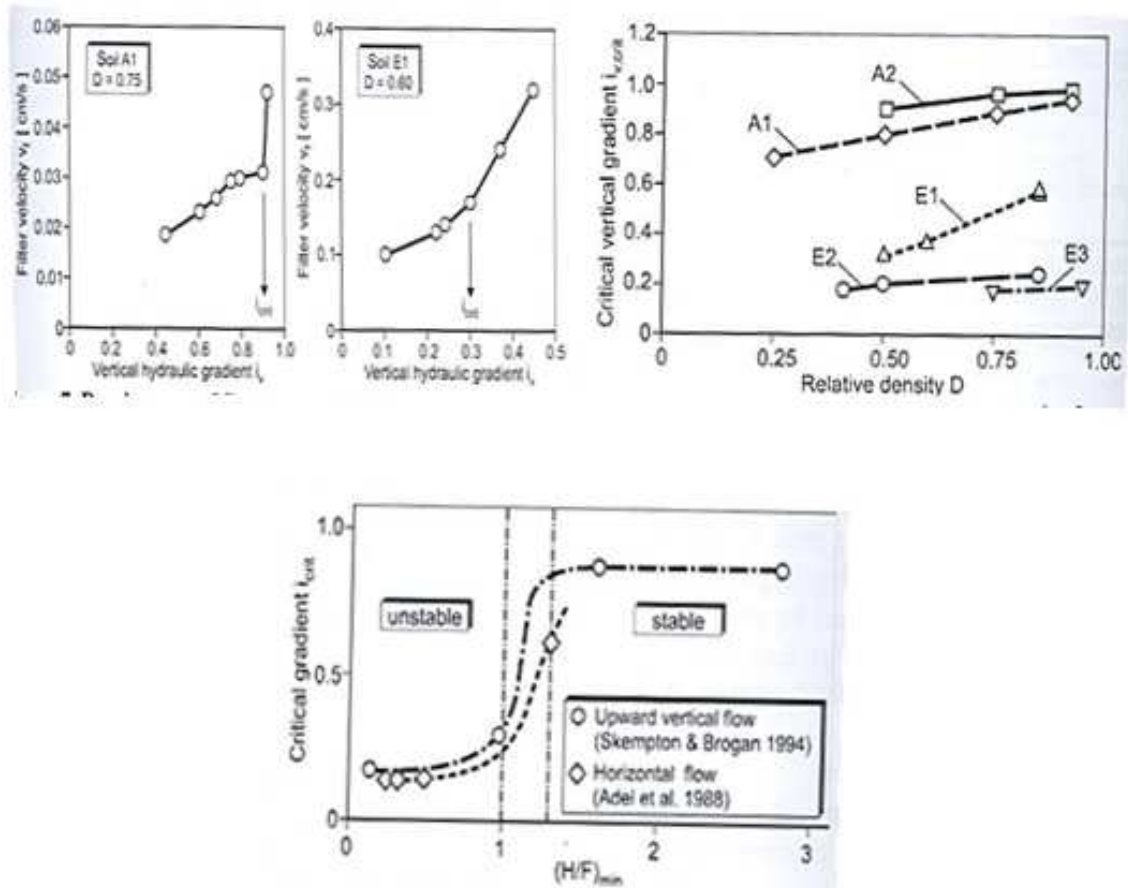


Figure I-15 Quelques résultats obtenus par Ahlinhan : (a) Influence de la granulométrie ; (b) Influence de la densité ; (c) influence de la direction d'écoulement (Ahlinhan et al. (2012))

I-3-2-2 Synthèse des critères granulométriques

Les critères présentés ci-dessous reposent sur les courbes granulométriques des sols, et plus particulièrement sur les diamètres caractéristiques de ces courbes, notamment sur celles de la fraction grossière et de la fraction fine. Certains auteurs ont établi une classification plutôt qualitative en fonction de la forme des courbes granulométrique : érodable ou non érodable (Lafleur et al. (1989), Chapuis et al. (1996) ...). Les dimensions caractéristiques des particules grossières permettent de caractériser les dimensions de l'espace poral et les dimensions caractéristiques des particules fines permettent de décrire les dimensions des particules érodables. La condition de suffusion se résume au fait que les particules fines puissent passer à travers l'espace poral de la fraction grossière. En effet, si les particules grossières n'arrivent pas à « autofiltrer » les particules fines alors celles-ci sont susceptibles d'être érodées. Parmi tous les critères proposés, certains ont été plus utilisés que d'autres, notamment ceux de Sherard (1979), Kenney et Lau (1986) et Burenkuva (1993).

Plus récemment, *Wan et Fell (2008)* ont montré que ces critères sont conservatifs, et ils ont proposé une modification du critère de *Burenkuva (1993)* afin de mieux décrire les résultats obtenus. De ce fait, ce sont ces quatre critères qui seront utilisés dans cette étude.

Il est à noter que, dans l'élaboration de ces critères, les auteurs n'ont pas pris en compte l'état initial des matériaux à leur mise en place : densité, porosité... ce qui peut être une explication de certaines divergences des résultats obtenus. Ceux-ci peuvent également dépendre de la taille des dispositifs utilisés dans les différentes études.

Bien entendu, l'érosion des matériaux dépend aussi des sollicitations hydrauliques appliquées, ces sollicitations génèrent une autre catégorie de critères nommée 'hydraulique' qui sera décrite ci- dessous.

1-3-2-3 Critères hydrauliques

Les critères granulométriques présentés ci-dessus permettent de classer les matériaux en fonction de leur susceptibilité à l'érosion (suffusion dans notre cas). Or l'érodabilité des matériaux classés 'érodables' dépend notamment de l'intensité des sollicitations hydrauliques appliquées. De ce fait, certaines structures de retenue d'eau construites avec des matériaux classés comme instables peuvent bien résister, si les sollicitations hydrauliques restent faibles. Cela montre que la classification de l'érodabilité des matériaux dépend aussi des conditions hydrauliques auxquelles ils sont soumis, notamment du gradient hydraulique et du débit d'écoulement. Dans ce qui suit, on présente une revue des études faites sur l'influence des sollicitations hydrauliques sur l'initiation et l'évolution de l'érodabilité des matériaux.

Terzaghi (1939)

Terzaghi (1939) décrit un phénomène appelé "boulance" dans les sols sableux 'pulvérulents'. Celui-ci correspond à la perte de résistance des particules d'un sol soumis à un écoulement vertical ascendant. Cette perte de résistance, décrivant un état de contraintes effectives nulles, est due à la poussée exercée par l'eau, dite aussi force d'écoulement qui pousse le sol vers le haut, et dont l'intensité est proportionnelle à la vitesse d'écoulement, et donc au gradient hydraulique.

En effet, dans un écoulement vertical ascendant, trois forces sont exercées sur un volume de sol, son poids ($W = \gamma_{sat} * dV$), la poussée d'Archimède ($A = \gamma_w * dV$) et la force d'écoulement ($J = i * \gamma_w * dV$). Les forces de pesanteur et la poussée d'Archimède étant toutes les deux verticales et indépendante de l'écoulement, les trois forces peuvent être réduites à deux, comme on le voit sur le schéma de la *Figure I-16*.

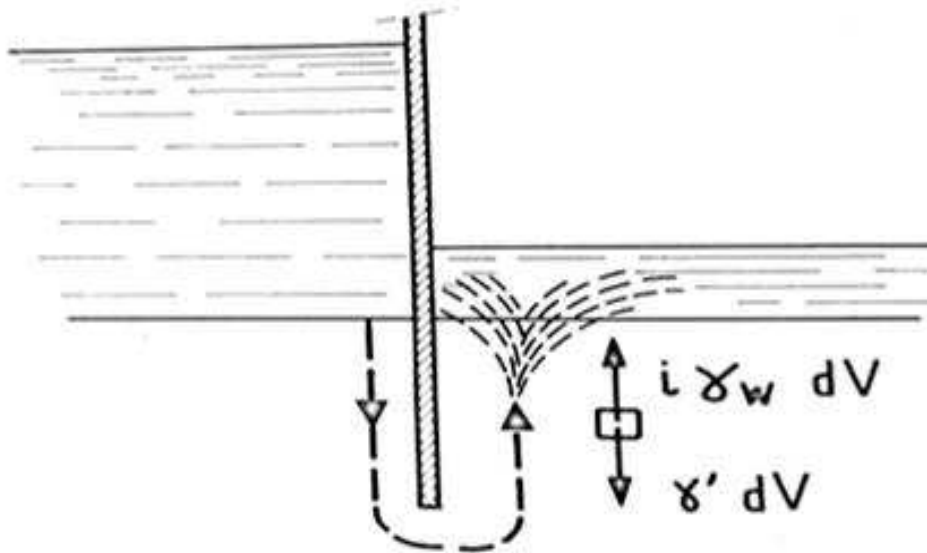


Figure I-16 Conditions d'apparition de la boullance (Philipponnat (1979))

- La force de pesanteur descendante (déjaugée) : $W - A = \gamma' * dV$.
- Une force d'écoulement d'eau verticale ascendante : $J = i * \gamma_w * dV$.

De ce fait, si la force d'écoulement dépasse la force de pesanteur $i \geq \frac{\gamma'}{\gamma_w}$, l'eau aura tendance à soulever le sol, il apparaît ainsi ce qu'on appelle une 'boullance' et le sol se comporte comme un liquide. Comme en général $\gamma' \approx \gamma_w \approx 1$, la boullance se produit lorsque $i \geq 1$. Ce critère ne permet pas de distinguer un sol érodable d'un sol non érodable.

Pour mieux prendre en compte l'état de sol *Terzaghi* a introduit l'effet de la porosité n sur la boullance et a proposé l'expression de gradient critique suivante :

$$i_{cr} = (1 - n) \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)$$

Où γ_s est le poids volumique des grains solides (couramment $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$)

Skempton et Brogan (1994) ont fait une étude plus détaillée sur le phénomène de boullance associé aux phénomènes d'érosion, une synthèse de leurs travaux sera présentée dans la suite de ce chapitre.

Istomina (1957)

Dans la suite de ce qui a été présenté dans les critères granulométriques, *Istomina (1957)* a proposé une courbe d'évolution de gradient hydraulique critique en fonction du coefficient d'uniformité C_U montrée sur la *Figure I-17*. L'auteur montre que pour les matériaux à

granulométrie serrée ($C_u \leq 2$) le gradient hydraulique critique est de 1, qui correspond au gradient hydraulique de la boullance. En augmentant le coefficient d'uniformité, les courbes granulométriques deviennent de plus en plus étalées et le gradient critique diminue pour atteindre une valeur de 0,2 pour un $C_u \approx 40$). En effet dans le cas des matériaux à granulométrie étalée, les particules fines auront plus de facilité à traverser la porosité des particules plus grosses, de ce fait elles seront facilement érodables sous de faibles gradients hydrauliques.

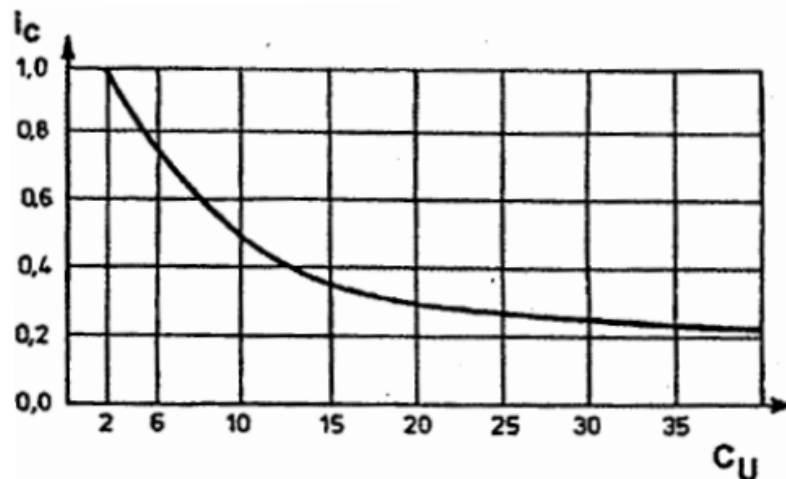


Figure I-17 Evolution de gradient hydraulique critique en fonction de coefficient d'uniformité (Istomina(1957))

Den Adel et al. (1988)

Den Adel et al. (1988) ont réalisé des essais d'érosion sur trois matériaux dits 'minestone' (déchets de carrière) utilisés pour la protection des talus des digues. Ces matériaux à granulométries étalées sont connus par leur instabilité mécanique et leur faible cohésion, mais l'intérêt de leur utilisation réside dans leur faible coup et de pouvoir utiliser les matériaux recyclables ayant la même granulométrie et facilement disponibles.

Les matériaux sont testés dans un dispositif horizontal de 105 cm de longueur, et les essais sont réalisés sous des écoulements à charge hydraulique constante et augmentée graduellement par paliers toutes les 30 minutes. Les particules érodées sont récoltées à la sortie de la conduite. Les auteurs mesurent le gradient hydraulique critique qui correspond à un taux d'érosion de $1\text{g/m}^2\cdot\text{s}$, calculé sur les 30 minutes de chaque palier, qui correspond au rapport de la masse des particules érodées par unité de surface de l'échantillon et par unité de temps. A l'issue de cette étude, le critère de *Kenny et Lau (1985)* est vérifié, et une relation linéaire entre le gradient hydraulique critique et l'indice de stabilité (H/F) est établie comme illustré sur la *Figure I-18*.

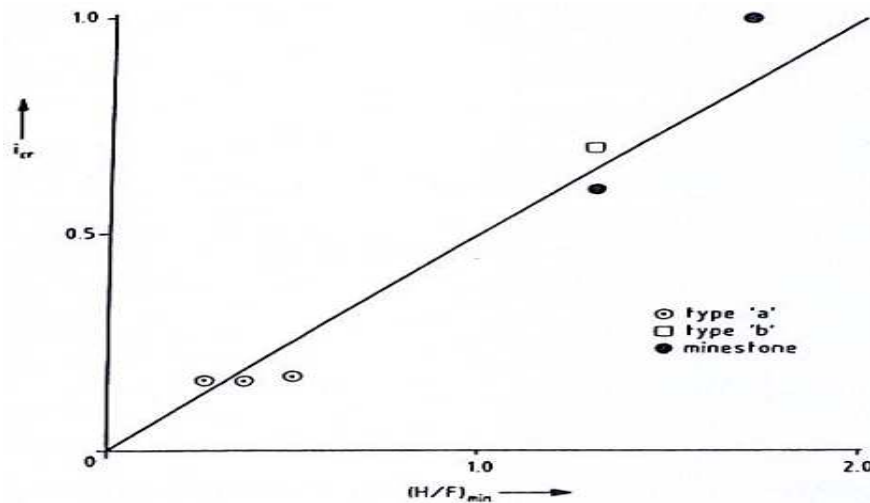


Figure I-18 Critère établi par Den Adel et al.(1988)

Ces essais montrent que le gradient hydraulique critique d'érosion dépend de la forme de la courbe granulométrique des matériaux testés. Et notamment de la capacité des matériaux testés à s'auto-filtrer, qu'on peut décrire par l'indice de stabilité H/F.

Skempton et Brogan (1994)

Skempton et Brogan (1994) ont réalisé des essais d'érosion sur des configurations semblables à celles décrites par *Terzaghi (1939)*. Quatre matériaux reconstitués à partir des mélanges de sable de gravier à granulométrie étalée ou discontinue sont testés. Les échantillons ont une forme cylindrique avec un diamètre de 13,9 cm et une hauteur de 15,5 cm. La cellule est équipée de 4 tubes piézométriques pour mesurer l'évolution de la pression interstitielle le long des échantillons. Une fois les échantillons saturés dans le perméamètre, un écoulement unidirectionnel vertical ascendant est appliqué et augmenté graduellement jusqu'à la rupture des échantillons. La rupture par érosion se caractérise par une augmentation importante et soudaine de la vitesse d'écoulement sous des gradients hydrauliques plus faibles que le gradient hydraulique critique de *Terzaghi (1939)*, comme on peut le voir sur la *Figure I-19(a) et (b)*. Selon cette description, l'échantillon B est caractérisé comme instable, et l'échantillon C est caractérisé comme un matériau stable vis-à-vis de l'érosion.

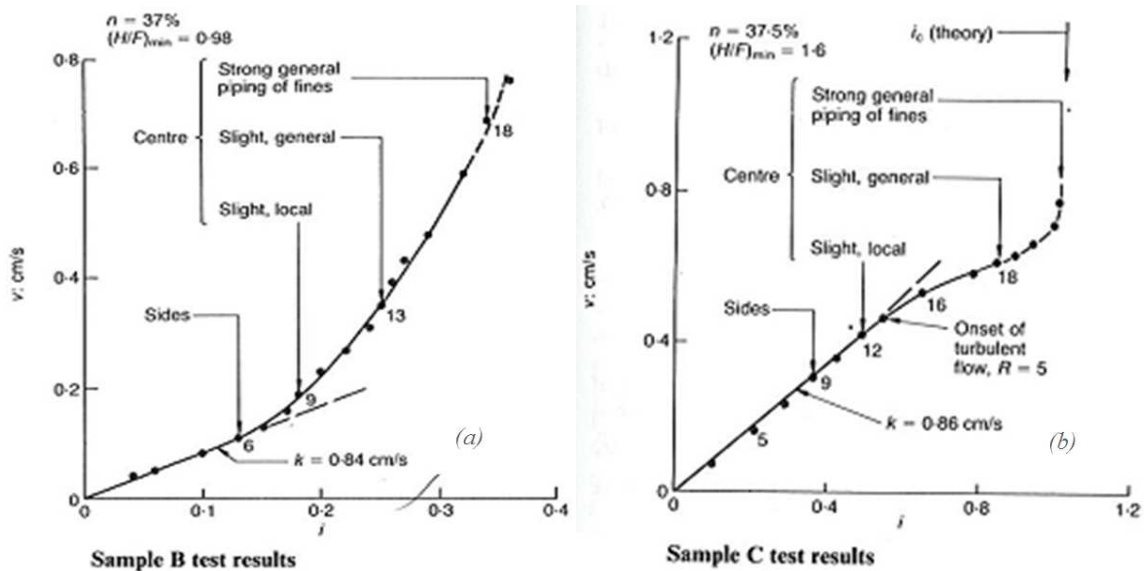


Figure I-19 Résultats des essais d'érosion de Skempton et Brogan (1994) : (a) stable ; (b) instable

Les auteurs ont constaté que, pour les matériaux instables, les gradients hydrauliques critiques sont de l'ordre de 1/3 voir 1/5 de celui défini par Terzaghi (1939). Ceci s'explique par le fait que dans ce cas la majeure partie de la contrainte effective est reprise par le squelette granulaire constitué par les particules grossières, et donc les particules fines reprennent très peu de charge et donc elles sont facilement détachables et transportables sous l'effet de l'écoulement d'eau dans la mesure où la porosité ne s'y oppose pas.

A l'issue de ces travaux Skempton et Brogan (1994) ont proposé une formule d'évaluation de gradient hydraulique d'érosion des particules fines $i_{cr} = \alpha \times \gamma' / \gamma_w$, où α est un facteur de réduction de la contrainte effective inférieur à 1, qui est inversement proportionnel à la quantité de particules fines.

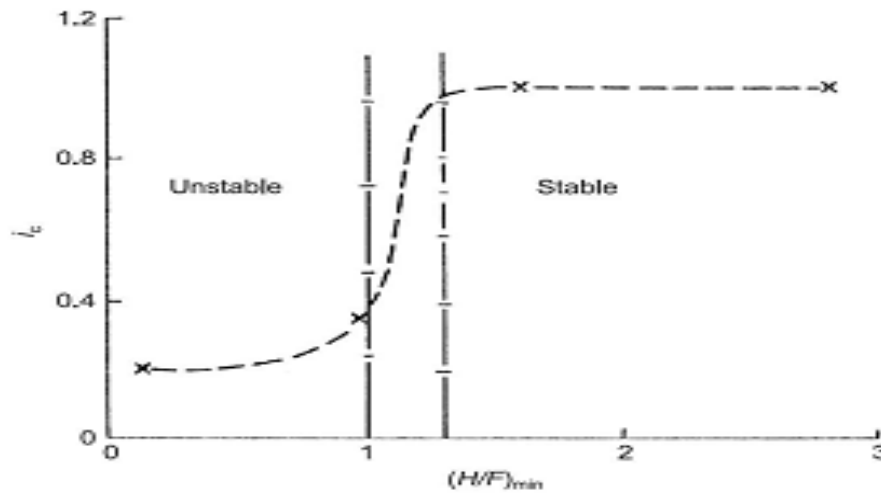


Figure I-20 Evolution de gradient hydraulique critique en fonction de l'indice de stabilité (Skempton et Brogan(1994))

En s'intéressant à l'évolution du gradient hydraulique critique en fonction de l'indice de stabilité (H/F) tracée sur la *Figure I-20*, on voit bien que dans le cas des matériaux instables, cette instabilité se produit à des gradients faibles. La relation obtenue entre l'indice de stabilité et le gradient hydraulique n'est plus linéaire, contrairement à ce qui a été obtenu par *Den Adel et al. (1988)*. Ceci peut être attribué à la différence dans le sens de l'écoulement, horizontal et vertical ascendant, et à la définition du gradient hydraulique critique.

Monnet (1998) a proposé une autre interprétation des travaux de *Skempton et Brogan(1994)* pour déterminer le gradient hydraulique d'initiation de l'érosion. L'idée consiste à comparer la conductivité hydraulique k au paramètre issu de la granulométrie $0,01 d_{15}^2$ (d_{15} en mm), de ce fait :

- Si $k < 0,01 d_{15}^2$, la rupture sera obtenue par boulangerie pour le gradient hydraulique critique de Terzaghi.
- Si $k > 0,01 d_{15}^2$, le matériau est plus perméable, et l'érosion s'initie par érosion régressive ou renard, qui est une localisation de l'écoulement (qui peut être précédé par de la suffusion) et dont l'apparition est commandée par un gradient hydraulique critique de renard i_r estimé comme suit :

$$i_r = 0,01 \frac{d_{15}^2}{k} i_{cr}$$

Où $d_{15}(mm)$ est la taille des particules correspondant à 15 % de passant sur la courbe granulométrique de matériau testé, $k(m/s)$ est la conductivité hydraulique de matériau et $i_{cr}(m/m)$ est le gradient hydraulique critique de *Terzaghi*.

Bien entendu, dans ce cas le rapport $0,01 \frac{d_{15}^2}{k}$ est inférieur à 1, et donc le gradient critique de renard est inférieur au gradient critique de Terzaghi (de Boulance).

Mao (2005)

Mao (2005) a réalisé des essais sur des échantillons dans un perméamètre de 20 cm à 30 cm de hauteur. Les échantillons sont soumis à des écoulements verticaux ascendants, sous des gradients hydrauliques augmentés par paliers jusqu'à la rupture. Aucune surcharge n'est appliquée sur les échantillons. Le gradient hydraulique critique (de rupture) des échantillons est défini comme le gradient hydraulique à partir duquel la pente de la courbe vitesse d'écoulement-gradient hydraulique change significativement et brutalement. *Mao (2005)* propose une relation non linéaire du gradient hydraulique critique en fonction de la proportion de particules fines et de la porosité, à savoir :

$$i_{cr} = \frac{7d_5}{d_f} [4p_f(1-n)]^2$$

Où d_5 est le diamètre des particules correspondant à 5 % de passant, d_f correspond au diamètre de séparation entre les particules fines et les particules grossières, défini par $d_f = 1,3\sqrt{d_{15}d_{85}}$, p_f correspond au pourcentage des particules fines et n est la porosité de l'échantillon.

Wan et Fell (2004)

Dans les essais de suffusion réalisés par *Wan et Fell (2004)*, les auteurs ont tiré les enseignements suivants :

- (1) Les sols instables (érodables) commencent à s'éroder à des gradients inférieurs à 1, voire parfois inférieurs à 0,5. L'érosion se produit à un taux relativement faible, et ne conduit pas à une situation de «trouble extrême» à laquelle l'érosion serait évidente;
- (2) Les auteurs n'ont pas pu établir de relation entre le gradient hydraulique critique et le coefficient d'uniformité, le rapport H/F ou le contenu des particules fines;
- (3) En termes de porosité, les auteurs ont trouvé que les sols avec une porosité plus élevée commenceraient à s'éroder à des gradients hydrauliques plus faibles.
- (4) Les sols avec des particules argileuses (kaolinite) semblent s'éroder à des gradients hydrauliques relativement plus élevés que ceux ayant la même quantité de particules fines, mais de nature non argileuse ;
- (5) La densité d'un sol exerce un effet important sur le gradient hydraulique critique. Plus la densité du sol, plus le gradient hydraulique critique est élevé.

(6) Les sols avec une granulométrie discontinue s'érodent à des gradients hydrauliques relativement plus faibles que les sols avec des granulométries continues ayant des teneurs en particules fines semblables.

Moffat et al. (2005, 2006)

Moffat et al (2006) ont étudié la stabilité interne (érodabilité) de 3 échantillons reconstitués à partir de mélange de billes de verre. Les auteurs ont utilisé un grand perméamètre dont les dimensions des échantillons sont de 279 mm de diamètre, et d'une longueur de 300 à 500 mm, équipé de deux séries de capteurs de pression le long de l'échantillon pour mesurer la variation locale des pressions. L'objectif est d'examiner l'effet de la contrainte effective verticale sur l'initiation de l'instabilité interne, et notamment la relation entre les contraintes effectives et le gradient hydraulique à l'initiation de l'érosion. Des écoulements verticaux ascendant et descendant sont appliqués, avec des gradients hydrauliques augmentés par paliers de 1 jusqu'à l'initiation de l'érosion. Une pression supplémentaire de 25 kPa à 175 kPa a été appliquée à la partie supérieure de l'échantillon. Les auteurs ont suggéré qu'il existe une relation entre le gradient critique et la contrainte effective verticale, mais elle n'a pas été posée de manière explicite. Chaque matériau a abouti à une frontière hydromécanique différente, qui caractérise le début de l'instabilité interne.

Marot et al. (2011-a) et Nguyen et al. (2012)

Dans ce qui suit, on présente la synthèse d'une partie des travaux menés sur l'érosion réalisés au laboratoire de l'IUT Saint-Nazaire (Université de Nantes) pour étudier l'influence des paramètres tels que le gradient hydraulique, le débit d'écoulement, la nature et la quantité des particules fines sur l'érodabilité des matériaux testés. Dans les travaux de *Nguyen et al. (2012)*, les auteurs ont testé un mélange de 75% de sable de Fontainebleu et de 25 % de kaolinite Proclay, dans le même dispositif utilisé par *Bendahmane et al. (2008)* (voir plus bas). L'utilisation d'un capteur optique, développé par *Marot et al. (2011-a)*, permet d'évaluer de la concentration de l'affluent en particules argileuses, et de détecter aussi l'initiation de l'érosion de particules sableuses. Deux types de chargement hydraulique sont appliqués, des essais à débit contrôlé (N1 à N3) et des essais à gradient contrôlé (N4 à N7). L'évolution de la quantité des particules fines érodées pour les différents essais est montrée sur la *Figure I-21*. Les flèches sur les différents graphes correspondent à l'initiation de l'érosion des particules sableuses.

On constate que pour les essais à débit contrôlé la masse des particules fines érodées augmente continuellement avec l'augmentation du débit d'écoulement, alors que pour les essais à gradient contrôlé, la masse des fines érodées augmente puis se stabilise vers une valeur asymptotique (essai N6 et N7).

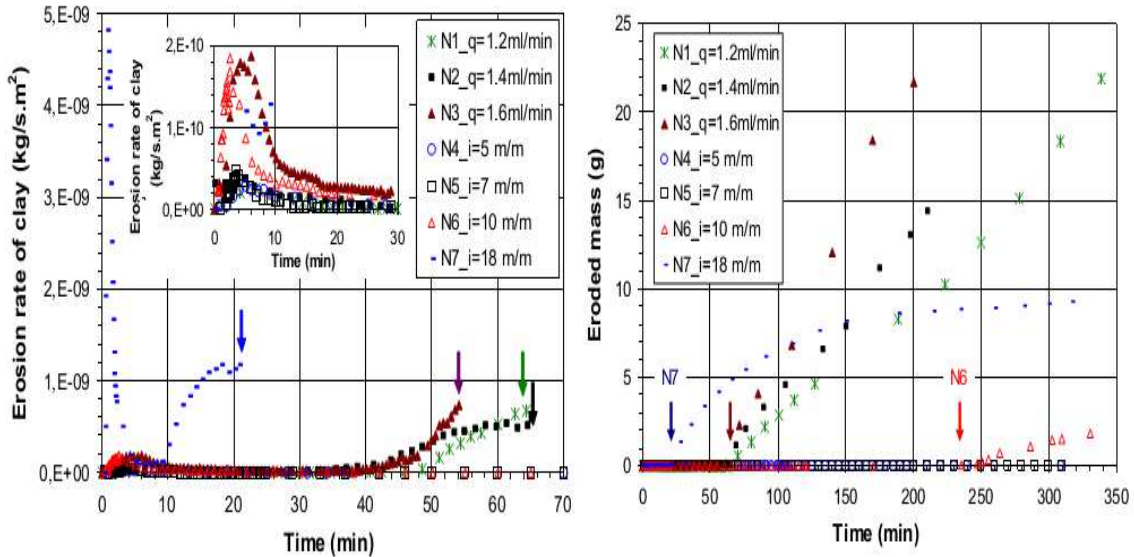


Figure I-21 Evolutions de la masse des particules érodées pour les différents essais (Nguyen et al.(2012))

En s'intéressant à l'évolution des caractéristiques des matériaux testés, et notamment leur conductivité hydraulique, les auteurs ont constaté que pour les essais à gradient contrôlé la conductivité hydraulique diminue avec l'érodabilité des matériaux testés, ceci peut-être due au phénomène de colmatage et de re-déposition (filtration) des particules érodées qui accompagne le phénomène d'érosion, alors que pour les essais à débit contrôlé la perméabilité diminue au début des essais puis augmente avec l'érosion des particules sableuses. La diminution de la perméabilité pour le cas essais à débit contrôlé est accompagnée par une augmentation de gradient hydraulique comme on le constate sur les courbes des gradients hydrauliques sur la *Figure I-22*, puis avec l'érosion des particules sableuses, le gradient hydraulique a tendance à diminuer plus ou moins rapidement en fonction de débit appliqué.

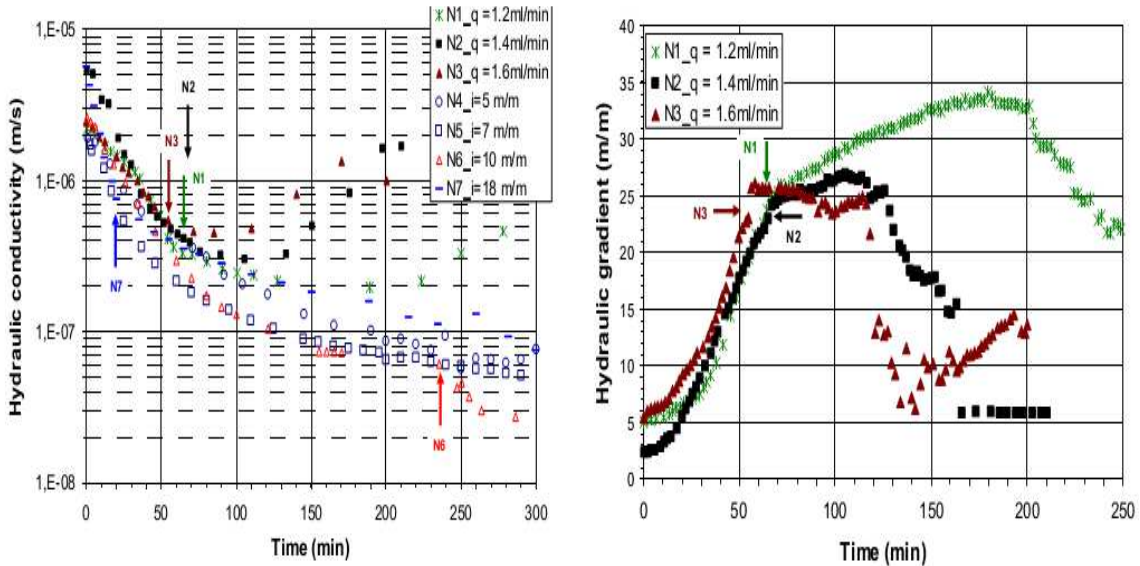


Figure I-22 Evolution de la conductivité hydraulique et des gradients hydrauliques (Nguyen et al. (2012))

Pour une interprétation poussée des résultats, les auteurs ont utilisé la méthode dite ‘énergétique’. Cette méthode a été développée par *Regazzoni (2009)* pour caractériser l’érosion dans le HET (Hole Erosion Test) et le JET (Jet Erosion Test), et utilisée par *Marot et al. (2012)* et *Nguyen et al. (2012)* pour caractériser la suffusion. Dans cette méthode les auteurs utilisent la puissance d’érosion pour caractériser la sollicitation hydraulique appliquée. Cette méthode se base sur l’évaluation de l’énergie dissipée par un fluide. Et dans sa formule simplifiée, pour un écoulement vertical, *Marot et al. (2011-b)*, a défini la puissance d’érosion comme une combinaison du gradient hydraulique et du débit d’écoulement correspondant. L’érodabilité des matériaux est caractérisée par le taux d’érosion surfacique, défini par la masse de sol érodé par unité de surface et par unité de temps.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{masse} (e_{int} + \frac{w^2}{2} \vec{g} \cdot \vec{z}) dM$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{Volume} (e_{int} + \frac{w^2}{2} \vec{g} \cdot \vec{z}) \rho dV + \iint_s (e_{int} + \frac{w^2}{2} \vec{g} \cdot \vec{z}) \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_{the}}{dt} + \frac{dW}{dt}$$

Où :

E est l’énergie totale

E_{int} est l’énergie interne

W est le travail des forces extérieures au volume

U est la vitesse du fluide de composante (u, v, w)

Z : coordonnées

E_{the} est l'énergie thermique échangée

S la surface de contact avec l'environnement extérieur

M, est la masse du fluide

V est le volume du fluide

ρ est la masse volume du fluide

g est la gravité

Avec les hypothèses suivantes :

- Le système est adiabatique et isotherme, et donc les variations des énergies interne et thermique sont négligeables
- Le régime d'écoulement est supposé permanent, et donc la variation de l'énergie cinétique est négligeable
- La dissipation de l'énergie par viscosité et turbulence au sein de fluide est négligeable par rapport à la dissipation par contact avec le sol qui génère l'érosion.

Pour le cas d'un écoulement vertical descendant, la puissance d'érosion est donnée par l'expression :

$$P = Q * \Delta P + Q * \rho_w g \Delta z \quad (1-1)$$

Plus de détails sur la méthode sont donnés dans *Marot et al. (2011-b)*.

En appliquant cette analyse à leurs résultats, *Nguyen et al. (2012)* ont obtenu les courbes présentées sur la *Figure I-23*. Les résultats montrent qu'au-delà d'une valeur de la puissance d'érosion, le taux d'érosion augmente d'une façon linéaire en fonction de la puissance d'érosion.

Cette approche présente un intérêt particulier, dans la mesure où elle caractérise les sollicitations hydrauliques par une combinaison de gradient hydraulique et de débit d'écoulement à travers les sols testés, les deux paramètres qui ont tous les deux une influence sur l'initiation et l'évolution de l'érosion par suffusion, elle prend également en considération la longueur de l'échantillon ce qui permettra d'éviter la notion de l'effet d'échelle liée aux dimensions des dispositifs d'essais.

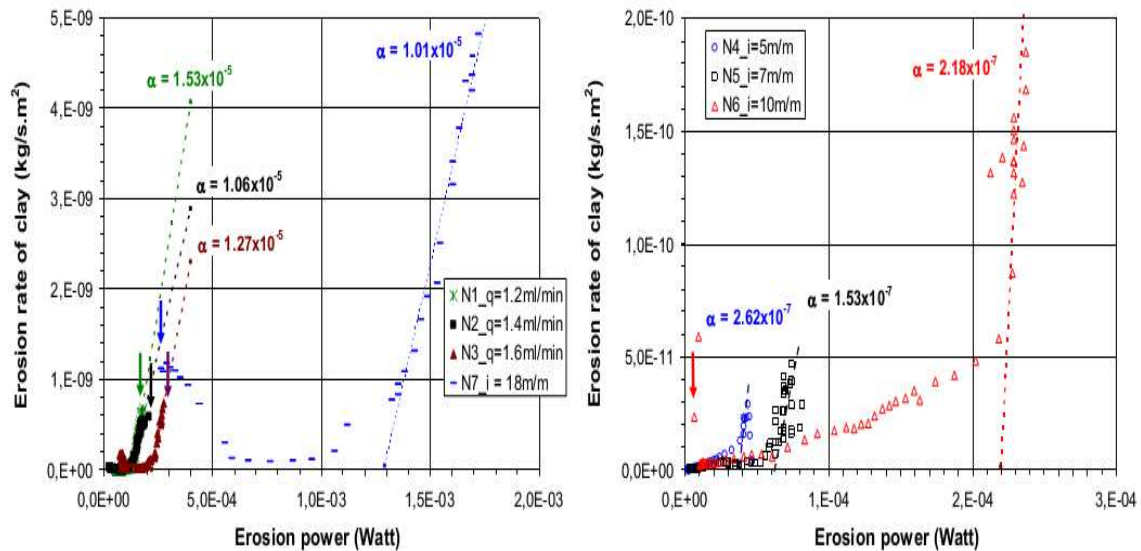


Figure I-23 Evolution de taux d'érosion en fonction de la puissance d'érosion (Nguyen et al. (2012))

Sail et al. (2011, 2012)

Dans le même laboratoire *Sail et al. (2011) et (2012)* ont testé deux types de matériau, des billes de verre de différente taille, et un sol naturel comprenant des particules dont la granulométrie va de 50 μm à 60 mm. Les matériaux sont testés cette fois-ci dans un dispositif plus grand, un perméamètre de 28 cm de diamètre et d'une hauteur qui peut atteindre 60 cm selon les essais. Le perméamètre est équipé d'un système de chargement axial, d'un système de contrôle du chargement hydraulique et d'un gamma-densimètre pour évaluer la densité spatiale des échantillons testés. Dans cette étude les matériaux sont soumis à des écoulements verticaux descendant sous des gradients constants et augmentés par paliers.

Les résultats sur les mélanges de billes de verres sont interprétés en termes de gradient hydraulique, de la vitesse d'écoulement de *Darcy*, de la contrainte de cisaillement et de la puissance d'érosion.

Les auteurs ont signalé que l'érodabilité des matériaux dépend de la longueur de l'échantillon et de l'historique de chargement. La puissance d'érosion est choisie, car elle correspond au meilleur indicateur du chargement hydraulique pour interpréter les résultats obtenus. L'évolution du taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion pour deux pourcentages de particules fines et deux contraintes axiales est présentée sur la *Figure I-24*. Le taux d'érosion augmente linéairement avec la puissance d'érosion. Le taux d'érosion dépend aussi de la teneur en particules fines, plus celle-ci est élevée et plus le taux d'érosion est faible. L'application de chargement mécanique axial a aussi une influence sur l'érodabilité

des matériaux, en effet, l'érosion des matériaux diminue avec l'augmentation de la contrainte axiale appliquée.

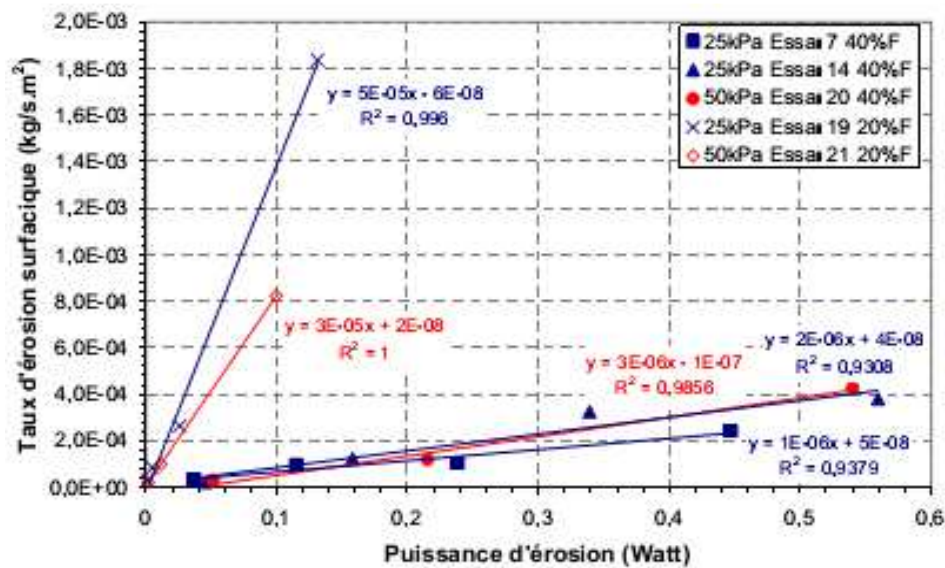


Figure I-24 Quelques résultats obtenus (Sail(2012))

I-3-2-4 Synthèse des critères hydrauliques

Terzaghi (1939) a été le premier à s'intéresser à l'érosion, mais uniquement pour étudier son influence sur les caractéristiques mécaniques des sols. Il a établi la première formule de gradient hydraulique de perte de portance des sols (boulance). Par la suite, certains des critères établis sont basés sur le gradient hydraulique critique d'initiation de l'érosion (Istomina (1957), Den Adel et al. (1988)...).

D'autres auteurs se sont intéressés à l'influence du débit d'écoulement sur l'érosion et les résultats ont montré que le taux d'érosion est proportionnel à ces débits (Nguyen (2012)).

Finalement, pour mieux décrire l'influence combinée de gradient hydraulique et de débit d'écoulement, Marot et al. (2011-b) ont proposé la méthode énergétique. La sollicitation hydraulique est caractérisée par la puissance d'érosion qui est le produit de gradient de pression et de débit d'écoulement, et la quantité de sol érodé est décrite par le taux d'érosion surfacique, qui correspond au rapport de la masse des particules érodées par unité de surface de la conduite et par unité de temps.

Les résultats obtenus dépendent des conditions des essais et des dispositifs expérimentaux utilisés. Les directions des écoulements utilisés dans les différentes études sont différentes et les critères obtenus dépendent, en partie, de cette condition d'essai. La méthode énergétique semble la mieux adaptée pour caractériser les conditions d'écoulement, elle prend en compte le gradient de pression, le débit d'écoulement et la longueur de l'échantillon.

I-3-2-5 Paramètres influençant la suffusion

La suffusion des sols peut être influencée par les paramètres liés au sol et par les paramètres liés à l'écoulement. *Sail (2012)* a présenté une synthèse de *Schuler (1995)* regroupant les paramètres pouvant influencer le processus de suffusion, la synthèse est présentée dans le *Tableau I-3*.

Principaux paramètres	Paramètres secondaires
Géométrie des grains	<ul style="list-style-type: none"> – La taille des grains et leurs distributions – La forme des grains
Géométrie des pores	<ul style="list-style-type: none"> – La taille des pores et leurs distributions – La forme des pores
Propriétés mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> – Etat de compaction – L'angle de frottement φ – La cohésion C – La rugosité de la forme des grains
Conditions hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> – Le gradient hydraulique – La vitesse d'écoulement – L'angle entre la direction de l'écoulement et la gravité – Les propriétés physiques du fluide

Tableau I-3 Paramètres influençant la susceptibilité à la suffusion (Schuler (1995)) selon Sail (2012)

Dans les deux parties précédentes (critères granulométriques et critères hydrauliques), nous avons présenté l'effet de la granulométrie et des sollicitations hydraulique sur l'érodabilité des matériaux testés. Dans cette partie on va surtout s'intéresser aux effets de la nature et de la teneur en fines sur l'initiation et l'évolution de la suffusion.

Bendahmane et al. (2006 et 2008)

Bendahmane et al. (2006 et 2008) ont réalisé des essais d'érosion sur des matériaux reconstitués à partir de mélange de sable de Loire et de kaolinite (*Figure I-25 (a)*) pour étudier l'influence de gradient hydraulique appliqué, la teneur en particules fines et de la contrainte de consolidation sur leur érodabilité.

Les auteurs ont utilisé une cellule triaxiale modifiée à parois souples équipée d'un capteur optique à l'aval pour quantifier les particules de kaolinite érodées (*Figure I-25(b)*). Les écoulements appliqués sont des écoulements descendants avec des charges hydrauliques maintenues constantes sur la durée des essais. La masse volumique sèche initiale de mise en place est $1,7 \text{ Mg/m}^3$.

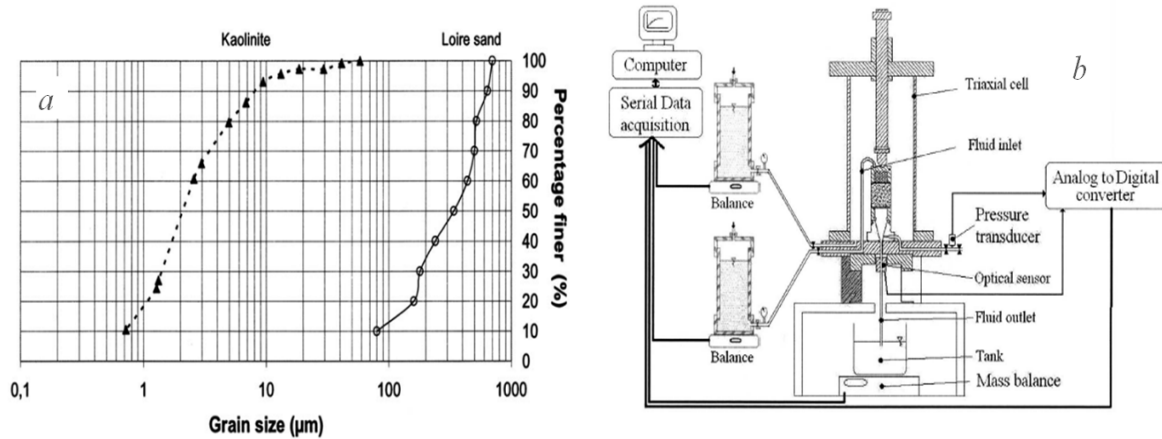


Figure I-25 Matériaux et dispositif expérimental utilisés : (a) Matériaux utilisés; (b) Dispositif expérimental (Bendahmane et al.(2008))

Les auteurs ont mis l'influence significative du gradient hydraulique appliqué et de la quantité de particules fines (kaolinite) sur l'érodabilité de ces dernières. En effet, sur la *Figure I-26 (a)*, on constate qu'en augmentant le gradient hydraulique appliqué, le taux d'érosion, définie par la masse des particules fines érodées par unité de surface et par unité de temps, augmente également de façon linéaire, et ce pour la même contrainte de consolidation de 100 kPa. Et inversement, en augmentant la quantité des particules fines (10% et 20% de kaolinite dans ce cas), la quantité de particules fines érodées diminue significativement pour la même contrainte de consolidation de 100 kPa et pour le même gradient hydraulique.

Pour l'influence de la contrainte de consolidation, les auteurs ont mis en évidence une influence qui dépend des valeurs des gradients hydrauliques appliqués sur l'érosion d'un matériau contenant 10 % de kaolinite. En effet, pour les faibles gradients hydrauliques (inférieurs à 60 dans ce cas), l'augmentation de la contrainte de consolidation fait diminuer l'érodabilité des matériaux testé (*Figure I-26 (b)*), et inversement, pour les gradients hydrauliques plus élevés (supérieurs à 90 dans ce cas) l'augmentation de la contrainte de consolidation fait augmenter la quantité des particules de kaolinite et de sable érodées (*Figure I-26 (c)*).

Ces résultats montrent l'existence d'un deuxième gradient hydraulique critique au-delà duquel les particules sableuses sont aussi érodées par érosion régressive. Ce gradient dépend notamment de la contrainte de confinement, et de la teneur en kaolinite. Sur des essais d'érosion sur des échantillons sableux *Papamichos et al.(2001)*(selon *Bendahmane et al.*

(2008)) ont indiqué que le gradient hydraulique critique de l'érosion régressive augmente en fonction de la pression de confinement.

Wan et Fell (2008) indiquent que des valeurs de gradient hydraulique supérieures à 8 sont déjà très élevées par rapport à celle qu'on peut retrouver dans la structure des ouvrages hydrauliques réels.

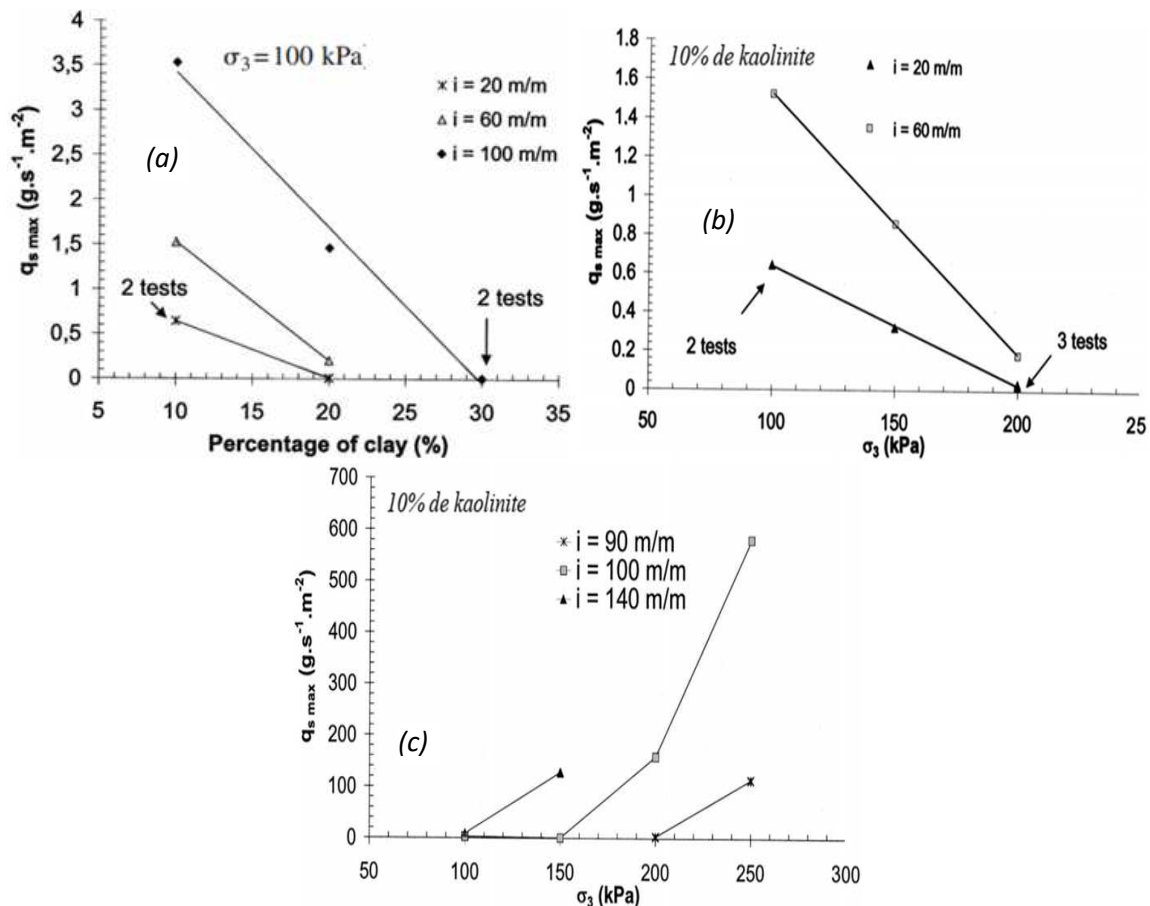


Figure I-26 Synthèse des résultats: (a) Influence de gradient hydraulique et de la teneur en fines; (b) Influence de la contrainte de consolidation pour les faibles gradients; (c) Influence de la contrainte de consolidation pour les forts gradients sur l'érosion de la kaolinite et de sable. (Bendahmane et al. (2008))

Benamar et al. (2012)

Dans le cadre du projet national ERINOH, Benamar et al. (2012) ont réalisé des essais d'érosion sur des mélanges de sable d'Hostun (HN34) et des particules fines de différente nature (kaolinite, illite et limon) pour étudier l'influence de la nature et de la concentration de ces particules fines sur l'érodabilité des matériaux testés. Les matériaux sont testés dans un dispositif de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur équipé d'un turbidimètre pour mesurer la

concentration des particules fines érodées. Les écoulements appliqués sont des écoulements verticaux ascendants sous des charges hydrauliques constantes et augmentées graduellement, les charges appliquées sont de 0,7 m; 1,2 m; 1,6 m et 3,5 m, ce qui correspond à des gradients hydrauliques de 14, 24, 32 et 70 respectivement.

Les résultats obtenus sont synthétisés dans la *Figure I-27*. Les auteurs montrent que la nature des fines a une influence significative sur leur érodabilité. Les résultats présentés sur la *Figure I-27a* et *b* montrent que pour la même concentration des particules fines, 10 % dans ce cas, l'illite s'érode beaucoup moins que la kaolinite, qui est à son tour plus résistante à l'érosion que le limon, et ce en termes de concentration d'effluent ou de la masse cumulée des fines érodées. Les auteurs ont expliqué cette différence d'érodabilité par la différence de dispersivité de ces différents matériaux. En termes de teneur en particules fines, les auteurs ont montré qu'en augmentant la teneur en illite de 10 % à 20 %, la concentration de l'effluent diminue et par conséquent la masse cumulée aussi, voir la *Figure I-27c*. Pour la kaolinite, les auteurs ont trouvé un résultat différent, en augmentant la teneur en kaolinite de 10% à 20 % la concentration de l'effluent augmente aussi et par conséquent la masse cumulée aussi comme on peut le voir sur la *Figure I-27d*.

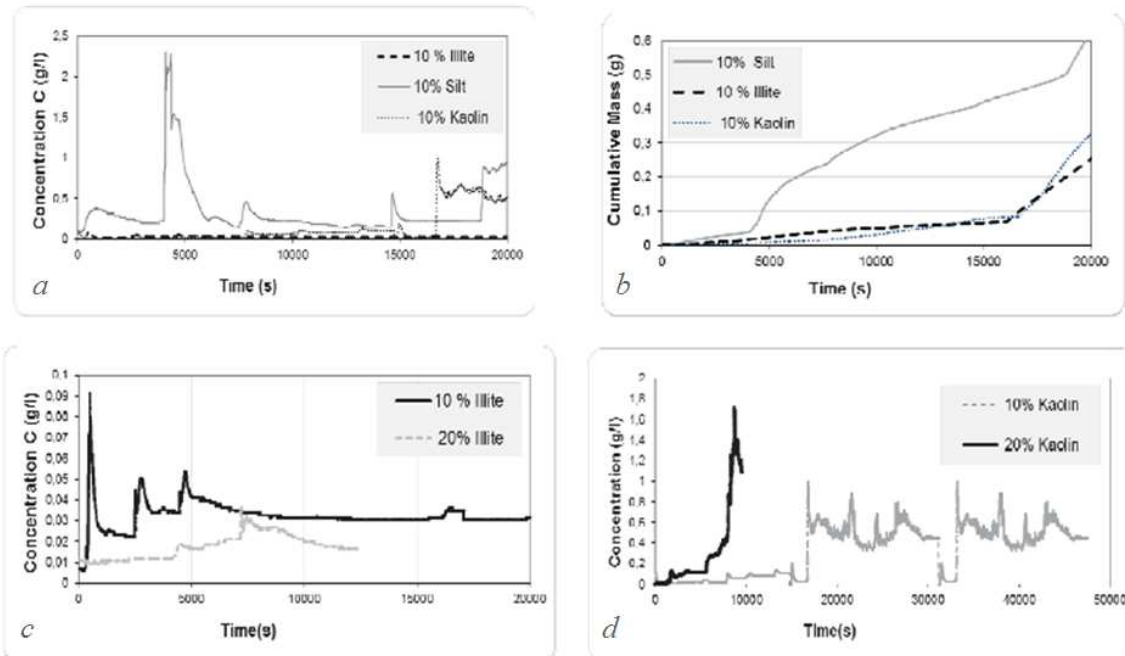


Figure I-27 Synthèse des résultats obtenus : (a) Concentration de l'effluent en fonction de la nature de fines; (b) masse cumulée en fonction de la nature de fines; (c) Influence de la quantité de l'illite; (d) Influence de la quantité de la kaolinite. (Benamar et al. (2012))

I-4 Conclusion et objectifs de la thèse

Dans ce premier chapitre, on a mis en lumière tout d'abord l'importance du parc des ouvrages hydrauliques français. Celui-ci est certes important, mais aussi assez ancien ce qui cause fréquemment des dégradations dans les structures de ces ouvrages. Ces dégradations si elles ne sont pas détectées à temps, peuvent induire à l'apparition des brèches qui peuvent causer la rupture de ces ouvrages par érosion. En effet, malgré l'importance des études réalisées sur le phénomène d'érosion (depuis le début du 20^e siècle), on continue toujours à enregistrer des ruptures dans ce type d'ouvrages.

Les études sur le phénomène d'érosion par suffusion, qui est le sujet de cette étude, ont permis d'élaborer des critères granulométriques basés sur les courbes granulométriques, et des critères hydrauliques basés sur les sollicitations hydrauliques appliquées. D'autres études ont permis d'évaluer l'influence de certains paramètres (tels que la teneur en particules argileuses ou les contraintes de confinement) sur l'initiation et l'évolution de la suffusion. Il faut dire que qualitativement la suffusion dépend aussi bien des caractéristiques des sols (granulométrie, densité de mise en place, porosité...) que celles des sollicitations hydrauliques appliquées (gradient hydraulique, débit d'écoulement...), et que ces paramètres ne sont pas toujours pris en compte simultanément. La plupart des références listées dans ce chapitre seront directement utilisées pour l'interprétation de nos essais, une bibliographie plus détaillée est donnée dans *Bonelli (2012)* et *Sail (2012)*. On a constaté que peu d'études sont réalisées avec des dispositifs de grades tailles permettant de tester des sols plus gros.

Pour mieux comprendre ce phénomène et pour limiter les ruptures, plusieurs projets ont été lancés en France, on peut citer le projet ERINOH, DOFEAS...

Cette étude s'inscrit dans la suite des études présentées, et a pour objectif de mieux comprendre le phénomène d'érosion par suffusion. Un programme expérimental est élaboré pour étudier l'influence de certains paramètres tels que la granulométrie, les sollicitations hydrauliques ainsi que la teneur en particules argileuses. La finalité sera d'établir des recommandations à prendre en compte dans la conception des futurs projets, ou à mettre en place pour les opérations de maintenance et de réparation.

L'approche retenue est une approche de type modélisation physique à partir d'une conduite (colonne) d'écoulement de 18 cm de diamètre et d'une longueur modulable bien instrumentée. Dans le chapitre deux (2) on va présenter le dispositif expérimental, les matériaux utilisés dans cette étude ainsi que le protocole élaboré pour la reconstitution de ces matériaux et pour le déroulement des essais.

Chapitre II Dispositif expérimental, matériaux utilisés et protocole d'essai

II-1 Approche retenue

L'approche retenue pour cette étude est une approche de type modélisation physique. Un dispositif déjà disponible a été adapté pour étudier le phénomène d'érosion interne dans les sols grossiers. C'est une conduite d'écoulement de 18 cm de diamètre intérieur, et d'une longueur modulable de 50 cm à 3 m avec des modules de 50 cm de longueur chacun. Dans cette étude, on a travaillé sur des longueurs de conduite de 1m et de 50 cm. Cette configuration peut représenter une partie d'ouvrage où, localement, un écoulement d'eau peut déclencher des phénomènes d'érosion. Le principe des essais consiste à remplir la conduite d'un matériau dont on maîtrise les caractéristiques initiales, de le saturer puis de générer un écoulement d'eau et de faire un suivi métrologique : pressions d'eau le long de cette conduite, débit d'eau traversant ainsi que la quantité de particules érodées.

Dans ce qui suit, nous présentons le dispositif expérimental utilisé dans le cadre de cette étude, les matériaux testés ainsi que la procédure de leur reconstitution et enfin le protocole d'essai.

II-2 Dispositif expérimental

Dans la bibliographie portant sur l'érosion interne en général, et sur l'étude du phénomène d'érosion par suffusion en particulier, plusieurs dispositifs d'essais ont été présentés. Ces derniers diffèrent par leurs dimensions et aussi dans leur conception. On peut les classer en deux catégories :

- **Dispositif à parois rigides** : c'est le type de dispositif utilisé par la plupart des auteurs pour étudier le phénomène d'érosion interne des sols (*Lafleur et al(1989), Reddi et Bonala (1997), Ahlinhan(2010) et (2012), Skempton et Brogan(1994), Benamar et al. (2012) ...*). Ces auteurs ont utilisé des perméamètres à parois rigides pour leur simplicité et leur facilité de mise en œuvre, ainsi que leur faible coût par rapport aux essais sur des ouvrages en vraie grandeur. L'inconvénient de ce type de configuration est la probable apparition d'écoulements parasites sur les parois rigides de la conduite (là où la perméabilité est relativement plus élevée), et ce phénomène peut s'accroître avec l'utilisation de matériaux plus grossiers.
- **Dispositif à parois souples** : dans ce type de dispositifs, une membrane en caoutchouc est insérée sur les parois intérieures du perméamètre pour éviter l'apparition des écoulements

parasites sur les parois de la conduite (*Kenney et Lau (1985,1986), Bendahmane (2006...)*). La membrane doit être suffisamment souple pour épouser la paroi de la conduite et les grains de sols, mais aussi suffisamment résistante pour qu'elle ne soit pas percée par ces grains, notamment lors de la phase de mise en place des sols par compactage.

Pour notre projet, on a opté pour un dispositif constitué de modules en plexiglas à parois rigides, et ce notamment pour la possibilité qu'il offre de placer des capteurs de pression le long de la conduite, ce qui est difficilement réalisable dans les dispositifs à parois souples.

Dans ce qui suit, le dispositif expérimental utilisé dans le cadre de cette étude va être présenté. Pour la réalisation des essais, on a utilisé deux configurations du dispositif expérimental, une configuration initiale « horizontale », mais à la suite de problèmes de mise en œuvre et de réalisation d'essais, on a décidé de changer la disposition de la conduite, pour passer à la configuration finale « verticale ».

II-2-1 Configuration horizontale

Le recours à l'utilisation des dispositifs dans une configuration dite « horizontale » pour étudier les phénomènes d'érosion interne des sols paraît la configuration la plus adaptée et la plus représentative. En effet, c'est ce qui représente bien le chemin d'écoulement d'eau à travers la structure des ouvrages, qui sont plutôt subhorizontaux, voir horizontaux dans certains cas.

Néanmoins, dans la littérature, peu d'essais sont réalisés avec la configuration horizontale (*Ahlinhan 2010, DenAdel 1988*). La *Figure II-1* présente deux dispositifs d'essais typiques. Cette configuration nécessite des précautions lors la mise en place du sol dans la conduite, et aussi lors de la phase de saturation. Le principe des essais consiste à générer un écoulement horizontal d'eau à charge hydraulique constante à l'amont, et de mesurer la masse de sol érodé à travers la grille placée à l'aval. Le dispositif développé par *Ahlinhan (2010)* permet aussi de suivre l'évolution des pressions d'eau le long de l'échantillon à l'aide de piézomètres placés à différents points le long de la conduite.

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est une conduite d'écoulement en plexiglas, conçue initialement pour étudier le blocage d'un écoulement permanent d'eau par injection d'un coulis de colmatage (*Truong(2012)*).

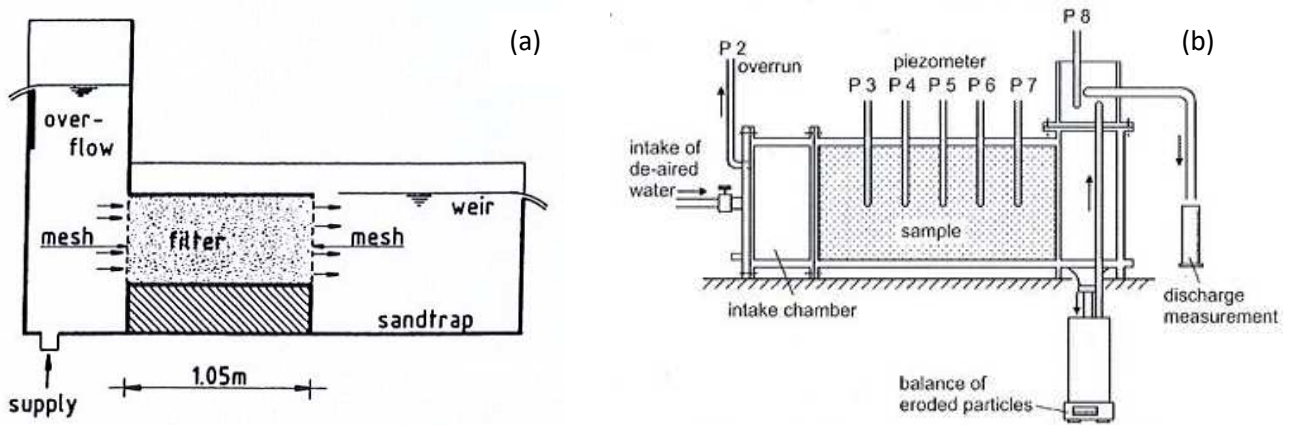


Figure II-1 Dispositifs expérimentaux horizontaux utilisés dans les travaux antérieurs :
(a) DenAdel 1988 ; (b) Ahlinhan 2010

Le schéma de principe est illustré dans la *Figure II-2* et le dispositif dans sa configuration d'essai est montré sur la *Figure II-3*. Dans cette étude, les auteurs se sont notamment intéressés à une solution à apporter pour stopper les écoulements parasites traversant les structures des ouvrages hydrauliques et ainsi réduire l'impact de l'érosion interne dans ces ouvrages. C'est ce dispositif qu'on a ensuite modifié et adapté pour étudier le phénomène d'érosion interne.

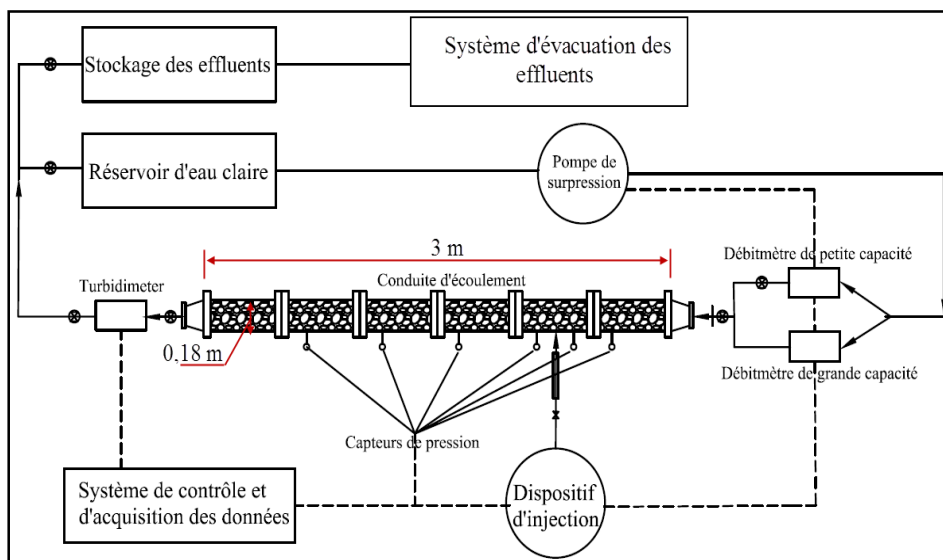


Figure II-2 Schéma de dispositif d'injection (Truong 2012)



Figure II-3 Vue d'ensemble du dispositif initial d'essai (Truong 2012)

Le dispositif est une conduite d'écoulement construite d'un assemblage de modules cylindriques en plexiglas (Figure II-4 a et b). Le diamètre intérieur est choisi en fonction de la taille maximale des particules des sols à tester. Pour les études hydrauliques (notamment les études d'érosion) une valeur minimale du rapport de diamètre de la conduite sur le diamètre maximal des particules à tester de 8 à 15 (généralement 10) est exigée pour avoir une meilleure représentativité des échantillons (Truong(2012)...). Le matériau le plus grossier à tester étant un gravier 10/20, dont le diamètre maximal (D_{max}) est de 20 mm, par conséquent un diamètre de 180 mm pour la conduite a été retenu, ce qui correspond à un rapport de 9 entre le diamètre de la conduite et le diamètre maximal des particules.

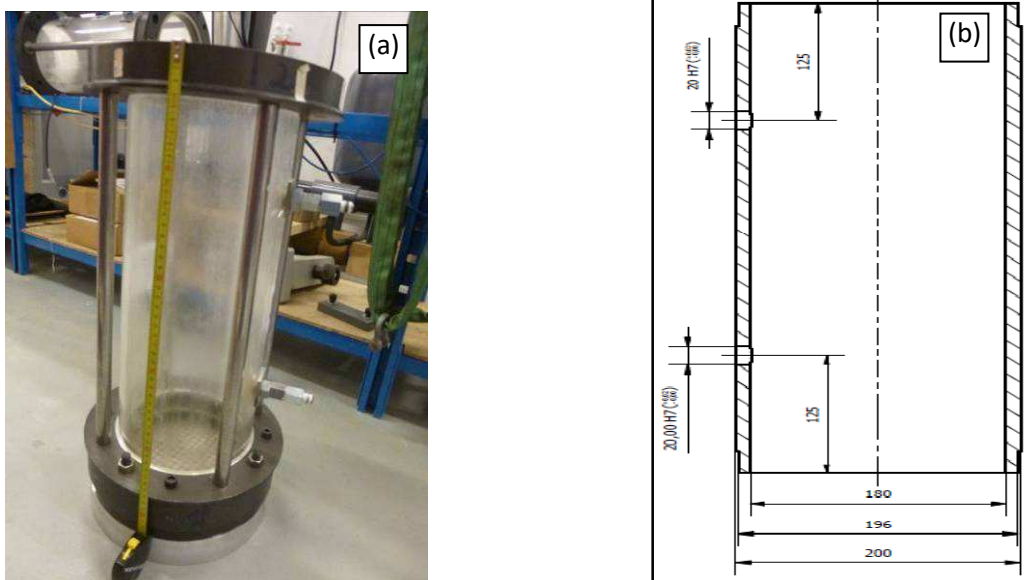


Figure II-4 Module de la conduite : (a) Vue du module ; (b) Schéma en coupe longitudinale

La longueur de chaque module est de 50 cm, cette longueur est choisie pour avoir un dispositif modulable (6 modules disponibles), mais aussi pour une manutention plus aisée, tout en ayant un dispositif long par rapport à son diamètre pour rester dans la configuration d'un écoulement unidirectionnel.

La première campagne d'essais a été réalisée sur une conduite constituée de l'assemblage de 2 modules, soit une longueur totale de 1m. La *Figure II-5* présente un schéma de principe du dispositif adapté à notre étude dans sa configuration horizontale.

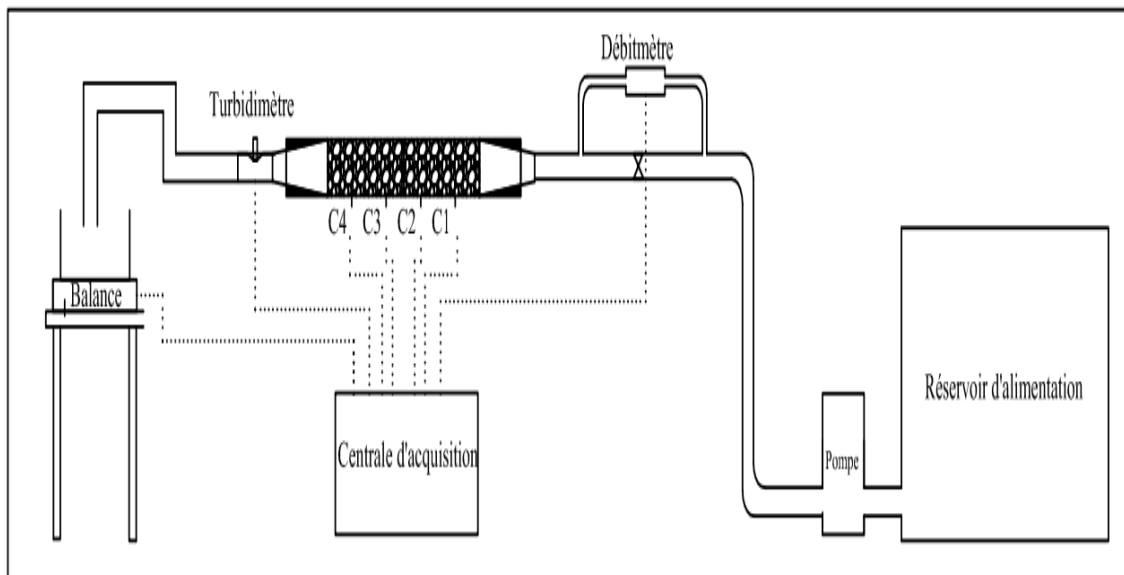


Figure II-5 Schéma de principe du dispositif dans sa configuration horizontale

Chaque module est doté d'un ensemble d'équipements pour répondre à certaines exigences pratiques (*Figure II-6*). On trouve 2 brides métalliques aux extrémités amont et aval de chaque module. Ces brides vont servir comme support pour les vis d'assemblage avec le reste du dispositif, mais vont également permettre de rigidifier les extrémités du module qui sont soumises à la pression d'eau, notamment sur l'extrémité amont. Sur chaque bride, on trouve un joint torique pour assurer l'étanchéité du circuit hydraulique et des tiges qui relient les brides amont et aval pour solidariser l'ensemble des parties du module.

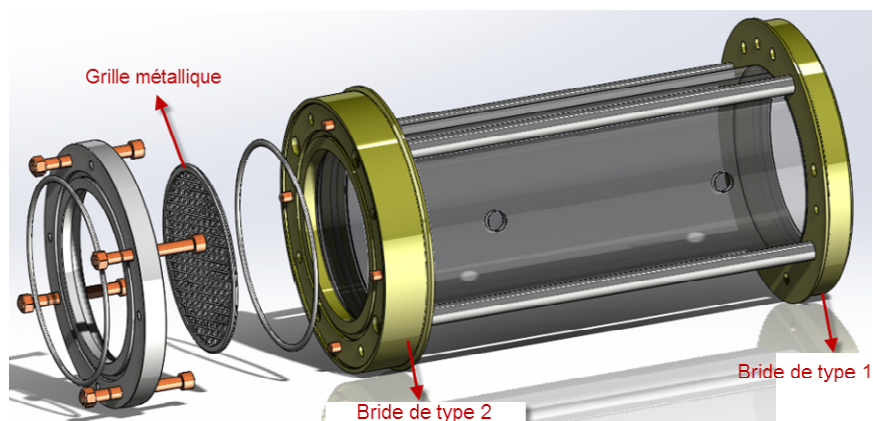


Figure II-6 Vue 3D du module avec les équipements (Truong 2012)

Sur chaque extrémité de la conduite, on installe une grille dont l'ouverture des mailles dépend de sol à tester, deux grilles d'ouvertures de mailles de 10 mm et 2 mm ont été utilisées en fonction des matériaux testés (gros ou plus fins). La grille du côté amont joue le rôle de diffuseur d'eau arrivant dans la conduite, et la grille sur le côté aval sert de support au sol dans la conduite.

Comme on l'a indiqué, cette configuration horizontale, bien qu'elle représente mieux les conditions in-situ, pose des problèmes pratiques, entre autres, la difficulté de saturer les échantillons sans avoir des effondrements dans la partie supérieure (*Figure II-7-a*), et un dépôt de fine dans la conduite en aval, ce qui fausse l'interprétation des essais par rapport à la masse des fines érodées (*Figure II-7-b*).



Figure II-7 Quelques problèmes rencontrés dans la configuration horizontale : (a) Effondrement du sol lors de la saturation ; (b) Dépôt dans le cône aval

Ces problèmes seront détaillés dans la partie descriptive des essais (chapitre 3).

II-2-2 Configuration verticale

Le recours à la configuration verticale, pour la réalisation de la deuxième campagne d'essais, a pour objectif de surmonter les problèmes rencontrés avec la configuration horizontale.

Dans la littérature, la plupart des dispositifs utilisés sont de type « perméamètre » dans une configuration verticale. De nombreux dispositifs avec des dimensions (diamètre, longueur) variables ont été développés. En effet, comme déjà mentionnées, les dimensions des dispositifs sont fonction du diamètre maximal des particules des sols à tester. De ce fait, les auteurs travaillant sur les matériaux graveleux utilisent des dispositifs de grandes dimensions (*Figure II-8 a, b, c, d*).

On peut citer, entre autres :

- *Kenney et Lau (1985, 1986)* qui ont utilisé deux dispositifs de dimensions 245 mm Φ * 450 mm et 580 mm Φ * 860 mm pour des matériaux dont le diamètre maximum est $D_{\max} = 100$ mm,

- *Skempton et Brogan (1994)* qui ont développé un dispositif de dimensions 139 mm Φ^* 155 mm, pour étudier l'érosion des sols dont le diamètre maximum est de 20 mm.
- *Wan et Fell (2008)* qui, de leur côté, ont travaillé sur un dispositif de dimensions 300 mm Φ^* 300 mm pour des sols qui sont des mélanges de sols fins (argile) jusqu'au gravier dont le diamètre maximum est de 75 mm.

Pour les auteurs qui travaillent sur des sols plutôt sableux, les dimensions de dispositif d'essai sont plus petites :

- *Bendahmane et al. (2008)* qui ont conçu un perméamètre dont le diamètre est de 50 mm et la hauteur est de 50 mm pour étudier des sols mélanges de kaolinite et de sable de Loire dont le diamètre maximal est de 700 μm .
- *Benamar et al. (2012)* qui ont développé un autre perméamètre de dimensions 40 mm Φ^* 120 mm, pour étudier des mélanges de sols fins (illite, kaolinite ou limon) avec le sable d'Hostun HN34 dont le diamètre maximum est de 400 μm .
- *Sail(2012)* a utilisé un dispositif plus important, il s'agit d'un perméamètre de 280 mm de diamètre et d'une hauteur qui peut atteindre les 600 mm. Sur ce dispositif sont testés aussi bien des mélanges de billes de verre que des sols reconstitués ayant des granulométries qui vont du sol fin au gravier.

Le recours à l'utilisation de dispositifs de type « perméamètre » peut se justifier par la plus grande facilité pratique de réalisation des essais. En effet, la saturation peut se faire par un écoulement ascendant sous de faibles débits d'écoulement, ou de faibles gradients écoulement pour éviter d'initier l'érosion. De même pour la récupération des particules de sols érodées, notamment pour les essais avec un écoulement descendant. Dans ce cas, il suffit d'installer un dispositif pour récolter les particules de sols érodées. (*Bendahmane (2006), Sail (2012)*).

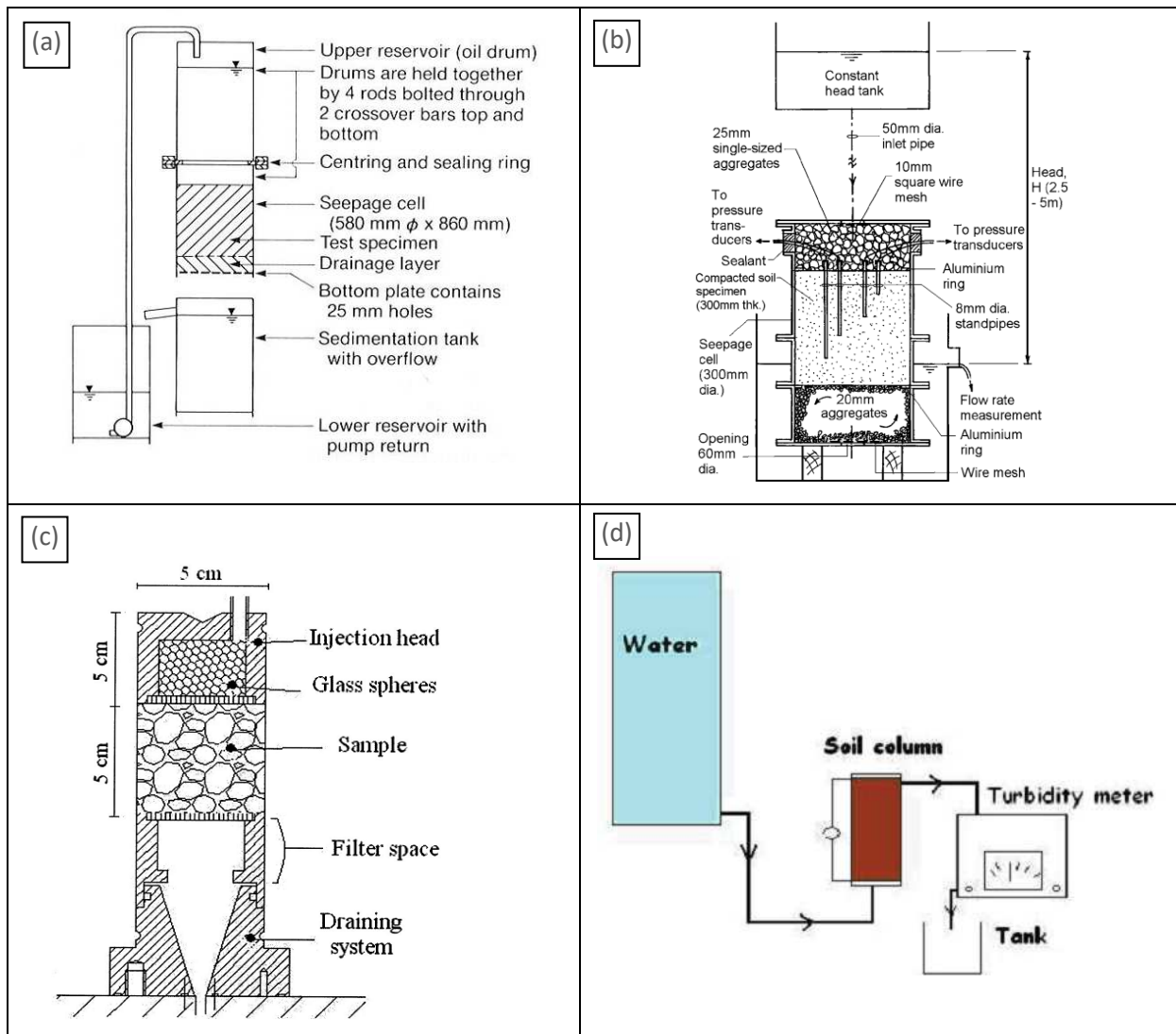


Figure II-8 Quelques dispositifs d'érosion dans la configuration verticale : (a) Kenney et Lau 1985 ; (b) Wan et Fell 2008 ; (c) Bendahmane 2008 ; (d) Benamar 2012

Pour les premiers essais réalisés avec cette configuration, on a utilisé, comme pour le cas de la configuration horizontale, une conduite constituée de deux modules, donc d'une longueur totale de 1 m. Le schéma de principe est montré sur la *Figure II-9*, et le dispositif dans sa configuration finale est montré sur la *Figure II-10a*. Pour le programme d'essais de l'étude paramétrique, on a utilisé un seul module, correspondant avec une longueur utile de 53 cm (brides incluses) afin d'augmenter les valeurs du gradient hydraulique appliqué sur le sol, et de faciliter aussi la manipulation de l'ensemble du dispositif (*Figure II-10b*).

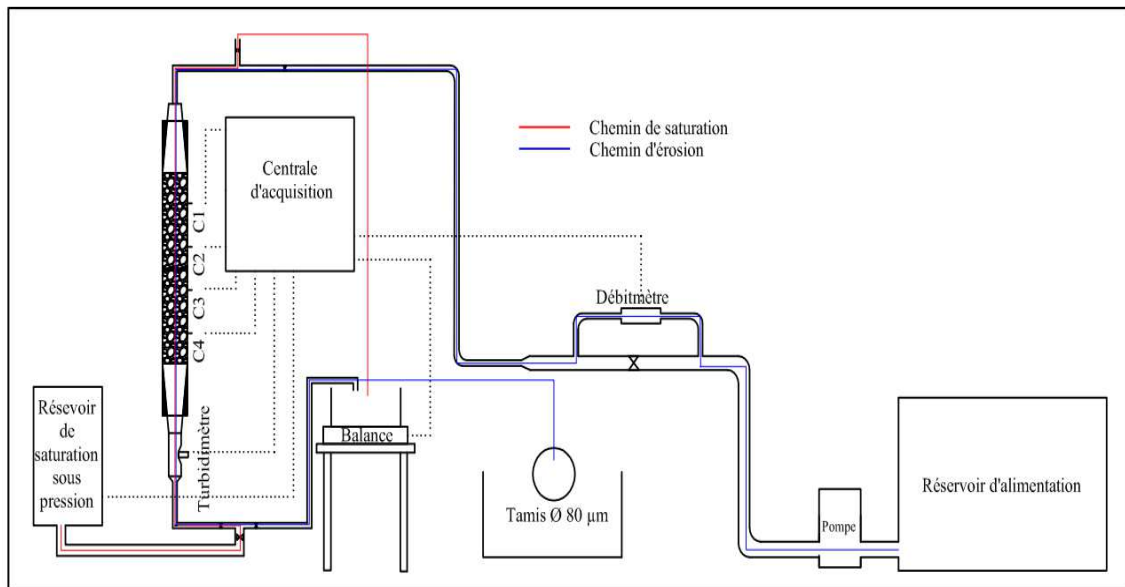


Figure II-9 Schéma de principe de la configuration verticale

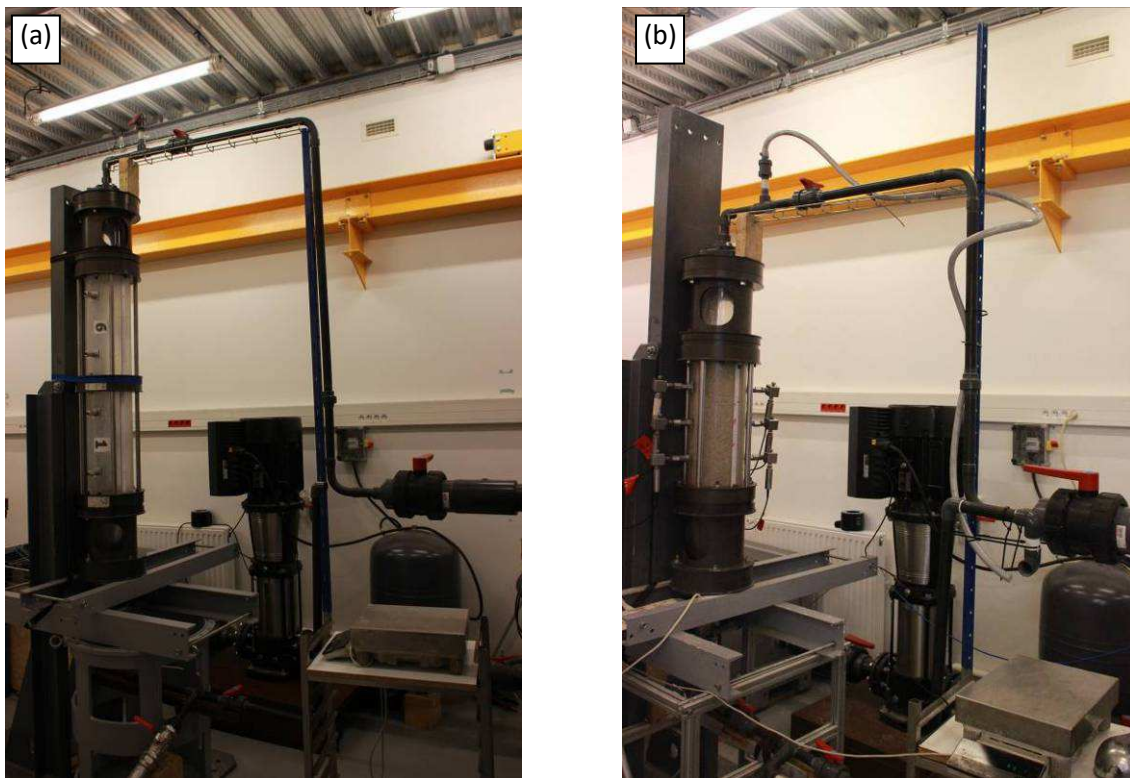


Figure II-10 Dispositif expérimental dans la configuration verticale : (a) Configuration à deux modules ; (b) Configuration à un module

Les mêmes modules sont utilisés dans les deux configurations (horizontale et verticale). Les modifications sont portées plutôt sur la position de la conduite, et sur le circuit de raccordement, permettant notamment pour assurer la saturation du sol dans la conduite.

II-2-3 Equipements annexes

○ **Modules coniques amont et aval :** La conduite est équipée à ses extrémités amont et avant de deux modules coniques en plexiglas *Figure II-11a et b*. Les dimensions de ces modules sont identiques, mais leur rôle est différent en fonction de leur position. Du côté conduite, le diamètre intérieur est le même que celui de la conduite, à savoir 180 mm, et le diamètre est de 80 mm à l'autre extrémité. Cette forme conique permet un raccordement progressif entre la conduite d'écoulement et le restant du circuit hydraulique (diamètre 80 mm).

Le cône de côté amont a pour rôle une répartition homogène de l'écoulement d'eau arrivant du circuit hydraulique (diamètre intérieur 80 mm) vers la conduite ayant un diamètre de 180 mm. Grâce à cette variation progressive du diamètre, la sollicitation hydraulique est appliquée sur toute la surface du sol. Le cône du côté aval, permet aussi ce passage progressif du diamètre de 180 mm au diamètre de 80 mm. Dans ce cas, la forme conique permet le passage de toutes les fines érodées sans qu'elles soient bloquées dans la conduite.

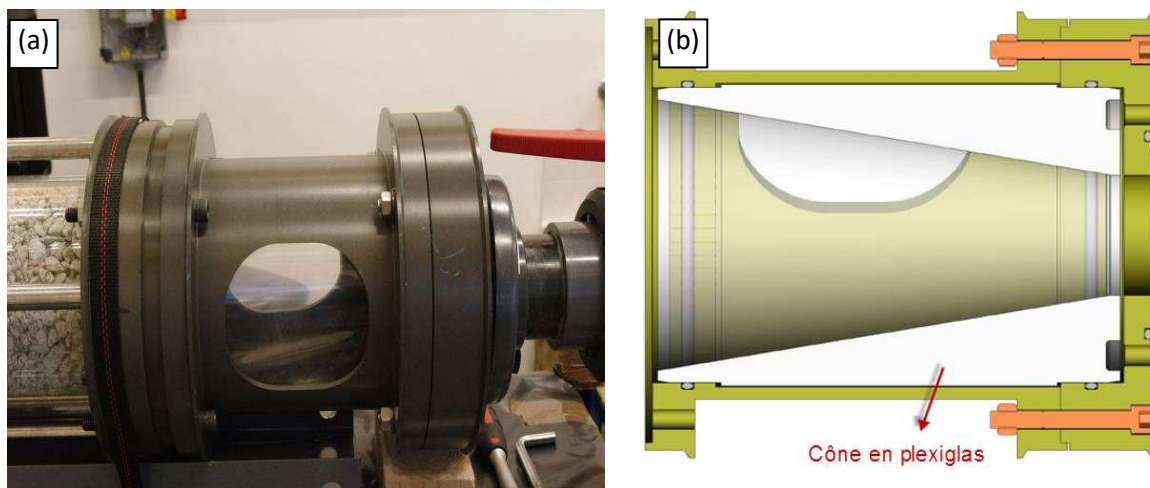


Figure II-11 Le module conique : (a) Vue du module ; (b) Schéma en coupe

○ **Circuit hydraulique :**

▪ Dans la configuration horizontale, sur le côté amont le raccordement de la conduite d'écoulement au reste du circuit se fait avec des tubes en PVC de 80 mm de diamètre. Ces tubes peuvent supporter une pression d'eau de 16 bars. Sur le côté aval, le raccordement se fait avec les tubes en plexiglas de diamètre intérieur de 80 mm, qui peuvent résister à une pression d'eau de 4 bars. Le choix de tube en plexiglas, à la sortie, nous permet de voir éventuellement s'il y a des fines qui se déposent dans la conduite au cours de l'essai.

- Dans la configuration verticale, le raccordement se fait par des tubes en PVC de diamètre intérieur de 32 mm du côté amont et aval afin de faciliter la manipulation du dispositif et sa stabilité.
- **Pompe de surpression** : Les essais réalisés dans le cadre de cette étude sont des essais à pression d'eau imposée par une pompe du côté amont de la conduite (*Figure II-12a et b*). L'application de cette pression d'eau est assurée par un surpresseur de type Grundfos GRE 45-4. La pompe permet d'appliquer et de maintenir une pression constante à l'amont du sol de la conduite qui peut aller de 0 à 1600 kPa. L'application de cette pression se fait par des paliers de 10 kPa.

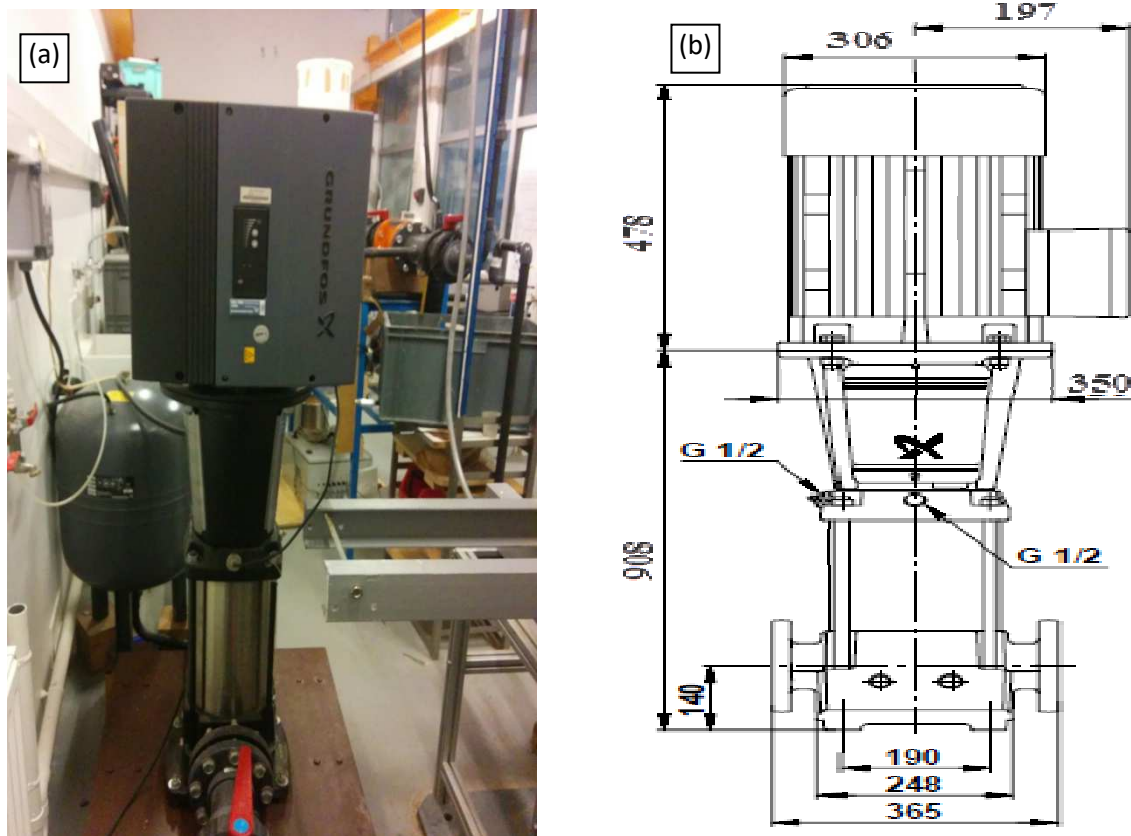


Figure II-12 La pompe de surpression : (a) Vue de la pompe ; (b) Vue schématique

- **Réservoir d'alimentation** : Pour assurer une alimentation d'eau continue de la pompe, celle-ci est raccordée à un réservoir d'alimentation d'un volume d'environ 450 litres (*Figure II-13*). L'alimentation de ce réservoir est assurée par un robinet d'eau qu'on ouvre pour avoir un débit correspondant au débit d'eau traversant le sol dans la conduite. En fonction de débit

d'eau généré par l'écoulement, on est amené à alimenter le réservoir par d'autres robinets afin de s'assurer de l'alimentation en continu de la pompe.



Figure II-13 Réservoir d'alimentation de la pompe

○ **Réservoir de saturation :**

- Dans la configuration horizontale, la saturation se fait directement avec la pompe de surpression dans le même sens que les essais d'érosion.
- Dans la configuration verticale, la saturation se fait du bas vers le haut, contrairement aux essais d'érosion où les écoulements sont descendants (Figure II-14). On utilise pour cela un réservoir d'eau d'un volume de 80 l, dans lequel on applique une pression d'air avec un détendeur. On a également ajouté un circuit pour injecter de CO_2 avant le début de la phase de la saturation, et ce notamment pour améliorer la saturation des sols dans la conduite.



Figure II-14 Réservoir de saturation dans la configuration verticale

○ **Dispositif de collecte des fines érodées** : Pour collecter les particules de sable érodées au cours des essais, nous avons mis en place un dispositif adapté. A la sortie de la conduite du côté aval, on a placé un tamis dont l'ouverture de maille est de $100\mu\text{m}$, qui correspond à la plus petite taille des particules sableuses constituant les matériaux testés. La photo du dispositif est donnée sur la *Figure II-15*. L'eau d'écoulement s'écoule dans un grand réservoir et elle est ensuite évacuée à l'aide d'une pompe.

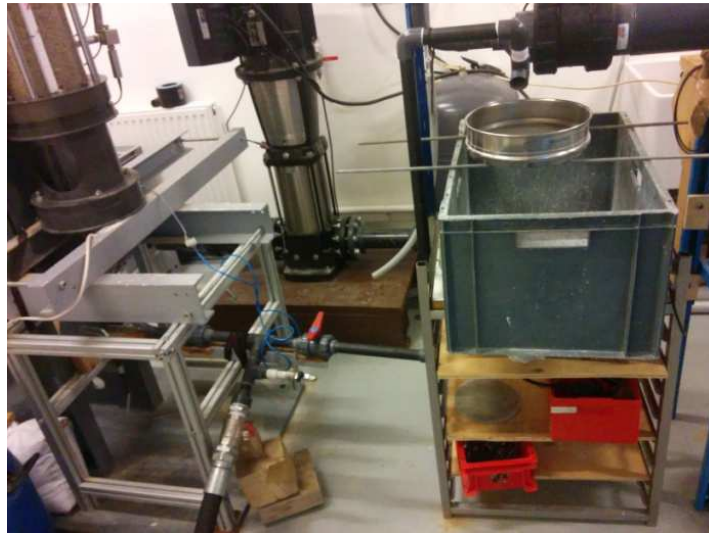


Figure II-15 Vue du système de collecte des fines érodées

II-2-4 Instrumentation

○ **Débitmètre** : Pour mesurer le débit d'eau à travers l'échantillon, le dispositif est équipé d'un débitmètre installé à l'amont de la conduite. Le débitmètre est de type *KOBOLD-DOG 2* avec une gamme de mesure de débit allant de $0,04 \text{ l/s}$ à $2,22 \text{ l/s}$ (*Figure II-16*).

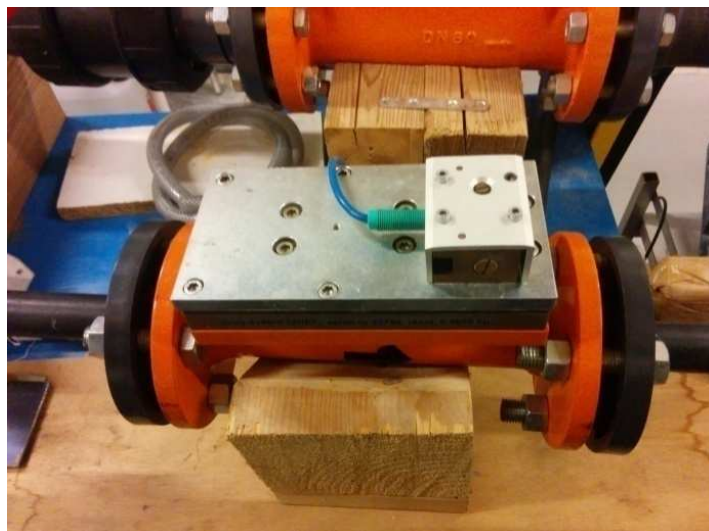


Figure II-16 Débitmètre KOBOLDS DOG 2

Le débitmètre est de type inductif, c'est-à-dire qu'on mesure la fréquence des oscillations du système qui est proportionnelle à la vitesse d'écoulement. Pour les très faibles débits, inférieure à 0,04 l/s, qu'on ne peut pas mesurer à l'aide du débitmètre, on utilise une balance placée à la sortie de la conduite. C'est cette même procédure qu'on utilise pour mesurer le débit d'écoulement au cours de la phase de saturation. La précision de la balance est de 1 g.

○ **Turbidimètre** : la quantité des particules fines érodées et transportées à l'extérieur de la conduite (argileuses et limoneuses) est mesurée à l'aide d'un turbidimètre placé sur le côté aval juste à la sortie de la conduite. Le turbidimètre utilisé est de marque *Kobold LAT N1* qui mesure la turbidité à l'aide de quatre rayons lumineux alternés entre émetteur et récepteur (*Figure II-17*). Le turbidimètre a une gamme de mesure de 0 à 5000 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). A partir d'un étalonnage préalablement réalisé pour les différents sols fins susceptibles d'être érodés et avec différentes concentrations, on peut obtenir la quantité massique correspondante des particules érodées.



Figure II-17 Photo du turbidimètre *Kobold LAT N1*

○ **Capteurs de pression** : Pour suivre l'évolution des pressions d'eau le long de la conduite, celle-ci est équipée de capteurs de pression installés à différentes positions. Les capteurs utilisés sont de marque *Polaron Schaevitz* et leur gamme de mesure est de 0 à 1 MPa (10 bars) avec une précision de $\pm 0,5$ kPa (*Figure II-18a*). L'installation des capteurs sur les modules nécessite d'utiliser un système passe-paroi et un bloc désaérateur pour chaque capteur, comme on peut le voir sur la *Figure II-18b*. Lors des premiers essais, on a utilisé 2 capteurs espacés de 25 cm sur chaque module. Avec le développement du dispositif dans la configuration verticale, on est passé à 6 capteurs par module, disposés en deux séries de trois capteurs espacés de 12,5 cm.

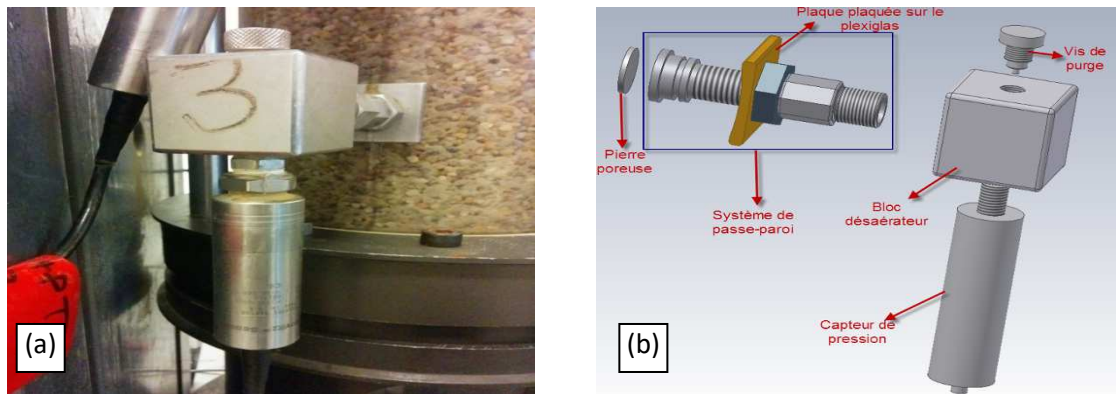


Figure II-18 Capteur de pression Polaron Schaevitz : (a) Photo de capteur ; (b) Système de montage du capteur

○ **Système d'acquisition** : L'ensemble des dispositifs de mesure est relié à un multimètre de type *HBM* pour assurer l'acquisition simultanée sur toutes les voies. Le multimètre est à son tour relié à un ordinateur pour permettre l'acquisition et l'enregistrement automatique de toutes les données *Figure II-19*.

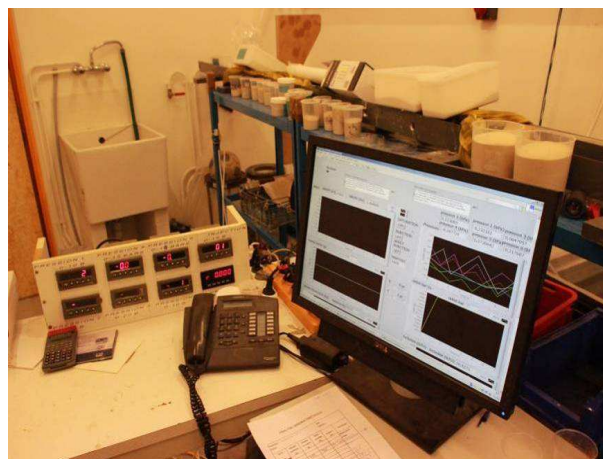


Figure II-19 Ordinateur d'acquisition et les différents afficheurs

Le programme d'acquisition est développé sous *LABVIEW*, il permet l'acquisition et l'enregistrement de :

- la masse d'eau injectée lors de la saturation,
- la masse d'eau en sortie pendant la saturation,
- la pression de saturation,
- les pressions d'eau le long de la conduite,
- le débit d'écoulement,
- la turbidité de l'eau sortante.

II-3 Les matériaux étudiés

II-3-1 Choix de matériaux modèles

Le choix de matériaux de référence est une étape importante dans le cadre de ce travail. L'objectif est de choisir des matériaux représentatifs et homogènes. Dans la littérature, on distingue trois catégories de matériaux testés dans le cadre des études sur l'érosion des sols :

- **Les matériaux naturels :** Ce sont des matériaux qu'on trouve dans des ouvrages réels. L'intérêt de ces matériaux consiste dans le fait qu'ils sont représentatifs de cas réels. Néanmoins, l'utilisation de ces matériaux peut avoir quelques inconvénients, en particulier le fait que ces matériaux ne soient en général représentatifs que d'un seul ouvrage ou de quelques ouvrages dans les meilleurs cas. De plus, l'obtention de ces matériaux n'est pas toujours facile, vu qu'on doit les récupérer sur des ouvrages réels, mais aussi la difficulté de s'assurer de leur homogénéité dans le cas où l'on veut faire des essais de répétabilité.
- **Les matériaux artificiels :** Certains auteurs comme *Lafleur (1989)*, *Tomlinson et Vaid (2000)*, *Marot et al (2010)*, *Sail (2012)*, *Sibille et al(2015)* ... ont utilisé des matériaux artificiels pour étudier les phénomènes d'érosion. Ces matériaux sont souvent constitués à partir de mélange de billes de verre de différentes tailles et dans différentes proportions. Ainsi ce sont des matériaux faciles à reconstituer, et le procédé de fabrication permet d'avoir des matériaux homogènes tout en s'assurant de la répétabilité du processus de reconstitution. Cependant, ces matériaux restent non représentatifs de sols réels, notamment dans le cas des billes de verre qui sont rondes lisses ce qui élimine l'effet de la rugosité et de la plus ou moins grande angularité des grains qui jouent des rôles importants dans leur érosion.
- **Les matériaux reconstitués :** La troisième catégorie des sols utilisés pour les études de l'érosion correspond aux sols reconstitués à partir mélanges des matériaux 'naturels' dits de référence. Grâce à cette technique, on peut reconstituer des matériaux avec différentes courbes granulométriques en jouant sur les proportions des différents constituants. Ce type de matériaux est le plus utilisé dans les études de l'érosion, *Skempton et Brogan (1994)*, *Wan et Fell (2008)*, *Bendahmane et al (2006)*, *Marot et al (2012)*, *Benamar et al (2012)* ..., en y associant un procédé de reconstitution adapté, cela permet de fabriquer une large gamme de matériaux qui peuvent représenter des matériaux réels.

Dans le cadre de cette étude, on a réalisé les essais sur des matériaux reconstitués. Pour cela il fallait développer un procédé de reconstitution des matériaux modèles à partir de matériaux dits de référence disponibles au laboratoire. Le procédé de reconstitution doit permettre d'obtenir des matériaux homogènes tout en s'assurant de la répétabilité de cette procédure.

II-3-2 Protocole de reconstitution des matériaux

La reconstitution des matériaux modèles utilisés dans le cadre de cette étude se fait à partir de mélange de 11 matériaux dits de référence (*Figure II-20*).

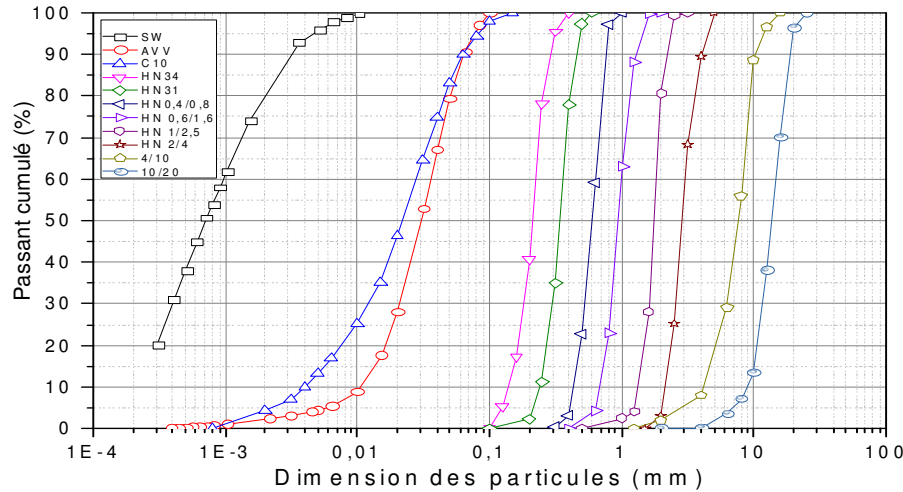


Figure II-20 Courbes de distribution granulométrique des matériaux de références utilisés pour la reconstitution des matériaux modèles

Ces matériaux de références, notés (MRi), peuvent être classés en trois classes : la première comprend les sols fins qui regroupent l'argile kaolinite Speswhite (notée SW), l'argile illite Verte de Velay (AVV) et le sable broyé C10 fourni par Sibelco. La seconde classe regroupe les sables d'Hostun, où l'on utilise les 6 sables suivants, classés du plus fin au plus gros : HN 34 ; HN 31 ; HN 0,4/0,8 ; HN 0,6/1,6 ; HN 1/2,5 et HN 2/4. La troisième classe regroupe les graviers 4/10 et 10/20. La composition chimique montre que le C10, les sables d'Hostun et les graviers sont des matériaux siliceux, avec des proportions de silice de plus de 98%.

Le *Tableau II-1* regroupe les dimensions caractéristiques des matériaux de référence utilisés dans le cadre de cette étude.

Les matériaux reconstitués ont été définis afin de faire varier la forme de la courbe granulométrique (continue, discontinue...) et ainsi pouvoir étudier l'influence de cette granulométrie sur l'érosion des matériaux. On s'est inspiré des différentes courbes testées dans les travaux antérieurs.

Noms	Matériaux	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	Cu
MR1	Speswhite	-	7,00E-04	9,66 E-4	0,0031	-
MR2	C10	0,004	0,022	0,028	0,063	7
MR3	HN34	0,137	0,211	0,223	0,292	1,62
MR4	HN 31	0,242	0,341	0,360	0,457	1,48
MR5	HN 0,4/0,8	0,433	0,596	0,634	0,766	1,46
MR6	HN 0,6/1,6	0,678	0,933	0,981	1,297	1,44
MR7	HN 1/2,5	1,329	1,755	1,822	2,239	1,37
MR8	HN 2/4	2,147	2,849	3,016	4,036	1,40
MR9	4/10	4,158	7,268	8,26	10,45	1,98
MR10	10/20	8,769	13,757	14,77	19,07	1,68
MR11	AVV	0,0106	0,03	0,035	0,064	3,30

Tableau II-1 Tableau des dimensions caractéristiques des matériaux de références

Une question importante à résoudre est : quelles sont les proportions des matériaux de référence qu'il faut utiliser pour reconstituer un matériau modèle donné ?

Pour fabriquer un matériau modèle donné, il faut commencer par calculer les différentes proportions des matériaux de références nécessaires pour constituer ce matériau. La détermination de ces proportions se fait par un calcul moyen à partir des D₅₀ des matériaux de référence. Pour illustrer cette procédure, on prend l'exemple d'un matériau modèle qu'on nommé M1 reconstitué à partir de l'ensemble des matériaux de référence cités ci-dessus sauf l'AVV. On trace sa courbe granulométrique puis on positionne les D₅₀ des matériaux de référence comme illustré sur la *Figure II-21*. La tranche du matériau modèle comprise entre deux D₅₀ successifs sera divisée entre les matériaux correspondants à ces D₅₀. Ainsi la proportion de chaque matériau de référence est calculée comme suit :

$$\%_{\text{MR}_i} = \frac{\%D_i - \%D_{i-1}}{2} + \frac{\%D_{i+1} - \%D_i}{2}$$

Où %_{MR_i} : Correspond à la proportion du matériau de référence n° i nécessaire pour reconstituer le matériau modèle.

% D_i : Correspond au pourcentage d'intersection de la courbe granulométrique des matériaux de référence n° i (MR_i) avec la droite de diamètre D₅₀ de ce même matériau de référence. Ces différents paramètres de calcul sont illustrés sur la *Figure II-21*.

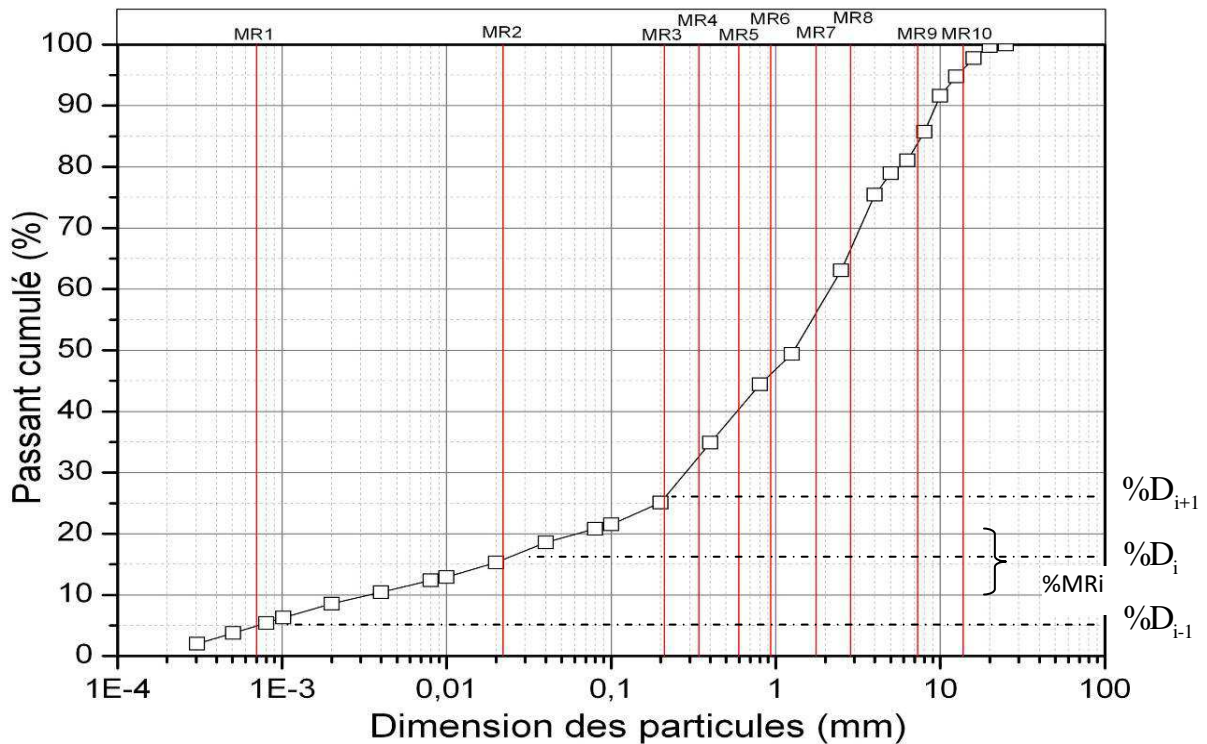


Figure II-21 Exemple de calcul des proportions des matériaux de référence pour reconstruire un matériau modèle (cas du matériau modèle nommé M1)

Les valeurs de proportions calculées sont ensuite arrondies pour faciliter le calcul des masses de chaque matériau de référence nécessaire pour reconstituer le matériau modèle.

Par exemple pour le matériau 'M1', les proportions de chaque matériau de référence ainsi que les masses nécessaires pour reconstituer 5 kg de matériau sont regroupées dans le *Tableau II-2*.

	Speswhite	C10	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	4-10	10-20
% MR _i	10	11,5	8,5	6	7	7	8	18	16,5	7,5
Masse MR _i (g)	500	575	425	300	350	350	400	900	825	375

Tableau II-2 Tableau des proportions et masses des matériaux de références nécessaires pour la construction d'un matériau modèle nommé M1

Dans ce qui suit, nous allons détailler la procédure de reconstitution des matériaux modèles. La finalité de cette étape est d'élaborer un protocole de reconstitution permettant d'obtenir des matériaux homogènes tout en assurant la répétabilité de la procédure.

En effet, mélanger des sols pulvérulents pose toujours un problème de ségrégation lors de la reconstitution et aussi lors de la mise en place. Deux techniques de mélange ont été testées : le mélange à sec et le mélange humide.

Pour le mélange à sec, les premiers mélanges ont été réalisés à l'aide d'un malaxeur d'une contenance de 5 litres (*Figure II-22*), dans lequel on mélange uniquement les sables d'Hostun, le C10 et la Speswhite. On commence par introduire le sable HN 2/4, puis tout en maintenant le malaxage on ajoute les autres matériaux du plus gros au plus fin. Le malaxage est ainsi maintenu pendant une dizaine de minutes.



Figure II-22 Malaxeur de contenance 5 litres

A la fin de malaxage, on récupère le matériau dans le récipient de malaxage en deux lots, dans la partie supérieure et dans la partie inférieure du bol du malaxeur, et on réalise une analyse granulométrique de chaque partie que l'on compare à la courbe granulométrique ciblée du matériau à reconstituer.

Le *Tableau II-3* regroupe les proportions et les masses des matériaux de référence nécessaires pour la construction d'un matériau modèle nommé 'M2', la courbe granulométrique ciblée et celles obtenues pour les deux lots sont regroupées sur la *Figure II-23*.

	Speswhite	C10	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	4-10	10-20
% MRi	5	10	30	10	25	10	7	3	0	0
Masse MRi (g)	250	500	1500	500	1250	500	350	150	0	0

Tableau II-3 Tableau des proportions et masses des matériaux de référence nécessaires pour la construction d'un matériau modèle nommé M2.

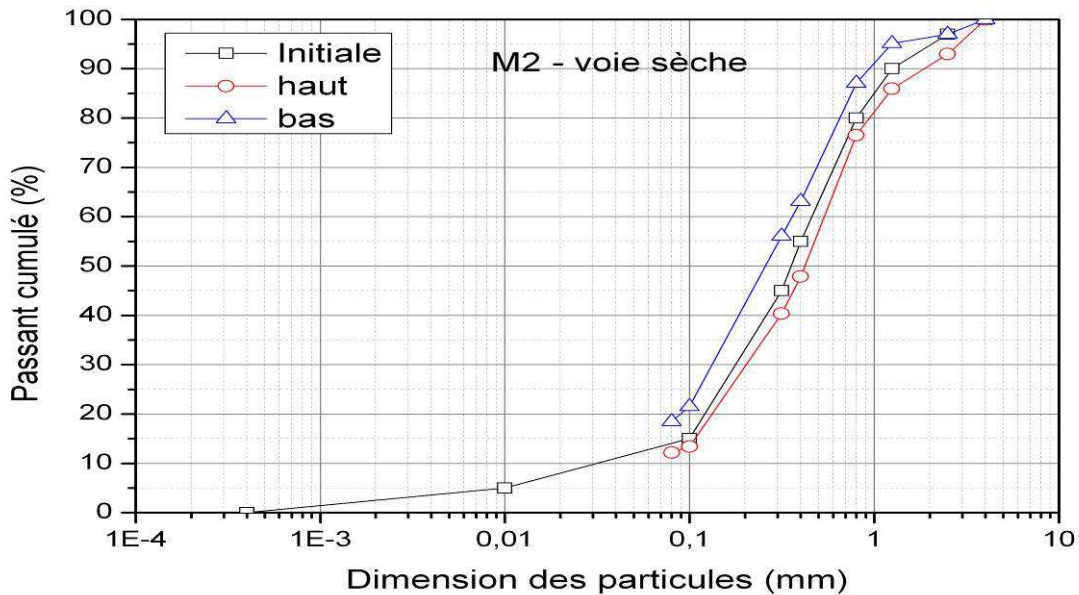


Figure II-23 Comparatif de la courbe granulométrique ciblée et celles provenant des deux lots dans le cas du matériau 'M2' reconstitué par mélange à sec.

On constate sur la *Figure II-23* que le matériau reconstitué a une granulométrie plus fine au fond du récipient du malaxeur et plus grossière en haut, ce qui met en évidence une ségrégation. Pour éviter ce problème de ségrégation, on a testé une autre méthode de reconstitution dite « méthode humide ».

Pour la technique de mélange humide, le plus important est de trouver la quantité d'eau optimale à introduire pour obtenir des matériaux homogènes. En effet, peu d'eau peut poser de nouveau le problème de ségrégation, et trop d'eau favorise la formation de grumeaux comme on le voit sur la *Figure II-24a et b*.

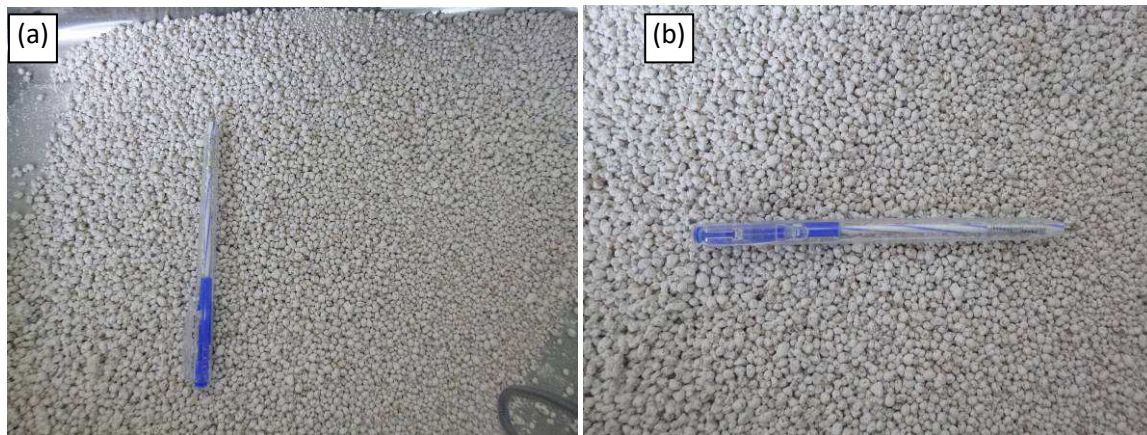


Figure II-24 Formation de grumeaux par la technique de mélange humide, pour une forte teneur en eau (10% dans ce cas)

En fait, la quantité d'eau à introduire pour réaliser ces mélanges humides doit permettre aux particules plus fines d'entourer les particules plus grossières sans qu'elles s'y collent fortement. Pour trouver la quantité d'eau optimale pour réaliser ces mélanges, on s'est basé sur les travaux de *Bendahmane et al. (2006)*. Ces auteurs ont travaillé sur des mélanges de sable et d'argile, et la quantité d'eau à introduire correspond à 10 % en masse des particules grossières, le sable dans ce cas. Néanmoins, la quantité d'eau à introduire doit être plutôt proportionnelle à la masse des particules fines introduite dans le mélange. Pour cela, nous avons proposé d'introduire une masse d'eau qui correspond à 30 % de la masse des particules fines introduites dans le mélange.

Le protocole finalement adopté pour la réalisation des mélanges consiste aux trois étapes suivantes :

- introduire les particules grossières dans le mélange, et malaxer pendant 3 à 5 min environ ;
- tout en maintenant le malaxage, on verse la masse d'eau qui correspond à 30 % de la masse des particules fines et on mélange encore jusqu'à l'humidification de toutes les particules grossières (2 à 3 minutes) ;
- tout en maintenant le malaxage, on introduit peu à peu les particules fines, en commençant par les plus grosses d'entre elles, et à la fin on laisse encore malaxer pendant 5mn.

La comparaison sur la *Figure II-25* des courbes de distribution granulométrique ciblée et celles obtenues à la fin des essais, montre une bonne homogénéité des matériaux reconstitués par cette méthode.

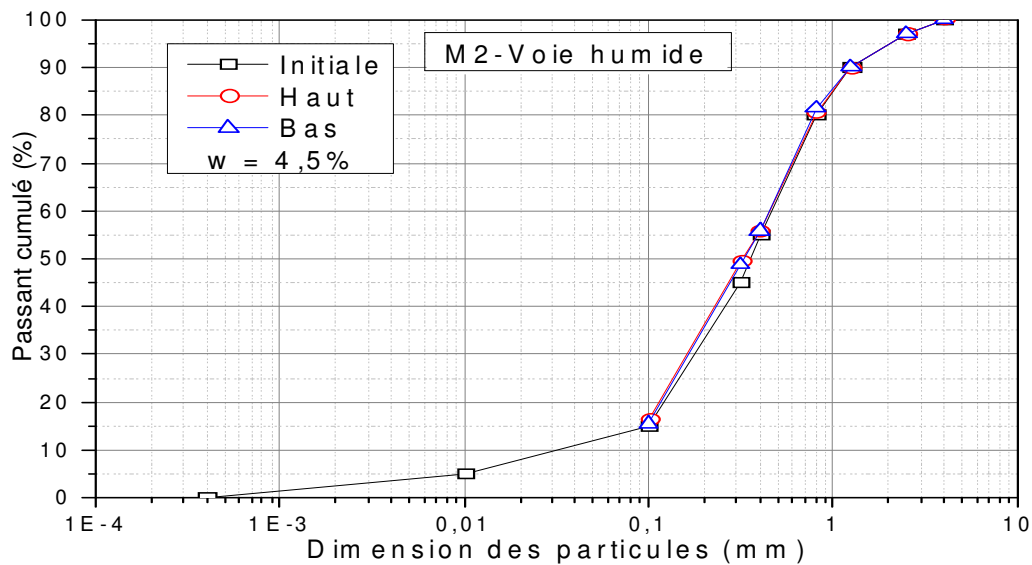


Figure II-25 Comparatif de la courbe granulométrique ciblée et celles des lots dans le cas d'un matériau reconstitué par mélange humide ($w=4,5\%$)

Le procédé retenu pour la reconstitution des matériaux testés dans le cadre de cette étude est le mélange par voie humide, à une masse d'eau correspondant à 30 % de la masse des particules fines introduite.

Pour la reconstitution des grandes quantités de matériaux nécessaire pour nos essais, nous avons utilisé un plus grand malaxeur d'une contenance de 20 litres (*Figure II-26-a*). Le protocole de reconstitution demeure le même.

Pour mélanger les graviers 4/10 et 10/20, nous avons utilisé une bétonnière. Une fois que le mélange est réalisé dans le grand malaxeur, on le verse dans la bétonnière dans laquelle on ajoute les quantités nécessaires des deux graviers tout en maintenant le malaxage (*Figure II-26-b*) pendant 10 minutes.

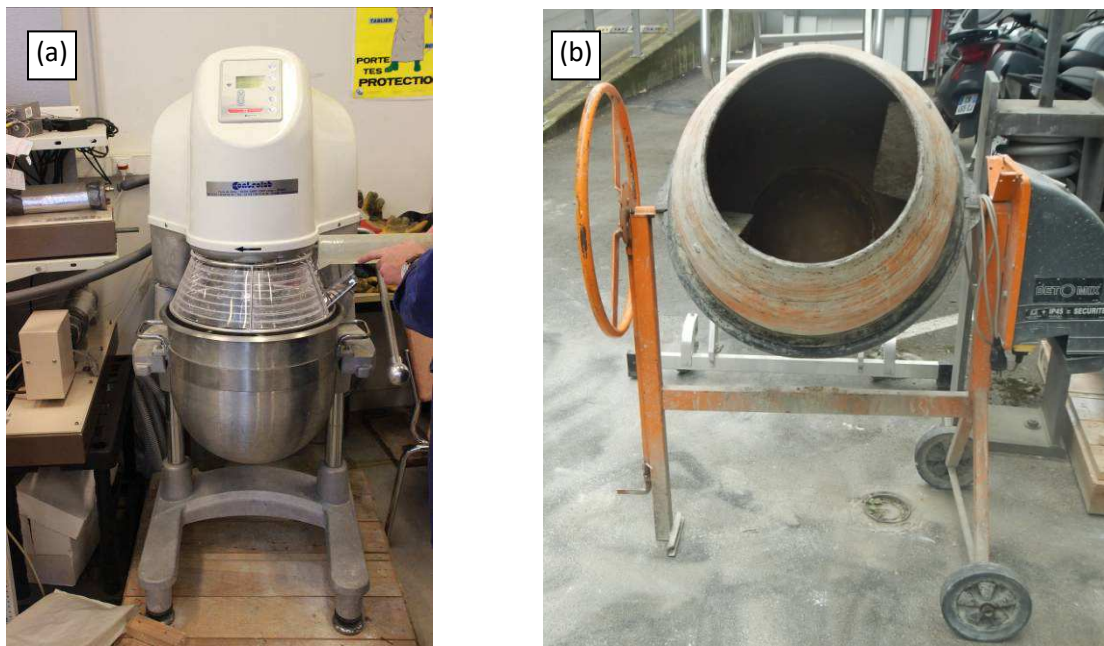


Figure II-26 Outils de malaxage des grosses particules : (a) Malaxeur de contenance 20 litres ; (b) Bétonnière

Pour finir, le matériau est laissé au repos dans un bac fermé hermétiquement pendant 24h avant de le mettre en place dans la conduite d'essai.

II-3-3 Vérification de l'homogénéité et de la répétabilité

Comme déjà mentionné, l'objectif est d'élaborer un protocole de reconstitution de matériaux homogènes, tout en s'assurant de la répétabilité du procédé. Dans le but de vérifier ces deux conditions, on a réalisé des essais de répétabilité sur le matériau M1 suscité, et les résultats des deux essais sont présentés sur les *Figure II-27* et *Figure II-28*.

On remarque que le protocole expérimental de mélange développé permet d'obtenir un matériau homogène. En effet, le matériau reconstitué est divisé en 3 lots, haut, centre et bas, et on réalise les courbes granulométriques correspondantes. On observe que les courbes sont confondues avec celle de la courbe granulométrique du matériau visé.

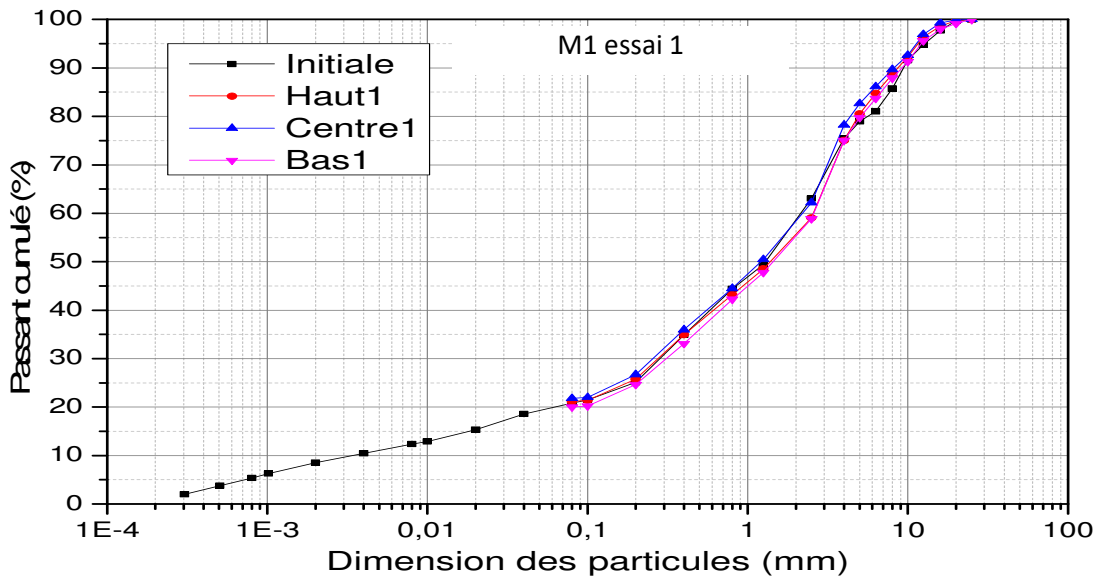


Figure II-27 Comparatif des courbes granulométriques ciblées et finales du matériau M1 reconstitué par mélange humide (Essai1)^(*)

^(*): Haut, centre et bas correspondent aux positions de récupération du sol dans le bac de malaxage.

Pour vérifier la répétabilité de la reconstitution des matériaux par cette procédure, nous avons réalisé la même procédure une seconde fois. Les résultats montrent que le protocole est bien répétable.

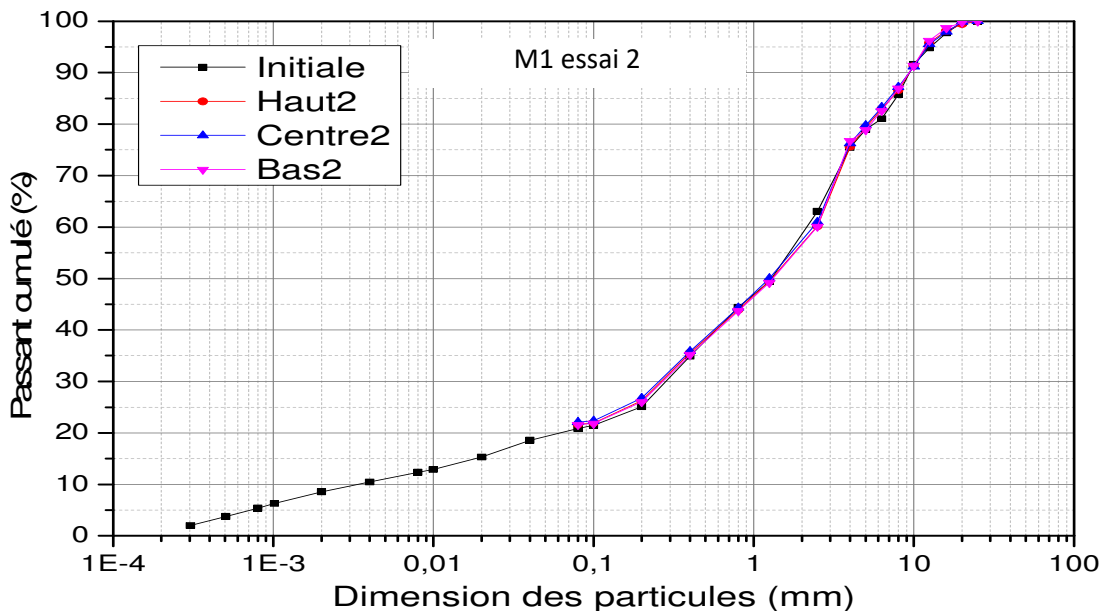


Figure II-28 Comparatif des courbes granulométriques ciblées et finales du matériau M1 reconstitué par mélange humide (Essai2)

II-3-4 Appellation des matériaux

Les matériaux testés dans cette étude sont constitués à partir des mélanges des 11 matériaux dits de référence cités ci-dessus, avec différentes compositions. Ces matériaux de référence peuvent être classés en quatre (4) classes en fonction de leur nature :

- La classe des Argile, notée 'A' : Elle regroupe le Speswhite (kaolinite), et l'Argile Verte de Velay (Illite).
- La classe de Sable broyé, noté 'S_b' : Qui contient le sable broyé C10.
- La classe des sable, notée 'S' : Qui regroupe tous les sables d'Hostun, HN34; HN31; HN0,4/0,8; HN0,6/1,6; HN1/2,5; HN2/4
- La classe de Gravier 'Notée 'G' : et elle regroupe les gravier 4/10 et 10/20.

L'appellation des matériaux reconstitués est basée sur leur composition. Par exemple, pour les matériaux composés de l'argile, de sable broyé, de sables d'Hostun et de gravier on les note: AS_bSG, suivi d'un numéro qui classe ces matériaux de même composition du plus fin au plus grossier. De même pour les matériaux composés d'argile et de sable, on les note AS suivi d'un numéro qui les classe du plus fin au plus grossier.

Bien évident, sur la base de cette nomenclature on ne peut pas distinguer quel sable entre dans la composition des matériaux reconstitués, ni quel gravier et quelle argile d'ailleurs, pour cela il faudra se référer aux tableaux de composition de chaque matériau (voir chapitres 3 et 4), où sont regroupés les matériaux de référence ainsi que leurs proportions distinctives.

II-4 Protocole d'essai

La réalisation des essais nécessite la mise en place d'un protocole expérimental adapté en fonction des matériaux testés et de la configuration du dispositif utilisé.

Le protocole expérimental adopté comporte les six phases suivantes :

- reconstitution des matériaux modèles,
- mise en place du sol dans la conduite,
- raccordement de la conduite sur le circuit hydraulique,
- saturation du sol,
- essai d'érosion,
- démontage de la conduite et analyses granulométriques après essai.

Une fois que le matériau modèle est reconstitué par la procédure décrite plus haut, on procède à sa mise dans la conduite, à sa saturation puis à l'essai d'érosion. Ces trois étapes sont décrites dans ce qui suit.

II-4-1 Mise en place du sol dans la conduite

Dans la littérature, on trouve deux procédés distincts pour maîtriser l'état de densité du matériau à la mise en place. La consolidation du matériau et le compactage par couches successives.

Le premier procédé est utilisé pour la mise en place des matériaux contenant une quantité importante d'argile. Le principe consiste à mettre le sol dans un état saturé et venir appliquer une contrainte de consolidation afin d'avoir l'état initial voulu. Pour cela on utilise la technique de « *Slurry deposition* », développée par *Kuerbis et Vaid (1988)* pour les essais triaxiaux, et adaptée par *Moffat et al (2006), (2011) et Sail (2012)* pour étudier l'érosion des sols. Sous un film d'eau désaérée de 5 mm, initialement introduit dans le perméamètre, on dépose avec précaution le sol afin qu'il soit immergé dans cette eau sans qu'il y ait de ségrégation. Une fois le film d'eau rempli de sol, on répète ce processus jusqu'au remplissage total du perméamètre. (*Figure II-29*). Le sol est ensuite consolidé à la contrainte de consolidation voulue par l'application d'une contrainte verticale à l'aide d'un piston placé sur la surface supérieure du sol dans la conduite.

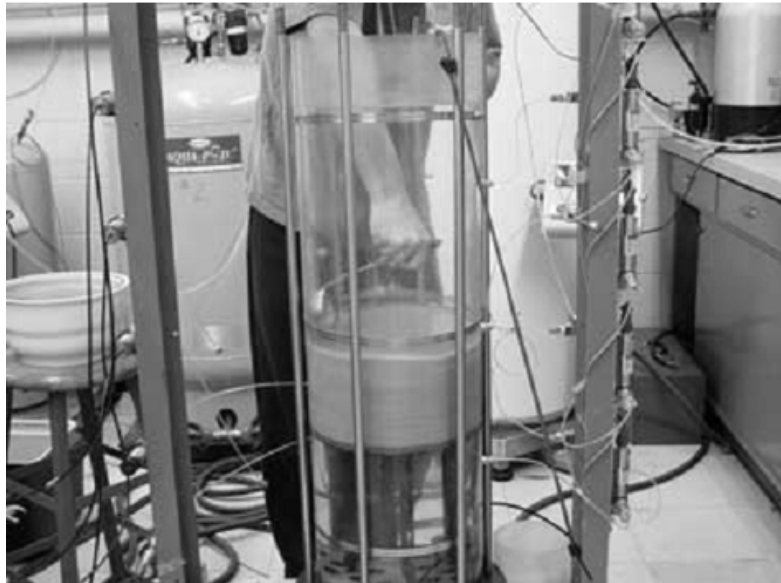


Figure II-29 Reconstitution des sols par la méthode de déposition d'une suspension liquide (boue) "Slurry déposition" (Moffat) 2006

Cette technique est longue, car elle demande de prendre des précautions lors de la mise en place du sol, afin de ne pas avoir de ségrégation du matériau d'un côté et de ne pas perdre des particules notamment fines du sol de l'autre.

L'autre technique utilisée pour la mise en place des sols dans les perméamètres est la mise en place par compactage. Le sol est mis dans le perméamètre par couches successives d'épaisseurs déterminées préalablement afin d'obtenir la densité sèche voulue. Bien que plus simple, cette méthode nécessite de prendre des précautions lors du compactage pour s'assurer de l'homogénéité du sol le long du perméamètre.

Dans cette étude, on a utilisé la mise en place par couches successives compactées à une densité sèche choisie préalablement. Pour cela, et en fonction de la densité sèche visée, on calcule la masse de sol à mettre pour une épaisseur de sol donnée.

$$m_{sol-sec} = \rho_d * v$$

Où : $m_{sol-sec}$: La masse de sol sec à introduire dans la conduite

ρ_d : La densité sèche visée

v : Le volume de la conduite à remplir

En fonction de la teneur en eau w à la mise en place du sol, on peut estimer la masse de sol humide à mettre dans la conduite afin d'obtenir la densité sèche visée :

$$m_{sol-hum} = m_{sol-sec} (1 + w)$$

Une fois que la quantité de matériau à mettre une place est définie, on procède au remplissage de la conduite (colonne). Les modules sont positionnés verticalement à la fois pour la configuration horizontale ou verticale, on commence par placer la première grille au fond de la conduite qui servira du support au sol (*Figure II-30a*), ensuite on met une couche de 5 cm environ de graviers 16/20 (*Figure II-30b*). La granulométrie de ce gravier est choisie selon le critère de *Kenney et Lau (1986)*, le petit diamètre du sol filtrant doit être au moins 4 fois supérieur au grand diamètre du sol filtré (qui correspond à la valeur minimale du rapport H/F). Cette couche servira de filtre pendant la phase d'érosion. Le gravier est choisi pour permettre le passage des particules fines érodées tout en bloquant le passage des particules plus grossières qui constitue le squelette de sol.

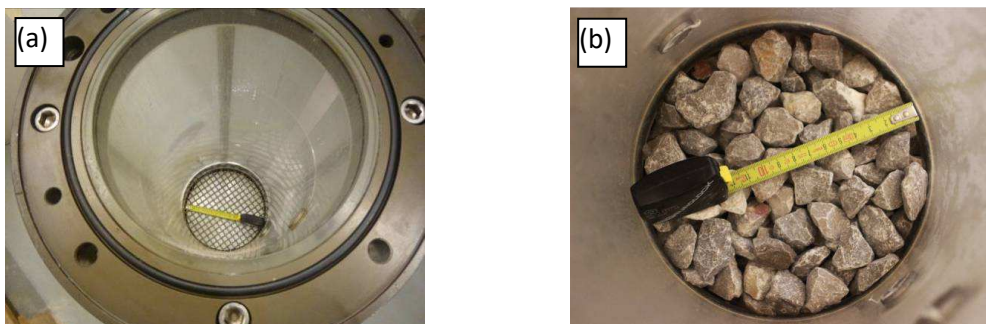


Figure II-30 Reconstitution des échantillons : (a) Mise en place de la grille ; (b) La couche de graviers inférieure

Le sol est ensuite mis en place par des couches successives et compactées à l'aide d'une tige de 1 cm de diamètre jusqu'à avoir la masse volumique sèche désirée. Le compactage est réalisé d'une façon rotative à partir de la paroi vers l'intérieur du sol, puis inversement (*Figure II-31*). Ce mode de compactage nous permet d'avoir une densité uniforme pour chaque couche. Cette méthode nous permet aussi d'avoir une bonne homogénéité de densité sur toute la hauteur de la colonne tout en évitant d'avoir des couches stratifiées, ce qui pourrait arriver si on utilisait une dame de compactage de grande surface.



Figure II-31 Compactage rotatif du sol par couches successives

En fonction de la longueur de la conduite, 1 m pour 2 modules et 53 cm pour 1 module, on aura soit 6 couches soit 3 couches respectivement. Après le compactage de la dernière couche, on met en place une couche de graviers 10/20 (*Figure II-32-a*), qui joue le rôle de diffuseur d'eau pendant la phase d'érosion, afin d'avoir un écoulement uniforme sur toute la surface de l'échantillon. Ensuite, on place la 2^e grille (*Figure II-32-b*). La masse moyenne de chaque module est d'environ 25kg.

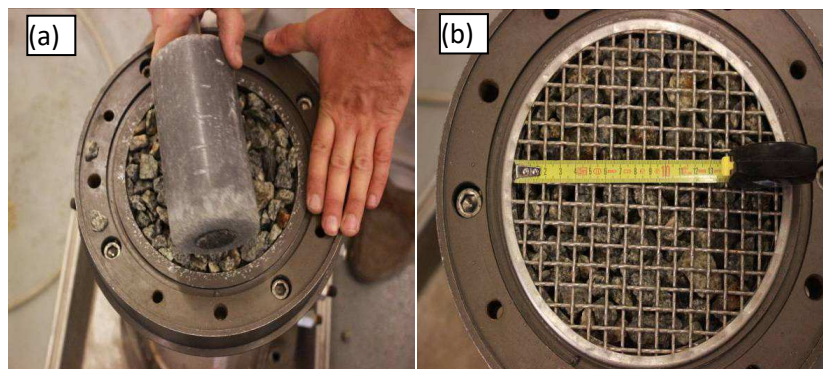


Figure II-32 Reconstitution des échantillons : (a) Mise en place de la couche supérieure de gravier ; (b) Grille supérieure

II-4-2 Installation de la conduite sur le circuit

- **Dans la configuration horizontale :** Une fois la grille supérieure installée, la conduite est basculée horizontalement afin de pouvoir installer les deux cônes amont et aval (*Figure II-33*).



Figure II-33 Montage des cônes amont et aval dans la configuration horizontale

A l'aide d'un pont roulant, on porte la conduite avec les deux cônes et on place l'ensemble sur la table *support* (*Figure II-34*). La conduite est ensuite raccordée au reste du circuit. (*Figure II-35*).



Figure II-34 Installation de la conduite sur son support



Figure II-35 Raccordement de la conduite sur le reste du circuit

○ **Dans la configuration verticale :** Dans cette configuration, on a réalisé des essais avec 1 ou 2 modules, mais la procédure de raccordement reste la même. La procédure de la mise en place du sol dans la conduite est identique à celle de la configuration horizontale. Le cône aval étant déjà fixé au circuit aval du dispositif et placé sur son support (*Figure II-36*), on soulève la conduite verticalement et on la positionne sur le cône aval (*Figure II-37*, *Figure II-38*).

Une fois la conduite fixée sur le cône aval, on place le cône amont dessus et on raccorde la partie amont du circuit hydraulique (*Figure II-39*).

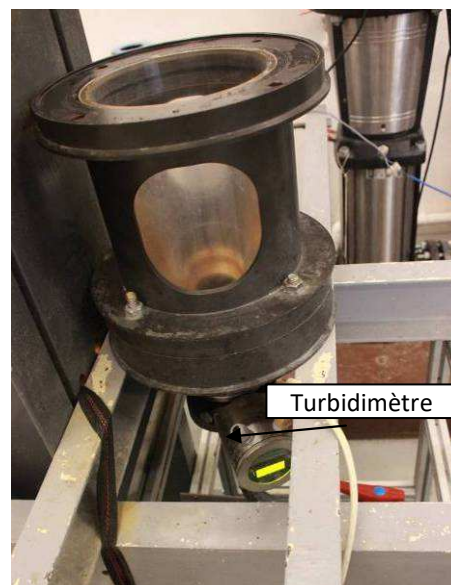


Figure II-36 Installation du cône aval sur la conduite



Figure II-37 *Soulèvement de la conduite à l'aide du pont roulant*



Figure II-38 *Installation du cône amont*



Figure II-39 Raccordement de la conduite sur le reste du circuit

II-4-3 Saturation du sol en conduite

La saturation du sol dans la conduite est réalisée en faisant passer de l'eau sous de faibles pressions afin d'éviter de déclencher tout mouvement de particules de sol pendant cette phase.

○ **Dans la configuration horizontale :** La saturation est réalisée de l'amont vers l'aval, dans le même sens d'écoulement que la phase d'érosion. L'écoulement est généré à l'aide de la pompe de surpression sous de faibles pressions (entre 10 et 30 kPa). La pression est ensuite maintenue constante jusqu'à la sortie de l'eau du côté aval de la conduite. En général, le matériau est considéré saturé si le volume de l'eau sortant est supérieur à quatre à cinq fois le volume des vides dans le sol.

Pendant cette phase on enregistre :

- l'évolution des pressions d'eau p_{i-sat} le long de la conduite (i correspond au numéro du capteur),
- le débit d'écoulement q_{e-sat} à travers la conduite, estimé à partir de l'évolution de la masse d'eau sortant,
- la turbidité d'eau sur le turbidimètre qui nous informe sur l'éventuel départ de fines pendant la saturation.

○ **Dans la configuration verticale :** Dans cette configuration, la phase de saturation est réalisée en 2 étapes : injection de CO₂ et saturation par un écoulement ascendant, à travers un circuit dérivé de circuit de saturation.

L'injection de CO₂ se fait sous une pression de 10 à 15 kPa pendant 20 minutes environ. Cette injection de CO₂ se fait dans le but d'améliorer la saturation du sol (procédure triaxiale classique). Le CO₂ est caractérisé par sa solubilité rapide et totale dans l'eau, une fois que tout l'air dans le sol est chassé et remplacé par le CO₂, on vient injecter de l'eau pour remplir tous les vides déjà occupés par le CO₂ et ce dernier sera dissous.

La saturation de fait par un écoulement ascendant, par injection d'eau à partir d'un réservoir de 80 litres (*Figure II-40*). L'eau est mise en pression par une pression d'air régulée à l'aide d'un détendeur. La pression d'injection est incrémentée par paliers de 2 à 3 kPa, et la masse d'eau injectée (entrante) est suivie à l'aide d'une balance placée sous le réservoir. Chaque pression d'injection est maintenue constante jusqu'à ce que la masse d'eau dans le réservoir devienne constante (pas d'écoulement). Ensuite, on passe à l'incrément de pression suivant, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'eau sorte de la conduite. Le volume d'eau sortant est mesuré à l'aide d'une balance de précision de 1g, placée à la sortie de la conduite. De même que la configuration horizontale, le matériau est considéré saturé une fois que le volume d'eau sortant est supérieur de quatre à cinq fois le volume des vides dans l'échantillon.

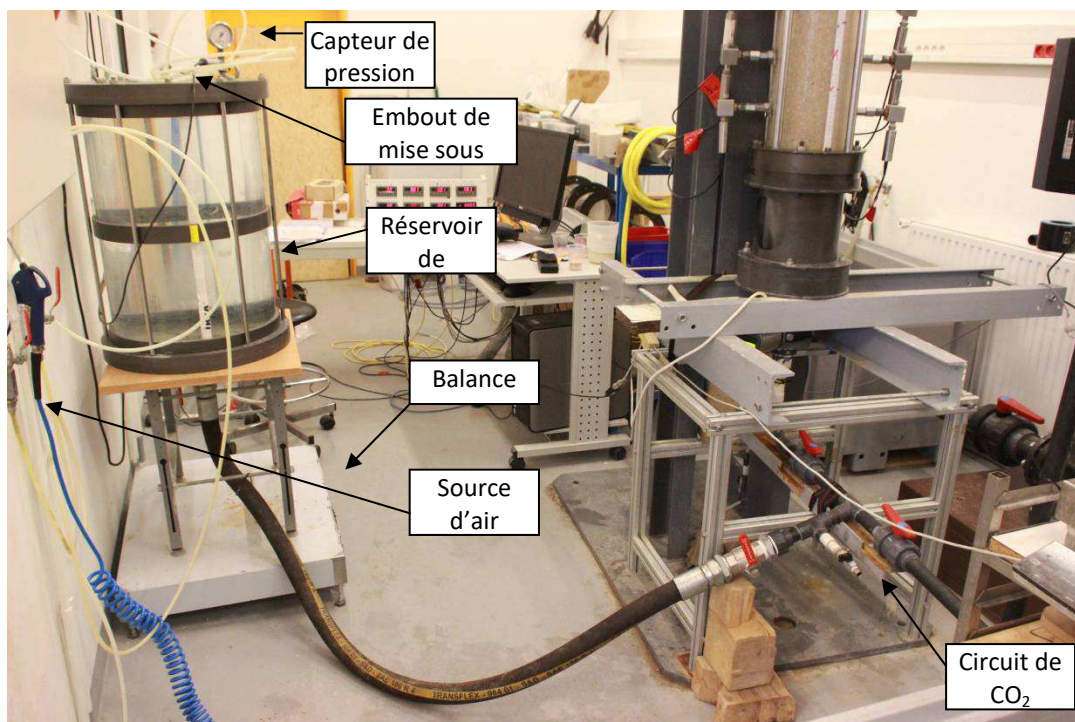


Figure II-40 Photo du dispositif de saturation dans la configuration verticale

La pression d'air qu'on applique pour injecter l'eau peut être assimilée à une colonne d'eau de hauteur équivalente. De ce fait, pour garder une pression de saturation constante sur la surface d'eau dans le réservoir, il faut augmenter cette pression d'injection au fur et à mesure que le niveau d'eau baisse dans le réservoir, pour compenser la hauteur d'eau de l'eau déjà injectée. Le profil de la pression d'injection (notée Pression sat) d'un essai typique est présenté sur la (Figure II-41a et b).

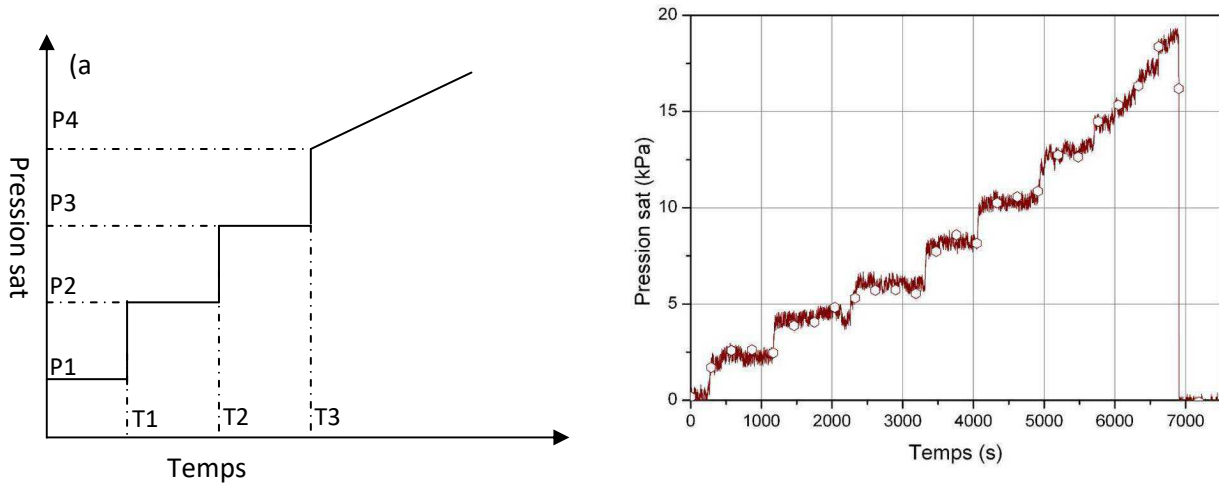


Figure II-41 Profil type de la pression de saturation : (a) Schéma explicatif, (b) Exemple de pression de saturation appliquée

Pendant cette phase on fait l'acquisition de :

- la masse de réservoir, notée masse_{entrée},
- la masse d'eau sur la balance de sortie, notée masse_{sortie},
- l'évolution des pressions d'eau p_{i-sat} le long de la conduite,
- le débit d'écoulement q_{e-sat} , calculé à partir de la masse d'eau sortie.

II-4-4 Erosion du sol en conduite

Une fois que le sol dans la conduite est considéré comme saturé, on lance la deuxième phase de l'essai, qui correspond à la phase d'érosion.

Pour tester l'érodabilité ou non des sols étudiés, on génère un écoulement sous une pression donnée à l'aide de la pompe de surpression, et on mesure la quantité de particules entraînées par l'écoulement. Le départ de particules argileuses et/ou limoneuses est détecté à l'aide du turbidimètre. En ce qui concerne les particules sableuses érodées, elles sont directement collectées, en sortie, sur le dispositif élaboré à cet effet (Figure II-15). Au début des essais, on récupère les particules érodées avec des petits pas de temps, 1 min, puis 5 min, puis au cours

de l'essai on augmente ce pas de temps pour passer à 10 min, 20 min, 30 min puis toutes les heures.

Deux types d'écoulement sont appliqués, des écoulements par des paliers de pression, maintenus constants pour une durée déterminée puis incrémentée, et des écoulements sous une pression d'écoulement maintenue constante pendant toute la durée de l'essai. L'incrément entre chaque palier dépend notamment de la nature des matériaux testés et de leur érodabilité comme illustrés sur *Figure II-42 a et b*.

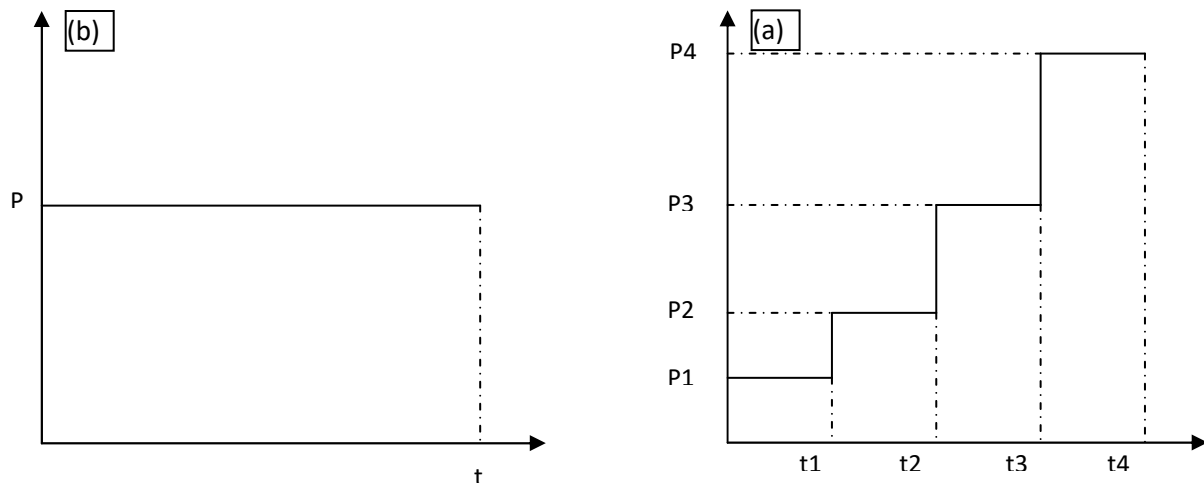


Figure II-42 Représentation schématique des sollicitations hydrauliques appliquées : (a) Pression appliquée par un seul palier; (b) Pression appliquée par plusieurs paliers.

○ **Dans la configuration horizontale :** Les premiers essais, dans le cadre de cette étude, ont été réalisés sur la configuration horizontale (la configuration initiale).

Deux classes de matériaux sont testées avec cette configuration, des matériaux avec une granulométrie très large (de l'argile Speswhite au gravier 10/20), et des matériaux mélanges de sable Hostun HN34 et de Speswhite. Les courbes granulométriques seront présentées dans le paragraphe III-1.

Dans cette configuration les essais sont réalisés en appliquant des pressions par la pompe par des paliers successifs, allant de 20 jusqu'à 400 kPa. Afin de protéger la pompe de surchauffe dans les essais où les débits d'écoulement sont très faibles, certains essais sont réalisés par phasage, afin de laisser la pompe se reposer.

Les paramètres enregistrés durant la phase d'érosion sont :

- les pressions d'eau le long de la conduite,
- le débit d'écoulement,
- la turbidité de l'effluent, ou la masse des particules sableuses érodées.

A partir du profil des pressions d'eau, on peut calculer le gradient hydraulique moyen appliqué sur le sol dans la conduite, ainsi que les gradients hydrauliques appliqués sur chaque tronçon de la conduite à partir des valeurs de pression de deux capteurs successifs.

En connaissant les valeurs des gradients hydrauliques et des débits, on peut estimer la perméabilité apparente de sol étudié.

Comme c'est déjà mentionné plus haut, le dépôt de fines érodées dans le cône aval, et sur le turbidimètre, comme on le voit sur la *Figure II-43a et b*, fait dire que l'interprétation de l'essai ne peut être que qualitative, vu qu'on ne peut pas estimer correctement la quantité de ces fines érodées.

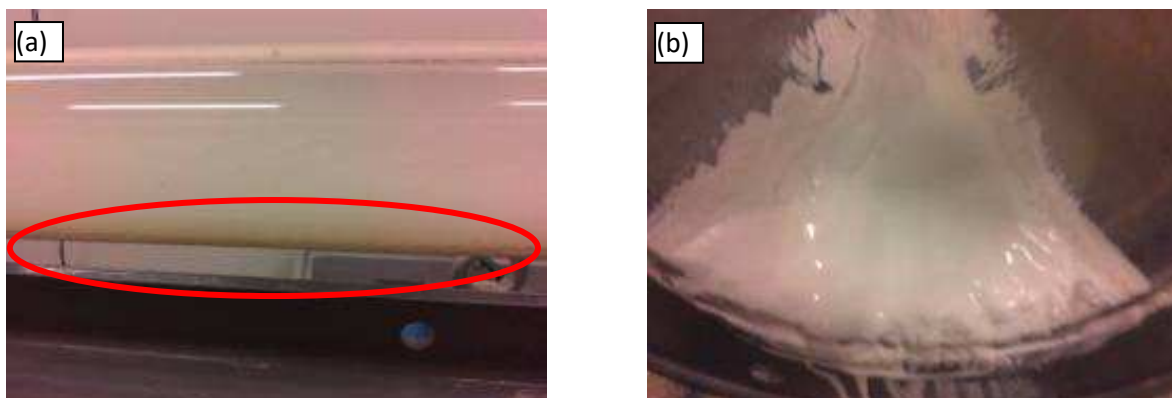


Figure II-43 *Dépôt de fines érodées: (a) Dépôt dans le cône aval ; (b) Dépôt dans le circuit aval*

○ **Dans la configuration verticale :** Pour surmonter les problèmes rencontrés dans la configuration horizontale, en particulier le dépôt de particules érodées, on a développé la configuration verticale. Dans cette dernière configuration dans laquelle l'écoulement est dirigé vers le bas (écoulement descendant). De ce fait, on évite le dépôt de particules de sol érodées dans le circuit aval.

Avec cette configuration, on a réalisé des essais d'abord avec une conduite constituée de 2 modules puis avec un seul module.

L'écoulement est généré de la même manière que pour la configuration horizontale avec la pompe, soit par des paliers de pressions successifs, soit sous une pression maintenue constante pour la durée de l'essai.

Les matériaux testés dans cette configuration peuvent être divisés en trois classes : des matériaux fins constitués par le mélange de sable HN 31 et Speswhite avec différentes proportions, des matériaux grossiers dont la granulométrie regroupe tous les matériaux du gravier 10/20 au sable broyé C10, avec ou pas de Speswhite. La dernière classe des matériaux

testés est constituée par le mélange de sables Hostun de HN2/4 à HN34, auxquels on a ajouté parfois le C10, l'argile verte ou la Speswhite avec des pourcentages inférieurs à 5%. Les courbes de distribution granulométriques des matériaux testés avec cette configuration sont exposées en détail dans le §III-2.

Dans la phase d'érosion on fait l'acquisition des paramètres suivants :

- les pressions d'eau le long de la conduite,
- le débit d'écoulement,
- la turbidité,
- la masse des particules sableuses érodées.

De même que pour la configuration horizontale, on calcule les différents gradients hydrauliques à différent niveau du sol en conduite, puis on estime les valeurs des perméabilités apparentes à différents niveaux.

Dans le cas de la configuration verticale et pour tester des matériaux reconstitués à partir de mélanges de sable d'Hostun, un système de récupération des particules sableuses érodées a été élaboré afin d'évaluer leur quantité et leur courbe granulométrique. Pour ce faire, un tamis dont l'ouverture de maille est de 100 μm (qui correspond à la taille minimale des particules sableuses des matériaux testés) est placé à l'extrémité aval de la conduite. Les particules fines érodées sont alors récupérées à des intervalles de temps différents, comme déjà mentionné plus haut (§ II-2-3). Avec ce système on ne récupère pas les particules argileuses érodées qu'on a éventuellement ajoutées dans la composition des matériaux testés.

II-4-5 Démontage de la conduite et analyse granulométrique post-essai

A la fin des essais, on procède au démontage de la conduite. Pour cela, on commence par vider la partie aval du circuit, puis on démonte la conduite contenant le sol, et on nettoie le restant du circuit. Pour la configuration verticale, on nettoie le fond du circuit par un jet d'eau afin de récupérer les particules de sables qui peuvent éventuellement s'y déposer.

Le sol dans la conduite est ensuite récupéré par couches pour lesquelles on compare leurs courbes granulométriques à la courbe granulométrique initiale du matériau testé. Pour ce faire, la conduite est divisée en quatre tronçons notés T1 à T4 de l'amont vers l'aval (*Figure II-44*), et pour chaque tronçon on récupère le matériau et on procède à son analyse granulométrique.

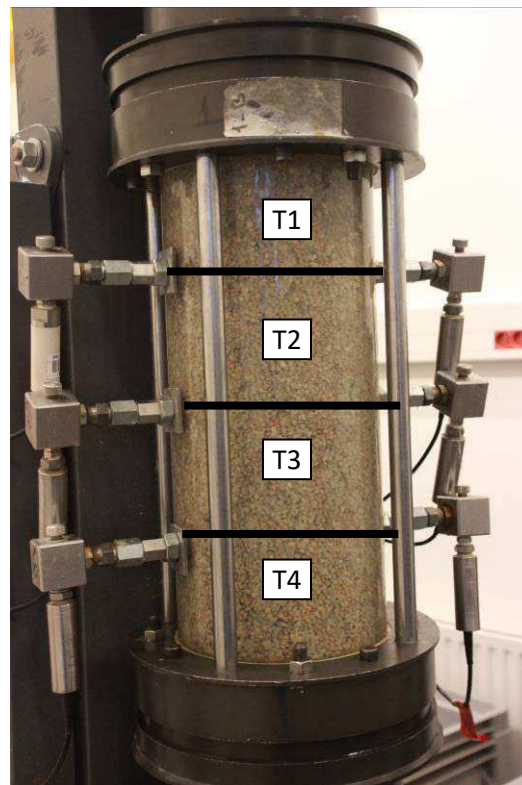


Figure II-44 Positionnement des différents tronçons pour l'analyse granulométrique post-essai

La comparaison des courbes de distribution granulométrique initiale et finale nous renseigne sur deux aspects :

- la distribution granulométrique des matériaux érodés.
- la localisation des matériaux érodés, en comparant les granulométries des différents tronçons par rapport à la distribution initiale.

II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le dispositif expérimental utilisé, les matériaux testés ainsi que le protocole d'essai associé.

Le dispositif utilisé pour notre étude est une conduite d'écoulement de 18 cm de diamètre et dont la longueur est modulable par l'association de modules en plexiglas de 50 cm de longueur chacun. Cette conduite est équipée avec des dispositifs permettant le suivi des différents paramètres tels que les pressions ou le débit grâce à un système d'acquisition de données. La conduite peut être raccordée soit horizontalement soit verticalement en fonction des données des essais. Plus de détails seront donnés dans le chapitre 3.

Les matériaux testés sont des matériaux reconstitués au laboratoire à partir de mélange de différents matériaux de référence. Un protocole de reconstitution des matériaux a été élaboré et validé pour avoir des matériaux homogènes tout en assurant la répétabilité du procédé.

En fonction de déroulement des essais, deux configurations d'installation de la conduite sont envisageables, soit la configuration horizontale, soit la configuration verticale. La procédure d'installation reste semblable pour les deux configurations. Celle-ci comporte la mise en place du sol dans la colonne, à la masse volumique sèche désirée, l'installation de la colonne sur le circuit, puis les deux phases d'abord de saturation et finalement d'érosion. A la fin de chaque essai, on procède au démontage de la colonne pour récupérer des échantillons de sol à différents niveaux pour réaliser des analyses granulométriques post-essai et de les comparer à la granulométrie initiale.

Chapitre III Essais typiques et validation

Deux configurations de la colonne d'érosion ont été utilisées pour la réalisation de nos essais. La configuration horizontale étant plus représentative des écoulements parasites qui peuvent apparaître dans la structure des ouvrages hydrauliques a été d'abord testée, mais à la suite de problèmes, la configuration verticale a été finalement retenue.

III-1 Configuration horizontale

Les premiers essais réalisés dans le cadre de cette étude ont été effectués avec le dispositif dans sa configuration horizontale d'origine. Comme déjà indiqué dans le chapitre précédent, les écoulements dans la direction horizontale ou subhorizontale sont les plus représentatifs des écoulements traversant les structures des barrages ou leurs fondations.

L'objectif de ces premiers essais est notamment de valider le dispositif expérimental ainsi que la procédure d'essai retenue. Pour cette première étape, cinq sols ont été testés dans cette configuration. Les proportions des matériaux de référence (disponible au laboratoire) composant ces cinq sols sont regroupées dans le *Tableau III-1*, et les courbes granulométriques correspondantes sont présentées sur la *Figure III-1*.

Matériau	Speswhite	C10	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	4-10	10-20
AS _p SG1	10	11,5	8,5	6	7	7	8	18	16,5	7,5
AS _p SG2	6	9	6	2,5	2,5	6	10	10	15	33
AS _p SG3	4	6	4,5	1,5	1	3	4	16	24	36
AS1	5	0	95	0	0	0	0	0	0	0
SG4	0	0	15	0	0	35	0	0	0	50

Tableau III-1 Composition en pourcentage massique des matériaux testés dans la configuration horizontale

Le choix des sols dans les essais de validation est basé sur la forme de leur courbe granulométrique. L'idée est de tester une large gamme de granulométrie du plus fin au plus grossier, et de vérifier l'adaptation du dispositif pour ces différents matériaux.

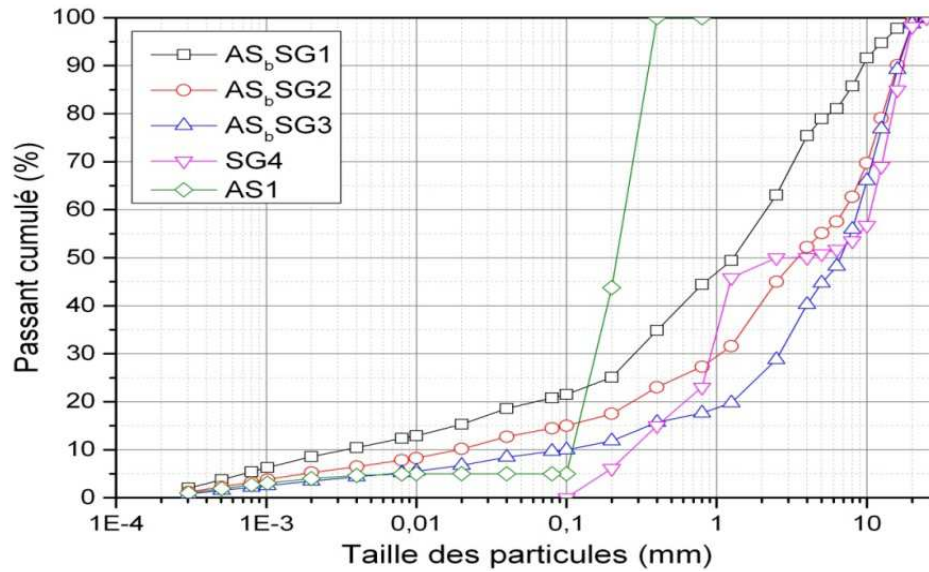


Figure III-1 Courbes granulométriques des matériaux testés dans la configuration horizontale

Les dimensions caractéristiques de ces matériaux et leur classification selon les principaux critères d'érodabilité sont regroupées dans le *Tableau III-2* et le *Tableau III-3* respectivement.

Matériaux	D ₅	D ₁₀	D ₁₅	D ₂₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₉₀	Cu
AS _b SG1	0,001	0,003	0,018	0,061	1,286	2,117	9,401	641,515
AS _b SG2	0,001	0,019	0,100	0,271	3,467	6,985	16,060	375,538
AS _b SG3	0,006	0,100	0,356	1,282	6,623	8,704	16,341	87,040
AS1	0,100	0,108	0,120	0,130	0,216	0,243	0,354	2,250
SG4	0,175	0,268	0,406	0,611	4,000	10,591	17,439	39,519

Tableau III-2 Tableau des dimensions caractéristiques des matériaux testés dans la configuration horizontale

Matériaux	Sherard 1979	Kenney et Lau 1986	Burenkuva1993	Wan&Fell 2008
AS _b SG1	Stable	Instable	Stable	Stable
AS _b SG2	Instable	Instable	Instable	Transition
AS _b SG3	Instable	Instable	Instable	Transition
AS1	Instable	Instable	Stable	Stable
SG4	Stable	Instable	Instable	Stable

Tableau III-3 Classification selon les critères d'érosion : cas des matériaux testés dans la configuration horizontale

III-1-1 Essais typiques

Dans ce qui suit, on va présenter les résultats d'un essai réalisé sur le matériau AS_bSG2. L'essai est réalisé en deux phases, une phase de saturation et une phase d'érosion. L'ensemble des essais réalisés sont regroupés dans le *TableauIII-4*. A cause de certains problèmes rencontrés lors de la réalisation des essais et qu'on va lister plus bas, certains essais sont répétés afin de vérifier les différentes constatations obtenues.

Essai	Matériaux testés	Masse volumique sèche de mise en place (Mg/m ³)
EH1	AS _b SG1	2,1
EH2	AS _b SG2	2,1
EH3	AS _b SG2	2,1
EH4	AS _b SG3	2,1
EH5	AS1	2,1
EH6	AS1	2,1
EH7	SG4	2,1

TableauIII-4 Synthèse des essais réalisés dans la configuration horizontale

On rappelle que l'essai est réalisé sur une conduite construite de deux modules, ce qui correspond à une longueur de 1 m, et un espacement entre les capteurs de pression de 25 cm.

III-1-1-1 Phase de saturation

Comme déjà décrit dans la section II-4-3, pendant cette phase, le matériau est soumis à un écoulement sous une pression constante, et on suit l'évolution des pressions d'écoulement sur les différents capteurs placés sur la conduite, du débit d'écoulement sortant et de la turbidité de l'eau sortante, qui sera par ailleurs un indice de l'initiation de l'érosion.

Pour mieux protéger la pompe de la surchauffe, certains essais sont réalisés par des phases d'arrêt et de reprise. En effet, la pompe assure une pression d'entrée constante, et vu que le débit est faible, voire parfois nul pour certains essais, le maintien de la pression désirée peut

conduire à surchauffer le mécanisme de la pompe et l'endommager. A chaque reprise de l'essai, on augmente la pression sur la pompe progressivement jusqu'à la valeur désirée qui sera ensuite maintenue.

Dans ce qui suit, on montre l'évolution de la phase de saturation pour le matériau AS_bSG2 . Les matériaux testés dans cette configuration sont mis dans la conduite à une masse volumique sèche de $2,1 \text{ Mg/m}^3$. La pression de saturation est de 40 kPa pour ce matériau. La *Figure III-2* montre l'évolution au cours du temps des pressions d'écoulement sur les 4 capteurs le long de la conduite. Pour rappel le 1^{er} capteur C1 et le 4^{ème} C4 sont placés à une distance de 12,5 cm des deux extrémités de la conduite, et les quatre capteurs sont espacés de 25 cm.

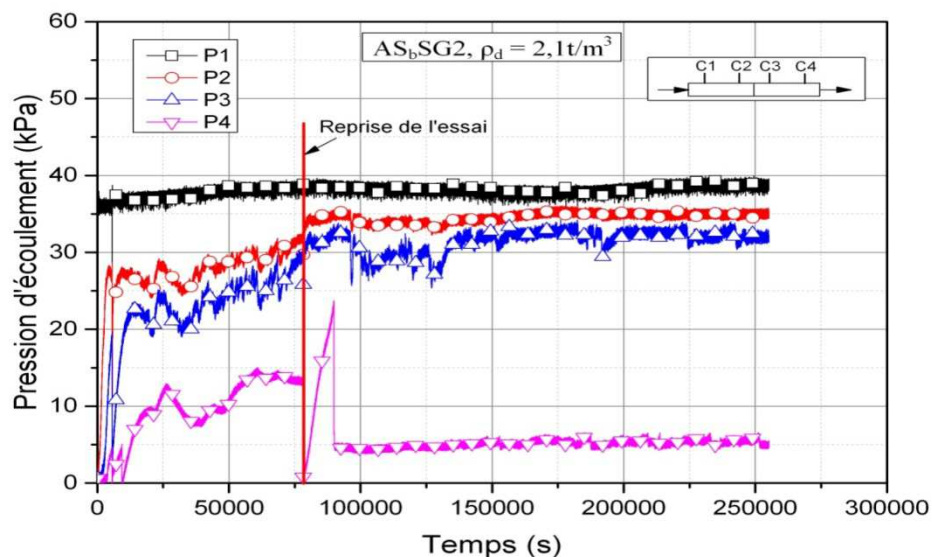


Figure III-2 Evolution temporelle de la pression d'écoulement le long de la conduite, pendant la phase de saturation du matériau AS_bSG2 (EH2)

La phase de saturation est réalisée sur une durée de plus de 250000 secondes, ce qui correspond à environ 3 jours. Sur le capteur C1, le plus à l'amont, la pression d'écoulement augmente très vite pour atteindre une valeur de pression très proche de celle imposée par la pompe. En effet, on enregistre une valeur de 38 kPa pour une pression de pompe de 40 kPa, et cette pression reste constante sur toute la durée de cette phase. Cette augmentation rapide est due notamment à la position du capteur, le capteur C1 est proche de l'amont et donc il réagit plus vite à la pression appliquée. Sur les capteurs C2 et C3, les pressions augmentent progressivement puis se stabilisent, après 80000 secondes, ce qui correspond à environ 20 h, à une valeur de 34 kPa pour le capteur C2 et 32 kPa pour le capteur C3. Pour la pression

mesurée sur le capteur C4, la tendance est la même que celles observées sur les capteurs C2 et C3, mais avec une amplitude plus faible. En effet, la pression au niveau du capteur 4 augmente progressivement pour atteindre la valeur de 14 kPa, puis à la reprise de l'essai, la pression augmente continuellement jusqu'à une valeur de 24 kPa, puis elle chute brusquement en purgeant le capteur à la reprise de l'essai pour se stabiliser à une pression de 6 kPa jusqu'à l'arrêt de l'essai.

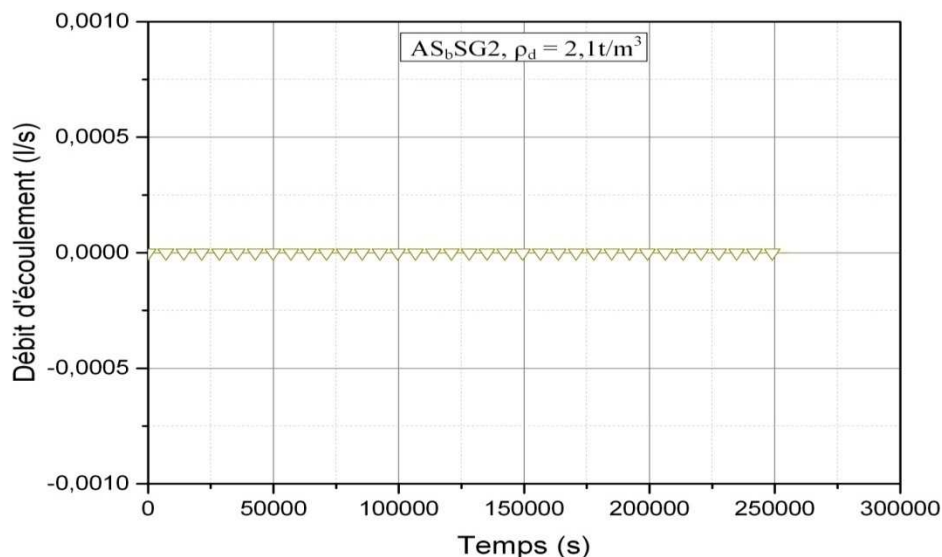


Figure III-3 Evolution au cours de temps de la turbidité de l'eau à la sortie de la conduite pendant la phase de saturation du matériau AS_bSG2 (EH2)

En même temps que l'évolution des pressions le long de la conduite on suit également l'évolution du débit d'écoulement de l'eau sortante de la conduite à l'aide de la balance installée à l'aval de la conduite. La *Figure III-3* montre la variation de débit d'écoulement sortant à travers l'échantillon dans la conduite au cours de temps pendant la phase de saturation. On remarque qu'au cours de cette phase la valeur du débit reste très faible pour être mesurée même par la balance malgré sa durée importante (72 heures sans interruption).

La courbe de l'évolution de la turbidité au cours de temps est présentée sur la *Figure III-4*. Au début de la saturation, le turbidimètre affiche une valeur de 15 NTU, qui correspond, pratiquement, à la valeur de la turbidité de l'eau au démontage de la conduite on a trouvé que le matériau érodé est un mélange d'argile, de C10 et de sable pour lesquels il n'était pas possible d'étalonner le turbidimètre. Lors de la phase d'augmentation des pressions sur les capteurs 2 et 3, on observe une faible augmentation de la turbidité pour atteindre un pic de 250 NTU après 23000 secondes (6 heures environ), puis cette turbidité diminue pour se

stabiliser à une valeur résiduelle de 20 NTU (turbidité de l'eau) à partir de 65000 secondes (14 heures environ), et elle reste constante jusqu'à l'arrêt de cette phase.

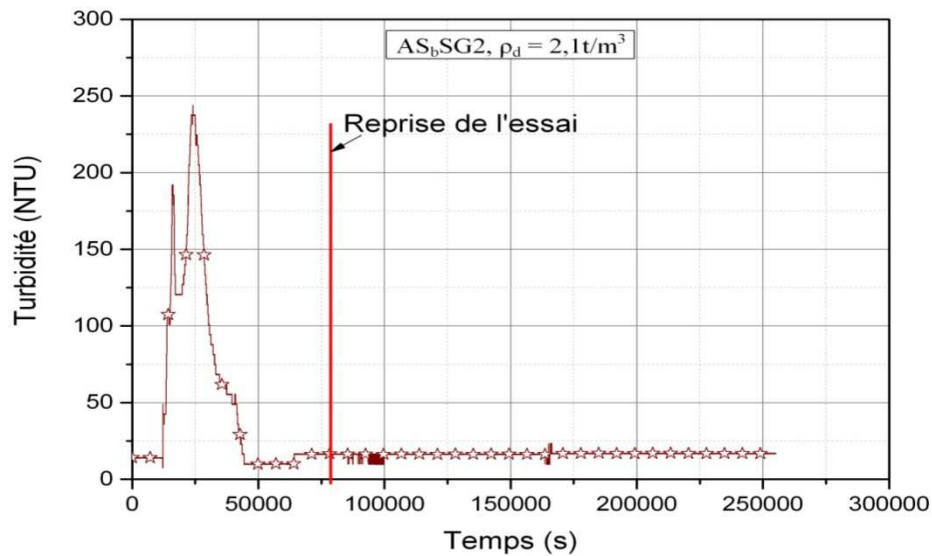


Figure III-4 Evolution au cours de temps de la turbidité pendant la phase de saturation du matériau AS_bSG2 (EH2)

Le débit d'écoulement à la sortie de la conduite étant nul pendant toute la phase de saturation, on peut dire que le sol dans la conduite n'est pas saturé malgré une durée importante d'application de la pression de saturation à une valeur de 40 kPa (valeur assez élevée pour la phase de saturation). Pour tenter d'améliorer la saturation du sol dans la conduite, on a augmenté la pression appliquée par la pompe. Cependant, l'augmentation de la pression sur la pompe peut déclencher un départ prématuré de certaines particules du sol dans la conduite avant sa saturation totale. C'est pour cette raison que la suite de la phase de saturation sera représentée dans la partie suivante (phase d'érosion).

III-1-1-2 Phase d'érosion

La deuxième phase de l'essai est la phase d'érosion du sol dans la conduite. Cette phase consiste à appliquer des paliers croissants de pression et de suivre l'évolution des différents paramètres, à savoir les pressions d'écoulement le long de la conduite, le débit d'écoulement et la turbidité de l'eau sortant de la conduite.

Pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG2 la pression appliquée est incrémentée par paliers maintenus pour une certaine durée. Les pressions appliquées dans cet essai sont 50 kPa, 80 kPa, 100 kPa, 120 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 250 kPa, 300 kPa, 350 kPa, 400 kPa et 500

kPa. La durée de l'essai est de 70000 secondes (20 heures environ). Pour protéger la pompe de la surchauffe (on l'a constaté notamment pendant la phase de saturation) l'essai est réalisé en 3 phases (à $t=0$ s, $t=20500$ s et à $t=52500$ s). A chaque reprise de l'essai, on augmente la pression sur la pompe progressivement jusqu'à la valeur désirée qui sera maintenue constante pour une durée arbitraire.

La *Figure III-5* représente l'évolution au cours du temps de la pression d'écoulement sur les quatre capteurs installés sur la conduite ainsi que de la pression appliquée. Les courbes d'évolution du débit d'écoulement et de la turbidité sont regroupées sur la *Figure III-6*.

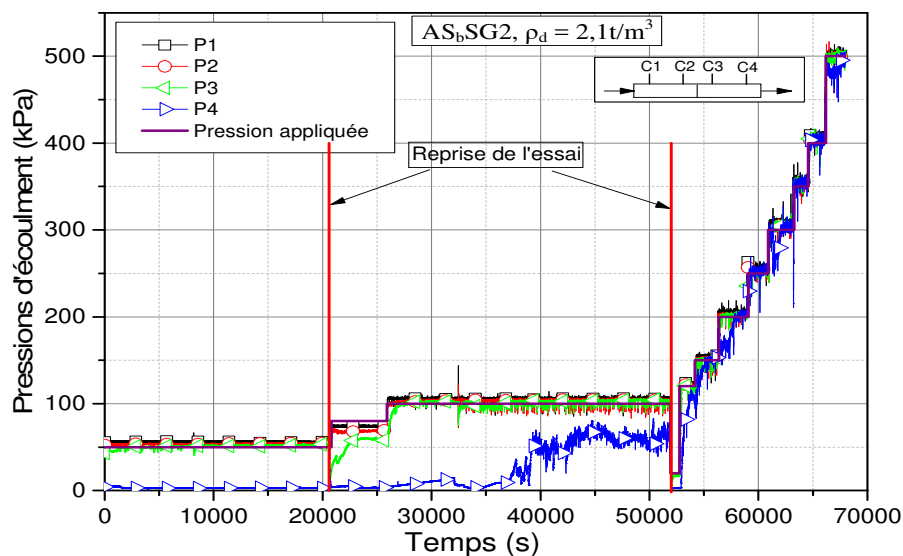


Figure III-5 Evolution au cours de temps de la pression d'écoulement le long de la conduite, pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG2 (EH2)

A l'application du premier palier de pression sur la pompe (50 kPa), les pressions sur les capteurs C1, C2 et C3 augmentent rapidement pour atteindre la valeur de cette pression appliquée. Par contre, la pression sur le capteur C4 reste faible et inchangée, autour de 4 kPa. Cette pression est maintenue pendant 20000 secondes (5h30). Sur la courbe de débit, on constate que le débit pour le premier palier de pression (50 kPa) est nul, comme pour le débit de la phase de saturation, et que la turbidité reste très faible et constante pendant toute la durée de ce palier comme montré sur la *Figure III-6*. Les paliers de pression qui suivent sont appliqués sur des durées plus courtes.

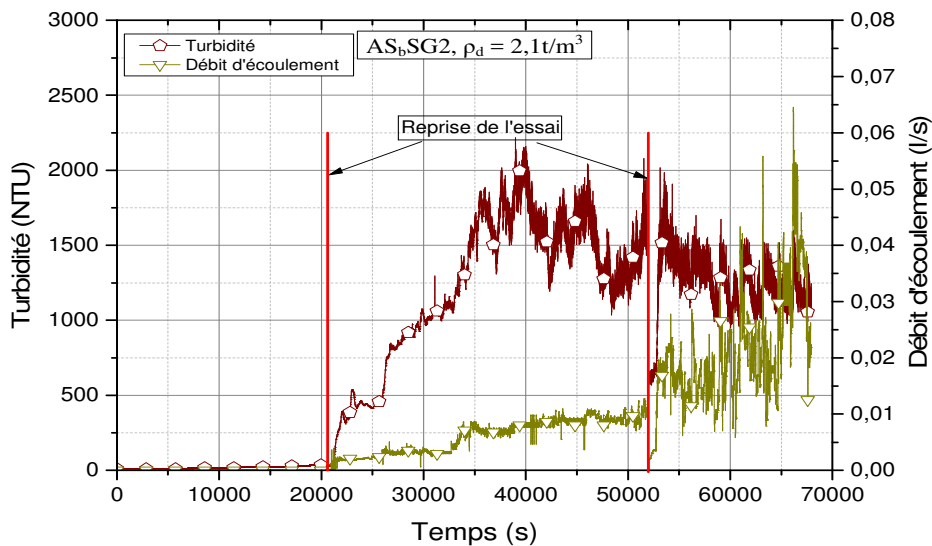


Figure III-6 Evolution au cours de temps du débit d'écoulement sortant et de la turbidité pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG2 (EH2)

Pour la pression appliquée de 80 kPa, l'évolution de la pression sur les quatre capteurs reste la même que pour le palier à 50 kPa. En effet, les pressions mesurées sur les capteurs C1, C2 et C3 restent proches de la pression appliquée, et celle au capteur 4 est toujours faible. Par contre, le débit d'écoulement croît faiblement pour atteindre des valeurs entre 0,003 l/s et 0,004 l/s, et à cela correspond à une augmentation de la turbidité pour atteindre une valeur de 450 NTU. On note que le matériau érodé récupéré à la fin de l'essai est un mélange de Speswhite, de C10 et de sable fin, et qu'il est très compliqué d'étalonner le turbidimètre avec ce type de mélange.

Lors du palier suivant à 100 kPa, on observe toujours que pour les capteurs 1 à 3, les pressions mesurées sont très proches de la pression appliquée sur la pompe, et la pression au niveau du capteur C4 est initialement faible, puis augmente progressivement après 10000 secondes (2h45) pour se stabiliser à une pression de 60 kPa. Cette augmentation correspond à un accroissement du débit d'écoulement qui atteint une valeur de 0,008 l/s, et une augmentation de la turbidité qui atteint des valeurs de 2000 NTU.

Au-delà de 100 kPa, les paliers de pression sont appliqués pour des durées de 45 min chacun. Les pressions sur les 4 capteurs affichent des valeurs très proches des pressions appliquées par la pompe (Figure III-5). Le débit augmente à chaque application du palier de pression, puis reste constant jusqu'à l'application du palier suivant. Le débit passe de 0,008 l/s pour la

pression de 100 kPa à 0,05 l/s pour la pression de 500 kPa. Sur la courbe de la turbidité, on constate que la turbidité évolue faiblement pour des valeurs autour de 1200 NTU.

Sur les courbes de l'évolution des pressions, on a constaté que les quatre capteurs mesurent des valeurs de pressions très proches de la pression appliquée, même pour une pression de 500 kPa qui correspond à un gradient de 50 pour un échantillon de 1m de longueur. Or les valeurs de pression très proches donnent un gradient hydraulique très faible (voire nul) ce qui mène à poser des questions sur la représentativité de ces pressions mesurées. D'autres anomalies sont constatées et sont regroupées ci-dessous.

III-1-2 Limites de la configuration horizontale

L'observation visuelle (prise de photos) pendant la réalisation de cet essai a permis de constater certaines anomalies qui sont listées ci-dessous :

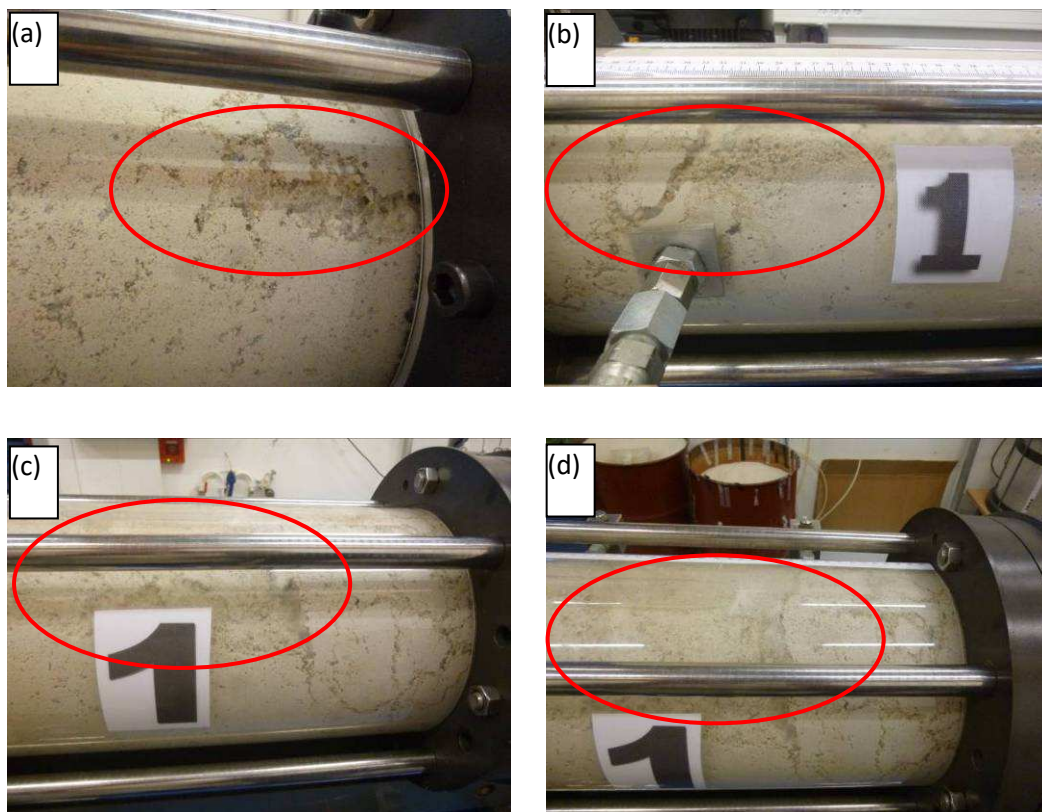


Figure III-7 Photos prises au cours de la phase d'érosion de l'essai sur le matériau AS_pSG2 : (a) et (b) Chemins préférentiels entre le sol et la paroi de la conduite; (c) et (d) Effondrement et création d'un vide sur la partie supérieure du sol.

- Création de chemins préférentiels entre la paroi de la conduite et le sol dans la conduite, notamment à l'entrée de la conduite (module 1), comme sur la *Figure III-7 a et b*.

- Effondrement de la partie supérieure de l'échantillon surtout du côté amont, et création d'un vide, ce qui fait apparaître des hétérogénéités dans le sol et favorise les écoulements préférentiels, comme sur *Figure III-7 c et d*.
- Les vides qui se créent sur la partie supérieure se retrouvent aussi lors du démontage de la conduite comme sur la *Figure III-8 a et b*. Ces vides qui se créent peuvent s'expliquer par l'effondrement du sol à sa mise en eau.
- Au démontage de la conduite, on constate également que le sol érodé, ou au moins une partie de ce sol, est déposé au fond de la conduite près de la sortie, comme on peut le voir sur la *Figure III-8 c et d*.

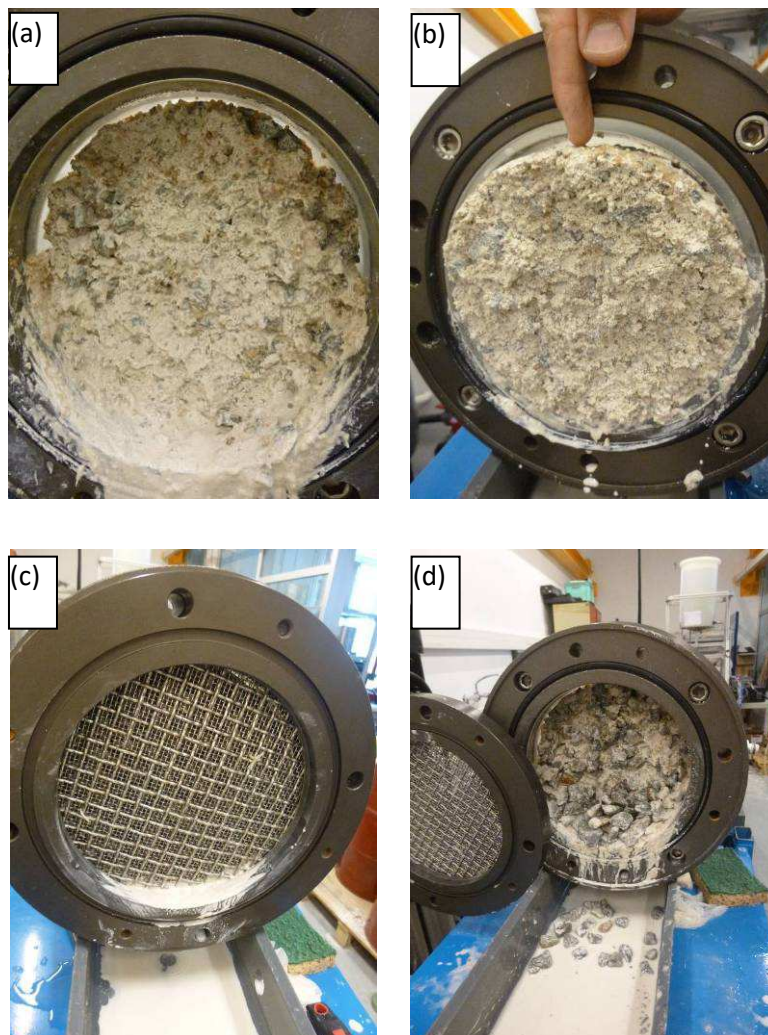


Figure III-8 Photos prises au cours de démontage de l'essai EH2 sur le matériau AS_pSG2 : (a) et (b) Illustration au démontage du vide créé sur la partie supérieure de la conduite; (c) et (d) Dépôt du sol érodé dans le fond du module aval.

- De même, une quantité des particules érodées s'est déposée dans le cône aval, sur le turbidimètre ainsi que dans la conduite située à l'aval du turbidimètre, comme sur la *Figure III-9*. Ces constatations qui peuvent expliquer les courbes de la turbidité de la *Figure III-6*, indiquent que les mesures de turbidité sont erronées, et qu'elles ne correspondent pas à la vraie quantité de matériau érodé.

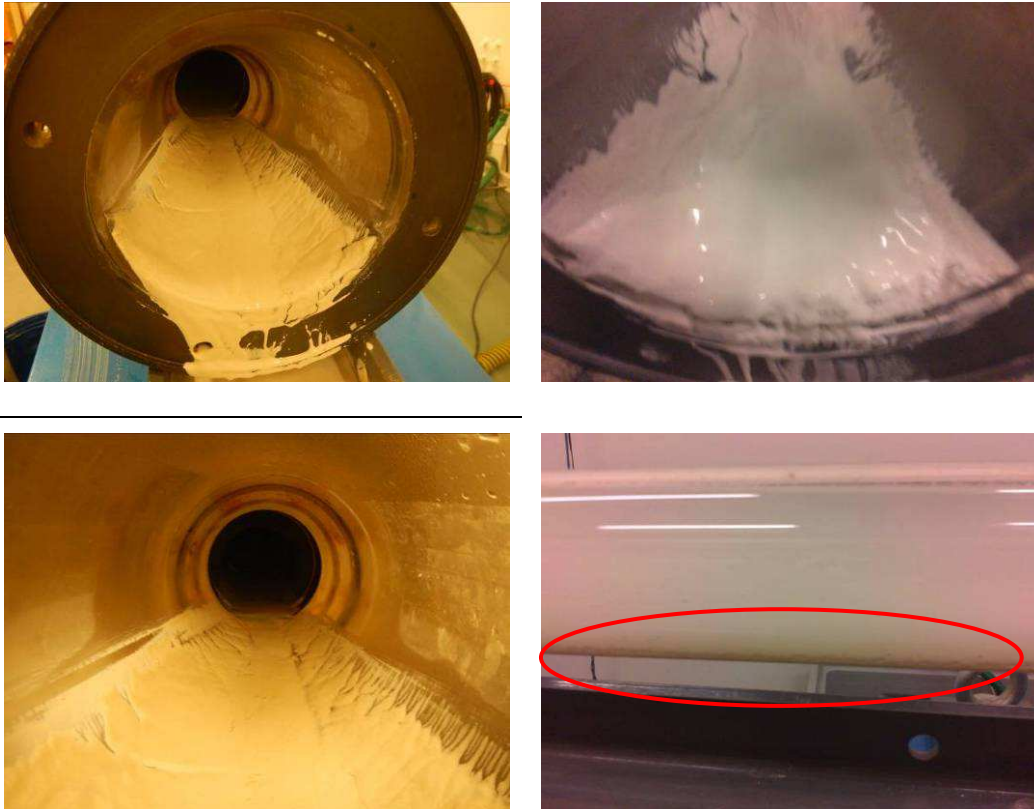


Figure III-9 Dépôt de particules fines érodées sur le cône aval, le turbidimètre et dans la conduite pour l'essai EH2

A ces problèmes listés, il faut ajouter celui rencontré dans la mesure des pressions sur les différents capteurs placés sur la conduite. En fait, dans un écoulement d'eau les pressions diminuent dans le sens d'écoulement. Pour notre configuration, l'écoulement étant dirigé du capteur 1 au capteur 4, les pressions doivent diminuer dans ce même sens. Or sur les deux premières parties de la courbe d'évolution des pressions (*Figure III-5*), pour les pressions appliquées inférieures à 100 kPa on voit que les pressions sur les capteurs 1, 2 et 3 sont égales à la pression appliquée, ce qui mène à dire qu'il n'y pas d'écoulement dans cette partie du sol, sauf que l'eau sort de la conduite, où on mesure un débit d'eau autour de 0,01 l/s. Ces deux mesures sont contradictoires. Pour des pressions appliquées supérieures à 100 kPa, après 50000secondes, on voit que la pression 4 rejoint aussi les 3 autres pressions, ce qui veut dire

qu'il y a un bouchon qui se forme après le capteur 4, sauf qu'on mesure toujours un débit d'eau (supérieur à 0,02 l/s), ce qui reste contradictoire. En effet, ceci peut s'expliquer par la création des écoulements préférentiels sur les parois de la conduite, où le film d'eau est mis sous pression indépendamment de ce qui se passe dans le massif de sol.

Pour confirmer les observations précédentes, nous avons réalisé un autre essai sur le matériau AS_bSG3. De la même façon que l'essai sur le matériau AS_bSG2, l'essai est réalisé en trois phases afin de protéger la pompe de surpression. Les courbes d'évolution des pressions d'eau sur les différents capteurs installés sur la conduite sont regroupées sur la *Figure III-10*. On remarque sur ces courbes que les pressions mesurées aux différents capteurs se rejoignent tous à la valeur de la pression appliquée sur la pompe.

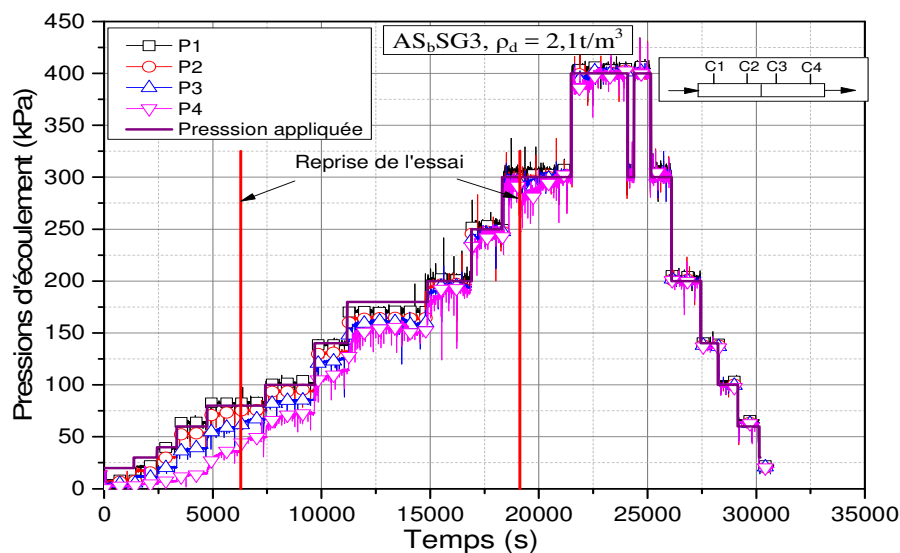


Figure III-10 Evolution de la pression d'écoulement à différents niveaux de la conduite, pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG3 (EH3)

Hydrauliquement, cela veut dire qu'il y a un bouchon qui s'est formé à l'aval des capteurs, notamment du quatrième capteur. Sauf que si on regarde la courbe de débit enregistré dans cet essai (*Figure III-11*), on voit bien qu'il y a un débit d'écoulement entre 0,05 l/s et 0,15 l/s. On remarque également que le débit diminue au cours de l'essai, ce qui peut être dû à un probable dépôt de fines érodées par l'écoulement à l'aval du capteur 4 notamment, comme on l'a déjà montré sur la *Figure III-8c* et *d*, mais cela ne justifie pas les mesures de pression obtenues.

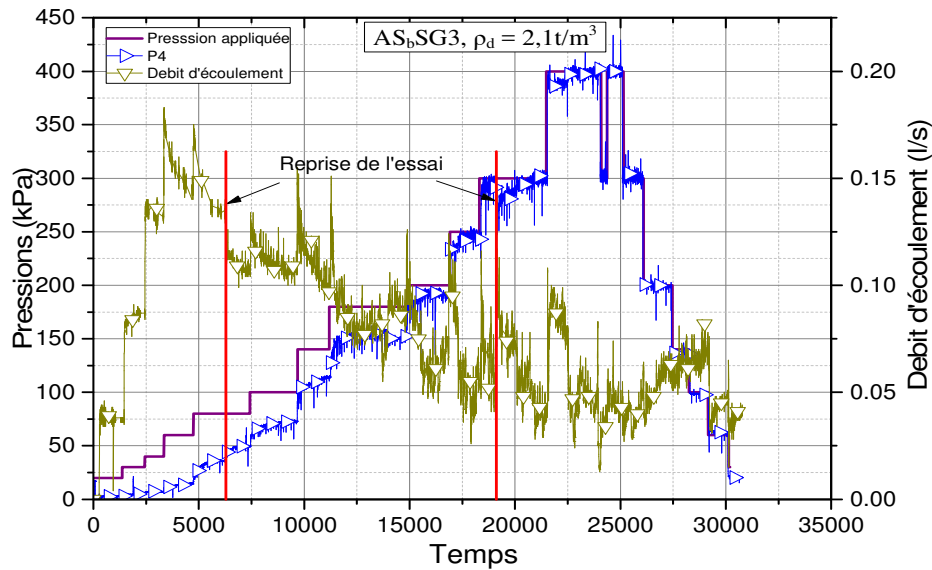


Figure III-11 Evolution du débit d'écoulement en fonction de la pression appliquée pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG3 (EH3)

En termes de turbidité enregistrée sur le matériau AS_bSG3, celle-ci augmente avec l'augmentation de la pression de la pompe. De plus, on voit apparaître des pics sur la courbe de turbidité, et on mesure une valeur résiduelle autour de 40 NTU comme on peut le voir sur la *Figure III-12*. Cette dernière ne correspond pas tout à fait à la turbidité de l'eau (entre 10 et 20 NTU), ce qui indique qu'il y a probablement un dépôt de sol érodé au niveau du turbidimètre.

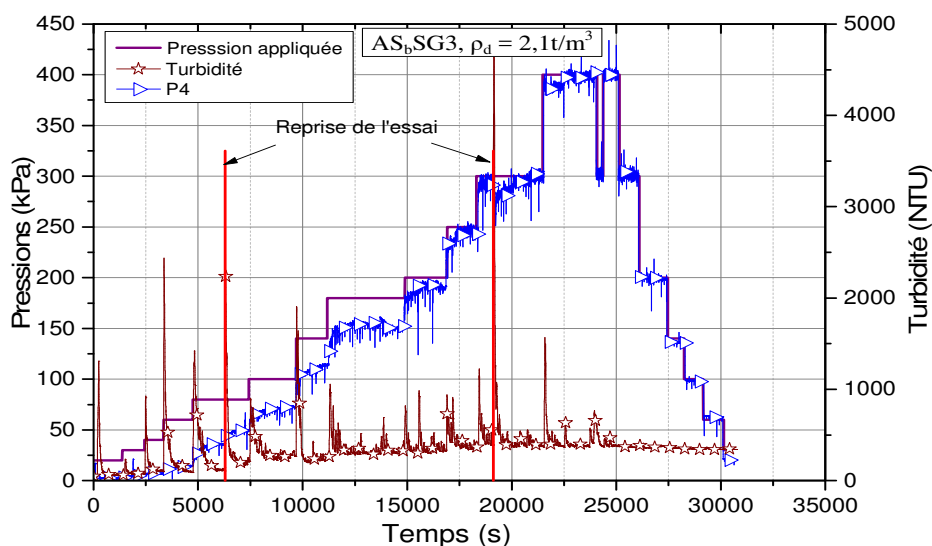


Figure III-12 Evolution de la turbidité de l'eau sortante en fonction de la pression appliquée pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG3 (EH3)

Les problèmes rencontrés dans les mesures des pressions sont peut-être dus dans ce cas aussi à la création d'écoulements préférentiels sur les parois de la conduite. Ces derniers induisent la création d'un film d'eau qui se met sous pression entre la paroi de la conduite et le sol adjacent indépendamment de ce qui se passe à l'intérieur du sol, et qui peut être couplé avec la diminution de la perméabilité par dépôt de sol érodé, notamment après le capteur 4. Cette diminution peut expliquer la diminution du débit sur la *Figure III-11*. La non-saturation de ce type de sols peut être due à la présence d'importante quantité de fines dans leur composition, notamment la kaolinite et le C10 (supérieure à 10 %), qui conduit à une faible perméabilité du sol. L'eau trouve alors un chemin plus facile sur les parois lisses de la conduite où sont installés les capteurs de pression. Vu que l'essai n'a pas donné des résultats concluants par rapport à l'érosion de ces sols testés, on n'a pas fait d'investigations plus approfondies sur l'évolution des paramètres mesurés et l'état de matériau testé. De plus, même à la fin de la phase d'érosion, on n'a toujours pas réussi à saturer la totalité de la conduite comme on le voit sur le niveau d'eau dans le cône amont de la *Figure III-13* sur laquelle on voit qu'une grande partie du cône amont n'est pas saturée.



Figure III-13 Vue du défaut de saturation même après la fin de phase d'érosion

Pour vérifier ces hypothèses, on a réalisé un essai sur un matériau simplifié AS1 composé de 95% de sable fin HN34 et 5% de Speswhite. Pour ce matériau la couche filtrante est constituée de sable grossier 2/4, et la grille utilisée a une ouverture de 2 mm. On présente brièvement les résultats obtenus.

III-1-3 Phase de saturation

Les pressions appliquées sont 20 kPa, 30 kPa puis 50 kPa sur une durée totale d'essai 450000 secondes (soit 5 jours).

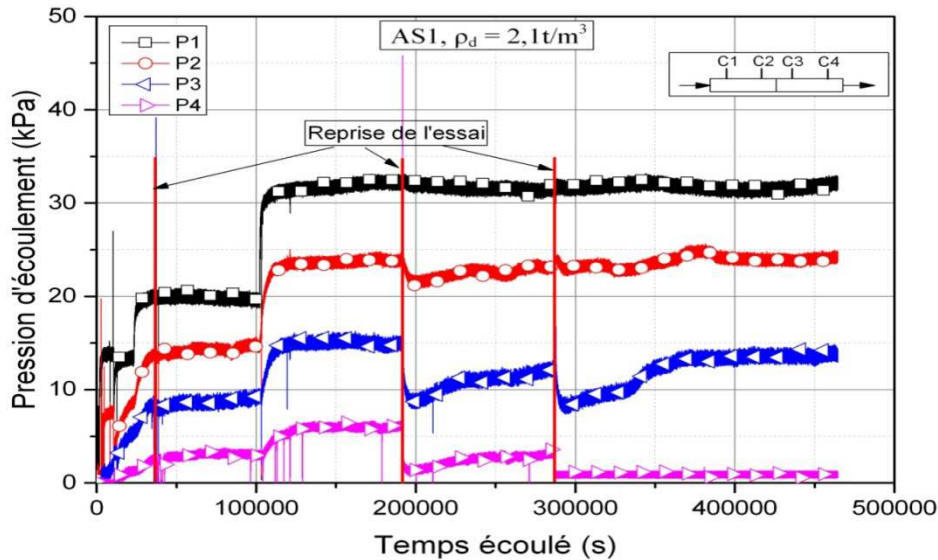


Figure III-14 Evolution des pressions sur les 4 capteurs pendant la phase de la saturation du matériau AS1 (EH5)

Les courbes d'évolution de pression le long de la conduite sont regroupées sur la *Figure III-14*. On remarque une évolution progressive des pressions au niveau des 4 capteurs, avec des artefacts plus ou moins prononcés sur les capteurs C3 et C4 à chaque reprise de l'essai. À la fin de phase de saturation à la pression 50 kPa, on enregistre 32 kPa sur le capteur C1, 23 kPa sur le capteur C2, 13 kPa sur le capteur C3, et 1 kPa sur le capteur C4. Ce qui correspond à un gradient moyen de 4 (C1- C4).

De même que pour l'essai sur AS_bSG2, malgré la durée importante de la phase de saturation (5 jours) et les pressions appliquées, on n'arrive toujours pas à saturer le matériau dans la conduite. Le débit d'écoulement reste toujours nul (non mesurable sur la balance) pendant toute la durée de cette phase de saturation, comme illustré sur la courbe de débit d'écoulement sur la *Figure III-15*.

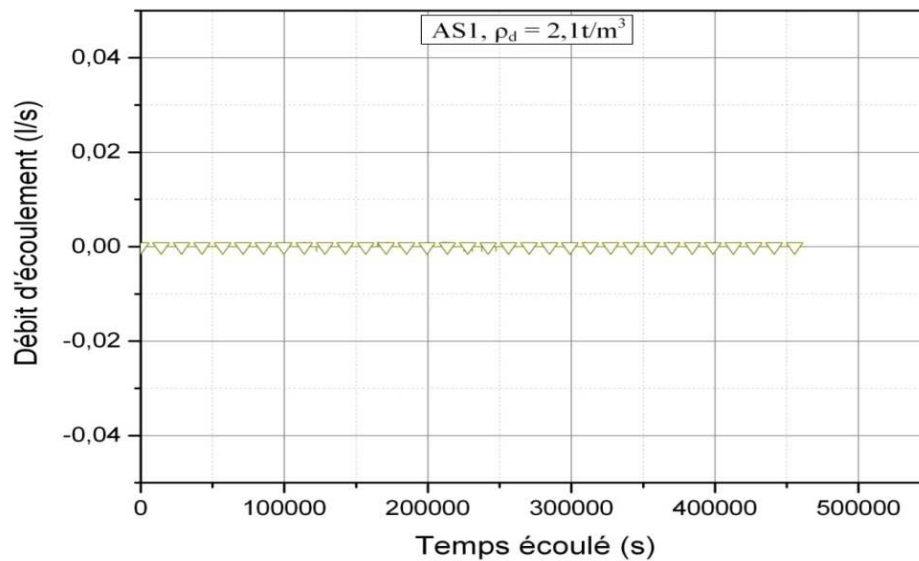


Figure III-15 Evolution du débit d'écoulement au cours de la phase de la saturation du matériau AS1 (EH5)

III-1-4 Phase d'érosion

Vu qu'on n'a pas réussi à saturer le sol dans la conduite avec les pressions déjà appliquées (20 kPa, 30 kPa et 50 kPa), on a augmenté la pression appliquée sur la pompe. L'augmentation de la pression appliquée pouvant déclencher le phénomène d'érosion, la continuité de la phase de saturation est représentée dans les mêmes graphes que la phase d'érosion.

La phase d'érosion est réalisée en 4 phases arrêt-reprise, et les pressions appliquées vont de 50 kPa jusqu'à 400 kPa par paliers de 50 kPa, puis par paliers de 100 kPa jusqu'à 600 kPa.

L'évolution de la pression d'écoulement sur les 4 capteurs est représentée sur la *Figure III-16*. L'évolution du débit d'écoulement ainsi que celle de la turbidité sont présentées sur la *Figure III-17*.

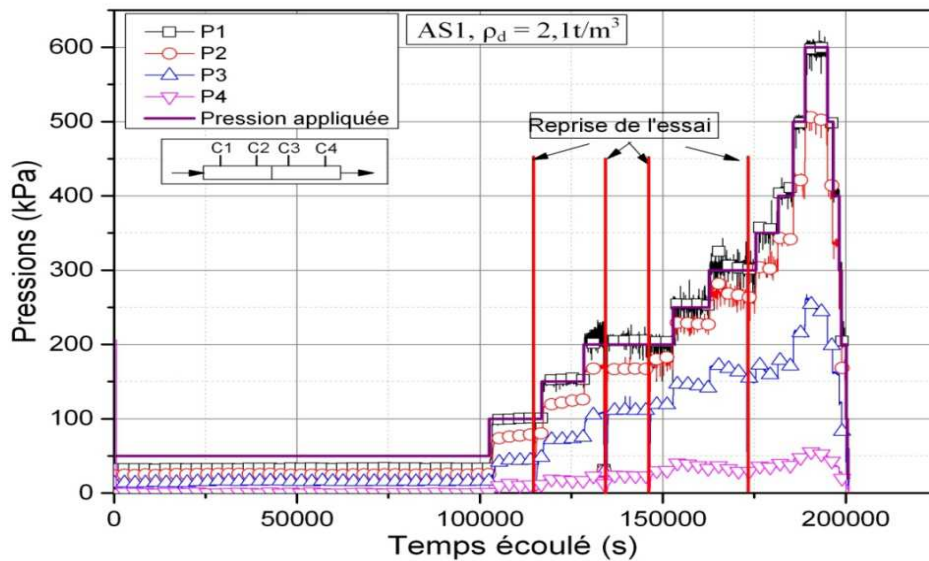


Figure III-16 Evolution au cours de temps de la pression d'écoulement à différents niveaux de la conduite, pendant la phase d'érosion du matériau AS1 (EH5)

La pression appliquée à 50 kPa est maintenue pour 120000 secondes (34 heures environ), pour tenter de saturer sans déclencher l'érosion, mais le débit reste toujours nul. En augmentant la pression sur la pompe afin de saturer l'échantillon on observe en parallèle une augmentation de débit d'écoulement et de la turbidité.

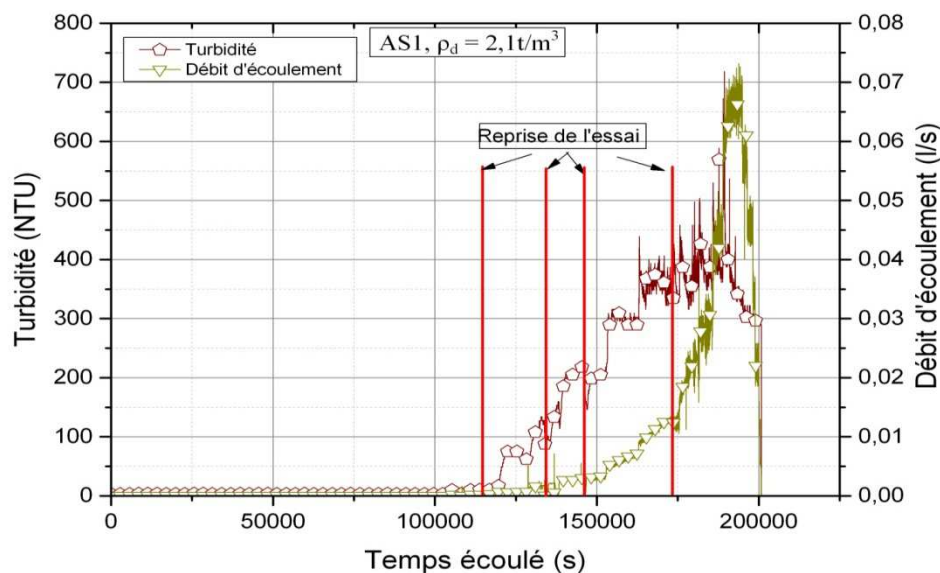
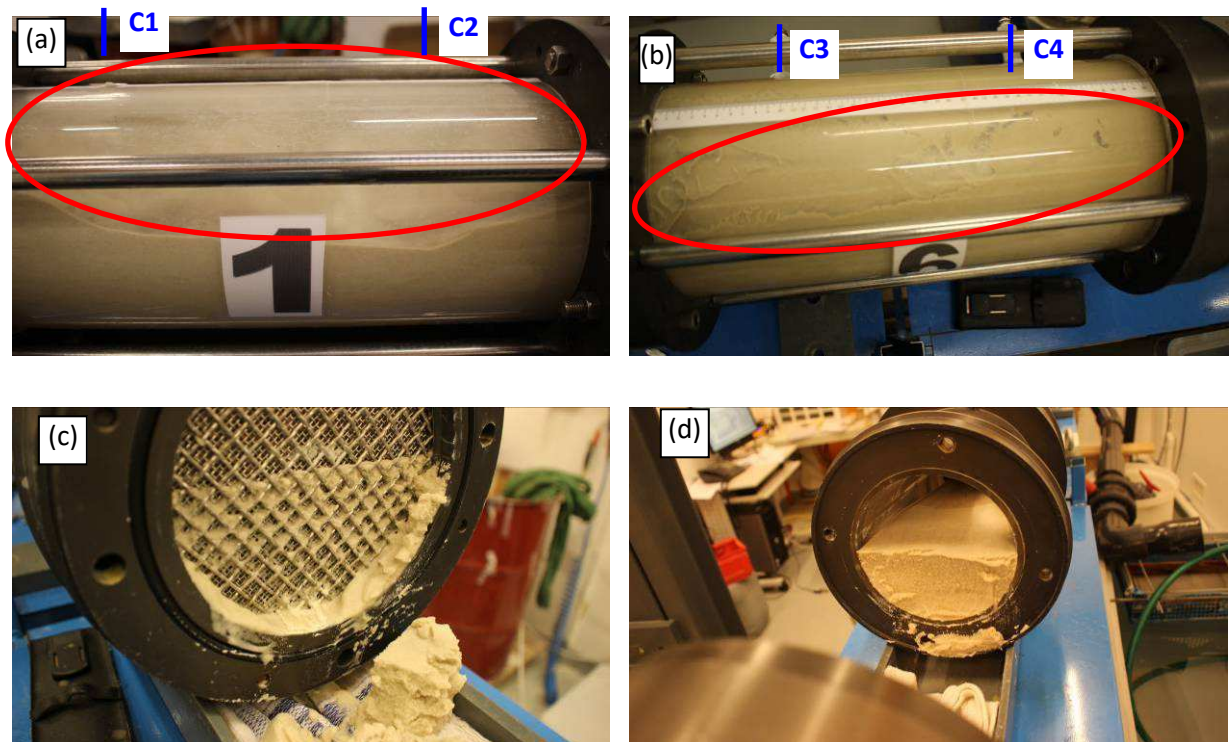


Figure III-17 Evolution au cours de temps de la turbidité et du débit d'écoulement pendant la phase d'érosion du matériau AS1 (EH5)

Sur les courbes d'évolution des pressions (*Figure III-16*), on remarque qu'au fur et à mesure de l'accroissement de la pression de la pompe le gradient de pression entre les capteurs C1 et C2 diminue par rapport aux gradients de pression entre les capteurs C2 et C3, ou de C3 et C4. Cela peut s'expliquer par l'effondrement de sol sur sa partie supérieure entre ces deux capteurs C1 et C2, notamment sur la partie supérieure de l'échantillon comme on le voit sur la *Figure III-18a*. Sur la *Figure III-18b*. On remarque aussi un départ de sol sur la partie supérieure entre les capteurs C2, C3 et C4 avec des quantités moins importantes que celles entre les capteurs C1 et C2.



**Figure III-18 Quelques photos prises au cours de la phase d'érosion du matériau AS1 :
(a) et (b) : Effondrement dans la partie supérieure du sol dans la conduite; (c) et (d)
Dépôt du sol érodé sur le cône aval (EH5)**

Les valeurs de la turbidité sont représentées en NTU, car il est difficile d'étalonner le turbidimètre avec un mélange de sable et de kaolinite. En effet, comme les particules sableuses décantent plus vite que les particules argileuses, on n'obtient pas un mélange homogène et la mesure n'est pas stable.

Sur la courbe d'évolution de la turbidité (*Figure III-17*) on remarque que la turbidité augmente à chaque palier de la pression appliquée jusqu'à atteindre une valeur stabilisée pendant toute la durée de ce palier. Or habituellement, la turbidité augmente avec

l'augmentation de la pression appliquée, ce qui correspond à l'érosion d'une partie des particules érodables du sol testé, puis elle diminue au cours de temps du fait que l'on érode de moins en moins ces particules. Dans cet essai la turbidité reste constante parce qu'une grande quantité de matériaux érodés se dépose devant et dans le turbidimètre et dans le circuit avant de la conduite, comme on le voit sur la *Figure III-18c* et la *Figure III-18d*, ce qui peut même perturber les mesures de pression et de débit d'écoulement.

Pour conclure sur la configuration horizontale de la conduite, sachant que cette configuration est la plus proche des écoulements parasites d'eau qui peuvent se produire à travers les structures des ouvrages hydrauliques, ou leur fondation, nous avons réalisé 7 essais sur 5 sols différents, qui comportent à la fois des matériaux très fins (kaolinite et sable broyé C10), des sables et des graviers. Le *Tableau III-5* regroupe les essais réalisés en mentionnant les problèmes rencontrés pour chaque essai.

Bien que ces essais puissent être interprétés partiellement, au moins qualitativement, notamment le fait de départ des fines à chaque augmentation de la pression appliquée, qui correspond à l'érosion des petites particules de sol, on n'a pas pu saturer le sol dans la conduite, du moins sans déclencher l'érosion du sol en même temps, et même dans ce cas le sol reste partiellement saturé.

Il faut ajouter dans le cas des matériaux contenant de la Speswhite et du C10, la difficulté de mesurer la variation de la pression d'écoulement le long de la conduite, qui peut être due à la création d'un film d'eau sur la paroi de la conduite qui se met sous pression indépendamment de ce qui se passe à l'intérieur du sol dans la conduite, ce qui peut expliquer le fait que les pressions sur les différents capteurs soient très proches voir égales à la pression appliquée sur la pompe malgré l'écoulement d'eau.

On a aussi rencontré un problème de dépôt de fines érodées à l'aval de la conduite, notamment sur le cône aval et sur le turbidimètre, ce qui conduit à une interprétation erronée en termes de quantité des particules fines érodées.

En raison de l'ensemble des problèmes rencontrés, on a proposé de changer la configuration pour passer à un écoulement vertical descendant.

Essai	Matériaux testés	Problèmes constatés
EH1	AS _b SG1	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de saturation • Vide sur la partie supérieure du côté aval
EH2	AS _b SG2	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de saturation • Problème de mesure de pressions • Dépôt des fines érodées en aval de la conduite (turbidimètre)
EH3	AS _b SG2	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de saturation • Problème de mesure de pressions • Dépôt des fines érodées en aval de la conduite (turbidimètre)
EH4	AS _b SG3	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de saturation • Problème de mesure de pressions • Dépôt des fines érodées en aval de la conduite (turbidimètre)
EH5	AS1	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de saturation • Problème de mesure de pressions • Dépôt des fines érodées en aval de la conduite (turbidimètre)
EH6	AS1	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de saturation • Problème de mesure de pressions • Dépôt des fines érodées en aval de la conduite (turbidimètre)
EH7	SG4	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de saturation • Dépôt des fines érodées en aval de la conduite (turbidimètre)

Tableau III-5 Synthèse des essais réalisés avec les problèmes rencontrés dans la configuration horizontale

III-2 Configuration verticale

Les essais dans cette configuration se déroulent en deux phases comme pour la configuration horizontale. La saturation se fait par un écoulement dirigé verticalement du bas vers le haut après injection de CO₂, ce procédé permet d'améliorer la saturation de sol. Pendant la phase d'érosion, l'écoulement est dirigé lui aussi verticalement, mais du haut vers le bas, ce qui permet de s'affranchir du problème de dépôt des particules devant le turbidimètre ou dans la conduite.

III-2-1 Essais de validation

Le premier essai de validation de la configuration verticale est réalisé sur le matériau AS_bSG3 déjà testé dans la configuration horizontale. Pour l'essai de validation, on présente particulièrement les résultats de la phase d'érosion. Les pressions sont appliquées par paliers de 20 kPa à 350 kPa. Sur les courbes de pression regroupées sur la *Figure III-19*, on constate que dès le début de l'essai les pressions aux capteurs 1 et 2 sont égales à la pression appliquée sur la pompe, et à partir de 35000 secondes d'essai c'est la pression au capteur 3 qui remonte pour atteindre elle aussi la valeur de la pression appliquée sur la pompe. Ceci semble indiquer qu'on ne s'est toujours pas affranchi du problème de mesure des pressions sur les différents capteurs placés le long de la conduite.

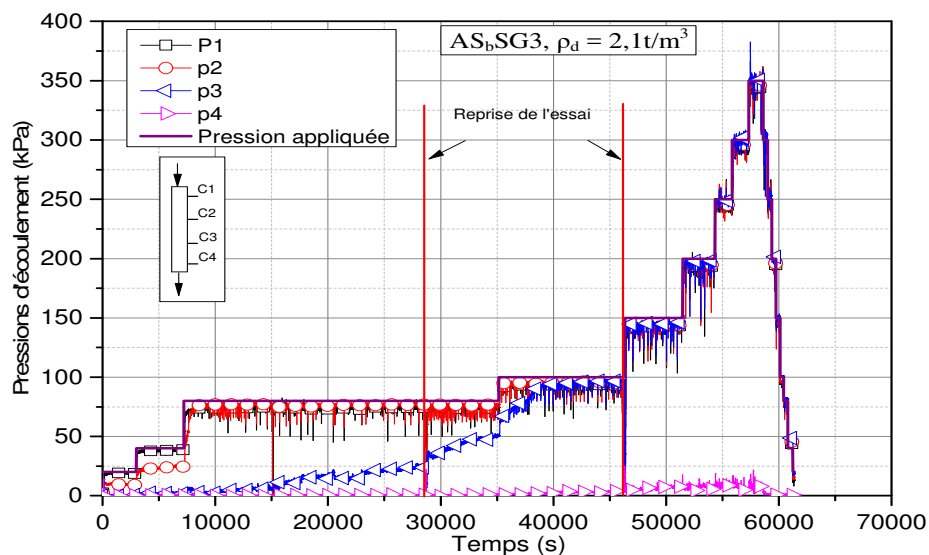


Figure III-19 Evolution de la pression d'écoulement sur les quatre capteurs le long de la conduite en fonction de la pression appliquée pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG3

L'évolution temporelle du débit d'écoulement correspondant à cet essai est représentée sur la *Figure III-20*. On remarque que l'évolution du débit est aléatoire. Le débit passe de 0,02 l/s, pour la pression de 20 kPa pour diminuer à 0,01 l/s pour la pression de 100 kPa, puis augmente pour atteindre 0,025 l/s pour la pression de 350 kPa. Sur la courbe de la turbidité (*Figure III-21*), l'augmentation de celle-ci correspond à l'application de la pression sur la pompe, puis cette turbidité diminue progressivement et qui augmente encore une fois à l'application du palier suivant.

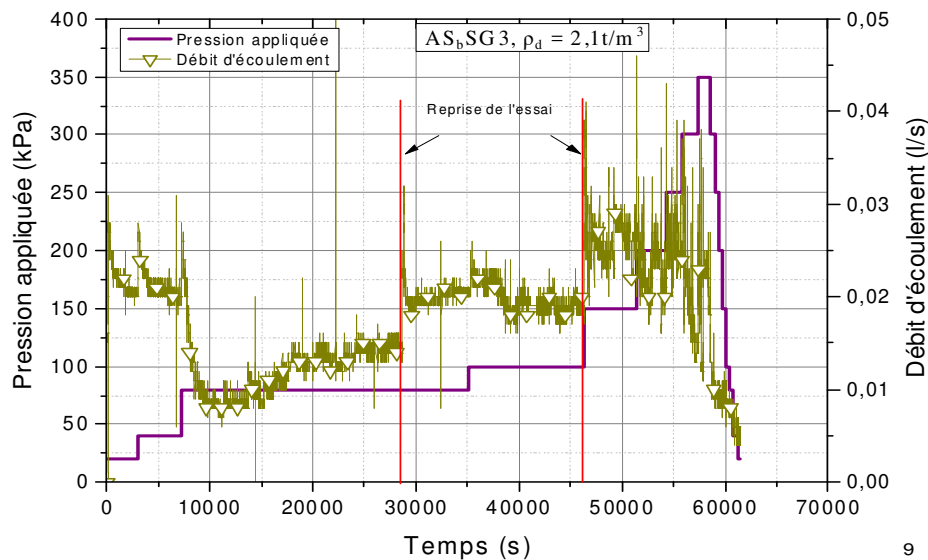


Figure III-20 Evolution au cours de temps du débit d'écoulement en fonction de la pression appliquée pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG3

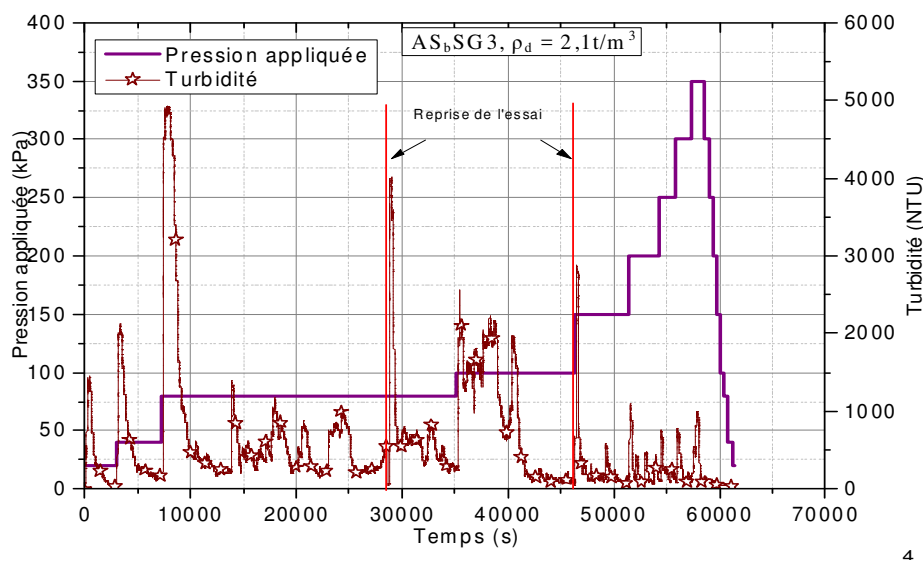


Figure III-21 Evolution au cours de temps de la turbidité de l'eau à la sortie en fonction de la pression appliquée pendant la phase d'érosion du matériau AS_bSG3

Le changement de la configuration d'essai n'a pas résolu le problème de mesure de la pression le long de la conduite. Ce problème étant probablement dû au choix des matériaux testés, nous avons décidé de tester des matériaux différents en termes de composition et donc de perméabilité. Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

III-2-2 Essais sur sols fins « simplifiés »

Pour identifier la source de problème relatif à ces mesures des pressions, nous avons réalisé des essais sur des matériaux plus « simples », qui sont constitués de mélange de sable fin HN34, et de sable broyé C10 dans différentes proportions. Les courbes granulométriques des matériaux testés sont regroupées sur la *Figure III-22*, et les compositions de ces matériaux sont regroupées dans le Tableau.

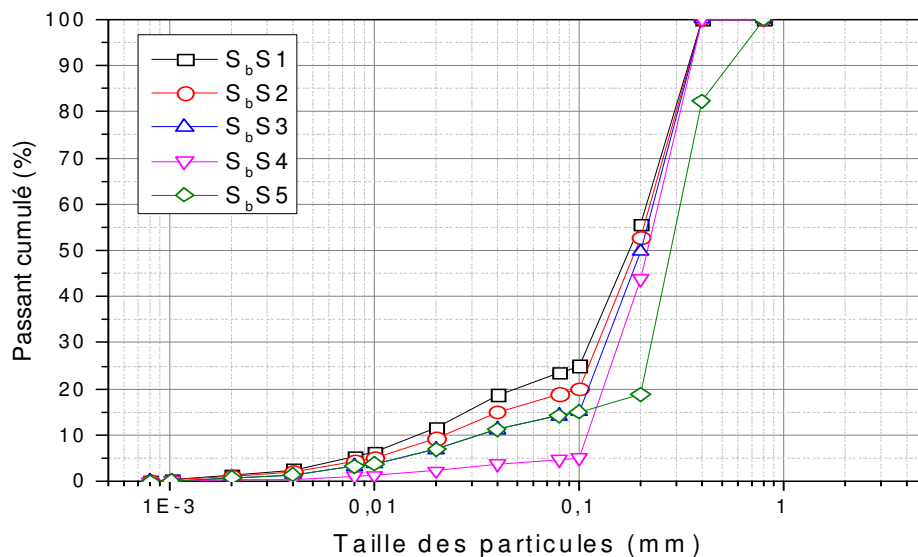


Figure III-22 Courbes granulométriques des matériaux fins « simplifiés » testés dans la configuration verticale

MT ^(*) / MR ^(**)	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4
S _b S1	0	5	95	0	0	0
S _b S2	0	20	80	0	0	0
S _b S3	0	15	85	0	0	0
S _b S4	0	25	75	0	0	0
S _b S5	0	15	5	80	0	0

(*) : matériau testé ; (**) : matériau de référence

Tableau III-6 Tableau de composition en pourcentage massique des sols fins « simplifiés »

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus sur le matériau S_bS4 composé de 95% de HN34 et de 5% de Speswhite. L'objectif étant toujours de valider le dispositif expérimental, on détaille ici les résultats de la phase d'érosion. Les pressions obtenues pendant la phase d'érosion du matériau S_bS4 sont présentées sur la *Figure III-23*. Sur ces courbes, on remarque que, contrairement aux cas précédents, les quatre capteurs de pression réagissent normalement. La pression augmente sur les 4 capteurs avec l'augmentation de la pression appliquée sur la pompe. La même tendance est enregistrée pour le débit d'écoulement comme on peut le voir sur la *Figure III-24*.

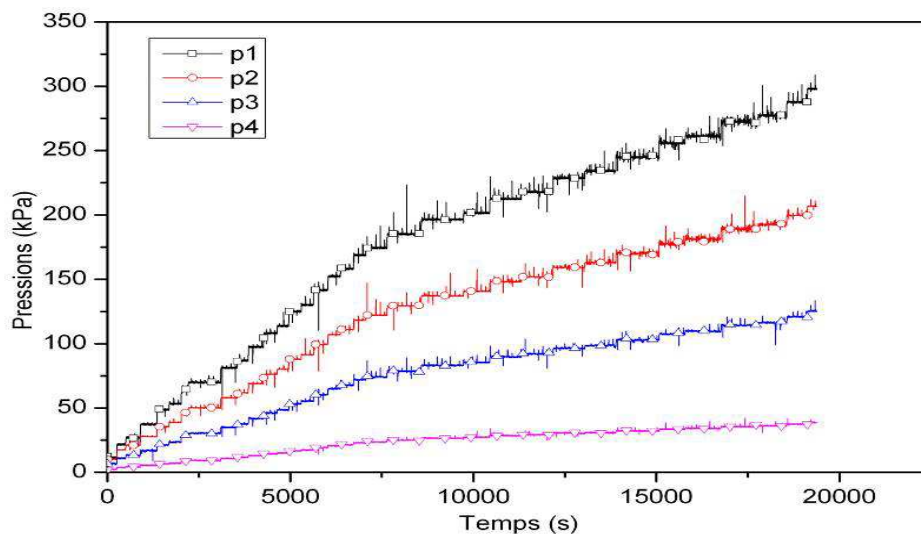


Figure III-23 Evolution de la pression d'écoulement sur les quatre capteurs le long de la conduite lors de la phase d'érosion du matériau S_bS4

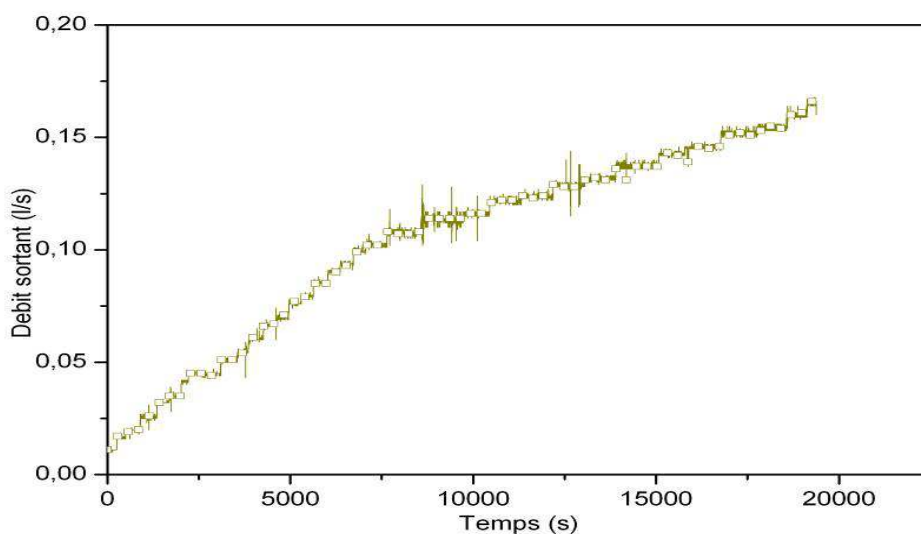


Figure III-24 Evolution de débit d'écoulement lors de la phase d'érosion du matériau S_bS4

Ces résultats montrent notamment que le dispositif d'essai est mieux adapté pour ce type de matériau. Mais pour rester sur le cas des sols grossiers, qui font l'objet de cette étude, on a ensuite testé des matériaux contenant des grosses particules, mais pas de kaolinite. On a testé notamment des matériaux qui sont des mélanges de graviers et de sable avec ou sans C10. Pour faciliter la manipulation de dispositif et travailler sur des petits échantillons, on a réduit la longueur de la conduite à un module d'une longueur de 53 cm, équipé alors que de deux capteurs. Les courbes granulométriques de ces matériaux testés sont regroupées sur la *Figure III-25*, et les différentes proportions des matériaux de référence constituant ces matériaux testés sont regroupées dans le *Tableau III-7*.

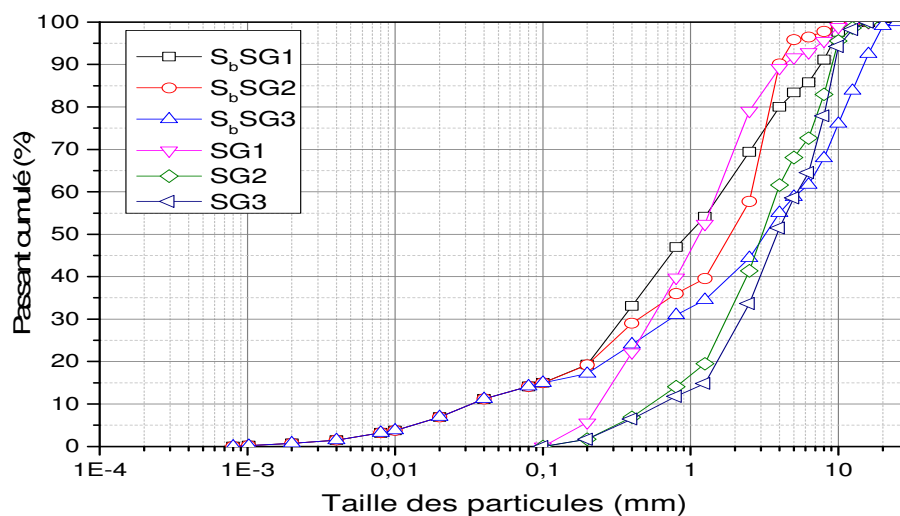


Figure III-25 Courbes de distribution granulométrique des matériaux testés avec un seul module dans la configuration verticale

MR ^(**) MT ^(*)	Speswhite	C10	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	4/10
S _b SG1	0	15	5	5	5	5	5	15	20
S _b SG2	0	15	10	10	10	10	10	15	20
S _b SG3	0	15	10	5	5	5	5	50	5
SG1	0	0	4	3	4	4	11	24	50
SG3	0	0	4	3,5	5	7,5	13	28,5	38,5
SG2	0	0	13,25	11	11,75	18	21	15	10

(*) : matériau testé ; (**) : matériau de référence

Tableau III-7 Composition en pourcentage massique des matériaux graveleux testés dans la configuration verticale

Les résultats obtenus sur ces matériaux sont présentés qualitativement. Les matériaux SG1, SG2, SG3 sont composés de sables et de graviers sans C10. Ces matériaux présentent la particularité de se saturer facilement. Six essais ont été réalisés sur ces matériaux, mais il est difficile de caractériser la phase d'érosion pour ce type de matériaux à cause de leur forte perméabilité.

Pour les matériaux S_bSG1 , S_bSG2 , S_bSG3 , 8 essais sont réalisés, mais on a rencontré une nouvelle fois le même problème de mesure de pression. La présence de particules fines de C10 avec des proportions de 15% dans la composition des matériaux réduit considérablement leur perméabilité des matériaux. Après le compactage de ses matériaux, les particules fines constituent un « bouchon » qui complique la saturation de ses matériaux. Dans ce cas l'eau trouve un chemin plus facile entre la paroi et le sol. En fait, la meilleure façon de saturer ce type de matériaux est de le mettre en place sous eau puis de procéder à sa consolidation qui demande un dispositif adapté.

III-2-3 Essais sur matériaux sableux

Pour surmonter le problème de mesure des pressions, nous avons testé une autre catégorie de matériaux qui sont composés uniquement de mélange de sables d'Hostun sans ajout de sable broyé (C10) ni de Speswhite. Les courbes granulométriques de ces matériaux sont regroupées sur la *Figure III-26*, et la composition de ces matériaux sont regroupées dans le *Tableau III-8*.

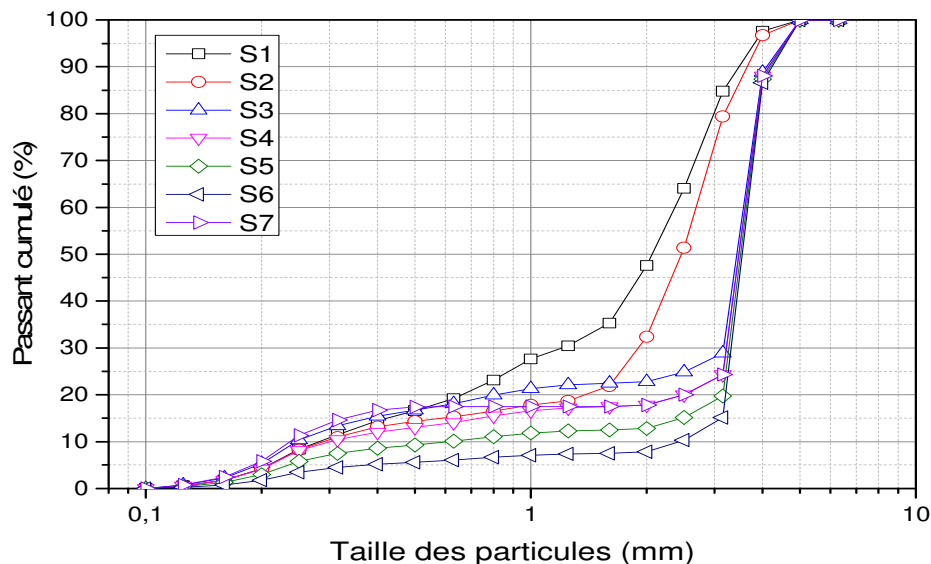


Figure III-26 Courbes de distribution granulométrique des matériaux constitués à partir de mélange de sables d'Hostun

On présente ici brièvement les résultats obtenus lors des essais de validation sur les matériaux S1, S4 et S7. Les essais de validation étant satisfaisants sur ce type de matériaux, les résultats obtenus sont présentés plus en détail dans le chapitre suivant.

MR ^(**) MT ^(*)	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	HN 2-4 tamisé à 3,15
S3	12,84	3,22	3,22	3,22	0,00	9,40	68,10
S4	10,00	2,50	2,50	2,50	0,00	10,00	72,50
S5	7,16	1,78	1,78	1,78	0,00	10,60	76,90
S6	4,29	1,07	1,07	1,07	0,00	11,20	81,30
S7	14,00	3,50	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50
S1	10	5,5	5,5	10	21	48	0
S2	10	4	2	2,5	16,5	65	0

(*) : matériau testé ; (**) : matériau de référence

Tableau III-8 Composition en pourcentage massique de matériaux constitués à partir de mélange de sables d'Hostun

III-2-3-1 Phase de saturation

Ici sont présentés les résultats obtenus sur le matériau S1. Le matériau est introduit dans la conduite en 3 couches successives de 15 cm de hauteur chacune. La masse volumique sèche de mise en place est de 1,8 Mg/m³. On rappelle que dans la suite les essais sont réalisés sur la conduite contenant un seul module équipé de 6 capteurs disposés en deux séries de trois sur deux côtés opposés de la conduite et espacés de 12,5 cm, afin de vérifier l'homogénéité des pressions mesurées (*Figure III-27*).

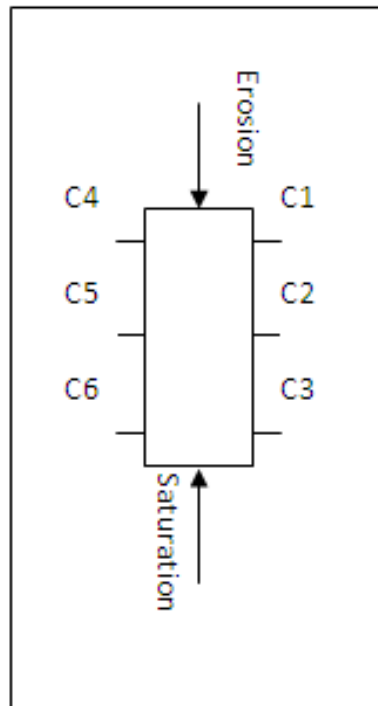


Figure III-27 Schéma d'installation des capteurs de pression sur la conduite verticale à un module

Une fois la conduite raccordée sur le circuit, on procède à la première phase de l'essai qui consiste à saturer le matériau. Pour ce fait, on met sous pression l'eau dans le réservoir de saturation pour pousser cette eau du bas vers le haut de la conduite. Le profil de pression appliquée dans le réservoir pour saturer le sol dans la conduite est représenté sur la *Figure III-28*. La pression est augmentée par de petits incréments de 2 à 3 kPa après stabilisation des valeurs des pressions mesurées. Au dernier palier, qui correspond à la pression pour laquelle l'eau sort de la conduite, on augmente la pression de saturation lentement afin de compenser la hauteur d'eau déjà injectée du réservoir (*Figure II-41*). Pour ce matériau, la pression de sortie d'eau est de l'ordre de 13 kPa.

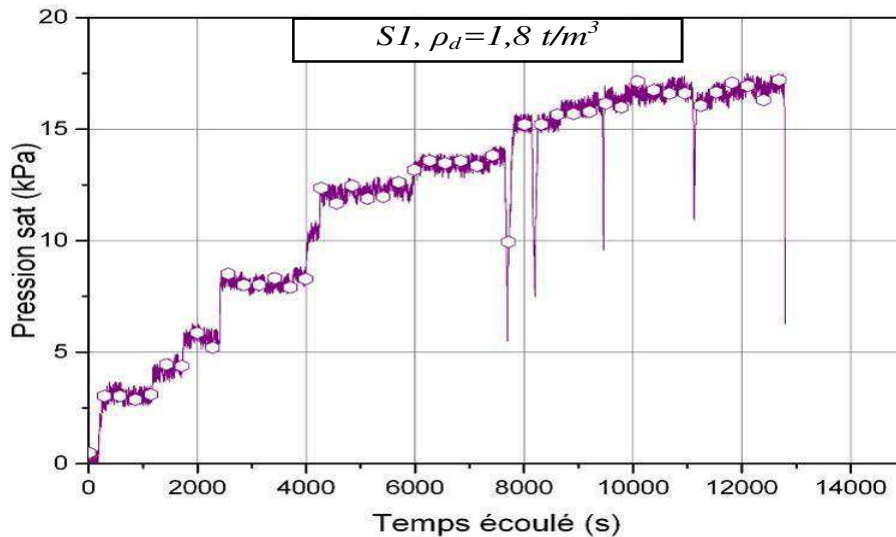


Figure III-28 Profil de la pression de saturation pour le matériau S1

Au cours de la phase de saturation, on suit l'évolution de la masse d'eau injectée à partir du réservoir de saturation placé sur la balance à l'entrée, et la masse d'eau sortante de la conduite à l'aide de la balance placée à la sortie de la conduite. L'évolution de ces deux masses est montrée sur la *Figure III-29*.

Sur la courbe de la masse d'eau dans le réservoir, on remarque que cette masse diminue à chaque application de palier de pression de saturation pour se stabiliser au bout d'un certain temps qui correspond au temps de stabilisation des pressions. La sortie d'eau dans la conduite est détectée par l'évolution de la masse d'eau sur la balance placée à la sortie. Sur la courbe d'eau sortante, on voit que l'eau commence à sortir après 6000 secondes d'injection, qui correspond globalement au temps nécessaire pour remplir la porosité du sol ainsi que du circuit. La capacité de la balance à la sortie de la conduite étant limitée à 32 kg, on est amené à vider le bac sur cette balance à chaque fois que cette capacité est atteinte. Le volume total d'eau injecté est de 55 litres correspondant à une durée d'environ 4 heures, et la masse d'eau sortante est de 47,5 litres.

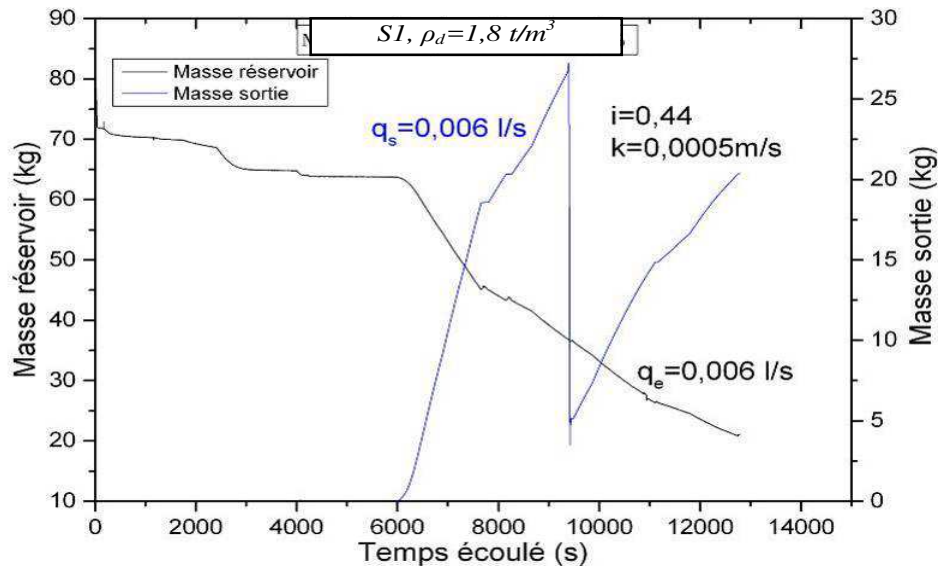


Figure III-29 Evolution de volume d'eau entrant et sortant au cours de la phase de saturation de matériaux S1

Si on calcule le volume des vides du sol testé :

$$v_T = v_s + v_v \Rightarrow v_v = v_T - v_s$$

Pour 45 cm de hauteur d'échantillon :

$$v_T = \pi \cdot r^2 \cdot h = 3,14 \cdot 0,09^2 \cdot 0,45 = 11,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Pour une masse volumique sèche de $1,8 \text{ Mg/m}^3$, le volume de sol sec introduit est calculé comme suit :

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} \Rightarrow v_s = \frac{m_s}{\rho_s}, \text{ où } \rho_s \text{ est la masse volumique sèche des grains solides : } \rho_s = 2,65 \text{ Mg/m}^3.$$

Calcul de la masse introduite dans la conduite :

$$\rho_d = \frac{m_s}{v_T} \Rightarrow m_s = \rho_d \cdot v_T = 1,8 \cdot 11,44 \cdot 10^{-3} = 20,6 \cdot 10^{-3} \text{ t}$$

$$\text{Donc : } v_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{20,6}{2,65} = 7,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

De cela on déduit le volume des vides :

$$v_v = v_T - v_s = 11,44 \cdot 10^{-3} - 7,77 \cdot 10^{-3} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3, \text{ soit un volume des vides : } v_v = 3,66 \text{ l.}$$

Le volume d'eau injecté étant largement supérieur à 5 fois le volume des vides dans le sol, on peut dire que le sol dans la conduite est saturé.

La différence entre la masse d'eau injectée et la masse de l'eau sortante est de 7,5l, et le volume des vides est de 3,66l, la différence entre ces deux dernières valeurs correspond au volume de circuit aval, en sachant que le circuit amont est rempli jusqu'à la base de sol avant le début de la phase de la saturation.

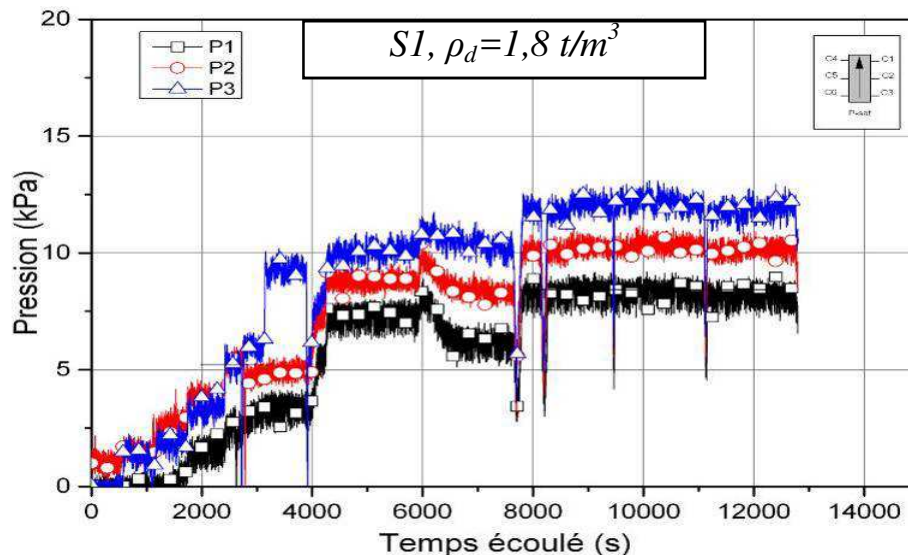


Figure III-30 Evolution des pressions d'eau sur les différents capteurs de la conduite pendant la phase de saturation de matériau S1

Sur les courbes d'évolution des pressions le long de la conduite, *Figure III-30*, on remarque que la pression augmente avec l'augmentation de la pression de saturation appliquée, puis se stabilise jusqu'à l'application du palier suivant. Le capteur 3 étant le plus bas, donc le plus proche de l'entrée d'eau dans la phase de saturation, affiche des valeurs de pression plus élevées que celles sur des capteurs 1 et 2. On voit bien que les pressions se stabilisent pendant le dernier palier de saturation malgré la baisse du niveau d'eau dans le réservoir de saturation.

La courbe d'évolution de débit d'écoulement sortant, *Figure III-31*, est calculée à partir de pente de la courbe de l'évolution de la masse d'eau sortante. On voit qu'au dernier palier de saturation ($t > 8000 \text{ s}$) le débit moyen est de l'ordre de $q_s = 0,006 \text{ l/s}$. Selon la même méthode, on a calculé le débit d'écoulement entrant dans la conduite, on trouve $q_e = 0,006 \text{ l/s}$. Ce qui veut dire que le volume d'eau entrant est bien égal au volume d'eau sortant.

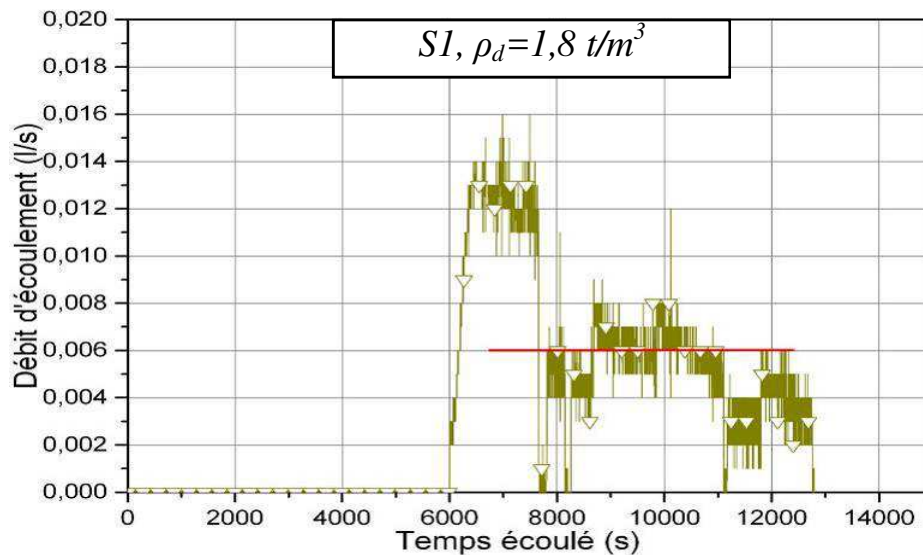


Figure III-31 Evolution du débit d'écoulement pendant la phase de saturation de matériau S1

Pour calculer la conductivité hydraulique (perméabilité) k , on procède comme suit :

A partir des courbes des pressions, on calcule un gradient hydraulique moyen entre les capteurs 1 et 3. L'écoulement étant dirigé du bas vers le haut, donc du capteur 3 vers le capteur 1.

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_3 - h_1}{L} \quad (III-1)$$

Où h_i est la charge hydraulique au niveau du capteur i le long de la conduite. En négligeant le terme de la vitesse, on a :

$$h = \frac{P}{\rho_w * g} + z \quad (III-2)$$

Où z est la position de ce point par rapport à un plan de référence dirigé vers le haut. Dans notre cas, on prend l'origine au niveau du capteur 3 ($z_3=0$).

Au dernier palier de saturation : $P_3 = 12$ kPa, et $P_1 = 8,4$ kPa, avec un espacement de 0,25 m

En injectant l'équation (III.2) dans (III.1), et en utilisant les valeurs de la pression correspondante, on obtient un gradient hydraulique moyen i de 0,44.

Connaissant la valeur du débit d'écoulement, on calcule la valeur de la vitesse d'écoulement qui va nous permettre de calculer ensuite la valeur de la perméabilité 'apparente' (conductivité hydraulique) de sol dans la conduite :

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi \cdot r^2} \Rightarrow v = \frac{0,006 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,09^2} = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

En utilisant la loi de Darcy : $v = k \cdot i$, on peut calculer la valeur de la perméabilité k :

$$k = \frac{v}{i} \Rightarrow k = \frac{2,35 \cdot 10^{-4}}{0,44} = 5,34 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

L'objectif de cette phase est de saturer le sol dans la conduite. Vu qu'on ne dispose pas d'autre méthode pour vérifier la saturation du sol dans la conduite, on se limite à vérifier que le débit d'eau entrant soit égal au débit d'eau sortant, et que le volume d'eau sortant de la conduite soit supérieur à 5 fois le volume des vides du sol dans la conduite. Ces deux conditions étant vérifiées pour cet essai on peut dire que le matériau doit être saturé. Cette phase nous permet aussi d'avoir une estimation de la perméabilité du sol placé dans la conduite.

III-2-3-2 Phase d'érosion

Une fois que le sol dans la conduite est supposé saturé, on génère un écoulement descendant à l'aide de la pompe à surpression pour étudier son érodabilité. Deux types de sollicitations hydrauliques peuvent être appliqués. Des écoulements avec des paliers de pressions ascendants appliqués avec durée choisie, ou des écoulements à une pression constante appliquée pour toute la durée de l'essai.

III-2-3-3 Essai d'érosion par paliers de pression

L'essai d'érosion réalisé sur le matériau S1 est un essai avec 8 paliers de pression ascendant. Les pressions appliquées sont : 10 kPa, 20 kPa, 30 kPa, 40 kPa, 50 kPa, 60 kPa, 80 kPa et 100 kPa. La durée moyenne de chaque palier est de 45 minutes. Le profil des pressions appliquées ainsi que la variation des pressions sur les 6 capteurs sont regroupés sur la *Figure III-32*. L'évolution des pressions sur les capteurs 1, 2 et 3 est la même que celle mesurée sur les capteurs 4, 5 et 6 respectivement, ce qui montre que l'écoulement est homogène le long de la conduite. On rappelle que les capteurs 1, 2 et 3 sont situés à la même position le long de la conduite que les capteurs 4, 5 et 6 respectivement. On remarque qu'une augmentation des pressions sur les 6 capteurs correspondant au changement de palier de pression, et se stabilisent jusqu'à l'application du palier suivant.

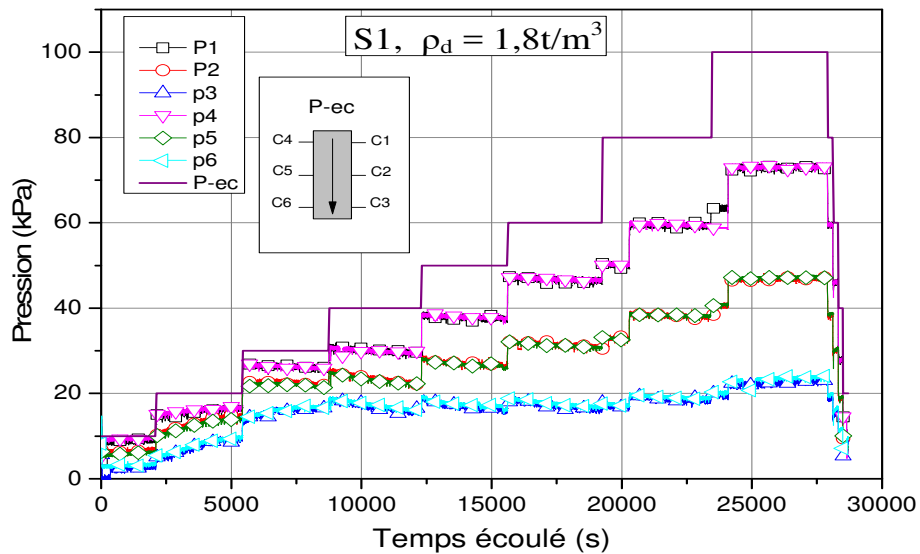


Figure III-32 Evolution des pressions aux différents capteurs de la conduite pendant la phase d'érosion de matériau S1

La pression aux niveaux des capteurs 1 et 4, situés à l'amont, passe de 9 kPa pour la pression appliquée de 10 kPa, pour atteindre 73 kPa pour la pression appliquée de 100 kPa. Sur les capteurs 3 et 6, situés à l'aval, les pressions passent de 3 kPa à 22 kPa.

Pour chaque palier de pression, on mesure le débit d'écoulement à l'aide de débitmètre installé à l'amont de l'échantillon, vu que les débits mesurés rentrent dans sa gamme de mesure. La courbe d'évolution temporelle du débit d'écoulement est représentée sur la *Figure III-33*. De la même façon que pour les pressions d'écoulement, le débit d'écoulement augmente avec l'augmentation de la pression appliquée. Le débit passe de 0,025 l/s pour la pression de 10 kPa à 0,25 l/s pour la pression de 100 kPa, soit un facteur de 10.

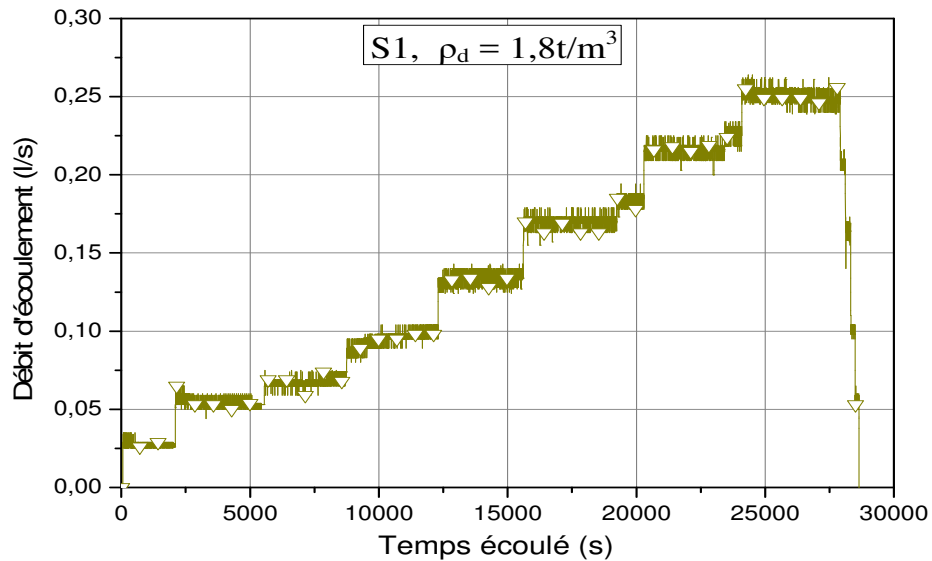


Figure III-33 Evolution du débit d'écoulement pendant la phase d'érosion de matériau S1

En terme de la turbidité, l'évolution est faible, elle représente notamment la turbidité due à la « poussière » présente dans les matériaux de référence composant le matériau S1. Dans les essais qui suivent, les matériaux sont lavés pour éliminer toutes les « poussières » présentes. La variation de la turbidité devient minimale à partir de 3^e palier de pression appliqué comme on le voit sur la *Figure III-34*.

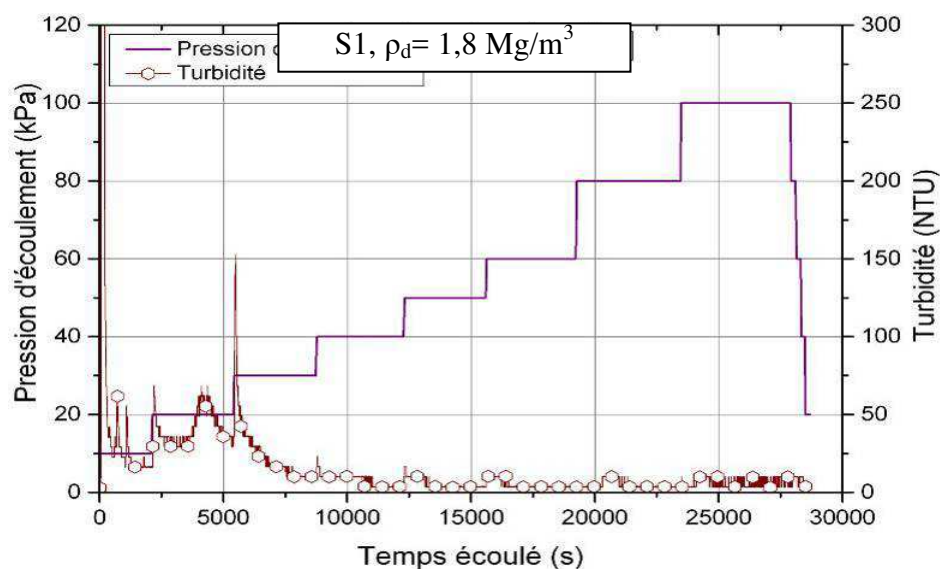


Figure III-34 Evolution de la turbidité pendant la phase d'érosion de matériau S1

En fait, le matériau S1 est constitué à partir de mélange de matériaux sableux, les particules érodées seront donc des sables fins (cf. *Figure III-26*), qu'on ne peut pas mesurer à l'aide du turbidimètre. Dans ce cas, les particules érodées sont récupérées sur le système de placé à la sortie du circuit.

A la fin du dernier palier, on diminue la pression appliquée progressivement par incrément de 20 kPa, et on mesure de la même façon l'évolution des pressions sur les différents capteurs ainsi que de débit d'écoulement.

De la même façon que pour la phase de saturation on calcule les paramètres hydrauliques, notamment la vitesse d'écoulement v , le gradient hydraulique moyen i et la perméabilité k , et ce pour chaque palier de pression appliquée, et ce pour le chemin de charge et de décharge.

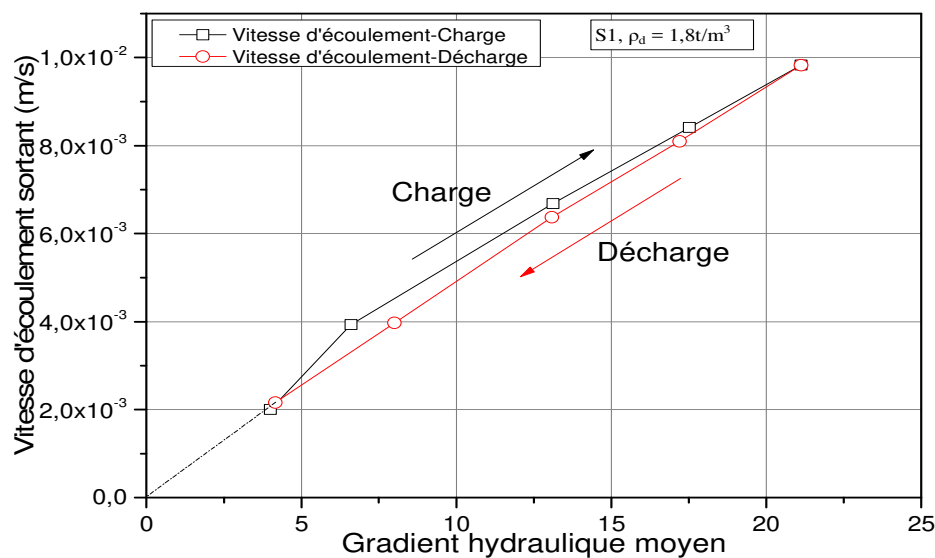


Figure III-35 Evolution de la vitesse d'écoulement en fonction de gradient hydraulique moyen pendant la phase d'érosion de matériau S1, pour le chemin de charge et de décharge

Les courbes de variation de la vitesse d'écoulement en fonction du gradient hydraulique moyen, calculé entre les capteurs 1 et 3, pour les chemins de charge et de décharge sont présentées sur la *Figure III-35*. On remarque que le chemin de charge est quasiment identique au chemin de décharge pour les différentes pressions appliquées.

Si on trace l'évolution de la perméabilité apparente des deux tranches du sol de la conduite, délimitées par les capteurs 1 et 2 et les capteurs 2 et 3, ainsi que la perméabilité moyenne (entre les capteurs 1 et 3) pour les chemins de charge et de décharge, on constate que la perméabilité n'évolue que faiblement aux premiers paliers appliqués avant de se stabiliser à

une valeur de $4,8 \cdot 10^{-4}$ m/s. On retrouve cette même valeur pour les différentes pressions appliquées à la décharge (*Figure III-36*). L'évolution singulière au début de cette phase peut être expliquée par la stabilisation d'écoulement surtout au cours du premier palier, et probablement le réarrangement de quelques particules de sols dans la conduite sans provoquer d'érosion.

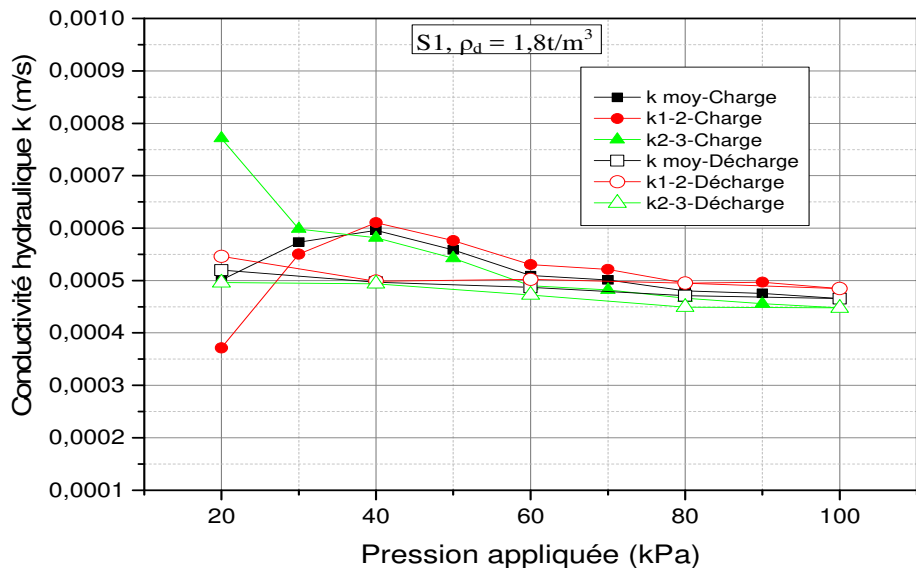


Figure III-36 Evolution de la perméabilité des différentes tranches du matériau S1 pendant la phase d'érosion pour les chemins de charge ascendant et descendant

Si on regarde en termes de la quantité de particules fines érodées (*Figure III-37*), on constate que le départ des fines n'est initié qu'à partir de la pression de 60 kPa, mais la quantité des particules érodées reste très faible d'environ 30g durant toute la durée de l'essai, dont la taille maximale est de 1,25 mm.

Dans la composition du matériau S1, on trouve que 30 % des particules ont une taille inférieure à 1,25 mm, en faisant les calculs on trouve que la quantité des particules érodées ne représente que 0,5 % des particules introduites dans la même gamme de taille.

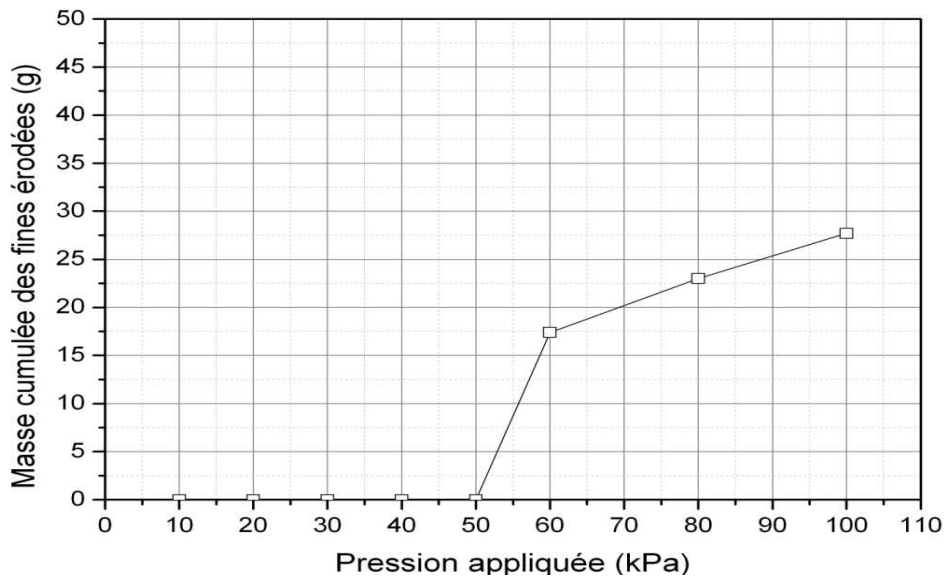


Figure III-37 *Quantité des particules fines érodées en fonction de la pression d'écoulement appliquée : Cas de matériau S1*

Cette faible quantité de particules érodées et le non changement de la perméabilité montrent que le matériau S1 est stable vis-à-vis de l'érosion pour la gamme de pressions appliquées.

III-2-3-4 Essais de répétabilité

Pour valider le dispositif d'essai et le protocole adapté, deux essais de répétabilité qu'on note 2 et 3 sont réalisés sur le matériau S4. La saturation est réalisée de la même façon que pour le matériau S1, déjà décrite plus haut. Pour vérifier la répétabilité des essais, on s'intéresse notamment à la comparaison des phases d'érosion des deux essais.

Le profil des pressions appliquées ainsi que des pressions mesurées sur les différents capteurs pour les deux essais réalisés sont regroupées sur la *Figure III-38*. La pression est appliquée en 10 paliers de 10 kPa, allant de 10 kPa jusqu'à 100 kPa. La durée de chaque palier est entre 30 et 45 minutes. De la même façon que le matériau S1, les pressions mesurées sur les capteurs 1, 2 et 3 sont égales à celles mesurées sur les capteurs 4, 5 et 6 respectivement. C'est pour cela que seules les 3 premières pressions de chaque essai sont représentées. Les pressions mesurées dans l'essai 2 sont présentées en symboles creux, et celles mesurées dans l'essai 3 sont présentées en symboles pleins.

En comparant les courbes sur la *Figure III-38*, on constate que les pressions mesurées sur les mêmes capteurs pour les 2 essais, sont très proches, ce qui valide la répétabilité en termes des valeurs de pressions mesurées. Les pressions augmentent dès l'application des paliers, puis se

stabilisent jusqu'à l'application du palier suivant. La pression au capteur 1 passe de 10 kPa à 90 kPa et celle du capteur 3 passe de 3 kPa à 10 kPa.

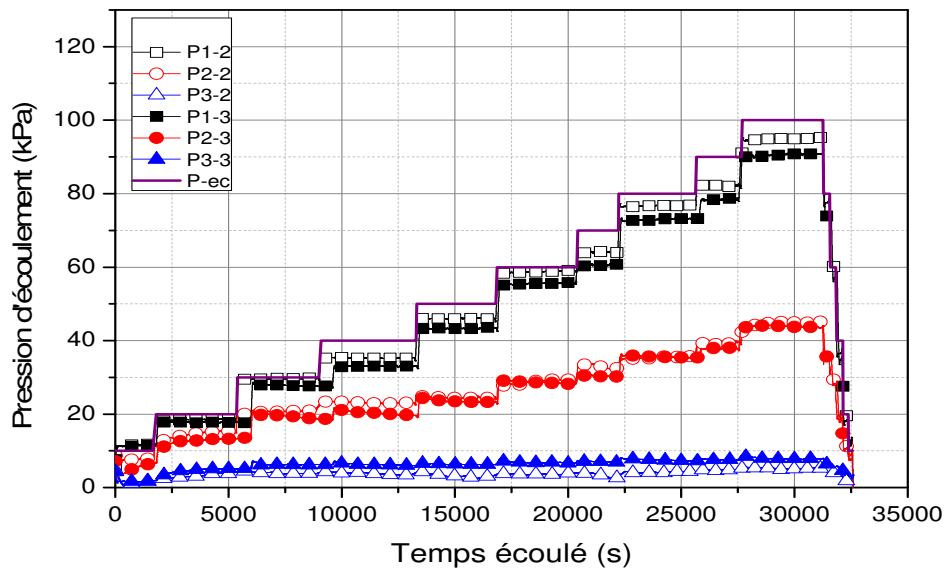


Figure III-38 Répétabilité des mesures de pressions au cours des deux essais réalisés sur le matériau S4

La même représentation est utilisée pour comparer le débit d'écoulement mesuré au cours des deux essais, les valeurs mesurées sont regroupées sur la *Figure III-39*. On constate qu'il y a de petites différences entre les débits mesurés au début des essais, mais qu'elles demeurent faibles.

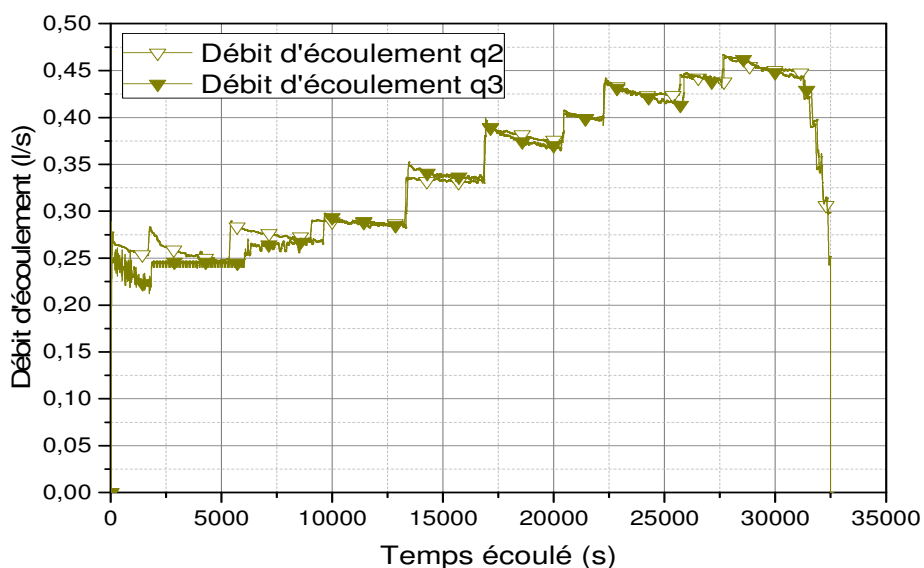


Figure III-39 Répétabilité des mesures de débit d'écoulement au cours des deux essais réalisés sur le matériau S4

Les débits augmentent à l'application de la pression puis tendent à se stabiliser. Les valeurs de débits d'écoulement obtenues montrent donc que l'essai est également répétable en termes de débit d'écoulement mesuré.

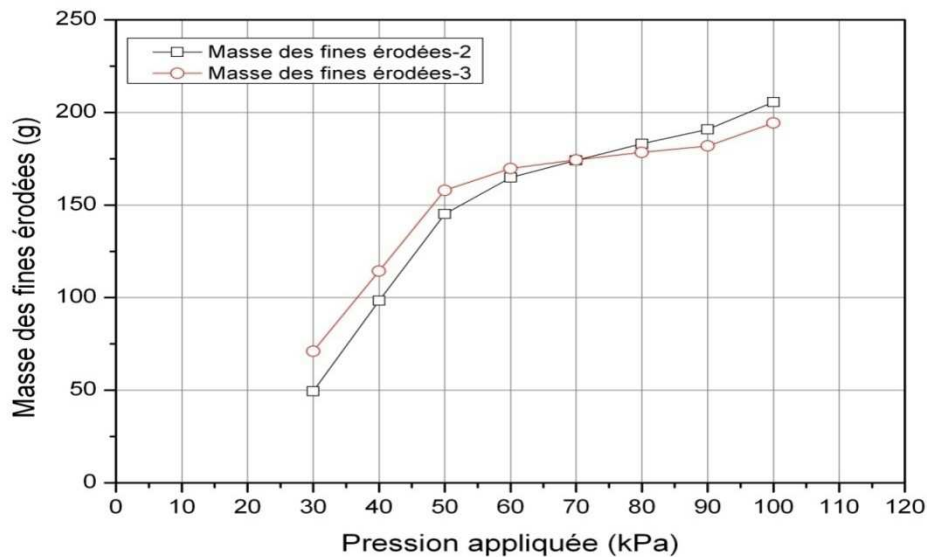


Figure III-40 Répétabilité des quantités de fines érodées au cours des deux essais réalisés sur le matériau S4

La répétabilité de l'essai est vérifiée aussi en termes de la quantité de fines érodées, là on constate aussi que les masses des fines érodées sont très proches pour les deux essais, comme montré sur la *Figure III-40*. La masse des fines érodées est obtenue par pesage du matériau érodé récupéré sur le tamis de récupération à la fin de chaque palier de pression appliquée. On a érodé 205,5 g de sol pour l'essai 2 et 194,5 g pour l'essai 3, qui correspondent respectivement à 5,75 % et 5,53 % de la masse totale des fines de la même taille initialement introduite.

La bonne répétabilité en termes des pressions mesurées, de débits d'écoulement mesurés et de quantités de fines érodées montre que le dispositif est adapté pour la problématique et que le protocole expérimental élaboré est adapté à cette étude.

Les résultats des essais sur les matériaux testés par paliers de pression seront présentés et analysés dans le *Chapitre 4 (étude paramétrique)*.

III-2-3-5 Essais à pression constante

Une autre série d'essais est réalisée sur une sélection de matériaux en appliquant cette fois-ci une seule pression sur la pompe qu'on maintient pendant toute la durée de l'essai. Dans ce qui suit, on présente uniquement les résultats obtenus pendant la phase d'érosion.

Phase d'érosion

Dans ce qui suit, on présente les résultats typiques d'un essai réalisé sur le matériau S7. Le matériau est introduit dans la conduite par 3 couches successives compactées à une masse volumique sèche de $1,8 \text{ Mg/m}^3$. Le déroulement de la phase de saturation étant toujours le même, seuls les résultats obtenus durant la phase d'érosion sont présentés ci-dessous. Une fois le matériau saturé, on procède à la phase d'érosion par génération d'un écoulement à l'aide de la pompe sous une pression de 30 kPa maintenue pour une durée de 10 heures.

La *Figure III-41* regroupe la pression appliquée et les pressions d'écoulement mesurées sur les différents capteurs. On voit encore une fois que les pressions sur les capteurs 1, 2 et 3 sont égales à celles mesurées sur les capteurs 4, 5 et 6 respectivement, ce qui valide l'homogénéité des sols testés. On note aussi que les pressions enregistrées sont significativement plus faibles comparées à la pression appliquée sur la pompe, ceci est dû notamment aux pertes de pression singulières dans la partie amont du dispositif (*Annexe I*). L'anomalie enregistrée sur le capteur 5 ($t=22500\text{s}$) est due à un problème de raccordement de ce capteur.

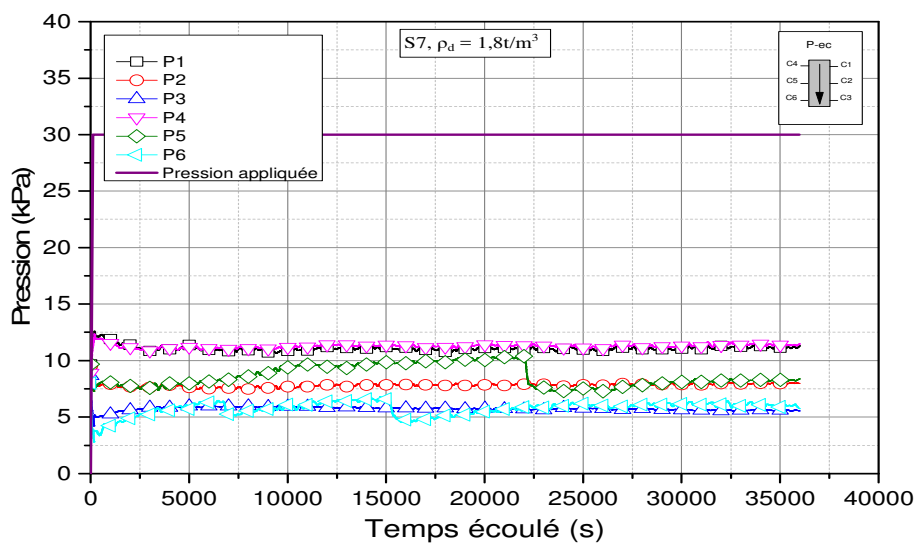


Figure III-41 Evolution des pressions sur les différents capteurs le long de la conduite pendant la phase d'érosion de matériau S7

Sur les courbes d'évolution des pressions 1, 2 et 3 (*Figure III-42*), on remarque que les pressions (2 et 3) évoluent au cours des 10000 premières secondes (2h40mn) puis se stabilisent jusqu'à la fin de l'essai. La pression du capteur 1 est stable autour de 11 kPa, et la pression au niveau du capteur 3 se stabilise à 6,8 kPa. Pour le capteur 2, la pression reste constante à une valeur de 7,8 kPa.

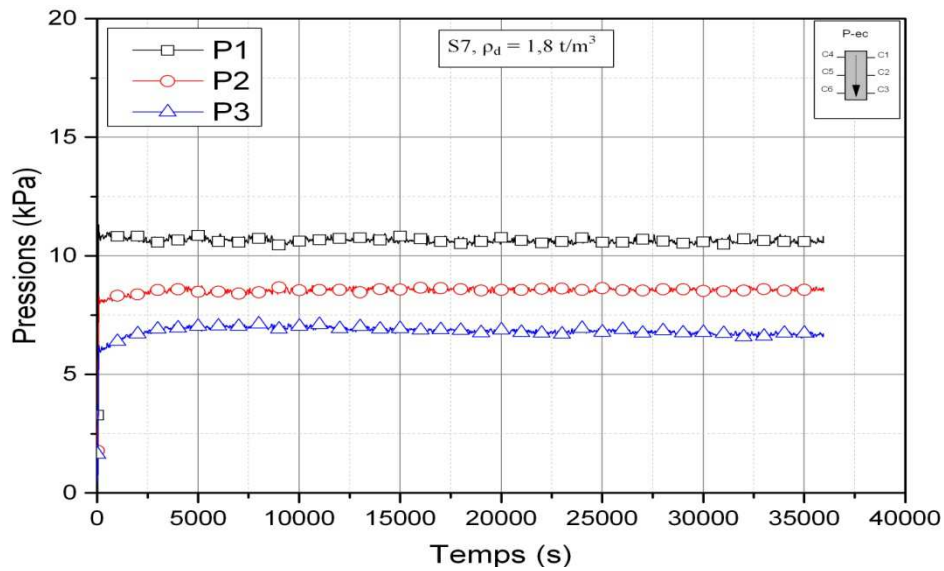


Figure III-42 Evolution des pressions des capteurs 1 à 3 de la conduite pendant la phase d'érosion de matériau S7

La *Figure III-43* représente la variation au cours de temps du débit d'écoulement enregistré. On note que pendant l'intervalle d'évolution des pressions (les 10000 premières secondes) on enregistre une petite évolution de débit d'écoulement qui passe de 0,7 l/s à 0,8 l/s, puis le débit reste stable jusqu'à la fin de l'essai.

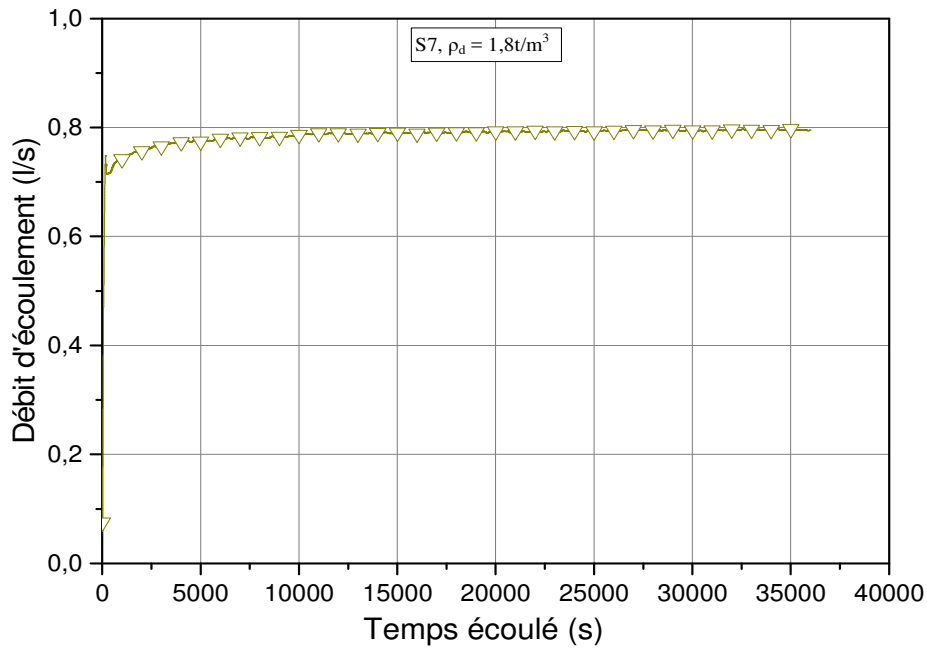


Figure III-43 Evolution du débit d'écoulement pendant la phase d'érosion de matériau S7

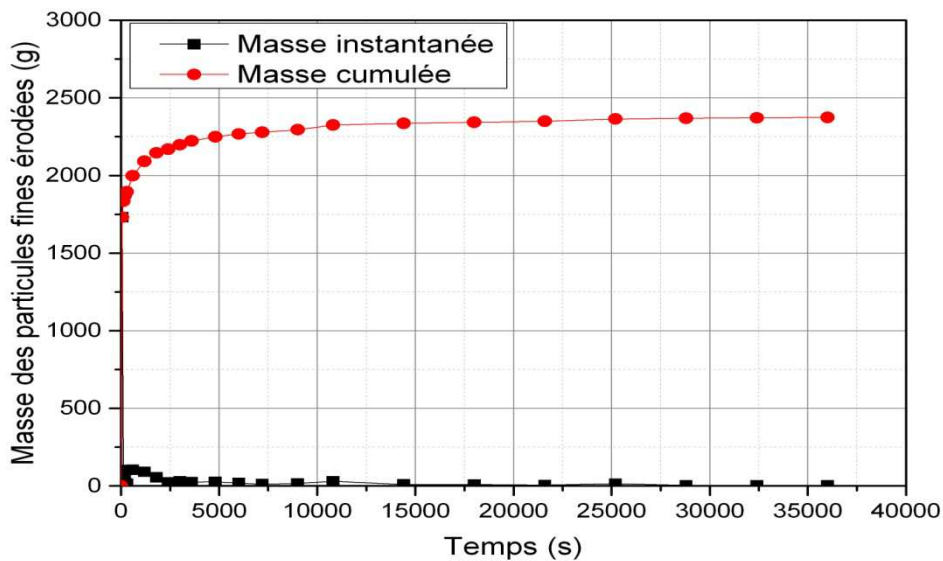


Figure III-44 Evolution de la masse de fines érodées pendant la phase d'érosion de matériau S7

La masse de fines érodées à différents intervalles de temps ainsi que la masse cumulée sont regroupées sur la *Figure III-44*. On rappelle que pour quantifier les fines érodées on récupère et on pèse à des intervalles de temps définis les particules érodées. Au début de l'érosion, la masse des fines érodées est notée toutes les minutes, puis cet intervalle augmente pour atteindre 1 heure à partir de 3 heures et jusqu'à la fin de l'essai. Au début de l'essai on

enregistre une pente importante de la courbe de masse cumulée, qui correspond à une masse importante de fines érodées, puis cette pente diminue, ce qui traduit la diminution de la quantité de fines érodées au cours du temps.

En effet, la masse de fines érodée augmente significativement jusqu'à 10000 secondes, puis augmente très faiblement. La masse totale des fines érodées est de 2375 g, ce qui correspond à 65 % des fines initialement introduites.

Si on compare la courbe de débit à la courbe de la masse des fines érodées, on constate que l'augmentation de la masse des fines érodées correspond à l'augmentation du débit d'écoulement déjà constaté sur la *Figure III-43*. En effet, plus on érode le matériau, plus l'eau circule facilement, ce qui se traduit par l'augmentation du débit.

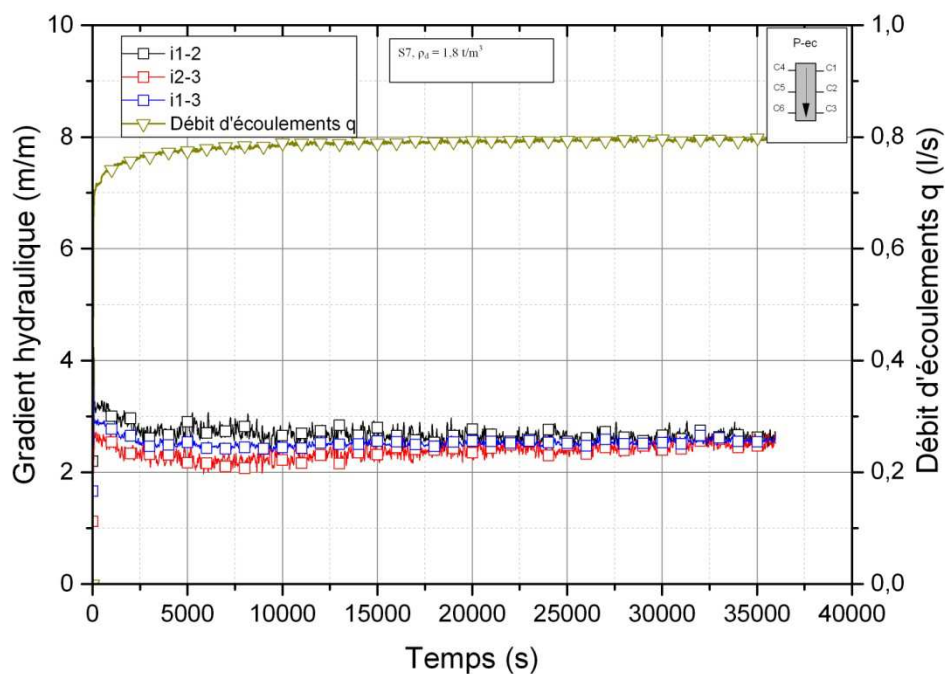


Figure III-45 Evolution des gradients hydrauliques aux différentes tranches de la conduite pendant la phase d'érosion de matériau S7

Pour comprendre l'évolution de la structure de matériau testé, on analyse chaque tranche entre deux capteurs successifs séparément. Pour cela, on calcule le gradient hydraulique entre les capteurs 1 et 2 noté 'i1-2', le gradient hydraulique entre le capteur 2 et 3 noté 'i2-3', et aussi le gradient entre les capteurs 1 et 3 noté 'i1-3' qu'on a appelé aussi le gradient hydraulique moyen. Les courbes ainsi obtenues sont regroupées sur la *Figure III-45*. On remarque une petite diminution des 3 gradients calculés, au cours des 10000 secondes, puis une stabilisation autour de 2,4 m/m.

Sur la *Figure III-46*, on représente les valeurs de la vitesse d'écoulement calculée à partir du débit d'écoulement, ainsi que les valeurs de la perméabilité « apparente » calculée par la loi de Darcy pour les différentes tranches de sol déjà décrites. Sur la partie amont, entre les capteurs 1 et 2, la perméabilité augmente de $8 \cdot 10^{-3}$ m/s jusqu'à $12 \cdot 10^{-3}$ m/s pendant les 10000 premières secondes puis se stabilise, cela est notamment due à l'érosion d'une proportion du sol dans cette tranche. Pour la tranche de sol entre les capteurs 2 et 3, la perméabilité augmente significativement pendant les 10000 premières secondes, pour passer de $10 \cdot 10^{-3}$ m/s à $14 \cdot 10^{-3}$ m/s, suivie d'une faible diminution jusqu'à $12 \cdot 10^{-3}$ m/s. L'augmentation de la perméabilité est peut-être due aussi à l'érosion d'une quantité de sol plus importante que pour la tranche située au-dessus. La diminution de la perméabilité peut être due au piégeage d'une partie de sol transporté des couches sous-jacentes, ce qui provoquera un colmatage de la porosité du sol.

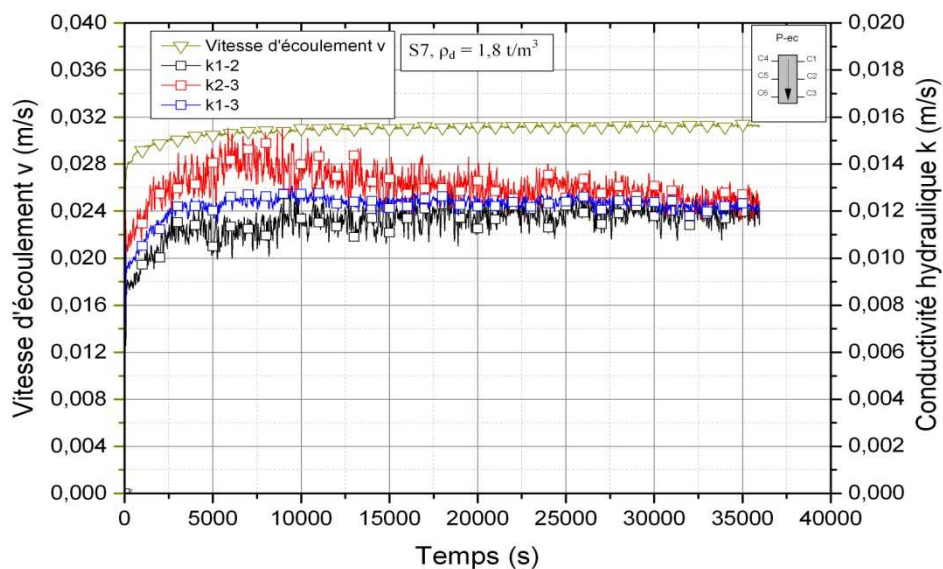


Figure III-46 Evolution de la conductivité hydraulique aux différentes tranches de la conduite pendant la phase d'érosion de matériau S7

A la fin de l'essai, on procède au démontage de la conduite et on récupère le sol pour faire des analyses granulométriques qu'on compare à la courbe granulométrique initiale du sol testé. Pour ce fait, on décompose le sol dans la conduite en 4 tranches, la première tranche, notée T1, correspond au matériau situé en dessus du capteur 1, la deuxième, noté T2, correspond au matériau situé entre les capteurs 1 et 2, la troisième, noté T3, correspond au matériau situé entre les capteurs 2 et 3 et la dernière tranche, noté T4, correspond au matériau situé en dessous du capteur 3 (*Figure III-47*) et on fait des prélèvements séparément. Les courbes

granulométriques des sols prélevés ainsi que la courbe granulométrique initiale sont regroupées sur la *Figure III-47*.

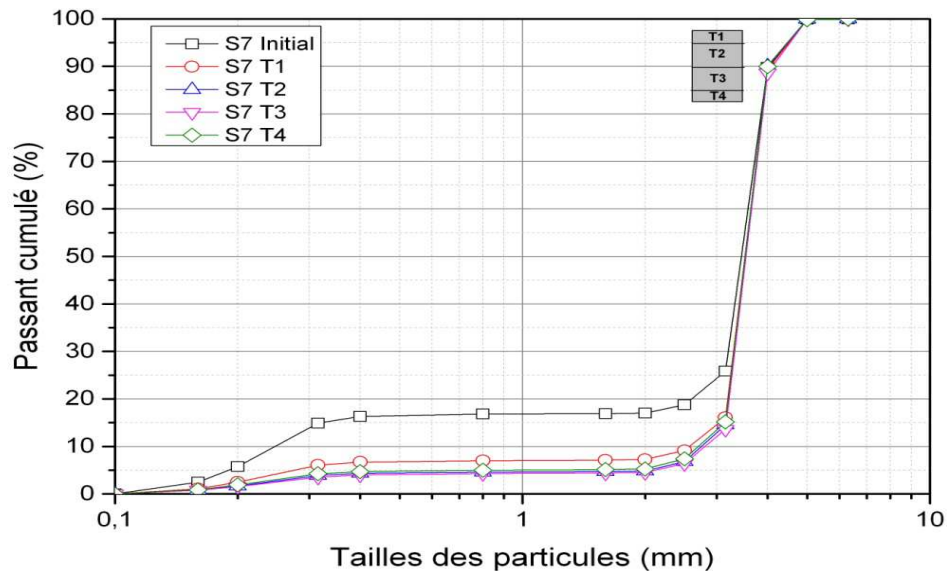


Figure III-47 Comparaison des courbes de distributions granulométriques initiale et finales de matériaux S7

En comparant les courbes granulométriques, on constate que le sol érodé est transporté sur la totalité de la longueur de la conduite. La comparaison des courbes granulométriques post-essai n'a pas montré de différence significative de quantité de fines érodées dans chaque tranche.

Pour une analyse poussée et comparative des essais réalisés, on a introduit la méthode énergétique élaborée par *Marot et al. (2011-b)*. Cette méthode caractérise la sollicitation hydraulique par la puissance d'érosion qui est définie comme une combinaison du gradient de pression mesuré le long de la conduite et du débit d'écoulement traversant les sols testés. La méthodologie suivie pour son calcul ainsi que les résultats obtenus seront présentés plus en détail dans le chapitre 4.

III-3 Conclusion

Dans ce chapitre les résultats des essais typiques et de validation réalisés sur les deux configurations de la colonne ont été présentés.

Les premiers essais sont réalisés sur la configuration horizontale, cette configuration a l'avantage d'être représentative des écoulements parasites qui peuvent traverser la structure des ouvrages hydraulique et leur fondation. Différents matériaux ont été testés, mais suite à des problèmes de saturation et de dépôt du sol dans le circuit aval, le reste du programme d'essai a été réalisé sur la configuration verticale.

Pour s'affranchir des problèmes de saturation, la grande partie du programme expérimental s'est portée sur des matériaux reconstitués à partir de mélange de sables d'Hostun. Les essais comportent deux phases, une phase de saturation réalisée sous un écoulement ascendant à partir d'un réservoir d'eau sous pression, et une phase d'érosion à l'aide de la pompe. Deux types d'écoulement sont appliqués, soit des écoulements sous des paliers de pression, soit des écoulements avec un seul palier de pression. La phase d'érosion nous permet de suivre l'évolution des pressions, de débit et de la quantité des particules fines érodées tout au long des essais. L'analyse granulométrique post-essai permet de localiser le départ de ces particules fines érodées et éventuellement leur déposition.

Chapitre IV Etude Paramétrique

Dans le chapitre 3 on a réalisé plusieurs essais de validation afin de mieux choisir la configuration du dispositif expérimental la plus adéquate pour réaliser ce travail, ainsi que de mieux choisir les matériaux à étudier. Dans ce chapitre, on présente les résultats d'une étude paramétrique sur le phénomène d'érosion interne. Après une brève présentation des deux types d'essais retenus, on étudie l'influence de la granulométrie, de la pression d'entrée, de la nature et teneur en particules fines ainsi que de la densité de mise en place sur l'initiation et l'évolution de la suffusion. Les résultats présentés dans ce chapitre concernent les essais d'érosion réalisés sur la configuration verticale de la conduite constituée d'un seul module. Le déroulement des essais se fait en deux phases, une phase de saturation et une phase d'érosion. La saturation ne pose aucun problème pour ce type de matériaux, on va présenter ci-après uniquement les résultats obtenus pendant la phase d'érosion.

IV-1 Les types des essais retenus

Les différents essais de validation réalisés et détaillés dans le chapitre 3, montrent que les matériaux reconstitués à partir des mélanges de sables d'Hostun sont les mieux adaptés pour l'étude de l'érosion dans la configuration verticale actuelle du dispositif dont on dispose.

On rappelle que le choix des granulométries des matériaux testés s'est basé notamment sur les critères d'érosion déjà établis, l'idée étant d'avoir une certaine classification initiale vis-à-vis de l'érosion de matériaux à tester et de vérifier cette classification à la fin de nos essais. Pour ce faire, on s'est basé sur le critère de *Wan et Fell (2008)*, dans lequel en fonction de certains paramètres des courbes granulométriques on distingue une zone des matériaux stables (non érodables), une zone des matériaux instables (érodables) et entre les deux une zone de transition.

Dans le chapitre 3, deux procédures ont été proposées pour l'application de la sollicitation dans nos essais, la première consiste à appliquer plusieurs paliers de pression pendant une durée d définie, et la seconde utilise un seul palier de pression maintenue pour toute la durée de l'essai. La première procédure nous a permis la vérification de la classification des matériaux testés par rapport au critère de *Wan et Fell (2008)*. Ensuite, c'est la deuxième procédure qui a été retenue pour l'étude paramétrique approfondie des matériaux testés. Le principe des essais est le même pour les deux procédures, après la mise en place de matériaux

dans la conduite, celui-ci est ensuite saturé par un écoulement vertical ascendant, et finalement la phase d'érosion est initiée selon le type d'écoulement choisi, c'est en cette dernière étape que les deux procédures qui seront présentées ci-après se différencient.

On présente tout d'abord la synthèse des essais réalisés avec des paliers de pression, puis la synthèse des essais réalisés avec un seul palier de pression.

IV-1-1 Essai avec des paliers de pression

Dans ce paragraphe, on présente les résultats des essais d'érosion réalisés dans la configuration verticale de la conduite, sous des écoulements avec des paliers de pression incrémentés et maintenus pour une durée déterminée.

IV-1-1-1 Choix des matériaux

Trois matériaux sont testés avec la procédure des essais avec des paliers de pression. Les courbes de distribution granulométrique de ces matériaux sont regroupées sur la *Figure IV-1*. Et la composition de ces matériaux est montrée dans le *Tableau IV-1*.

On note que pour reconstituer le matériau S4 qui se situe dans la 'zone instable', le gravier HN 2/4 est écrêté au tamis 3,15 mm. On diminue ainsi le rapport d_{20}/d_{5} , qu'on retrouve sur l'axe des abscisses du critère de *Wan et Fell (2008)*.

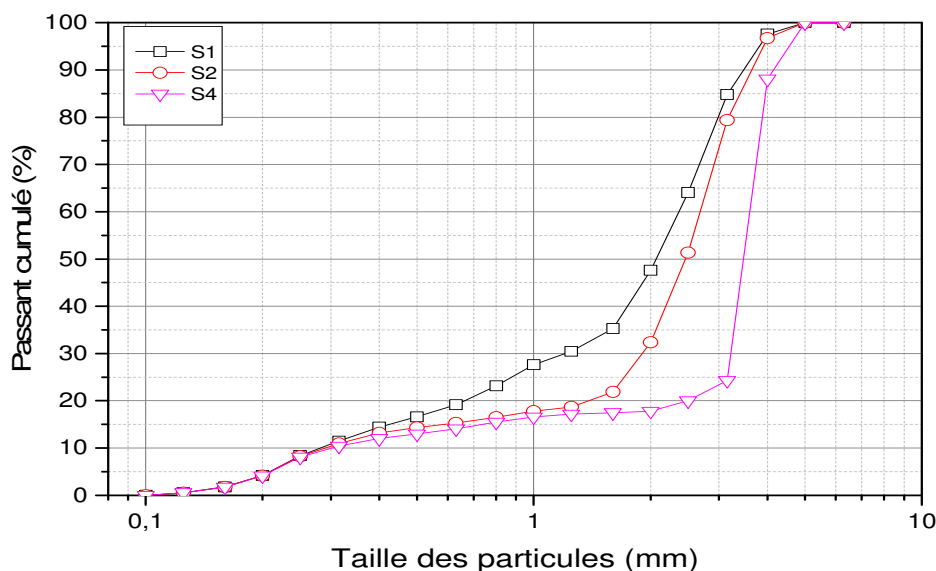


Figure IV-1 Courbes granulométriques des matériaux testés dans la configuration verticale avec des écoulements avec des paliers de pression

MR ^(**) / MT ^(*)	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	HN 2-4 tamisé à 3,15
S1	10	5,5	5,5	10	21	48	0
S2	10	4	2	2,5	16,5	65	0
S4	10,00	2,50	2,50	2,50	0,00	10,00	72,50

(*) : matériau testé ; (**) : matériau de référence

Tableau IV-1 Composition des matériaux testés en pourcentage massique dans la configuration verticale avec des écoulements avec des paliers de pression

La classification de l'érodabilité de ces matériaux selon le critère de *Wan et Fell (2008)* est présentée sur la *Figure IV-2*. Le matériau S1 est classé comme 'stable', le matériau S4 est classé comme instable et le matériau S2 est classé dans la zone de transition (intermédiaire).

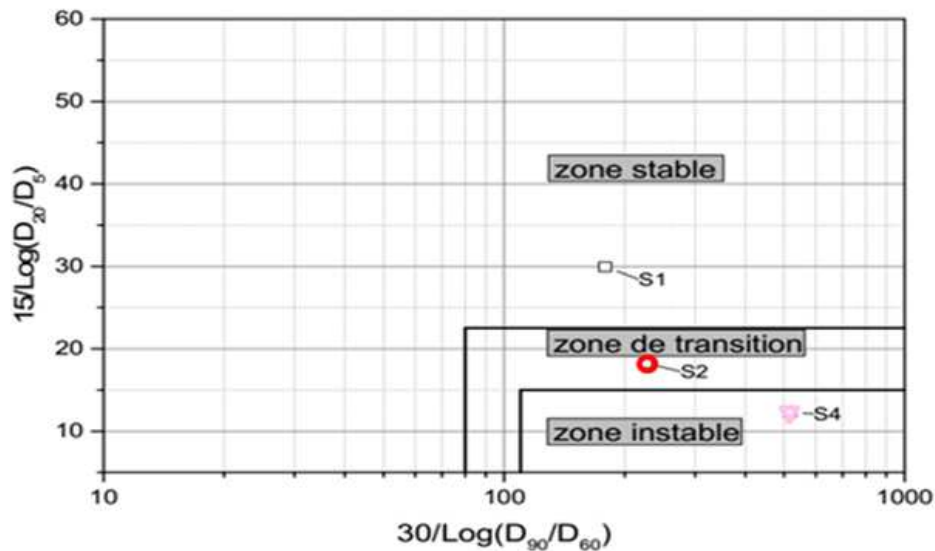


Figure IV-2 Classification des matériaux testés dans la configuration verticale avec des écoulements avec des paliers de pression selon le critère de Wan et Fell (2008)

Les matériaux testés sont mis en place dans la conduite à une masse volumique sèche de $1,8 \text{ Mg/m}^3$. Après la phase de saturation des sols dans la conduite par des écoulements ascendants, on génère des écoulements descendants cette fois-ci afin de tester l'érodabilité de ces matériaux.

IV-1-1-2 Evolution temporelle des paramètres hydrauliques pour le cas des essais avec des paliers de pression

Les résultats obtenus en termes d'évolution de pressions et de débit pour les trois matériaux (S1, S2 et S4) sont regroupés sur les *Figure IV-3a, c et e*. Les matériaux sont soumis à des paliers de pression d'écoulement allant de 10 à 100 kPa pour une durée entre 30 et 45 minutes pour chaque palier. On remarque que les pressions enregistrées sur capteurs C1, C2 et C3 sont identiques à celles enregistrées sur les capteurs C4, C5 et C6 respectivement, ce qui montre que les pressions mesurées sont bien homogènes sur chaque section de l'échantillon, et ce pour les trois matériaux testés. Les pressions enregistrées sur les six capteurs de la conduite suivent l'évolution des pressions appliquées, à savoir que les pressions augmentent avec l'accroissement de la pression de pompe, puis se stabilisent jusqu'au passage au palier suivant. A titre d'exemple, pour une pression appliquée (notée P-ec) allant de 10 à 100 kPa sur le matériau S1, la pression sur le capteur C1 passe de 8 kPa à 73 kPa alors que pour le matériau S4, la pression passe de 9 kPa à 90 kPa.

La même tendance est enregistrée sur les courbes de l'évolution du débit d'écoulement aussi. Les courbes obtenues sont présentées sur la *Figure (b), (d) et (f)*. En effet, le débit augmente à chaque augmentation de la pression appliquée par la pompe, puis se stabilise jusqu'à l'application du palier suivant. Le débit d'écoulement passe de 0,025 l/s à 0,25 l/s pour le matériau S1, de 0,1 l/s à 0,37 l/s pour le matériau S2 et de 0,35 l/s à 0,45 l/s pour le matériau S4 pour une pression appliquée passant de 10 kPa à 100 kPa.

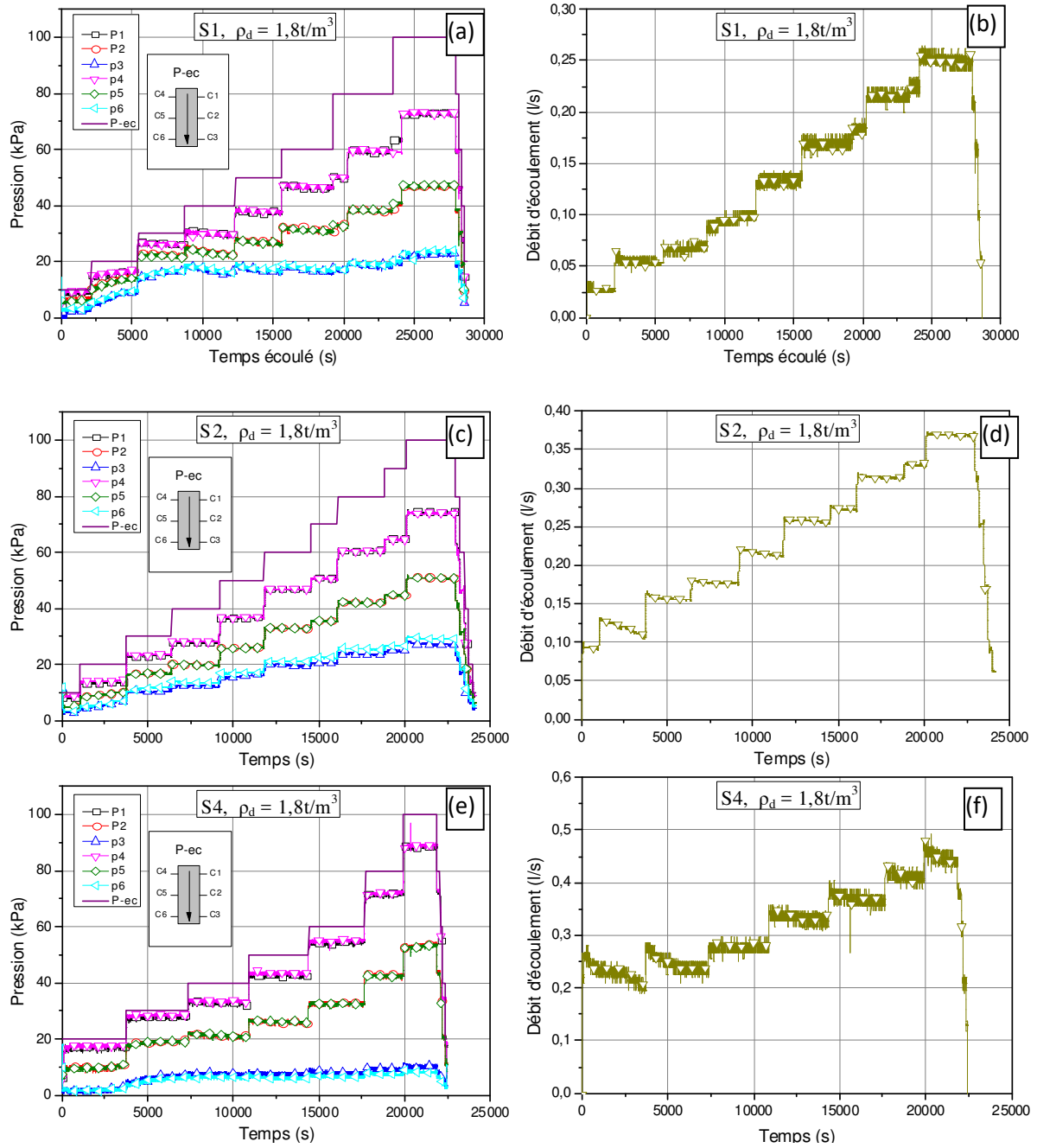


Figure IV-3 Résultats des essais avec plusieurs paliers de pression en termes de pression appliquée (P-ec) par la pompe, des pressions le long de la conduite et du débit d'écoulement : (a) et (b) : Cas du matériau S1; (c) et (d) Cas du matériau S2; (e) et (f) Cas du matériau S4

IV-1-1-3 Evolution temporelle de la masse des particules érodées pour le cas des essais avec des paliers de pression

En termes d'érodabilité, on a constaté qu'en augmentant la pression, en fonction des matériaux testés on arrive à éroder des quantités différentes des particules fines composant ces matériaux. L'évolution de la masse cumulée des particules fines érodées pour les différents essais est présentée sur la *Figure IV-4*. On remarque que cette masse dépend également des matériaux testés. En effet, pour le matériau S1, l'érosion s'initie à une pression de 50 kPa et la masse érodée est relativement faible, de l'ordre de 18 g. Pour les matériaux S2 et S4, l'érosion s'initie à une pression de 30 kPa, avec des masses totales de fines érodées, à la fin de l'essai, de 67 g et de 126 g respectivement.

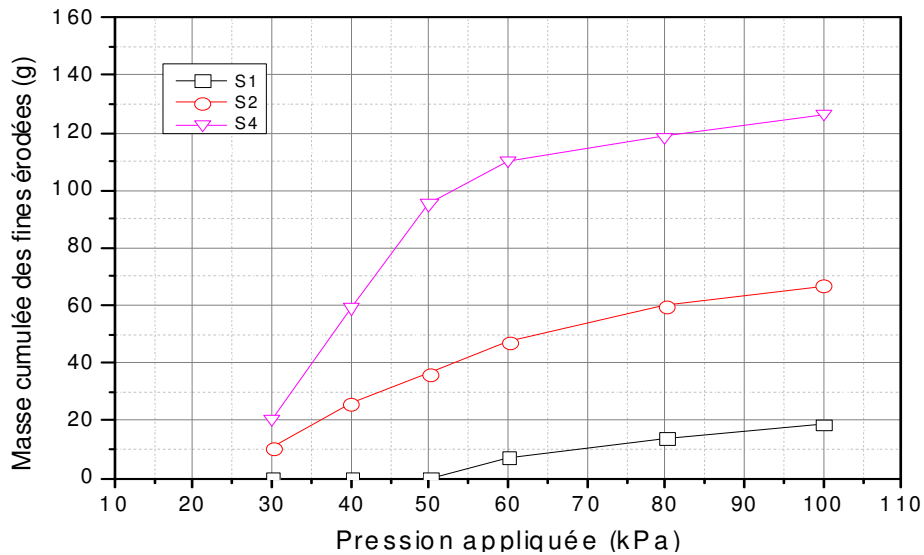


Figure IV-4 Evolution de la masse cumulée des particules fines érodées en fonction de la pression appliquée dans le cas des matériaux testés avec des paliers de pression

Il faut noter que les pressions d'initiation d'érosion indiquées ci-dessus peuvent n'être que des majorants des pressions d'initiation réelles. En effet, les faibles pressions peuvent déclencher l'érosion de certaines particules fines qui se déposent dans le circuit aval à cause des faibles débits que ces faibles pressions engendrent, sans qu'on puisse tout de même les récupérer sur le tamis placé à la sortie de la conduite.

Bien que les quantités de ces particules fines érodées soient faibles, ces premiers essais ont permis une première classification de l'érodabilité de ces matériaux. On constate bien que le

matériau S4 est plus érodable que S2, qui est à son tour plus érodable que S1, ce qui va dans le sens de classification établie selon le critère de *Wan et Fell (2008)* pour ces matériaux.

La distribution granulométrique de chaque matériau peut évoluer après chaque palier de pression en fonction des phénomènes d'érosion et éventuellement de filtration aussi (*Benamar et al. 2012*), il ne sera pas évident de comparer les différents paliers entre eux, car l'état de chaque matériau est différent à chaque début de palier, et donc ils n'ont pas le même état initial. De ce fait, dans le cas d'une étude paramétrique, il sera difficile de conclure sur l'influence d'un paramètre (granulométrie, pression appliquée...). Pour s'affranchir de cette limitation, nous avons décidé de réaliser notre étude paramétrique en utilisant la seconde procédure des essais, dans laquelle les essais sont réalisés avec un seul palier en pression d'entrée et maintenu sur toute la durée des essais.

IV-1-2 Essai à des pressions constantes appliquées sur la pompe

Afin de permettre une comparaison de l'état des matériaux entre l'état initial et l'état final, mais aussi entre les différents matériaux et les différents essais l'étude paramétrique est portée sur des essais d'érosion réalisés avec une seule pression d'entrée maintenue constante sur la durée totale de l'essai, qui est en général de l'ordre de 10 heures.

IV-2 Etude paramétrique

IV-2-1 Choix des matériaux et caractéristiques des essais

Pour réaliser l'étude paramétrique, dix-neuf (19) essais sont réalisés, dont trois essais de répétabilité. Les premiers essais étant la continuité de la partie des essais avec des paliers de pression, ils portent sur l'étude de l'influence de la forme de la courbe granulométrique des matériaux testés sur leur érodabilité. Dans ce but sept (7) matériaux avec des courbes granulométriques différentes sont testés, et les résultats sont détaillés dans la première partie de cette étude. Dans un deuxième temps, on a étudié l'influence de la pression d'écoulement d'entrée (appliquée sur la pompe) sur l'érodabilité d'un seul matériau. Pour ce faire, on choisit le matériau le plus érodable des matériaux testés pour le premier paramètre, sur lequel on réalise quatre (4) essais avec quatre (4) pressions différentes, les résultats obtenus sont également traités et synthétisés. Troisièmement, on étudie l'influence de l'ajout des particules fines, argileuses ou non, sur l'érodabilité de ce matériau le plus érodable, deux paramètres de

ce fait sont étudiés, la nature de ces particules fines (argileuses ou sable broyé) et leur pourcentage, cinq (5) essais sont réalisés en total pour ces deux paramètres. Le dernier paramètre étudié est la masse volumique sèche de mise en place ρ_d (masse volumique sèche). Pour ce faire, deux essais avec deux masses volumiques de mise en place différentes sont réalisés sur le même matériau, et pour lesquels on suit l'évolution de l'érodabilité de ce matériau. Le *Tableau IV-2* regroupe toutes les caractéristiques des essais réalisés dans le cadre de l'étude paramétrique.

IV-2-2 Influence de la forme de la courbe granulométrique

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence de la forme de la courbe granulométrique des matériaux testés sur leur érodabilité. Dix essais dont trois de répétabilité ont été réalisés sur sept matériaux différents notés S1, S2, S3, S4, S5, S6 et S7. Le changement de la forme de la courbe granulométrique des matériaux revient à changer les proportions des matériaux de référence composant ces matériaux. Les courbes granulométriques de ces matériaux S1 à S7 reconstitués à partir des mélanges des sables d'Hostun sont rappelées sur la *Figure IV-5*.

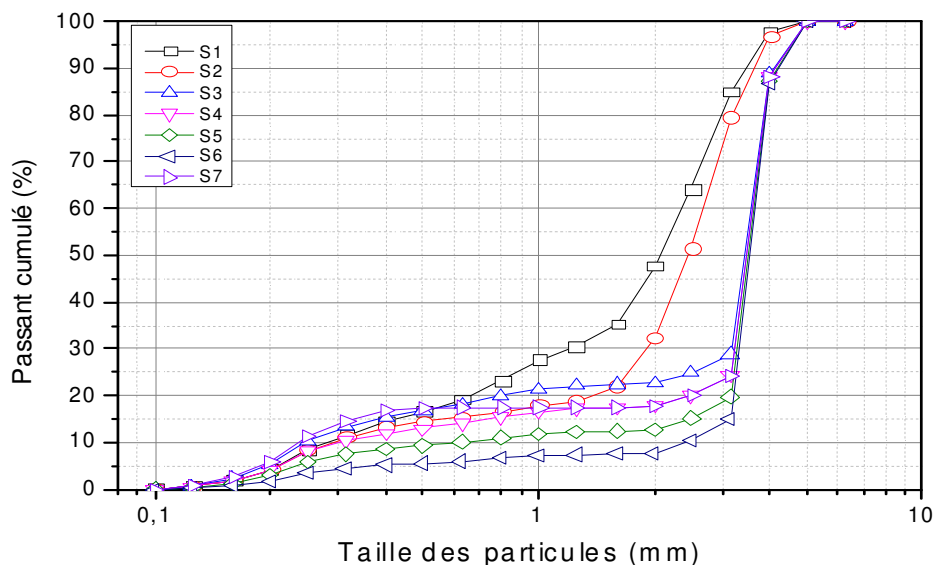


Figure IV-5 Courbes granulométriques des matériaux testés dans les essais à pression constante

Numéro d'essai	Matériau testé	ρ_d mise en place (Mg/m ³)	Pression appliquée
E1	S3	1,93	50
E2	S4	1,81	50
E3	S5	1,71	50
E4	S6	1,61	50
E5	S7	1,81	50
E6	S1	1,77	50
E7	S2	1,74	50
E8	S3 (R)	1,93	50
E9	S7	1,81	30
E10	S7	1,81	20
E11	S7	1,81	10
E12	S _b S ₆	1,81	20-50
E13	AS3	1,81	20-50
E14	AS5	1,81	20-50-100
E15	AS2	1,81	20-50
E16	AS4	1,81	20-50-80
E17	S3	1,8	50
E18	S4 (R)	1,81	50
E19	S7 (R)	1,81	20

Tableau IV-2 Tableau synthétique des essais réalisés pour l'étude paramétrique pour le cas des essais avec un seul palier de pression

Dans le *Tableau IV-3*, sont rappelées également les différentes proportions des matériaux de référence composant les matériaux S1 à S7.

MT ^(**) MR ^(*)	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	HN 2-4 tamisé à 3,15	% fines
S3	12,84	3,22	3,22	3,22	0,00	9,40	68,10	22,5
S4	10,00	2,50	2,50	2,50	0,00	10,00	72,50	17,5
S5	7,16	1,78	1,78	1,78	0,00	10,60	76,90	12,5
S6	4,29	1,07	1,07	1,07	0,00	11,20	81,30	7,5
S7	14,00	3,50	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50	17,5
S1	10	5,5	5,5	10	21	48	0	15,5
S2	10	4	2	2,5	16,5	65	0	14

(*) : Matériau testé ; (**) : matériau de référence

Tableau IV-3 Composition des matériaux testés en pourcentage massique dans les essais à pression constante

Les proportions des matériaux de référence sont calculées notamment selon le critère de *Wan et Fell (2008)*. L'objectif est de reconstituer des matériaux que l'on peut classer dans les 3 zones (stable, instable et zone de transition). En fonction de ce critère, le matériau S1 est classé comme stable, les matériaux S2 et S6 sont classés dans la zone de transition et les matériaux S3, S4, S5 et S7 sont classés comme instables, comme le montre la *Figure IV-6*.

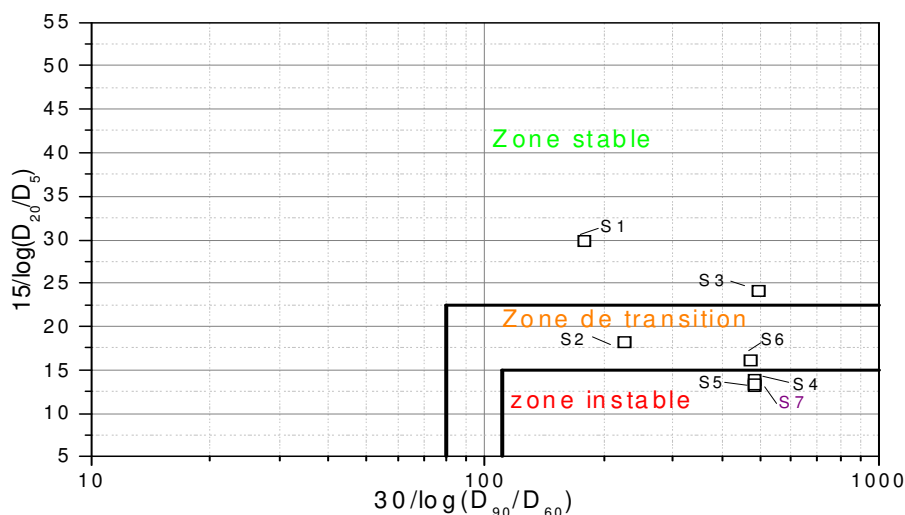


Figure IV-6 Classification de l'érodabilité des matériaux S1 à S7 selon le critère de Wan et Fell (2008)

IV-2-2-1 Analyse des matériaux à tester et conditions d'essai

Les dimensions caractéristiques nécessaires notamment pour classer ces matériaux vis-à-vis des différents critères d'érosion, ainsi que les valeurs du coefficient d'uniformité C_u , sont regroupées dans le *Tableau IV-4*. On note que les courbes granulométriques des matériaux S1 à S7 sont étalées avec un $C_u > 2$, et la courbe du matériau S7 est discontinue.

Matériaux	D ₅	D ₁₀	D ₁₅	D ₂₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₉₀	C _u	D _{max}
S1	0,21	0,28	0,42	0,66	2,05	2,36	3,48	8,44	0,4
S2	0,21	0,29	0,58	1,38	2,46	2,69	3,65	9,23	0,4
S4	0,19	0,25	0,38	0,81	3,42	3,57	4,10	14,55	0,5
S5	0,21	0,30	0,73	2,50	3,46	3,60	4,15	12,00	0,5
S3	0,24	0,61	2,44	3,16	3,51	3,63	4,19	5,97	0,5
S6	0,19	0,25	0,38	0,81	3,42	3,57	4,10	14,55	0,5
S7	0,38	2,43	3,13	3,21	3,54	3,66	4,23	1,50	0,5

Tableau IV-4 Récapitulatif des dimensions caractéristiques des matériaux testés pour l'étude de l'influence de la granulométrie

En se basant sur les travaux de *Kenney et Lau (1986)*, les courbes granulométriques de ces matériaux sont divisées en deux parties, une partie dite ‘grossière’, qui représente les particules de sol les plus grosses qui composent le squelette du matériau, et qui ne bougent pas au cours de l’essai (non érodables), et une deuxième partie dite ‘fine’, dont les particules remplissent la porosité des particules grossières. Selon *Kenney et Lau (1986)*, le diamètre de division de chaque courbe granulométrique correspond au diamètre où on enregistre la plus faible valeur de l’indice de stabilité H/F (§ I-4-2). Les courbes d’évolution du paramètre H (passant entre D et $4D$) en fonction du paramètre F (passant inférieur à D) sont tracées sur la *Figure IV-7*. Le diamètre maximal D_{max} des particules fines érodables est de 0,4 mm pour les matériaux S1 et S2 et de 0,5 mm pour les autres matériaux (*Tableau IV-4*), ces dimensions correspondent à la limite entre les parties ‘grossières’ et ‘fines’ des différentes courbes granulométriques.

En transposant ces résultats sur les courbes granulométriques des matériaux S1 à S7 il en résulte que pour les matériaux S3 à S7 la partie dite ‘fine’ est composée des matériaux HN34, HN31 et HN 0,4/0,8 et HN 0,6/1,6, et pour les matériaux S1 et S2 la partie dite ‘fine’ est composée des matériaux HN34 et HN31. La limite entre les matériaux composant les deux parties est tracée par la ligne rouge sur le *Tableau IV-3*.

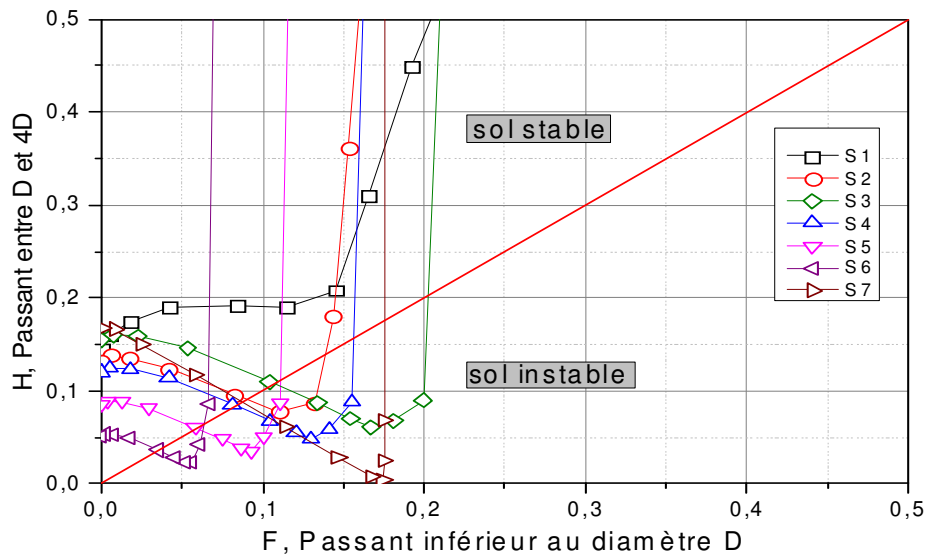


Figure IV-7 Représentation des courbes granulométriques des matériaux S1 à S7 selon le critère de Kenney et Lau (1986)

Les caractéristiques des essais réalisés pour l'étude de l'influence de la granulométrie sur l'érosion sont rappelées dans le *Tableau IV-5*. Les matériaux S1 à S7 sont mis en place dans la colonne à une masse volumique sèche des particules grossières constante et identique, à savoir $\rho_{dg} = 1,5 \text{ Mg/m}^3$. Par conséquent, les matériaux contenant plus de particules fines ont une masse volumique totale plus élevée que celle des sols en contenant moins. Il en résulte que tous ces matériaux ont la même porosité des particules grossières, mais les matériaux avec plus de particules fines ont la porosité la plus faible, 0,27 pour le matériau S3 ayant 22,5% de particules fines à 0,39 pour le matériau S6 contenant 7,5% de ces mêmes particules fines. Les matériaux S4 et S7, contenant la même quantité de particules fines (17,5%), sont mis à la même masse volumique malgré que la forme des courbes granulométriques soit différente : une granulométrie continue pour S4 et une granulométrie discontinue pour S7.

Numéro d'essai	Matériau testé	ρ_d de mise en place (Mg/m ³)	Porosité initiale	Pression appliquée (kPa)
E1	S3	1,93	0,27	50
E2	S4	1,81	0,32	50
E3	S5	1,71	0,35	50
E4	S6	1,61	0,39	50
E5	S7	1,81	0,32	50
E6	S1	1,77	0,33	50
E7	S2	1,74	0,34	50

Tableau IV-5 *Caractéristiques des essais réalisés pour l'étude de l'influence de la granulométrie des matériaux testés sur leur érodabilité*

IV-2-2-2 **Principe des essais**

Pour étudier l'influence de la forme de la courbe granulométrique des matériaux, et par conséquent la composition des matériaux sur leur érodabilité, nous avons soumis les

matériaux S1 à S7 à des écoulements sous une pression constante de 50 kPa, qui correspond à la pression de déclenchement de l'érosion dans matériaux S1, S2 et S4 testés précédemment (§IV-1-1). La durée est de 10 heures pour la plupart des essais, c'est le cas notamment des essais E6, E7, E1, E2 et E3 réalisés sur les matériaux S1, S2, S3, S4 et S5 respectivement. Cependant, les essais E4 et E5 sur les matériaux S6 et S7 respectivement ont été arrêtés après 10 min, ceci est dû au fait que le débit de remplissage du réservoir de la pompe (0,75 l/s) est inférieur au débit d'écoulement généré au cours de ces essais. Pour surmonter ce problème dans les essais réalisés par la suite, on a alimenté le réservoir avec 2 autres arrivées d'eau afin de s'affranchir de cette limitation.

Pour caractériser l'initiation et l'évolution de la suffusion, on suit l'évolution de plusieurs paramètres tels que : les pressions pression le long de la conduite, le débit d'écoulement, masse des fines érodées et aussi évolution des granulométries

IV-2-2-3 Evolution temporelle des paramètres hydrauliques

La *Figure IV-8* représente l'évolution temporelle des gradients hydrauliques moyens calculés entre les capteurs C1 et C3 au cours des essais réalisés sur les matériaux S1 à S7. Pour les matériaux S1 à S5, on constate que les valeurs du gradient se situent autour d'une valeur moyenne entre 8 m/m et de 10 m/m. en effet, pour la pression appliquée de 50 kPa (qui est l'équivalent d'une colonne d'eau de 5 m), et en prenant en compte la longueur de l'échantillon et une pression atmosphérique à l'aval de l'échantillon, on calcule une valeur du gradient hydraulique théorique de 11 m/m. On remarque que les valeurs de gradient hydraulique mesurées sont très proches de cette valeur théorique pour les différents matériaux S1 à S7 listés ci-dessus. Les petites différences peuvent être dues aux pertes de pression dans le sol situé avant le capteur C1 et après le capteur C3.

Concernant l'évolution temporelle de gradient hydraulique, on observe également sur les différentes courbes que le gradient hydraulique moyen évolue sensiblement pendant la première heure de l'essai, qui contient notamment à la phase d'augmentation de la pression de 0 à 50 kPa, puis reste stable jusqu'à la fin des essais (*Figure IV-8*).

Pour les essais E4 et E5 sur les matériaux S6 et S7, on remarque que les valeurs du gradient hydraulique sont nettement plus faibles, ceci est dû notamment à l'accumulation de pertes de pression singulières dans le circuit amont, liées à des débits beaucoup plus importants. En effet, les pertes de charge (ou de pression) singulières sont proportionnelles au carré de la

vitesse d'écoulement et donc au carré de débit d'écoulement, comme on le constate sur l'équation IV-1.

$$\Delta H = \kappa \frac{v^2}{2g} \quad (\text{IV-1})$$

Dans laquelle :

ΔH est la perte de charge du fluide (m)

κ un coefficient sans dimension dépendant de la nature du point considéré

v : la vitesse moyenne du liquide à travers la section considérée (m/s)

g l'accélération de la pesanteur (m/s^2)

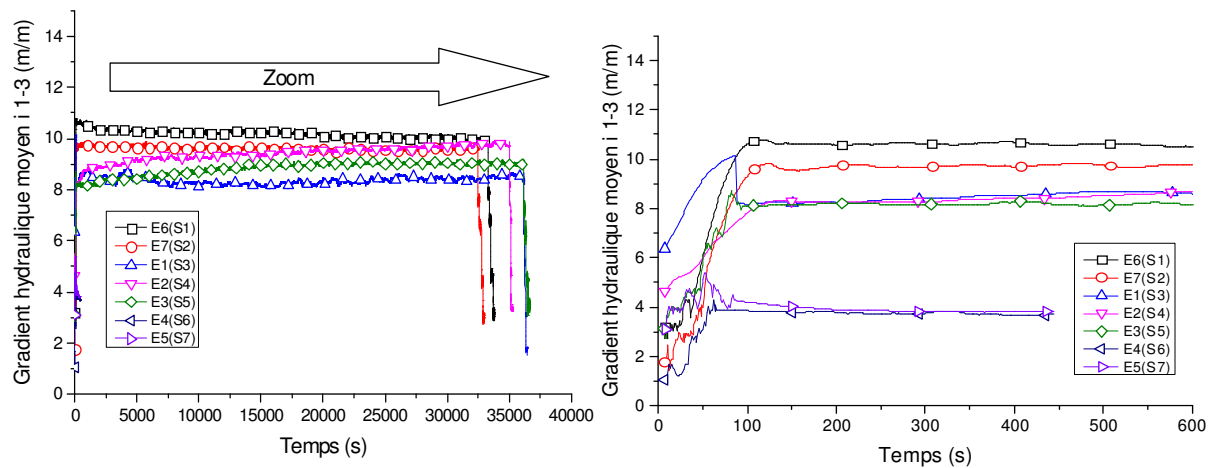


Figure IV-8 Evolution du gradient hydraulique moyen pour les matériaux S1 à S7

Les matériaux S6 et S7 étant les plus perméables (peu de particules fines (7,5 %) le matériau pour S6 et granulométrie discontinue pour le matériau S7), on enregistre des débits d'écoulement très élevés, 0,97 l/s et 0,93 l/s respectivement (*Figure IV-9*). Ce résultat confirme des pertes de charge importantes dans le circuit hydraulique d'alimentation de l'essai (notamment au niveau du débitmètre), et qui atteignent 28 kPa pour le matériau S7 et 26 kPa pour le matériau S6. On note qu'on enregistre également des pertes de charge dans le circuit hydraulique pour les matériaux S1 à S5, mais dans des proportions plus faibles, entre 1 et 3 kPa. Les valeurs des pertes de pressions pour les différents matériaux sont calculées et regroupées dans. Le calcul de ces pertes de chargé est établi dans l'*Annexes 1*.

L'autre paramètre hydraulique enregistré est le débit d'écoulement. La *Figure IV-9* présente l'évolution temporelle du débit d'écoulement pour les essais sur les matériaux S1 à S7. On remarque que les débits d'écoulement enregistrés pour ces différents matériaux varient dans une large gamme, de 0,08 l/s pour le matériau S3 à 0,98 l/s pour le matériau S7.

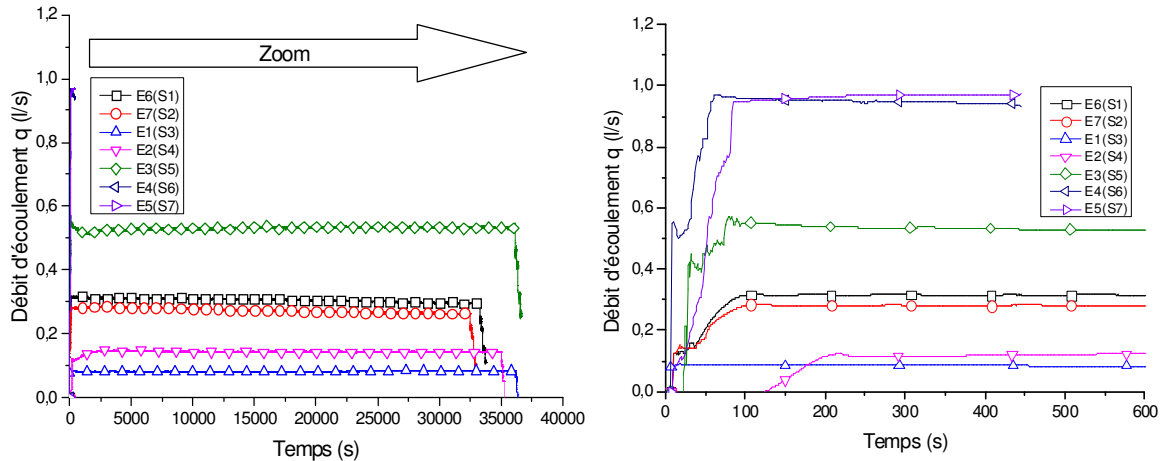


Figure IV-9 Evolution du débit d'écoulement pour les matériaux S1 à S7

Au cours des essais, on observe que pour les différents matériaux le débit varie sensiblement pendant la première heure, de la même façon que pour les gradients hydrauliques, puis se stabilise jusqu'à la fin des essais. Si on compare entre les matériaux S3 à S7, qui sont constitués exactement des mêmes matériaux de référence avec des proportions différentes (présence de HN 2/4 écrêté), on remarque que le débit d'écoulement augmente avec la diminution de la quantité de fines initiales dans le matériau. En effet, il passe de 0,08 l/s pour le matériau S3, contenant 22,5% de particules fines, à 0,53 l/s pour le matériau S6, contenant 12,5% de particules fines. Pour le matériau S7, pour lequel la granulométrie est discontinue avec 17,5% de fines, on a enregistré un débit de 0,98 l/s, qui est 6 fois supérieur à celui mesuré pour le matériau S4 contenant la même quantité de fines, mais ayant une granulométrie continue, pour lequel on a enregistré un débit de 0,14 l/s.

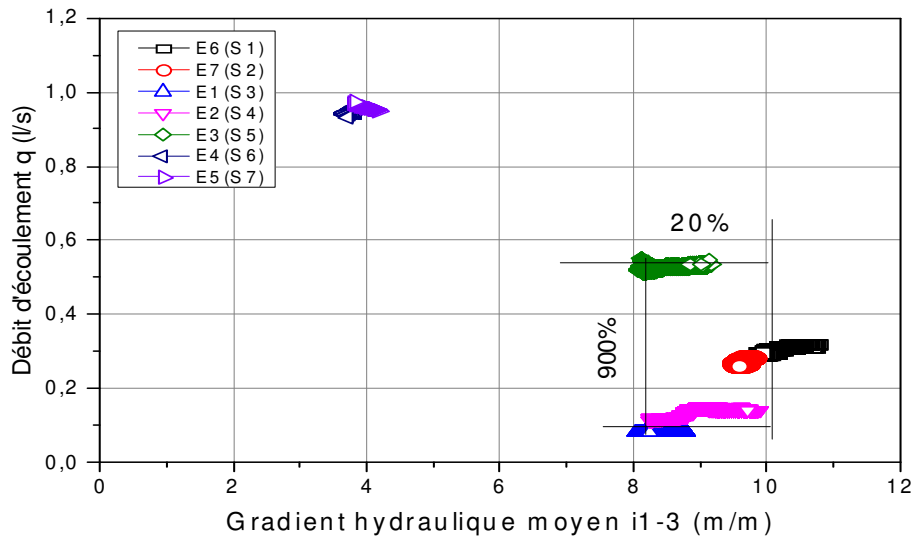


Figure IV-10 Evolution des débits d'écoulement en fonction de gradient hydraulique moyen pour les différents matériaux testés

Pour pouvoir comparer les essais entre eux en fonction des matériaux testés, il est nécessaire d'avoir le même gradient hydraulique pour l'ensemble de ces essais et de vérifier que le circuit hydraulique n'est pas responsable de pertes de charge importantes. En fait, en regardant les courbes d'évolution de débit d'écoulement pour les matériaux S1 à S5 en fonction du gradient d'écoulement moyen entre les capteurs C1 et C3 (Figure IV-10), on constate que le débit d'écoulement évolue dans une plage plus importante que celle du gradient hydraulique moyen (qui reste proche de 11 m/m attendu pour une colonne de 45 cm de matériau soumise à une pression d'entrée de 50kPa). En effet, on observe que le gradient évolue de 20 %, pour ces matériaux (le gradient varie entre 8 m/m et 10 m/m) tandis que le débit est multiplié par 9 (900%), en passant de 0,06 l/s pour le matériau S3 à 0,55 l/s pour le matériau S5. Cela confirme que pour la même pression appliquée de 50 kPa, on a enregistré des valeurs de gradient hydraulique plutôt proches comparées à l'évolution des débits d'écoulement qui en résultent. De ce fait on peut dire que le gradient hydraulique appliqué sur les matériaux S1 à S5 est "constant" et que seul le paramètre « granulométrie » change pour ces essais. Pour prendre en compte le gradient hydraulique et le débit d'écoulement, on utilisera la méthode énergétique.

Comme on l'a déjà signalé, pour les matériaux S6 et S7, vu les pertes de pression relativement importantes dans le circuit d'alimentation ; (pour des débits 0,93 l/s et 0,97 l/s

respectivement), les gradients hydrauliques moyens sont faibles, autour de 4 m/m, comme rapportés sur la *Figure IV-10*.

IV-2-2-4 Evolution temporelle de la masse des particules fines érodées

La *Figure IV-11* regroupe les courbes d'évolution temporelle de la masse cumulée des particules fines érodées pour les matériaux S1 à S7. On rappelle que les particules fines érodées sont récupérées et pesées toutes les minutes au début de l'essai, puis cet intervalle augmente pour ne faire des pesées que toutes les heures à partir de la 4^e heure. Sur ces courbes on remarque que l'érosion est plus rapide au début de l'essai, puis s'atténue au fur et à mesure que l'essai se poursuit. En effet, pour l'ensemble des essais entre 60 % et 80 % de la masse totale des particules fines érodées a été mesurée après les deux premières heures comme on le voit sur la *Figure IV-12*.

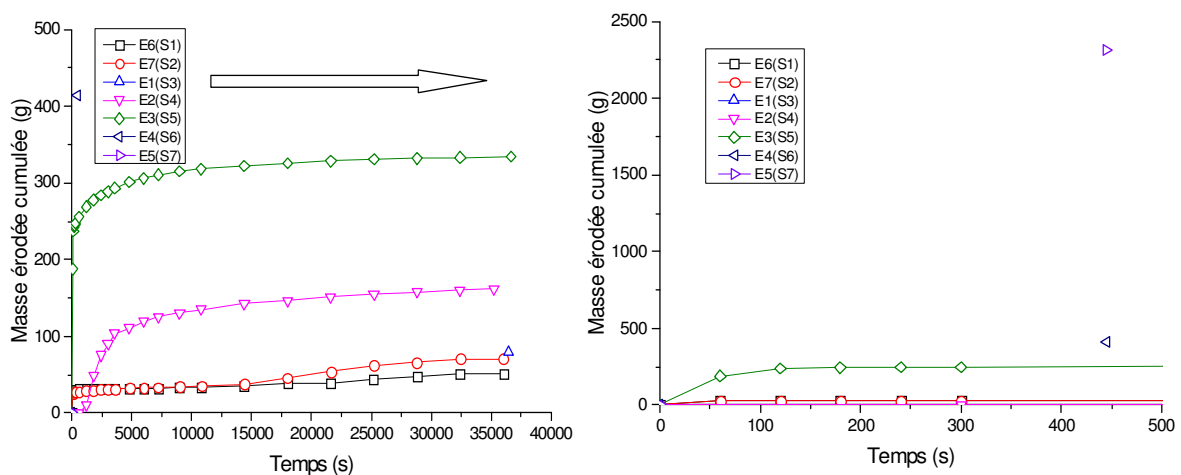


Figure IV-11 Courbes d'évolution des masses cumulées des particules fines érodées au cours des essais sur les différents matériaux testés

Pour le matériau S3 on dispose d'un seul point à la fin de l'essai, parce que les particules fines érodées se sont déposées au fond du tuyau de sortie à aval de la conduite, en raison du faible débit (0,08l/s). Pour l'ensemble des essais, on constate aussi que la masse des particules fines érodées dépend fortement de la composition initiale des matériaux, plus on diminue la quantité des fines initialement introduites et plus on érode. En effet, pour le matériau S3 qui contient 22,5 % de particules fines (érodables), on érode seulement 110 g à la fin de l'essai, ce qui correspond à 1,5 % des fines initialement introduites. Pour les autres essais, on mesure 161 g pour S4 et 343 g pour S5, qui correspondent à 3,8 % et 11 % des particules fines

initialement introduites respectivement. Pour les essais sur les matériaux S6 et S7, on a érodé 413 g et 2310 g respectivement, ce qui correspond à 25,7 % et 65 % de la masse des fines initiales après seulement 10 minutes d'essai.

On note qu'en fonction du taux de remplissage de la porosité des particules grossières, et donc en fonction de la porosité totale, et en fonction des conditions d'écoulement (pression et/ou débit d'écoulement), les particules fines peuvent ne pas bouger, être érodées et chassées à l'extérieur de sol testé, ou bien entraînées à travers la porosité des particules grossières puis se déposer (filtration). En fonction de la quantité de ces fines érodées, l'analyse granulométrique post-essai peut permettre de localiser la mobilité de ces particules fines érodées.

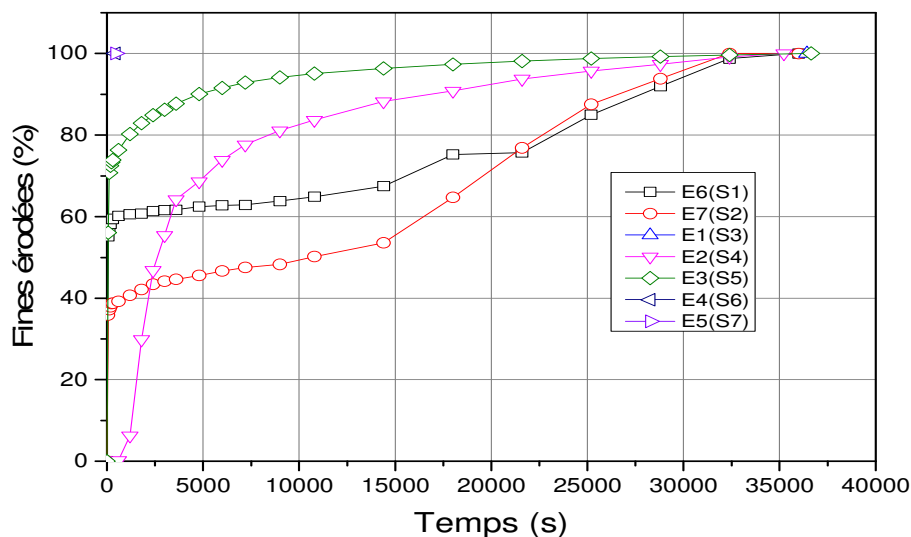


Figure IV-12 Evolution temporelle du pourcentage de la masse cumulée des fines érodées par rapport à la masse totale des fines érodées

IV-2-2-5 Evolution de la granulométrie des matériaux testés

Après chaque essai on réalise une analyse granulométrique de chaque sol selon la procédure décrite dans le *paragraphe III-2-3-6*. La *Figure IV-13* synthétise l'ensemble des résultats obtenus pour les matériaux S1, S2, S3, S4, S5 et S7. Pour le matériau S6 l'essai étant arrêté à 10 minutes on n'a pas fait d'analyse granulométrique post-essai contrairement au matériau S7. Pour les matériaux S1 à S4 on observe qu'il n'y a pas de changements significatifs dans les courbes de distribution granulométrique de ces différents matériaux après essais. L'exception est constatée pour les matériaux S5 et S7. En effet, pour le matériau S5 contenant 12,5 % de

particules fines, on constate un changement de granulométrie sur les quatre tranches, mais avec des phénomènes différents, on constate une perte des particules fines sur tranches à l'extrémité, notamment T1 et T4, et un dépôt de fines sur les tranches T2 et T2, la quantité de fines déplacées dans les deux cas étant faible (entre 2 et 3%) on n'a pas constaté des perturbations significatives sur les mesures des paramètres hydrauliques. Ce changement est plus significatif pour le matériau S7, où on constate un écart important sur les courbes finales pour les différents niveaux le long de la conduite par rapport à la courbe initiale. Le pourcentage de particules fines, initialement de 17,5 %, a diminué très significativement pour arriver à environ 6 % à la fin de l'essai. Cela montre le caractère très érodable des sols ayant une courbe granulométrique discontinue. On note aussi que pour notre étude on n'a pas noté de différence significative entre les granulométries des différentes tranches de la conduite. Suite à un problème au démontage de la colonne, on n'a pas pu récupérer les échantillons sur le matériau S6 pour lequel l'essai a duré 10 minutes.

Ces résultats montrent une fois que les matériaux ayant des courbes granulométriques discontinues sont les plus érodables, et que dans certains matériaux l'érosion peut être accompagnée de phénomènes de dépôt de particules fines déjà érodées.

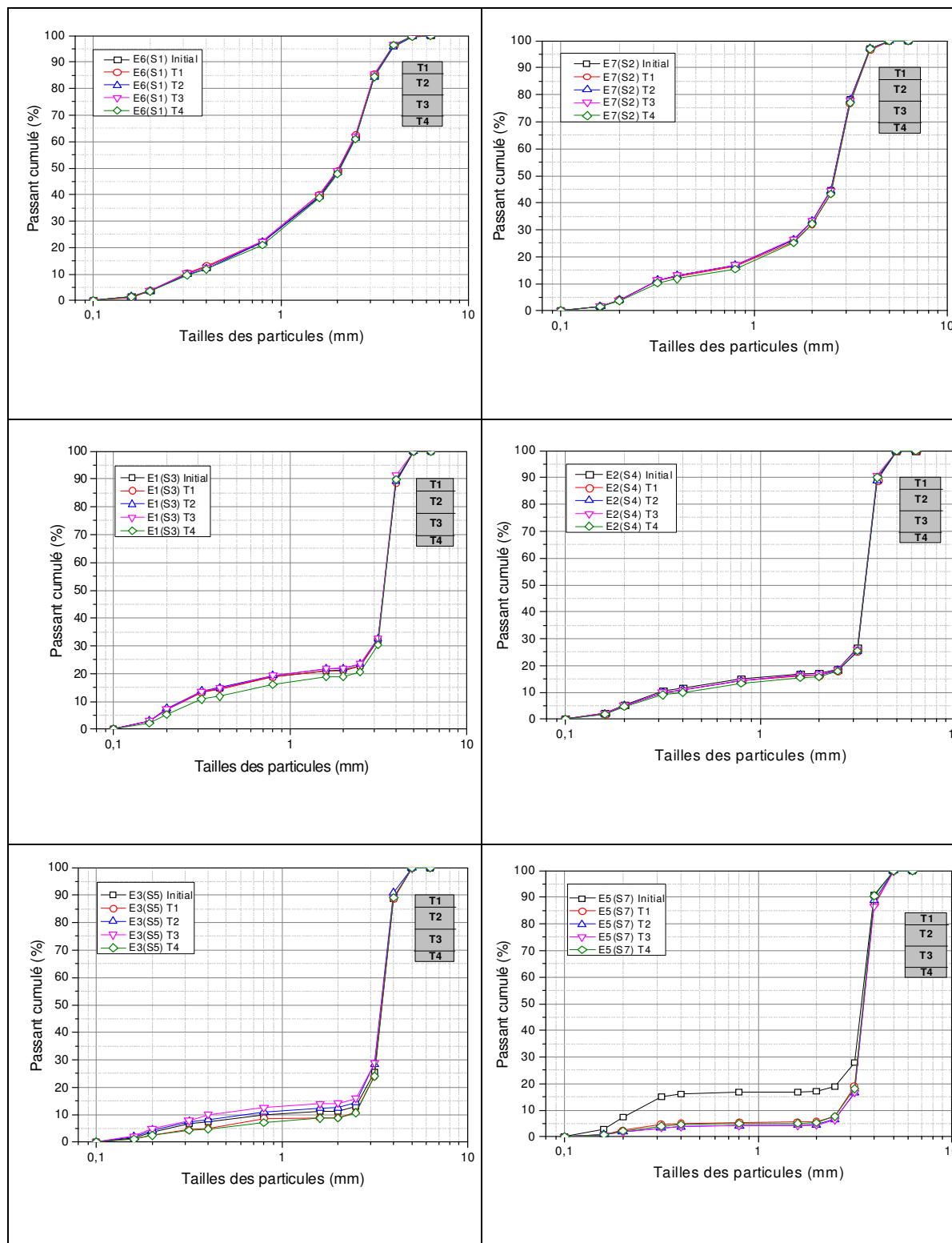


Figure IV-13 Comparaison des courbes granulométriques initiales et finales des différents matériaux testés

De même, à la fin des essais, on récupère toutes les particules fines érodées, et après séchage on trace la courbe de distribution granulométrique correspondante. Les courbes ainsi obtenues

sont regroupées sur la *Figure IV-14*. On peut noter que pour les matériaux S3 à S7, le diamètre maximal des particules fines érodées, qui est de 1,6 mm, et que plus de 90 % des particules fines érodées ont un diamètre inférieur à 0,4 mm, et pour les matériaux S1 et S2 90% des fines érodées ont un diamètre inférieur à 0,5 mm. Ces diamètres correspondent aux diamètres estimés par la méthode de *Kenney et Lau (1985)* (Voir le *Tableau IV-4*).

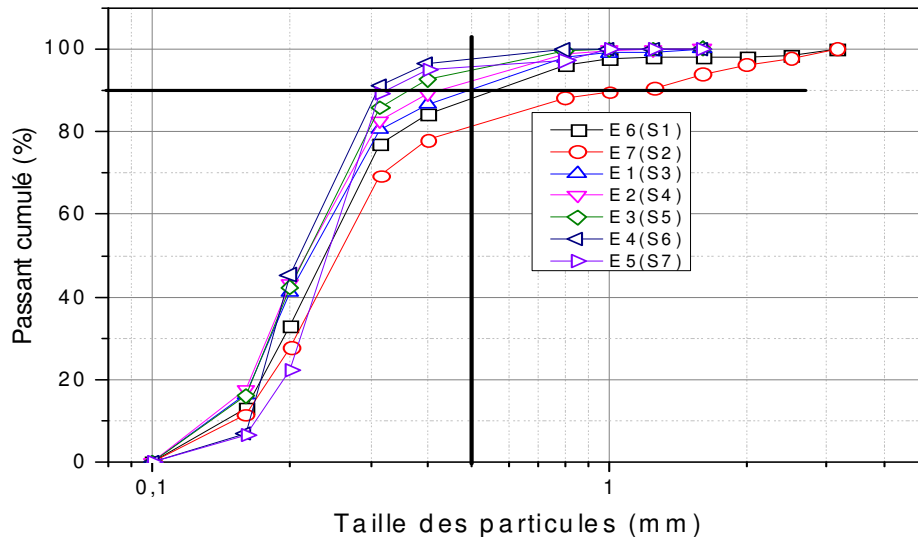


Figure IV-14 Courbes granulométriques des particules fines érodées pour les matériaux S1 à S7

IV-2-2-6 Influence des paramètres hydrauliques sur l'érodabilité des matériaux testés

Pour évaluer plus profondément l'influence de la composition des différents matériaux testés, et par conséquent la forme de la courbe granulométrique sur leur érodabilité, les résultats des essais sont synthétisés en fonction des différents paramètres hydrauliques, à savoir le gradient hydraulique (moyen dans notre cas, calculé entre les capteurs C1 et C3), le débit d'écoulement ainsi que de la puissance d'érosion (*Marot et al 2011-b*).

Le premier paramètre analysé est le rapport de la masse des fines érodées à la fin de chaque essai par rapport à la masse des fines initiales "érodables" en fonction du pourcentage de ces fines initiales dans la composition des matériaux testés. Les résultats obtenus sont regroupés sur la *Figure IV-15*. On présente seulement les résultats obtenus sur les matériaux S3 à S6, le matériau S7 étant à granulométrie discontinue et pour le matériau S1 et S2 il y a une

différence de composition initiale, absence de HN 2/4 écrêté. S6 est pris en compte à titre indicatif vu que la durée de l'essai était de 10 min seulement.

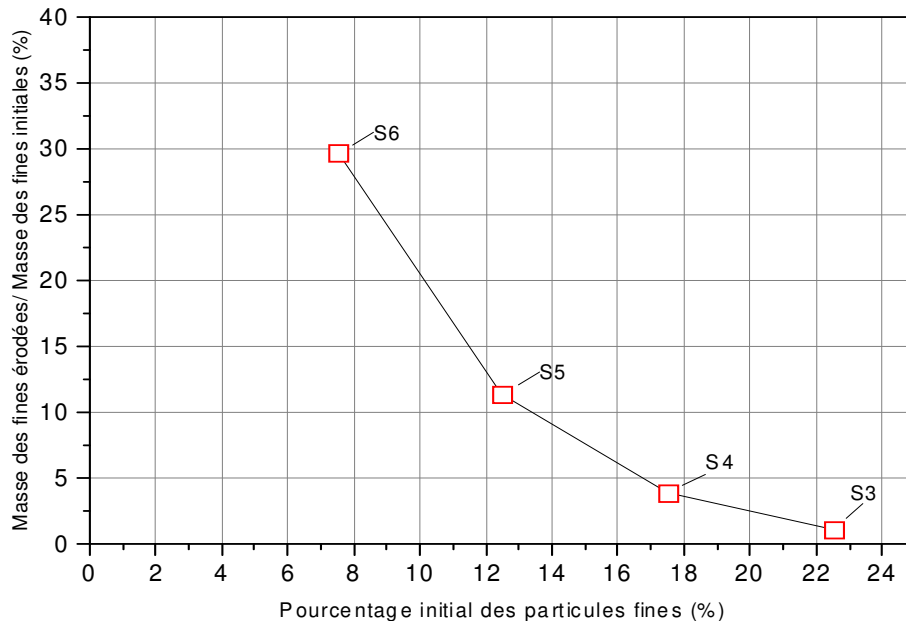


Figure IV-15 Évolution du rapport de la masse des fines érodées par rapport de la masse des fines initialement introduite en fonction du pourcentage initial de ces fines

On remarque que le rapport de la masse des particules fines érodées diminue avec l'augmentation de pourcentage des particules fines composant ces matériaux testés. En effet, pour le matériau S3 contenant 22,5 % de particules fines, on n'a érodé que 1,5 % de la masse initial des particules fines après 10 heures, alors que pour le matériau S6, contenant 7,5% des particules fines, on a érodé 25,7 % de ces particules fines au bout de 10 minutes seulement. Cette différence est due, comme on l'a déjà fait remarquer, au taux de remplissage par les particules fines de l'espace poral de la partie « grossière ». De ce fait, plus on met de particules fines dans la composition des matériaux testés, plus le volume de cet espace poral diminue et induit de ce fait une réduction du débit d'écoulement à gradient hydraulique constant. Or, selon *Wan et Fell (2004) et (2008)*, il faut une vitesse d'écoulement suffisante pour arracher et transporter les particules fines érodables à travers la porosité du squelette grossier. Cela justifie le résultat obtenu, à savoir on érode moins de particules fines dans les matériaux contenant plus de particules fines initialement. Ces mêmes résultats ont été obtenus également par *Moffat et al (2011)*, *Sail et al (2011)* et *Sibille et al (2015)*.

Pour évaluer l'influence du débit d'écoulement résultant, vu que les essais sont réalisés à pression d'écoulement imposée, on trace également la courbe du rapport de la masse des fines érodées sur leur masse initiale en fonction des débits d'écoulement. Les résultats obtenus sont regroupés sur la *Figure IV-16*.

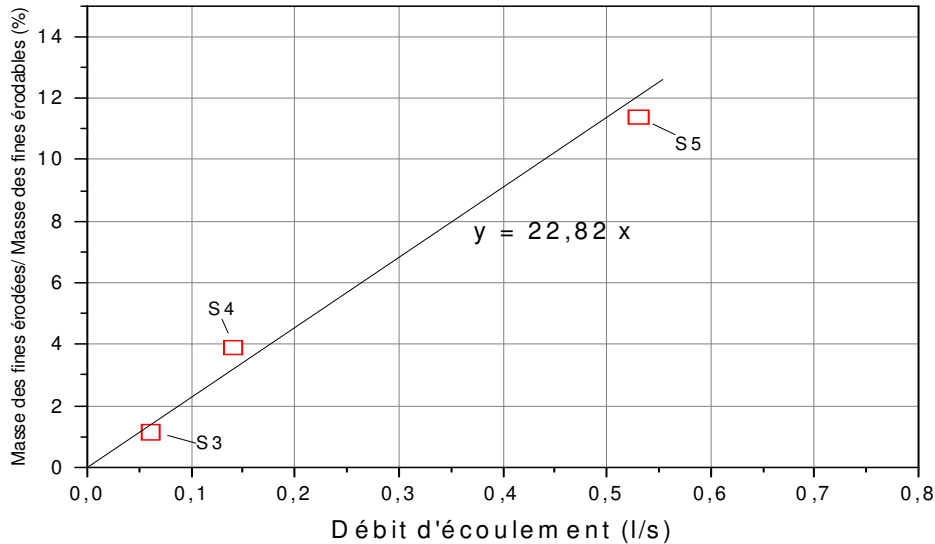


Figure IV-16 Courbe d'évolution du rapport de la masse des particules fines érodées sur leur masse initiale en fonction des débits d'écoulement induits

Sur la *Figure IV-16* sont regroupés les résultats des essais sur le matériau S3, S4 et S5. Ces résultats montrent que le rapport de la masse des fines érodées sur la masse initiale des fines introduites augmente d'une façon linéaire en fonction de débit d'écoulement, avec un rapport de 22,8 (%/l/s).

IV-2-2-7 Méthode énergétique

Pour évaluer l'influence combinée des deux paramètres hydrauliques, à savoir le gradient hydraulique moyen et le débit d'écoulement, on utilise la notion de la puissance d'érosion proposée par *Marot et al (2011-b)* pour l'étude de la suffusion, et déjà utilisée par *Sail (2012)* et *Sibille et al (2015)*. La puissance d'érosion est définie comme le produit de la différence de pression entre les extrémités de l'échantillon de matériaux testé multiplié par le débit d'écoulement, pour un écoulement vertical, la puissance d'érosion s'exprime comme suit:

$$P_{\text{erosion}} = \Delta P \times q + \Delta z \times \gamma_w \times q \quad (\text{IV-2})$$

Où :

P_{erosion} est la puissance d'érosion en watt

ΔP est la différence de pression entre la section d'entrée et la section de sortie de l'échantillon (entre le capteur C1 et le capteur C3 pour notre cas, espacé de 0,25 m).

q est le débit d'écoulement

Δz est la longueur de l'échantillon (dans notre cas, cela correspond à la distance entre les capteurs C1 et C3: 0,25m)

γ_w est le poids volumique de l'eau ($\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$)

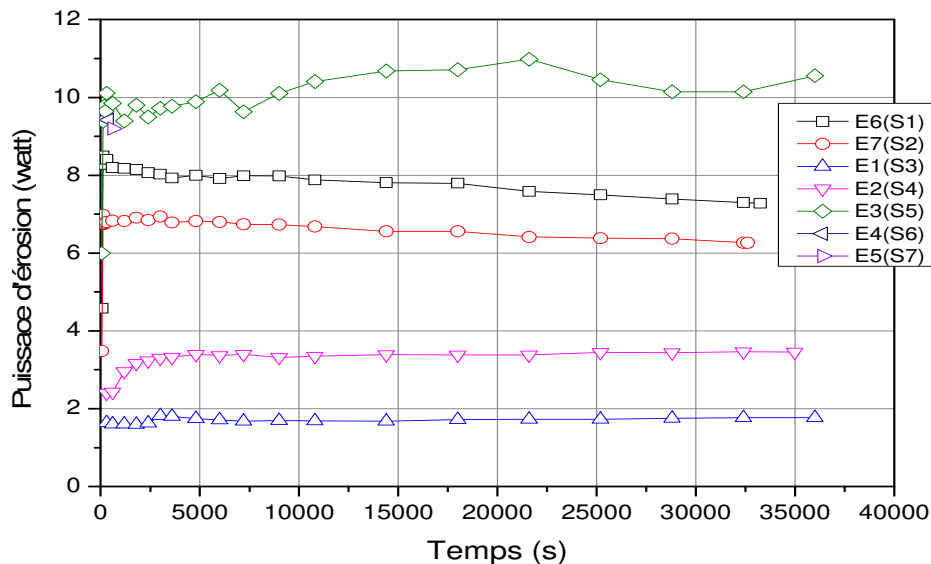


Figure IV-17 Evolution de la puissance d'érosion au cours des essais pour les différents matériaux testés

La Figure IV-17 montre l'évolution temporelle de la puissance d'érosion pour les différents matériaux testés. Les points représentés sur les courbes correspondent aux points obtenus aux différents temps auxquels on a mesuré la masse de particules fines érodées. Les débits d'écoulement et les gradients hydrauliques étant quasiment constants au cours de tous les essais après une phase d'évolution rapide, la puissance d'érosion suit également cette tendance. La puissance d'érosion est de 1,75 watt pour le matériau S3 contenant 22,5 % de particules fines et de 10 watts pour le matériau S5 contenant 12,5 % de particules fines érodables, et ce pour la même valeur de pression appliquée par la

pompe (50 kPa). La puissance d'érosion moyenne diminue alors d'une façon significative avec le pourcentage de particules fines initiales comme on peut le voir sur la courbe de la *Figure IV-18*, ceci est attendu dans la mesure où le débit diminue est le gradient hydraulique est quasi-constant.

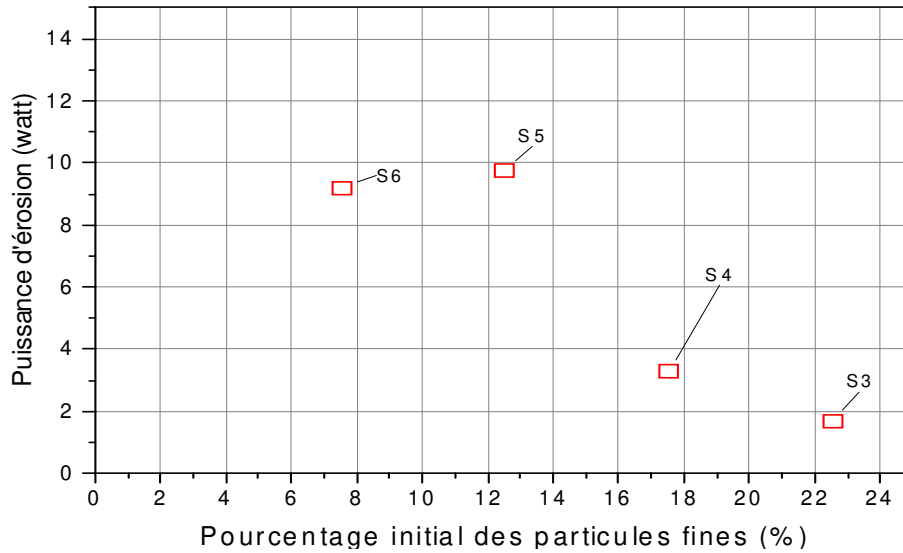


Figure IV-18 Evolution de la puissance d'érosion en fonction du pourcentage des particules fines initiales

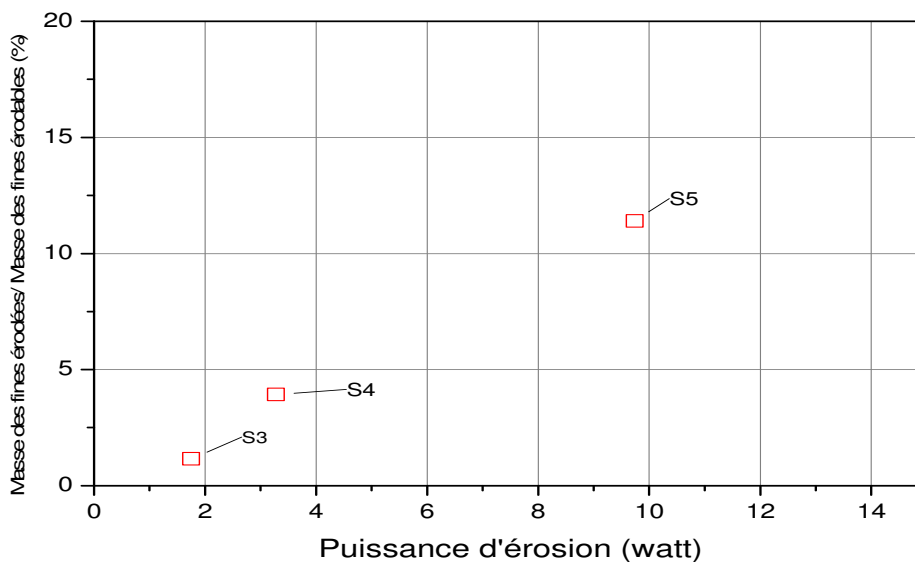


Figure IV-19 Courbes d'évolution de rapport de la masse des particules fines érodées par la masse de fines initiales en fonction de la puissance d'érosion pour les matériaux S3, S4, et S5

La courbe d'évolution du pourcentage des particules fines érodées par rapport aux particules fines initiales en fonction de la puissance d'érosion moyenne pour les matériaux S3 à S5 est présentée sur la *Figure IV-19*. Le pourcentage des fines érodées augmente quasi linéairement avec la puissance d'érosion générée par l'écoulement, il passe de 1,5 % pour la puissance de 1,75 watt pour atteindre 12 % pour la puissance de 9,5 watts. Ces valeurs restent supérieures à celles enregistrées par *Sail (2012)* sur des essais sur des billes de verre, où on trouve des valeurs de puissance inférieures à 1,2 watt.

Pour décrire l'érodabilité des matériaux avec l'approche de la puissance d'érosion, on définit le taux d'érosion surfacique, qui est le rapport de la masse des particules des fines érodées par unité de temps correspondant à la durée d'érosion de cette masse de fines et par unité de surface de l'échantillon testé, il correspond au débit massique des particules de sol érodées par unité de section transversale de l'échantillon de sol testé.

$$\tau_{er-surf} = \frac{\text{masse des fines érodées}}{t * S} \quad (\text{IV-3})$$

Où

$\tau_{er-surf}$ est le taux d'érosion surfacique en kg/s/m²

t est le temps d'érosion correspondant à la masse de fines érodées

S est la section transversale de l'échantillon

Ainsi les courbes d'évolution temporelle de ce taux d'érosion surfacique pour les différents matériaux sont représentées sur la *Figure IV-20*. Le taux d'érosion surfacique ici défini est le rapport de la masse cumulée des particules fines érodées par unité de temps correspondant et par la section de l'échantillon. On remarque que le taux d'érosion diminue progressivement pour les différents matériaux S1 à S7 et que ce taux d'érosion dépend surtout de la composition des matériaux testés. En effet, pour le matériau S3 le taux d'érosion à la fin de l'essai est de $2 * 10^{-4}$ kg/t/s², pour le matériau S5 le taux d'érosion passe de 0,1 kg/t/s² au début de l'essai à $4 * 10^{-4}$ kg/t/s² après 10 heures d'essai. Et pour le matériau S7 le taux d'érosion est 0,2 kg/t/s² après 10 minutes.

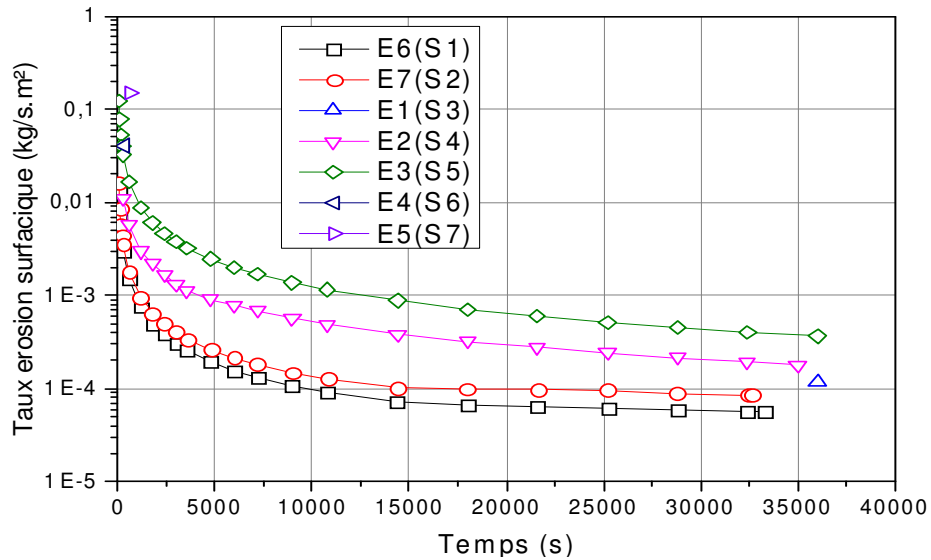


Figure IV-20 Evolution du taux d'érosion surfacique en fonction du temps pour les différents matériaux testés

Cette même évolution du taux d'érosion surfacique est mise en évidence en traçant les courbes d'évolution de taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion pour les différents matériaux (*Figure IV-21*). Pour des valeurs de puissance d'érosion qui varient dans un faible intervalle (± 1 watt), le taux d'érosion diminue généralement d'un facteur de 10^2 et ce pour les matériaux S1, S2, S4 et S5 pour lesquels on a pu estimer la masse des fines érodées pour différents intervalles de temps. Pour les matériaux S3, S6 et S7 on n'a qu'un seul point de mesure qui ne permet pas d'étudier la cinétique d'érosion de ces matériaux.

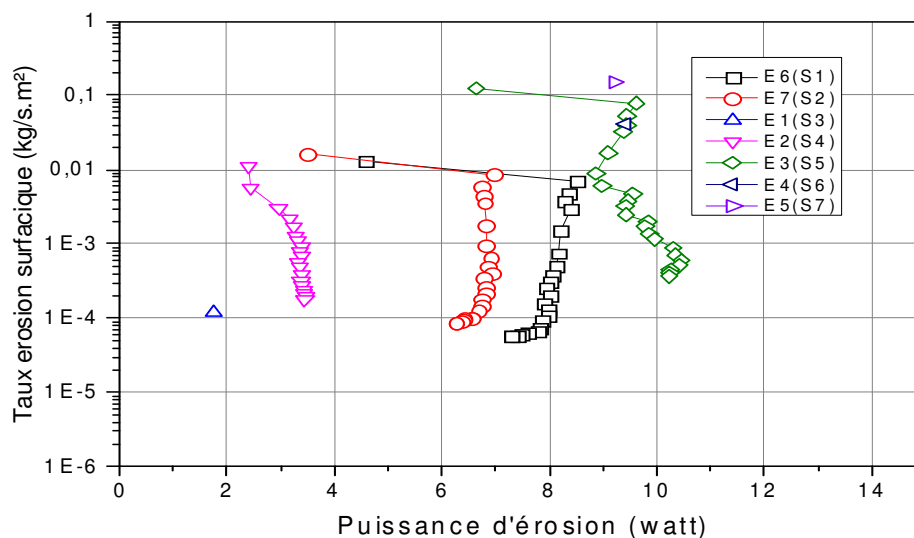


Figure IV-21 Evolution du taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion

IV-2-2-8 Evolution temporelle de la perméabilité des matériaux testés

Les courbes de la perméabilité des matériaux testés sont regroupées sur la *Figure IV-22*. Après une évolution au début de l'essai, qui correspond également aux évolutions de gradient hydraulique et de débit d'écoulement en cette période, la perméabilité de chaque matériau reste constante jusqu'à la fin des essais. Comme c'est déjà signalé en haut, la perméabilité de ces matériaux dépend largement de leur composition. En effet, on enregistre une perméabilité de $4,08 \cdot 10^{-4}$ m/s pour le matériau S3 contenant 22,5 % de fines et une perméabilité de $3 \cdot 10^{-3}$ m/s pour le matériau S5 comprenant 12,5 % de fines. Pour le matériau S6 qui contient uniquement 7,5% des particules fines et le matériau S7 ayant une courbe granulométrique discontinue, la perméabilité est plus élevée, de l'ordre de 0,1 m/s. Dans ces essais, on n'arrive pas à déterminer d'une façon certaine l'influence de l'érodabilité des matériaux testés sur l'évolution de leur perméabilité.

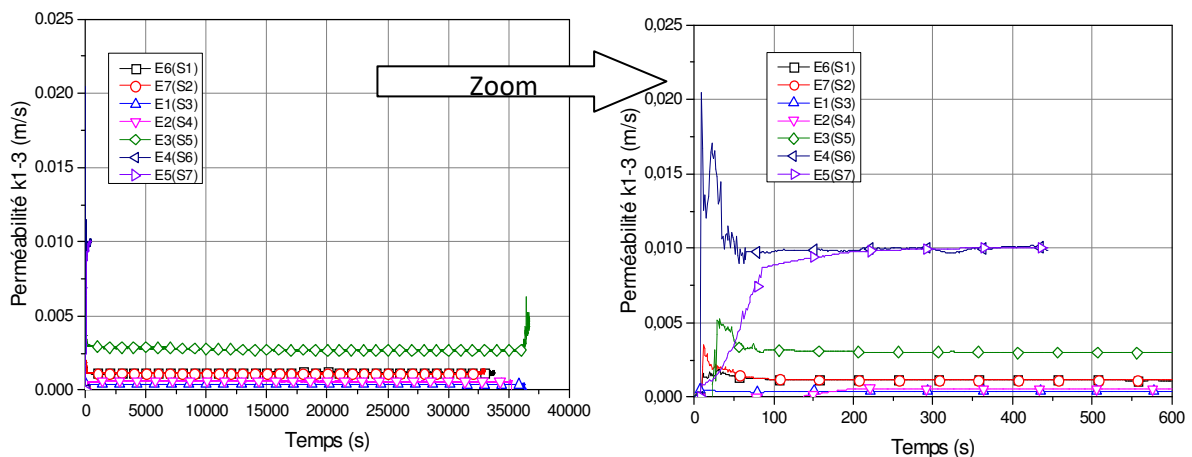


Figure IV-22 Evolution de la perméabilité apparente au cours des essais pour les différents matériaux testés

IV-2-2-9 Synthèse de l'influence de la forme des courbes granulométrique

Les résultats présentés mettent en évidence l'influence de la composition des matériaux testés, et donc leur granulométrie, sur leur érodabilité. En effet, pour la même pression d'écoulement appliquée, et pour la même masse volumique sèche initiale des particules grossières, la quantité des particules fines érodées dépend du pourcentage initial de ces particules fines de même taille. L'érodabilité des matériaux dépendant également de la vitesse d'écoulement qui les traverse, de ce fait l'augmentation du pourcentage des particules fines composant les matériaux testés réduit leur porosité, et donc leur perméabilité, et par conséquent pour le

même gradient hydraulique, la vitesse d'écoulement est réduite dans les matériaux contenant plus de particules fines (cas de matériau S3 par exemple), ce qui justifie leur faible érodabilité comparé aux matériaux qui contiennent moins de particules fines (cas de matériaux S5 et S6 par exemple). Les essais ont montré également que les matériaux ayant les courbes granulométriques discontinues (cas de S7) sont très érodables.

IV-2-3 Influence de la pression d'écoulement

Le deuxième paramètre étudié dans ces travaux est l'influence de la pression d'écoulement appliquée sur la pompe sur l'érodabilité des matériaux testés. Un seul matériau est testé sur lequel on applique une pression différente dans chaque essai.

IV-2-3-1 Conditions des essais

Pour étudier l'influence de la pression d'écoulement, on a réalisé des essais sur le matériau S7, qui est le plus érodable selon les essais décrits dans la section précédente, et sur lequel on réalise des essais d'écoulements sous différentes pressions maintenues constantes sur toute la durée des essais. En plus de la pression 50 kPa dont l'essai est décrit plus haut, nous avons réalisé d'autres essais sous les pressions 10 kPa, 20 kPa et 30 kPa. Les pressions choisies sont inférieures à 50 kPa pour éviter le problème de rupture de l'alimentation de la pompe. Les caractéristiques des essais réalisés sont regroupées dans le *Tableau IV-6*.

Numéro d'essai	Matériau testé	ρ_d mise en place (Mg/m ³)	Pression appliquée (kPa)
E5	S7	1,81	50
E9	S7	1,81	30
E10	S7	1,81	20
E11	S7	1,81	10

Tableau IV-6 *Tableau des caractéristiques des essais réalisés sous différentes pressions sur le matériau S7*

IV-2-3-2 Evolution temporelle des paramètres hydrauliques

Les pressions mesurées sur le capteur C1 pour les 5 essais sont regroupées sur la *Figure IV-23*. A cause des pertes de charge dans le circuit d'alimentation, et en particulier au niveau du débitmètre, les valeurs des pressions mesurées sur le capteur C1 restent faibles par rapport à celles appliquées au niveau de la pompe. En effet, on a mesuré 18 kPa sur le capteur C1 pour l'essai E5, 11 kPa pour l'essai E9, 8,5 kPa pour l'essai E10 et 3 kPa pour l'essai E11. Les valeurs des pertes de charge sont calculées dans *l'annexe 1*.

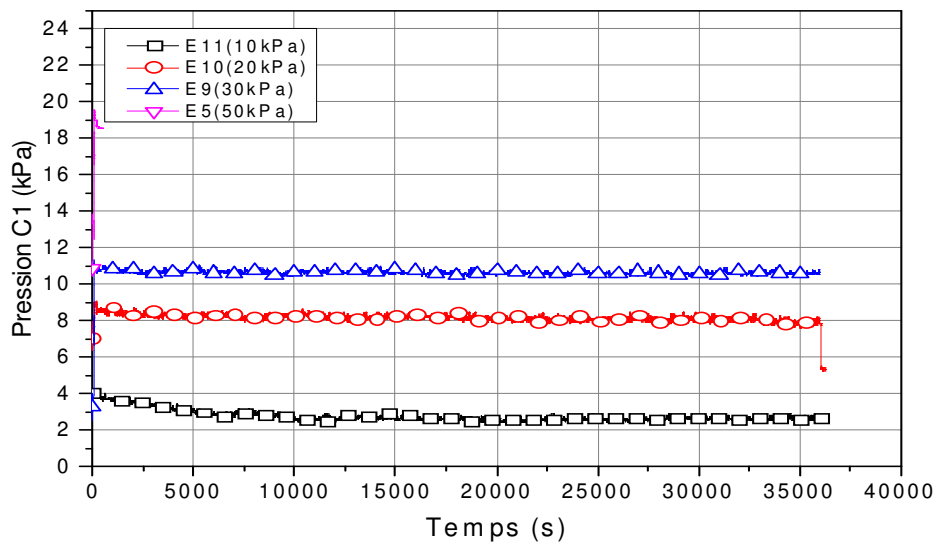


Figure IV-23 Variation de la pression au niveau du capteur C1 au cours des essais sur le matériau S7 pour les différentes pressions appliquées par la pompe

Les gradients hydrauliques moyens pour chaque essai sont calculés à partir des pressions mesurées sur les capteurs C1 et C3. L'évolution temporelle des gradients hydrauliques obtenus est montrée sur la *Figure IV-24*. On rappelle que pour la pression de 50 kPa, la durée de l'essai est de 10 min.

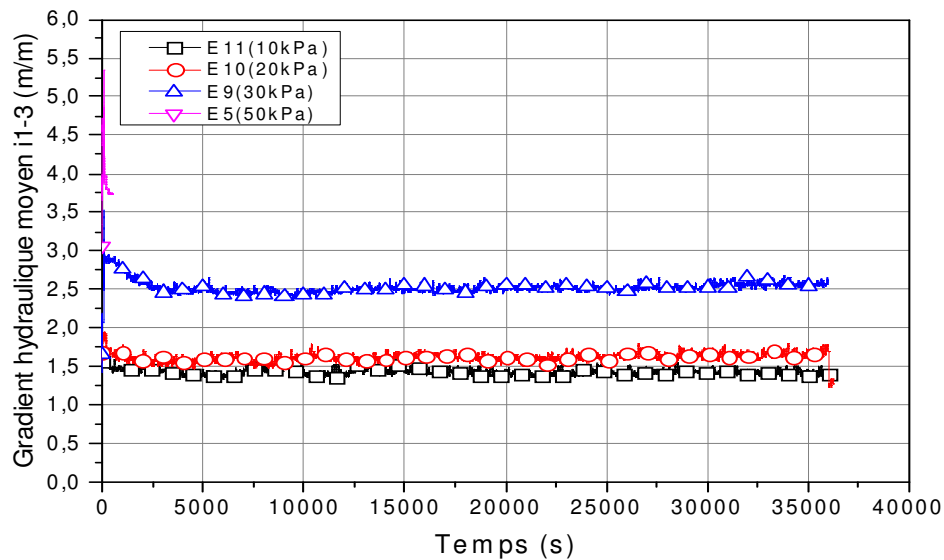


Figure IV-24 Evolution du gradient hydraulique moyen au cours des essais sur le matériau S7 pour les différentes pressions appliquées par la pompe

Les pertes de pression, dans le circuit d'alimentation, engendrent par conséquent des pertes en termes de gradient hydraulique. Ainsi pour l'essai E5 (50kPa), sous une pression de pompe de 50 kPa, le gradient hydraulique théorique est de 11 m/m, or on obtient 3,82 m/m seulement. De même, on obtient des gradients de 2,35 m/m, 1,63 m/m et 1,41 m/m au lieu de 7 m/m, 5 m/m et 3 m/m respectivement et ce pour les essais E9 (30 kPa), E10 (20 kPa) et E11 (10 kPa) respectivement, comme on peut le voir sur la *Figure IV-24*. Ces valeurs correspondent à celles obtenues sur les paliers de stabilisation après une phase d'augmentation d'une heure environ.

D'un autre côté, les courbes d'évolution temporelle des débits d'écoulement correspondant aux différentes pressions appliquées pour les différents essais sont tracées sur la *Figure IV-25*. De même que pour les gradients hydrauliques, les débits augmentent au cours de la première heure, puis se stabilisent jusqu'à l'arrêt des essais. En termes de valeurs obtenues, dans l'essai E5 (50 kPa), on enregistre un débit de 0,97 l/s après 10 min d'essai. Pour les autres essais on enregistre des débits de 0,5 l/s, 0,62 l/s et 0,8 l/s pour les essais E9, E10 et E11 correspondant aux pressions de 30 kPa, 20 kPa et 10 kPa respectivement. L'absence de données initiales pour l'essai E11 (10 kPa) est liée à un problème technique survenu sur le câblage du débitmètre.

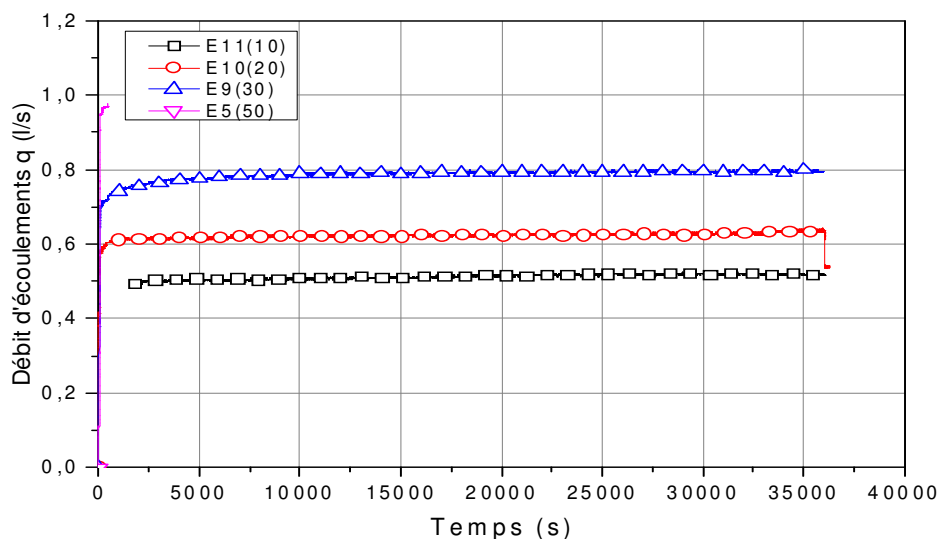


Figure IV-25 Evolution du débit d'écoulement au cours des essais sur le matériau S7 pour les différentes pressions appliquées par la pompe

L'augmentation de la pression d'écoulement engendre donc une augmentation du gradient hydraulique moyen calculé et du débit d'écoulement, et par conséquent de la puissance d'érosion aussi. Les courbes d'évolution des puissances d'érosion pour les différents essais sont regroupées sur la *Figure IV-26*. La puissance d'érosion prend la valeur de 1,83 watt pour l'essai à E11 (10 kPa) et la valeur de 9,1 watts pour l'essai à E5 (50 kPa).

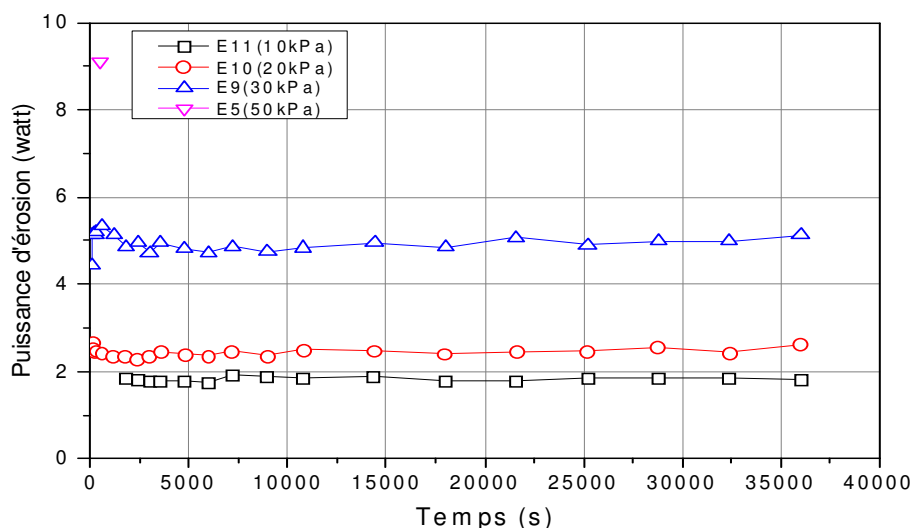


Figure IV-26 Evolution temporelle de la puissance d'érosion pour les essais sur le matériau S7 pour les différentes pressions appliquées par la pompe

IV-2-3-3 Evolution temporelle de la masse des particules fines érodées

Les courbes d'évolution des masses cumulées des particules fines érodées au cours du temps pour les essais réalisés pour les différentes pressions appliquées sur le matériau S7 sont regroupées sur la *Figure IV-27*.

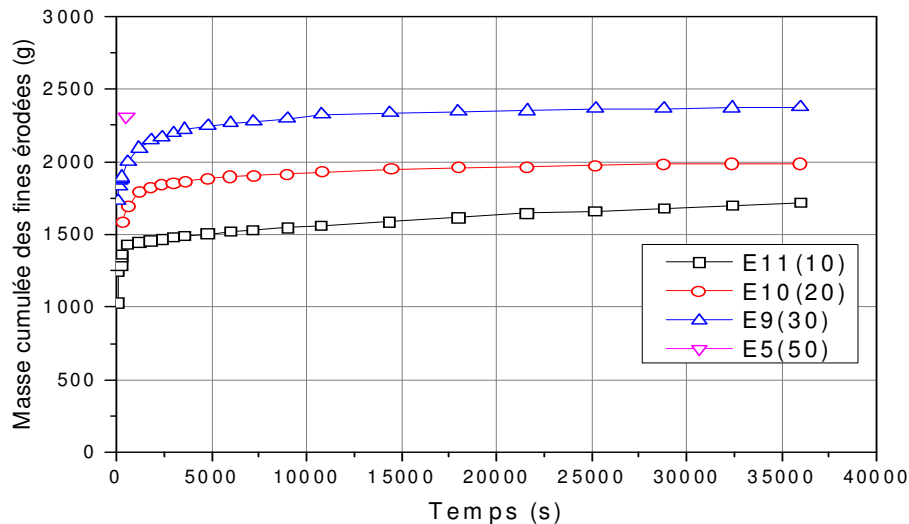


Figure IV-27 Evolution des masses cumulées des particules fines érodées au cours des essais sur le matériau S7 pour les différentes pressions appliquées par la pompe

On constate que, plus la pression appliquée est grande, et donc la pression sur le capteur C1, plus la masse de particules fines érodées augmente. Pour l'essai E5 à 50 kPa, on a érodé une masse de 2310 g sur une durée de 10 min, ce qui correspond à un pourcentage de 63,43 % de la masse de particules fines initiales. Pour les essais E9, E10 et E11, les masses des fines érodées sont de 2370 g, 1990 g et 1720 g respectivement, qui correspondent à des pourcentages de 65,2 %, 54,5 % et 47,2 % respectivement, et ce après 10 h d'essai. Si on regarde la cinétique de l'érosion au cours de ces différents essais, on remarque qu'une quantité importante des particules fines érodées sont érodées au début de l'essai, puis la vitesse d'érosion diminue progressivement jusqu'à l'arrêt des essais.

IV-2-3-4 Influence des sollicitations hydrauliques et méthode énergétique

On retrouve cette cinétique d'érosion également sur les courbes d'évolution temporelle du taux d'érosion surfacique pour les différentes pressions regroupées sur la *Figure IV-28*. A titre

d'exemple, pour l'essai E11 (10 kPa) le taux d'érosion surfacique passe de 0,065 kg/s*m² en début de l'essai à 0,002 kg/s*m² à la fin de l'essai, et pour l'essai E9 (30 kPa) le taux d'érosion surfacique passe de 1,2 kg/s*m² au début de l'essai à 0,003 kg/s*m².

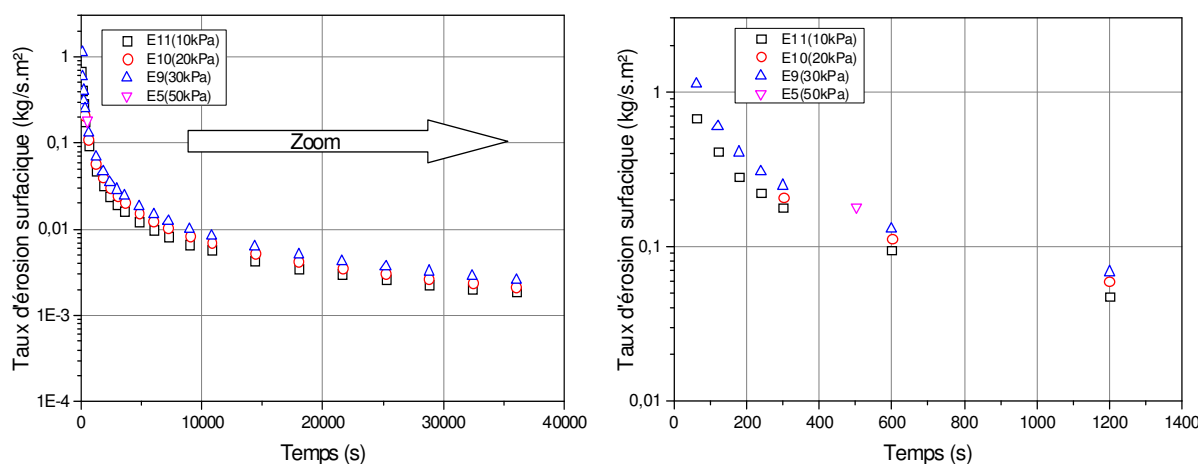


Figure IV-28 Evolution du taux d'érosion surfacique au cours de temps sur le matériau S7 pour les différentes pressions appliquées par la pompe

En s'intéressant à l'évolution du taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion, présentée sur la *Figure IV-29*, on observe que pour des valeurs de la puissance d'érosion relativement constante (± 1 watt), le taux d'érosion surfacique diminue très significativement au fur et mesure de l'essai. Ce qui va dans le même sens de la cinétique d'érosion déjà décrite en haut, où on a constaté une diminution de la vitesse d'érosion.

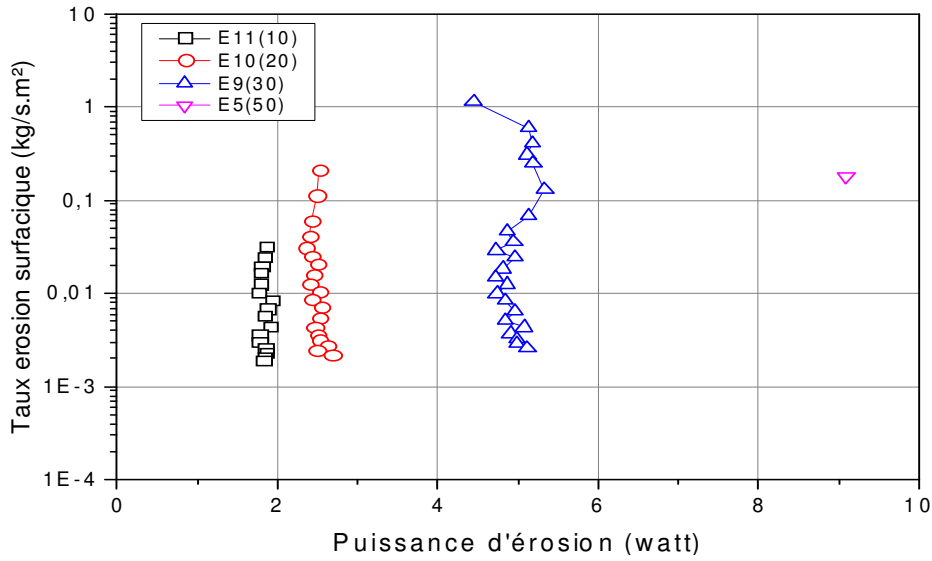


Figure IV-29 Evolution du taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion correspondante pour les différentes pressions appliquées par la pompe sur le matériau S7

Pour étudier la conséquence de cette érosion sur les conditions hydrauliques du matériau testé (S7), les courbes d'évolution de la vitesse d'écoulement en fonction de gradient hydraulique moyen pour les différentes pressions appliquées sont regroupées sur la *Figure IV-30*.

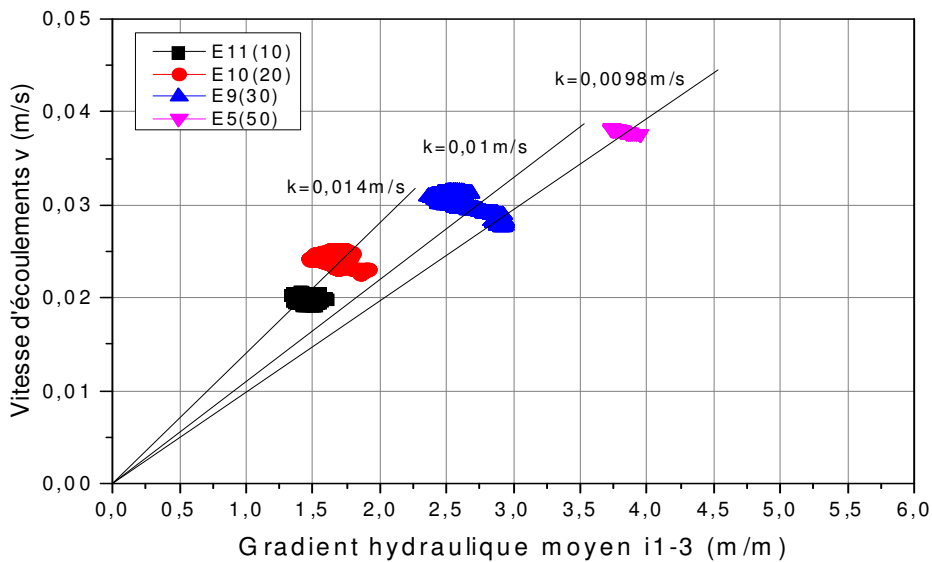


Figure IV-30 Evolution du débit d'écoulement en fonction du gradient hydraulique moyen pour les différentes pressions appliquées sur le matériau S7

Dans un régime d'écoulement laminaire dit de Darcy, la relation entre la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique est linéaire, avec une pente qui représente la conductivité hydraulique du matériau, comme on le retrouve dans l'équation ci-dessous :

$$v = k * i \quad (\text{IV-4})$$

Où v est la vitesse d'écoulement (m/s), i est le gradient hydraulique (m/m) et k est la conductivité hydraulique (m/s).

Or sur la *Figure IV-30*, on remarque que la pente de la courbe de la vitesse, et par conséquent la conductivité hydraulique, diminue en augmentant la pression d'écoulement appliquée, et donc le gradient hydraulique moyen, elle passe de 0,14 m/s pour les essais E11 et E10 avec les pressions 10 kPa et 20 kPa, à $9,8 * 10^{-3}$ m/s pour l'essai E5 sous une pression de 50 kPa. D'un autre côté, on a constaté qu'en augmentant la pression d'entrée, et donc en augmentant le gradient hydraulique on érode plus de particules fines, ce qui devrait conduire à une augmentation de la conductivité hydraulique de ce matériau testé.

Cette contradiction peut s'expliquer par le régime d'écoulement à travers les matériaux testés. En effet, on sait que le domaine d'application de la loi de Darcy est restreint dans une faible gamme du gradient, défini par un nombre de Reynolds $Re < 10$. Sur la *Figure IV-30*, on remarque qu'à partir d'une certaine valeur de la vitesse d'écoulement (environ 0,025 m/s), la relation n'est plus linéaire, et le régime d'écoulement devient turbulent, et la courbe résultante à une forme parabolique régit par la relation *Forshheimer* suivante :

$$i = \frac{v}{k} + \left(\frac{v}{k'} \right)^2 \quad (\text{IV-5})$$

k' est le coefficient de perméabilité turbulente

En utilisant la formule de *Slichter* (citée par *Truong (2012)*), pour les sols granulaires suivants :

$$k = \frac{g}{\nu} * 10^{-2} * n^{3,287} * d_{10}^2 \quad (\text{IV-6})$$

Où: k est la conductivité hydraulique (k est donnée ici en cm/s, vu le facteur de 10^{-2} ci-dessus)

g est l'accélération de la pesanteur, ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).

ν est la viscosité cinématique, ($\nu = 1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

n est la porosité, ($n = 0,32$ pour une masse volumique sèche de $1,8 \text{ Mg/m}^3$).

d_{10} est le diamètre correspondant à 10 % de passant sur le courbe granulométrique ($d_{10}=0,24 \times 10^{-3}$ m).

On a calculé une valeur de la perméabilité (conductivité hydraulique) de $k = 0,0132$ m/s, qui correspond à la pente de courbes vitesse d'écoulement/gradient hydraulique pour des vitesses d'écoulement inférieures 0,025 m/s.

Dans un écoulement turbulent, l'eau met plus de temps pour traverser les interstices des sols soumis à ce type d'écoulement, et par conséquent la conductivité hydraulique apparente a tendance à diminuer, ce qui est mis en évidence par l'influence plus significative de k' par rapport à k . Cette analyse permet d'expliquer la contradiction obtenue dans nos essais, à savoir la diminution de la perméabilité apparente malgré l'érosion d'un pourcentage considérable de particules fines initialement introduites.

IV-2-3-5 Evolution des courbes granulométriques

A la fin de chaque essai, on a fait des analyses granulométriques sur les échantillons de sol récupérés au niveau des quatre tranches délimitées par les capteurs de pression. La délimitation de ces quatre tranches ainsi que les courbes obtenues pour chaque tranche sont regroupées sur la *Figure IV-31*. Les courbes obtenues sont dessinées pour chaque tranche. Sur les courbes de la tranche supérieures (*Figure IV-31 (a)*) on remarque que la quantité de particules érodées augmente avec la pression appliquée, on a érodé moins de particule pour la pression de 10 kPa que celles érodées par la pression 50 kPa. Ce résultat est compatible avec celui des masses totales érodées (*Figure IV-27*). Néanmoins, cette différence sur les courbes de chaque tranche diminue en passant aux couches inférieures (couche 2 voir *Figure IV-31 (b)*), et couche 3 voir *Figure IV-31(c)*). C'est sur la dernière tranche qu'on a érodé le plus de particules pour les différentes pressions, les courbes se superposent sur la *Figure IV-31(d)*. Ceci peut s'expliquer par le fait que dans la tranche 4 située juste à l'aval les particules ont moins de distance à parcourir pour sortir complètement de l'échantillon, et que ces particules ont moins de probabilité à être stoppées dans la porosité des particules grossières.

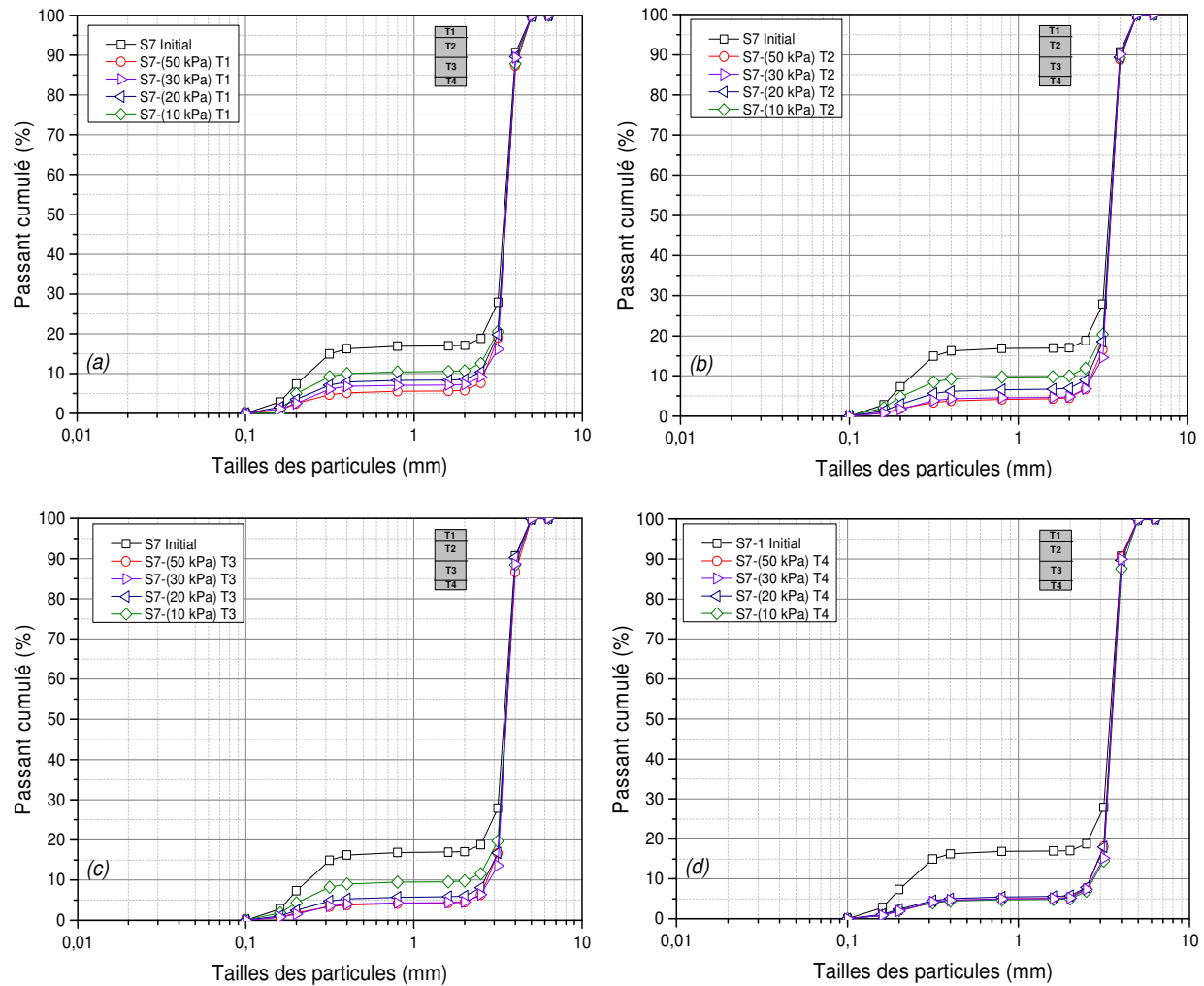


Figure IV-31 Evolution des courbes de distribution granulométriques des essais réalisés sur le matériau S7 à différentes pressions : (a) Tranche 1, (b) Tranche 2, (c) Tranche 3 et (d) Tranche 4

IV-2-4 Influence de la nature des fines

IV-2-4-1 Choix des matériaux et principe des essais

Les sols testés dans les parties précédentes sont de nature sableuse, dans la mesure où ils sont reconstitués à partir des mélanges de sables d'Hostun de différentes tailles. L'objectif de cette partie est d'évaluer l'influence de l'ajout de particules fines de nature différente du sable sur l'érodabilité d'un matériau initialement sableux. Trois matériaux fins ont été choisis pour cette étude, à savoir une argile de nature kaolinite appelée 'Speswhite', une argile de nature illite appelée 'Argile Verte de Velay', et un sable broyé de nature siliceuse appelé 'C10'. On met en garde de la différence entre les particules fines susceptibles d'être érodées dans les

essais décrits jusqu'à présent, qui sont notamment de nature sableuse, et les particules fines de nature notamment argileuse ou sable broyé ajoutées dans cette partie qui peuvent être aussi érodables au cours des essais en même temps que les particules sableuses, voir même avant. D'ailleurs, les essais ont montré que la suffusion des particules argileuses peut induire une érosion régressive du sable argileux *Bendahmane (2008)*. Le pourcentage des particules fines ajoutées dans cette partie ne dépasse pas les 5% afin d'éviter le problème de non-saturation décrit dans le chapitre 3.

Le matériau sableux de référence choisi est le S7, car c'est le plus érodable des matériaux déjà testés. On rappelle que le matériau S7 est composé de 17,5% de particules sableuses fines érodables et de 82,5% de particules sableuses grossières (voir Tableau IV-3). Pour garder le même protocole de mise en place des matériaux, à savoir une masse volumique sèche des particules grossières constante pour les différents matériaux, dont la valeur est de $\rho_{dg} = 1,5 \text{ Mg/m}^3$, nous avons gardé le même pourcentage de particules grossières de 82,5% et on a fait varier le pourcentage des particules fines sableuses en fonction notamment du pourcentage des particules fines argileuses ajoutées. Par exemple, pour le matériau AS2 contenant 3% de Speswhite, on garde les 82,5% de particules grossières, et sur les 17,5% de particules fines, on met 3% de Speswhite, et donc 14,5% de HN34 et HN31 avec le même rapport de proportion (1/5), ce qui va donner dans ce cas : 2,9% de HN31 et 11,6% de HN34. Le même raisonnement est appliqué pour calculer la composition de tous les matériaux qui seront testés dans cette partie.

Le *Tableau IV-7* regroupe les proportions des différents matériaux reconstitués après l'ajout de particules fines argileuses ou de C10. On note que les matériaux AS2 et AS3 contiennent 3% et 5% de Speswhite, les matériaux S4 et S5 contiennent 3% et 5% d'Argile verte de Velay (AVV), et le matériau S_bS6 contient 5% de C10. Les courbes de distribution granulométrique des matériaux obtenus sont présentées sur la *Figure IV-32*.

MR ^(**) MT ^(*)	% fines arg/sb	HN 34	HN 31	HN 0,4-0,8	HN 0,6-1,6	HN 1-2,5	HN 2-4	HN 2-4 tamisé à 3,15
S7	00	14,00	3,50	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50
AS2	3,00 SW	11,60	2,90	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50
AS3	5,00 SW	10,00	2,50	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50
AS4	3,00 AVV	11,60	2,90	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50
AS5	5,00AVV	10,00	2,50	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50
S _b S6	5,00 C10	10,00	2,50	0,00	0,00	0,00	10,00	72,50

(*) : matériau testé ; (**) : matériau de référence

Tableau IV-7 Tableau de composition des matériaux testés après ajout de particules fines argileuses et limoneuses

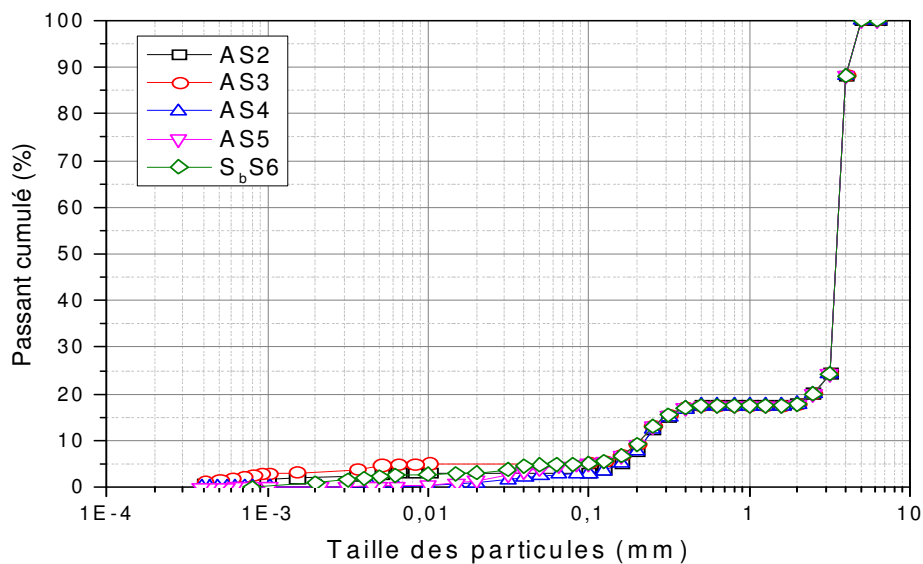


Figure IV-32 Courbes de distribution granulométrique des matériaux testés après ajout de particules fines argileuses et limoneuses

Dans un premier temps, on étudie l'influence de la nature des particules fines ajoutées sur l'érodabilité des particules sableuses, puis dans un deuxième temps on s'intéresse à

l'influence de la quantité de ces particules fines ajoutées. Pour le premier objectif, l'idée est alors de réaliser des essais sur des matériaux contenant des pourcentages similaires des particules fines de natures différentes. Pour notre étude, nous avons choisi, comme mentionné ci-dessus, deux pourcentages de particules fines (Speswhite et AVV) 3% et 5%. Dans le cas du C10, et pour des raisons qu'on va citer plus bas, on a testé uniquement un matériau contenant 5% de C10. Les caractéristiques des essais réalisés dans cette partie sont regroupées dans le *Tableau IV-8*

Numéro d'essai	Matériau testé	Nature de fines	% fines ajoutées	ρ_d mise en place (Mg/m ³) ^(*)	Pressions appliquées
E10	S7	-	0	1,81	20
E12	S _b S6	C10	5	1,81	20-50
E13	AS3	SW	5	1,81	20-50
E14	AS5	AVV	5	1,81	20-50-100
E15	AS2	SW	3	1,81	20-50
E16	AS4	AVV	3	1,81	20-50-80

(*) : La densité de mise en place est calculée en fonction de pourcentage des particules grossières qui est constante pour ces essais.

Tableau IV-8 Caractéristiques des essais réalisés avec l'ajout des particules fines

L'essai de référence choisi pour cette étude est l'essai (E10) sur le matériau S7 testé à une pression d'entrée de 20 kPa. Les résultats de cet essai ont été présentés plus haut (§IV-2-3). Les résultats de cet essai sont ensuite comparés aux résultats des essais réalisés sur les matériaux contenant les particules fines de différentes natures (kaolinite, illite, sable broyé) avec des pourcentages identiques.

IV-2-4-2 Evolutions temporelles des paramètres hydrauliques pour le cas de 5% de particules fines ajoutées

Dans un premier temps, on compare les résultats des matériaux avec 5% de particules fines ajoutées. Pour optimiser le temps, les essais sont réalisés en deux ou trois paliers de pression d'entrée une fois les réponses de matériaux en termes de pression, de débit d'écoulement et de masse des particules érodées soient stables. Pour l'essai E13 sur le matériau contenant 5% de Speswhite, deux paliers de 20 et 50 kPa sont appliqués, pendant une durée de 5 heures chacun. Dans le cas de l'essai E14, sur le matériau contenant 5% de l'Argile Verte de Velay, trois paliers de pression sont appliqués, 20 kPa pendant 5 heures, puis 50 kPa pendant 2 heures et finalement 100 kPa pendant 3 heures. Pour l'essai E12 sur le matériau contenant 5% de C10, on a appliqué deux paliers, un premier à une pression de 20 kPa pendant 5 heures, puis en passant à la pression de 50 kPa, le débit étant trop important (supérieur à 1,02 l/s), l'essai a dû être arrêté après 10 min.

Les courbes d'évolution temporelle de gradient hydraulique moyen calculé entre les capteurs C1 et C3 pour les différents essais sont regroupées sur la *Figure IV-33*. Les gradients moyens augmentent à l'application de chaque pression, puis se stabilisent, et ce pour les différents paliers de pressions appliquées. Pour le premier palier de pression à 20 kPa, le gradient moyen est de l'ordre de 1,62 m/m pour l'essai E10 sur le matériau S7, de 1,5 m/m pour matériau contenant 5% de C10 (E12), de 3,5 m/m pour matériau contenant 5% de SW (E13) et 3,6 m/m pour matériau contenant 5% de AVV (E14). Donc pour la même pression appliquée, on enregistre différentes valeurs du gradient hydraulique, ceci est notamment dû aux pertes de pression singulières dans le circuit amont de la conduite. En passant à la pression de 50 kPa, les valeurs de gradient augmentent aussi, mais avec des amplitudes différentes. En effet, pour l'essai E12 (5% de C10), le gradient a augmenté faiblement, pour atteindre 2,65 m/m sur les 10 minutes correspondant à la durée de ce palier. Pour l'essai E13 (5% de SW) le gradient hydraulique moyen est de 6 m/m, et de même pour l'essai E14 (5% de AVV), on mesure un gradient hydraulique moyen de 8,1 m/m. Pour ce dernier matériau (5% de AVV), en augmentant la pression à 100 kPa, le gradient suit une allure relativement différente des autres paliers, le gradient augmente très significativement pour atteindre 15,5 m/m, puis il diminue rapidement pour se stabiliser à la valeur de 12,7 m/m jusqu'à la fin de l'essai.

On constate que le gradient hydraulique dépend aussi de la nature de matériau testé. En effet, on enregistre une valeur importante du gradient dans le matériau contenant 5% de l'AVV

comparée à celle enregistrée sur le matériau contenant 5% de Speswhite, qui est à son tour plus importante que celle enregistrée sur le matériau contenant 5% de C10.

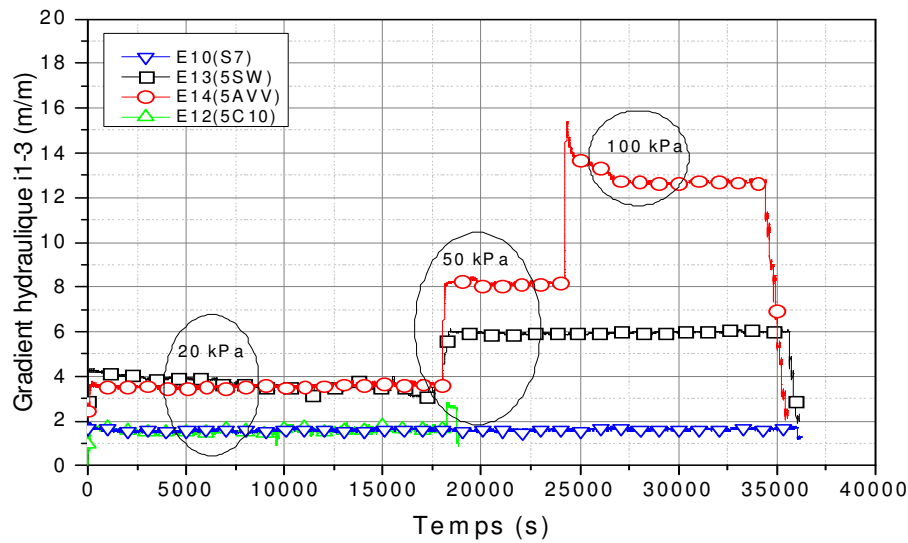


Figure IV-33 Evolution temporelle du gradient hydraulique dans les essais avec 5% de fines ajoutées

A cette évolution des gradients hydrauliques correspond une évolution similaire du débit d'écoulement montré sur la *Figure IV-34*, à savoir une augmentation de ce dernier à chaque augmentation de la pression appliquée, suivie d'une phase de stabilisation. Les pressions indiquées ici correspondent aux pressions d'entrée appliquées sur la pompe.

De plus, on observe que pour la même pression appliquée de 20 kPa (premier palier), on enregistre différentes valeurs du débit d'écoulement. Sur l'essai de référence (E5) sur le matériau S7, le débit d'écoulement après stabilisation est de 0,62 l/s, pour l'essai (E12) sur le matériau avec 5% de C10, le débit d'écoulement est de 0,65 l/s et pour les essais sur les matériaux contenant de la SW (E13) et de l'AVV (E14), les valeurs du débit sont de 0,39 l/s et 0,35 l/s respectivement. En passant à la pression de 50 kPa, les écarts des valeurs de pression sont plus marqués. Sur le matériau contenant 5% de C10, on atteint une valeur de débit de 1,02 l/s après 10 minutes. Pour les essais sur les matériaux contenant de la Speswhite et de l'Argile Verte de Velay, on enregistre des valeurs de 0,78 l/s et 0,56 l/s respectivement, qui restent faibles comparées à la valeur obtenue dans l'essai contenant le C10. On remarque également que le débit enregistré sous la pression de 50 kPa dans l'essai E14 (5% AVV) est

plus faible que le débit enregistré sur le matériau S7 sous une pression de 20 kPa avec un écart d'environ 10 %. Pour le palier de pression à 100 kPa le débit augmente progressivement à l'application de la pression pour passer de 0,98 l/s jusqu'à 1,06 l/s, ce qui correspond à la diminution du gradient hydraulique constatée.

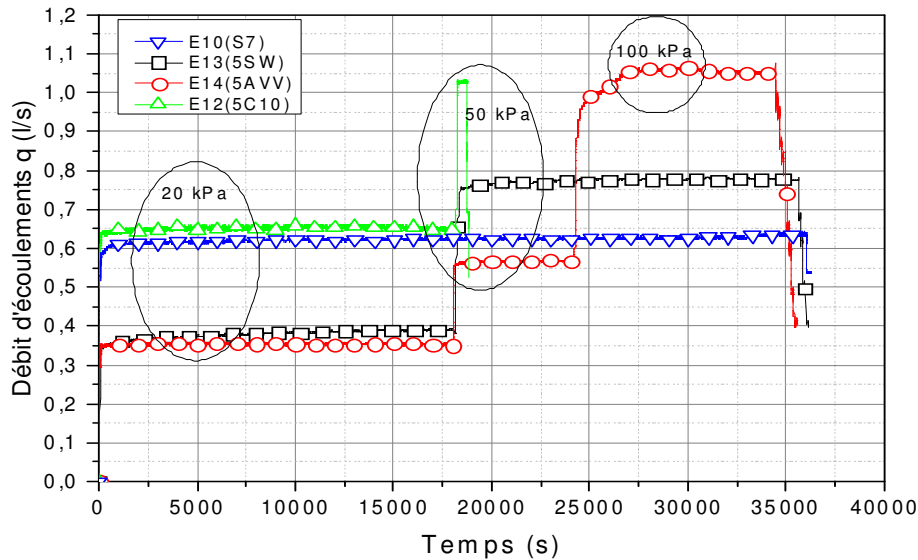


Figure IV-34 Evolution temporelle du débit d'écoulement dans les essais avec 5% de fines ajoutées

IV-2-4-3 Evolution temporelle de la masse des particules fines érodées

Dans ce qui suit, nous allons comparer les quantités des fines érodées dans les différents essais sur les différents matériaux. On note que seule la masse des particules fines sableuses dont le diamètre est supérieur à 100 μm est comparée dans cette partie, et ce afin de les comparer à la masse de fines sableuses érodées dans l'essai sur le matériau S7. Bien évidemment, à ces particules sableuses érodées s'ajoutent aussi des particules de C10, Speswhite et de l'AVV qui sont érodées au cours de l'essai, mais qu'on ne décrit pas dans cette étude. On rappelle que la collecte de ces particules fines érodées se fait à différents intervalles de temps. Au cours des 5 premières minutes, on récupère les fines érodées toutes les minutes, puis à partir de 10 minutes toutes les 10 minutes jusqu'à une heure, puis toutes les 20 minutes jusqu'à 2 heures, puis 30 minutes jusqu'à 3 heures, et après chaque heure jusqu'au passage de la pression suivante ou l'arrêt de l'essai. Les masses des particules érodées ainsi obtenues sont regroupées sur la *Figure IV-35*.

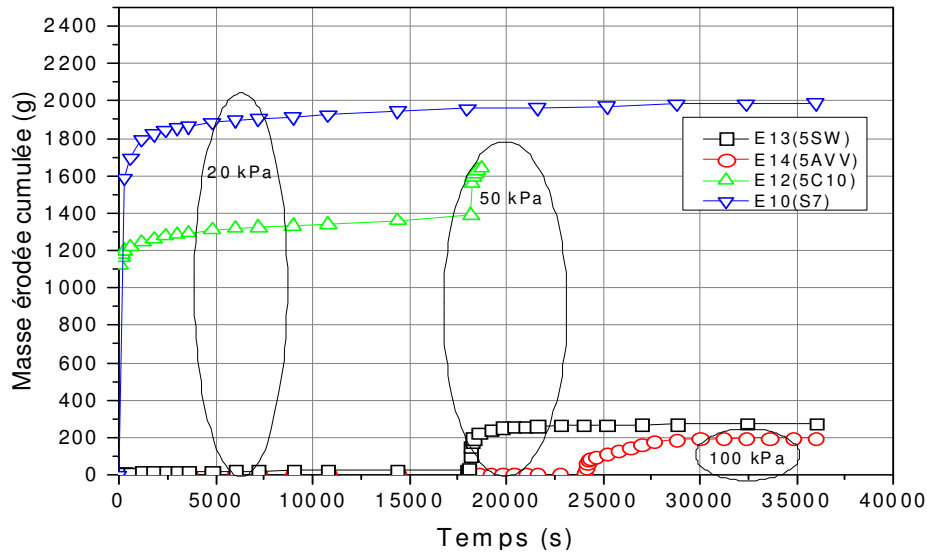


Figure IV-35 Evolution de la masse des particules érodées dans les essais avec 5% de fines ajoutées

On rappelle que pour la pression 20 kPa, dans l'essai E10 sur le matériau S7, la masse des fines érodées est de 1990 g, et que la vitesse d'érosion est plus importante au début d'essai puis diminue au cours du temps. Pour l'essai E12 sur le matériau contenant le C10, au bout de 5 heures à la pression 20 kPa la masse de sable érodé est de 1390 g. La cinétique d'érosion dans cet essai est similaire à celle de matériau de référence S7. Pour la même pression appliquée de 20 kPa, les masses de particules sableuses érodées, pour les matériaux contenant de la Speswhite et de l'AVV, sont très faibles, environ 25 g et 2,8 g respectivement après 5 heures. Cette faible érodabilité de ces deux matériaux ne permet pas de commenter la cinétique d'érosion d'une façon claire. En augmentant la pression à 50 kPa, pour le matériau contenant le C10, la masse des particules de sol érodées monte à 1640 g après 10 minutes d'essai, soit une augmentation de 250 g. Pour les essais E13 et E14, les masses des fines érodées dans cette phase sont de 272 g et 4,7 g respectivement. En augmentant la pression à 100 kPa pour l'essai E14 (5% AVV), la masse des fines érodée augmente jusqu'à 197 g, et la cinétique de l'érosion est semblable à celle des autres essais, à savoir une érodabilité rapide au début de l'application de la pression et qui tend à se stabiliser au fur et à mesure de l'essai. Cette différence d'érosion entre le Speswhite et l'AVV justifie les valeurs de gradient hydraulique moyen sur la Figure IV-33. En effet, la Speswhite étant moins résistante à la suffusion on enregistre des valeurs de gradients hydrauliques plus faibles comparées à celles trouvées pour l'AVV qui est dû à la perte de matériau.

Pour relativiser la masse des particules érodées par rapport à l'état initial des matériaux testés, on calcule le rapport de la masse de ces particules érodées sur la masse des particules fines de même taille initialement introduite. Les courbes ainsi obtenues sont regroupées sur la *Figure IV-36*. A la pression de 20 kPa, dans l'essai E10 sur le matériau S7 on a érodé 54% des particules fines érodables. Pour la même pression appliquée, pour l'essai E12 sur le matériau contenant de C10, le pourcentage des fines érodées est de 53,5% au bout de 5 heures d'essai. En fait, le matériau S_bS6 contient moins de particules sableuses érodables que le matériau S7, 12,5 % de la masse totale de matériau S_bS6 et 17,5% pour S7, et que la masse érodée dans cet essai est faible que celle dans l'essai E10, 1390g et 1986g respectivement, ce qui fait que les pourcentages dans les essais E10 et E12 sont très proches. Pour les essais E13 et E14, contenant 5% de Speswhite et de l'argile verte de Velay respectivement, le pourcentage des fines érodées est très faible, 1,25% et 0,1% respectivement. En passant à la pression de 50 kPa, dans l'essai E12 (5% C10), le pourcentage des fines érodées est passé à 63% au bout des 10 minutes (durée de cette phase). Dans l'essai E13 (5% Speswhite) on a érodé 10,5% des particules fines érodable après 5 heures d'application à cette même pression de 50 kPa, alors que dans l'essai E14 (5% AVV) le pourcentage reste toujours très faible d'environ 0,3%. En augmentant la pression à 100 kPa sur l'essai E14, la masse totale des fines érodées correspond à 7,6% de la masse initiale des fines de même diamètre, ce qui reste toujours faible comparée à la masse des fines érodées dans l'essai E10 (*Figure IV-36*).

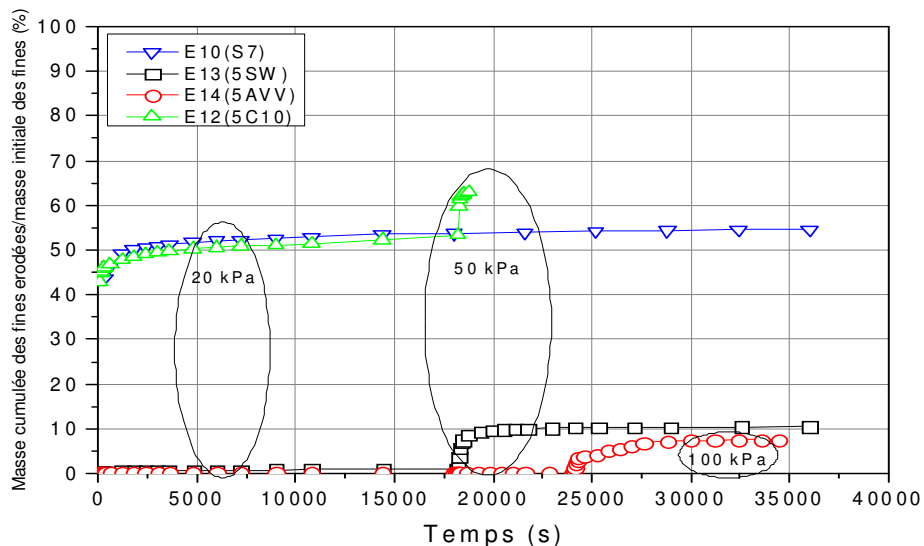


Figure IV-36 Evolution du pourcentage des fines érodées par rapport à la masse des fines érodables de la même taille

IV-2-4-4 Méthode énergétique

Les courbes d'évolution temporelle de la puissance d'érosion calculée pour les différents essais sont regroupées sur la *Figure IV-37*. Pour la pression de 20 kPa, les valeurs de la puissance d'érosion sont de l'ordre de 2,5 watt pour l'essai E10 sur le matériau S7 et l'essai E12 (5% de C10). Les valeurs de la puissance d'érosion pour les essais sur les matériaux contenant de Speswhite et de l'Argile Verte de Velay sont autour de 3,5 watts. Ces valeurs de la puissance d'érosion, calculées à partir des valeurs de pression d'écoulement (P1 et P3) et du débit d'écoulement, qui sont quasiment stables pendant chaque palier de pression, restent stables également pendant chaque palier de pression. En montant la pression sur la pompe à 50 kPa, les valeurs de la puissance d'érosion sont augmentées également. Pour l'essai sur le matériau contenant du C10, la valeur de la puissance d'érosion atteint 6,8 watts. Pour les matériaux contenant de la Speswhite et de l'Argile Verte de Velay la puissance d'érosion calculée est de l'ordre de 11,45 watts. En augmentant la pression à 100 kPa sur le matériau contenant de l'AVV, la puissance d'érosion atteint la valeur de 33,6 watts. L'allure de la courbe de la puissance d'érosion dans cette phase est différente de celle du gradient hydraulique et du débit. Notamment, on constate une stabilisation rapide de la puissance comparée à l'évolution de gradient hydraulique qui diminue après une première augmentation rapide avant stabilisation, et l'évolution du débit d'écoulement qui augmente progressivement avant de se stabiliser.

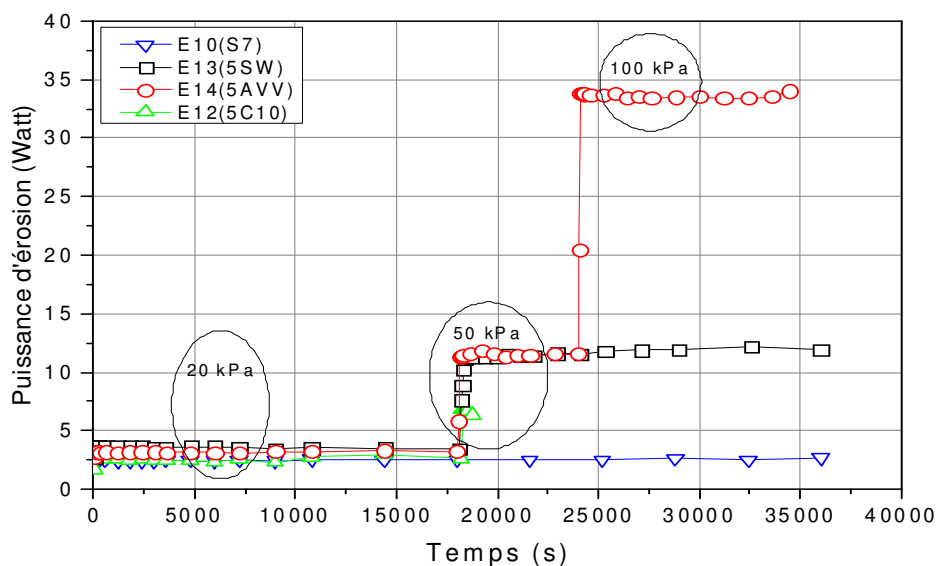


Figure IV-37 Evolution de la puissance d'érosion dans les essais avec 5% de fines ajoutées

Pour évaluer l'influence combinée de gradient hydraulique et de débit d'écoulement sur l'érodabilité des matériaux testés, nous avons étudié l'évolution de taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion définie. Les points tracés correspondent aux calculs faits entre le débit et la fin de chaque palier de pression appliquée, et les courbes obtenues sont regroupées sur la *Figure IV-38*.

Pour le matériau S7, les points représentés sont ceux obtenus à la fin de chaque essai réalisé sous les pressions de 10 kPa, 20 kPa et 30 kPa, déjà présentés plus haut (§ 4-1-2). Sur la *Figure IV-38* on constate que pour des valeurs très proches de la puissance d'érosion, autour de 3 watts, les taux d'érosion pour les essais E10, E12, E13 et E14 sur le matériau S7, le matériau contenant de C10, le matériau contenant de Speswhite et le matériau contenant de l'argile verte de Velay respectivement sont de $2 \cdot 10^{-3}$ kg/s*m², $3 \cdot 10^{-3}$ kg/s*m², $5,5 \cdot 10^{-5}$ kg/s*m² et $5,9 \cdot 10^{-6}$ kg/s*m² respectivement.

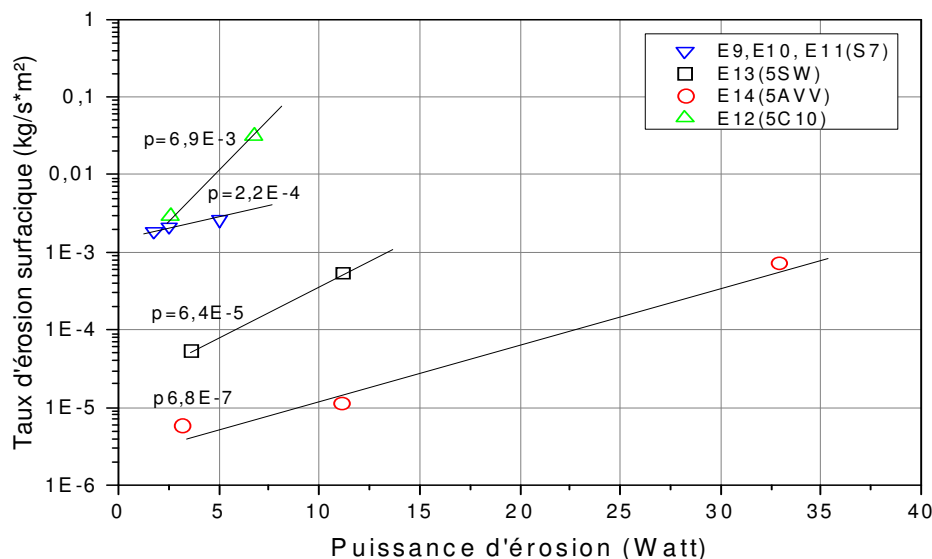


Figure IV-38 Evolution du taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion

Ce classement de taux d'érosion va dans le sens que le matériau contenant de sable broyé (C10) est plus érodable que le matériau contenant de la kaolinite (Speswhite), et qui est à son tour plus érodable que le matériau contenant de l'illite (Argile Verte de Velay). Cette constatation est aussi confirmée en s'intéressant à l'évolution de ce taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion. Sur la *Figure IV-38* on remarque que la relation entre les taux d'érosion surfacique et la puissance d'érosion est linéaire (échelle logarithmique), dont la pente varie en fonction des matériaux testés. Les pentes des différentes droites sont

reportées sur la même *Figure IV-38*. Pour le matériau S7 la pente est de $2,2 \cdot 10^{-4}$ kg/s*m²*watt, et pour les matériaux avec C10, Speswhite et AVV les pentes évaluées sont de $6,9 \cdot 10^{-3}$ kg/s*m²*watt, $6,4 \cdot 10^{-5}$ kg/s*m²*watt et $6,7 \cdot 10^{-7}$ kg/s*m²*watt respectivement. Ces valeurs permettent de dire qu'un matériau contenant un pourcentage d'illite dans sa composition est moins sensible à l'érosion comparée au matériau contenant le même pourcentage en kaolinite, et ce dernier est à son tour moins sensible à l'érosion que le matériau contenant de sable broyé avec le même pourcentage.

IV-2-5 Influence de la quantité des fines argileuses ajoutées

IV-2-5-1 Principe des essais

On a étudié dans la partie précédente l'influence de l'ajout de particules fines de différentes natures, mais avec le même pourcentage (5%). Dans ce qui suit, on va étudier l'influence de ce pourcentage sur l'érodabilité des matériaux qui en résultent.

La substitution d'une partie des sables fins dans le matériau S7 par du sable broyé C10 produit des matériaux plus érodables, dont les débits sont très importants. On a donc choisi pour l'étude de ce paramètre uniquement l'argile Speswhite et l'argile verte de Velay. Deux pourcentages ont été retenus, 3% et 5%. On a déjà présenté dans la partie précédente (§4-2-4) les différents résultats avec le pourcentage de 5%, ici on se concentre sur les comparaisons entre les différents paramètres relatifs à ces deux pourcentages.

En matière de sollicitation appliquée, les pressions étant les mêmes pour les essais E13 et E15 sur les matériaux contenant 5% et 3% de Speswhite respectivement, à savoir une pression de 20 kPa appliquée pendant 5 heures, puis une pression de 50 kPa appliquée également pendant 5 heures. Pour les matériaux contenant de l'argile verte de Velay, essais E14 et E16 pour les pourcentages 5% et 3 % respectivement, les pressions appliquées sont un peu différentes. Pour l'essai E14 avec 5 % de l'AVV, on a appliqué une pression de 20 kPa pendant 5 heures, puis une pression de 50 kPa pendant 2 heures, et finalement une pression de 100 kPa pendant 3 heures. Pour l'essai E16 avec 3 % de l'AVV, on a appliqué la pression de 20 kPa pendant 3 heures, puis 50 kPa pendant 3 heures et finalement une pression de 80 kPa pendant 4 heures.

IV-2-5-2 Evolution temporelle des paramètres hydrauliques

Les courbes ainsi obtenues pour le gradient hydraulique moyen entre les capteurs C1 et C3, le débit d'écoulement ainsi que la puissance d'érosion calculée pour les quatre essais ainsi que l'essai de référence E10 sont regroupées sur la *Figure IV-39*. Dans l'ensemble, pour le gradient hydraulique et le débit d'écoulement (*Figure IV-39 (a) et (b)* respectivement), les évolutions sont similaires pour les différents essais, à savoir une augmentation à l'application des paliers de pression, suivie d'une phase de stabilisation jusqu'à l'application du palier suivant. Pour les essais avec de la Speswhite, les gradients obtenus pour le matériau avec 3% sont plus faibles que ceux avec 5%, et ce pour les deux pressions appliquées 20 kPa et 50 kPa. En effet pour la pression à 20 kPa, on a enregistré des gradients de 2,7 m/m et 3,5 m/m pour les essais E15 et E13 respectivement, et pour la pression de 50 kPa, on a enregistré des gradients de 4,8 m/m et 6,5 m/m pour les deux essais respectifs. En termes de débit d'écoulement, les débits pour l'essai E15 avec 3% de Speswhite sont plus importants que ceux de l'essai E13 avec 5%. On a enregistré 0,5 l/s puis 0,9 l/s et 0,33 l/s puis 0,78 l/s pour les essais E15 et E13, respectivement. Cette évolution inversée du gradient hydraulique et du débit d'écoulement pour les essais E13 et E15 fait que les valeurs de la puissance d'érosion calculées pour les deux essais et pour les deux pressions appliquées soient proches (*Figure IV-39(c)*). Pour la pression à 20 kPa on a des valeurs de la puissance d'érosion de 3,45 watts pour les deux essais, et pour la pression de 50 kPa on a des valeurs de puissance d'érosion de 10,8 watts et 12 watts pour les essais avec 3% et 5% respectivement.

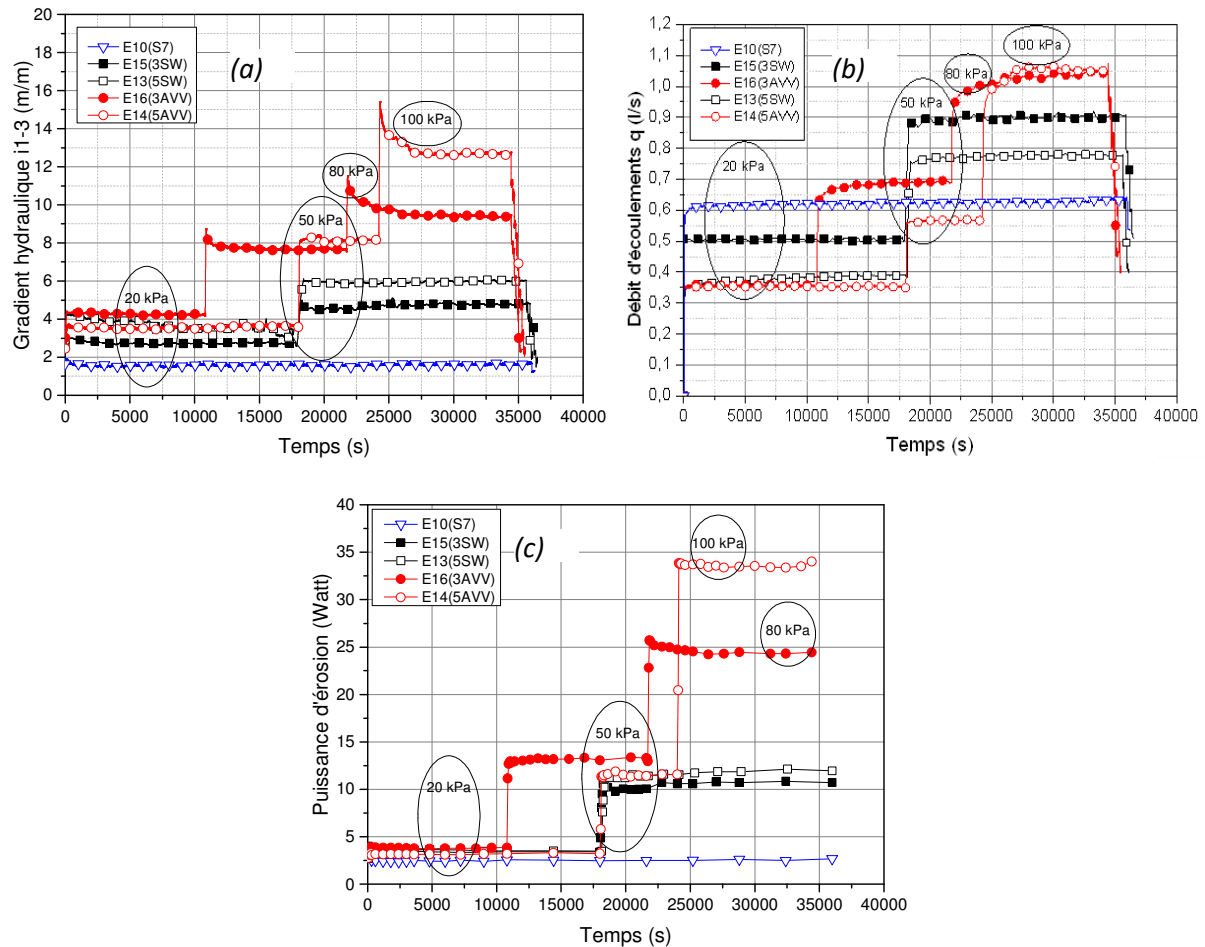


Figure IV-39 Evolution des sollicitations hydrauliques pour les différents matériaux testés à différents pourcentages de fines argileuses: (a) Gradient hydraulique moyen; (b) Débit d'écoulement ; (c) Puissance d'érosion calculée

Pour les essais avec l'argile Verte de Velay, les valeurs du gradient hydraulique sont proches pour les deux essais pour les pressions de 20 kPa et 50 kPa. Pour la pression de 20 kPa, on note des valeurs de 3,6 m/m et 4,2 m/m pour les essais E14 et E16 respectivement. Et pour la pression de 50 kPa, on note des gradients de 8,1 m/m et 7,6 m/m pour les essais E14 et E16 respectivement. Pour le dernier palier, à la pression de 80 kPa de l'essai E16 correspond un gradient de 9,45 m/m et pour la pression de 100 kPa de l'essai E16 correspond un gradient hydraulique de 12,7 m/m. En terme de débit d'écoulement, pour la pression de 20 kPa, on a quasiment les mêmes valeurs 0,35 l/s pour les deux essais, pour la pression de 50 kPa on a un débit de 0,56 l/s pour l'essai E14 (5%) et 0,7 l/s pour l'essai E16 (3%). Pour le dernier palier, à la pression de 100 kPa de l'essai E14 et à la pression de 80 kPa de l'essai E16 correspondent un débit important de 1,06 l/s pour les deux essais. C'est pour cette dernière constatation qu'on a mené l'essai E16 à une pression de 80 kPa au lieu de 100 kPa qui pourrait générer un

débit beaucoup plus important sous lequel on ne pourra pas assurer l'alimentation de la pompe. Et finalement en termes de la puissance d'érosion calculée, à la pression de 20 kPa la puissance d'érosion est autour de 3,15 watts pour l'essai E14 (5%) et 8,8 watts pour l'essai E16 (3%). A la pression de 50 kPa la puissance pour l'essai E14 est de 11,8 watts et de 13,3 watts pour l'essai E16. Au dernier palier, on a calculé une puissance de 33,5 watts pour l'essai E14 à 100 kPa et 24,4 watts pour l'essai E16 à 80 kPa.

IV-2-5-3 Evolution temporelle de la masse des particules fines érodées

La masse cumulée des particules fines érodées au cours des essais, ainsi que le pourcentage de cette masse par rapport à la masse initiale des particules fines de même taille sont représentés sur la *Figure IV-40*.

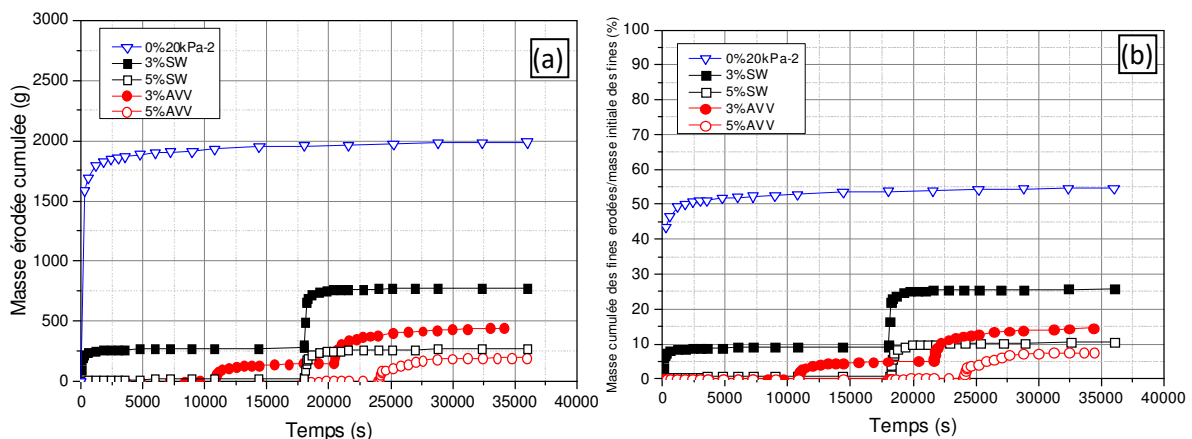


Figure IV-40 Evolution de l'érodabilité des matériaux testés à différents pourcentages de fines argileuses : (a) Masse cumulée des fines érodées, (b) Pourcentage de la masse des fines érodées par rapport à la masse initiale des fines de même taille

Sur ces courbes, on constate que la masse des fines érodées pour les essais sur le matériau contenant 3% des particules argileuses est plus importante que celle des matériaux avec 5 % des particules de même nature. Par exemple, pour les matériaux contenant de la Speswhite, on a érodé au total 25,7% des fines érodables dans l'essai E15 (3%) et 10,5% pour l'essai E13 (5%). De même pour les matériaux contenant de l'argile verte de Velay, on a érodé 14,5% pour l'essai E16 (3%) et 7,6 pour l'essai E14 (5%), malgré que la pression finale appliquée dans l'essai E14 (100 kPa) soit plus importante que celle de l'essai E16 (80 kPa). Ces résultats sont présentés d'une façon plus simplifiée sur la *Figure IV-41*, qui regroupe le pourcentage

des fines érodées en fonction de pourcentage des particules argileuses composant ces matériaux testés.

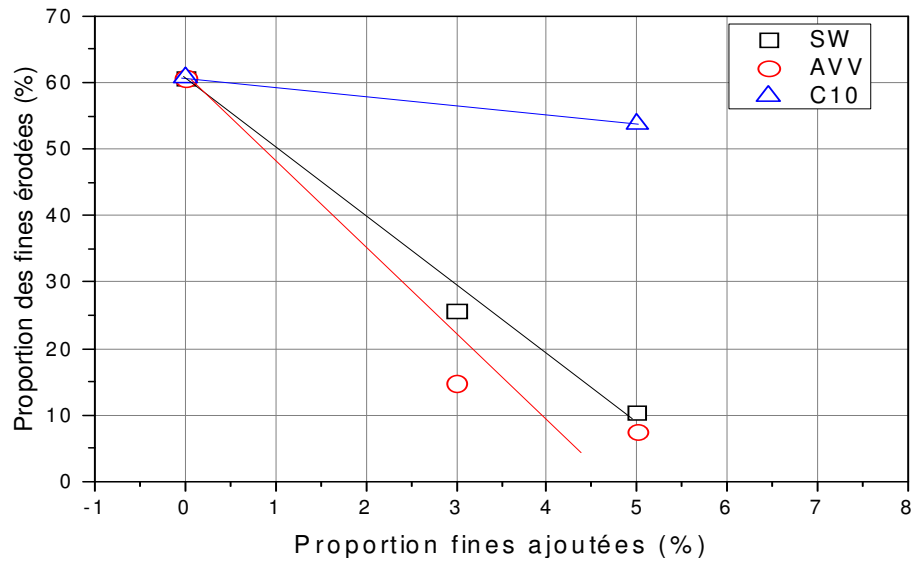


Figure IV-41 Evolution du pourcentage des particules fines érodées en fonction de pourcentage des particules argileuses composant les différents matériaux testés

IV-2-5-4 Méthode énergétique

Les courbes d'évolution du taux d'érosion en fonction de la puissance d'érosion, qui est pour rappel la combinaison du gradient de pression et de débit d'écoulement pour les différents matériaux testés sont regroupées dans la *Figure IV-42*. La relation entre le taux d'érosion surfacique (échelle logarithmique) et la puissance d'érosion est linéaire pour les différents matériaux, et les pentes correspondant à chaque droite sont mentionnées sur la *Figure IV-42*. On constate que les pentes des droites des matériaux contenant 3% de particules argileuses sont plus importantes que celles des matériaux contenant 5% de ces mêmes particules argileuses. Ce qui mène à dire que plus on met des particules argileuses dans la composition de matériau meilleure sera sa résistance vis-à-vis de l'érosion. C'est la même tendance qu'on retrouve aussi sur la *Figure IV-41* représentant l'évolution de pourcentage des particules fines érodées en fonction du pourcentage des fines argileuses ajoutées.

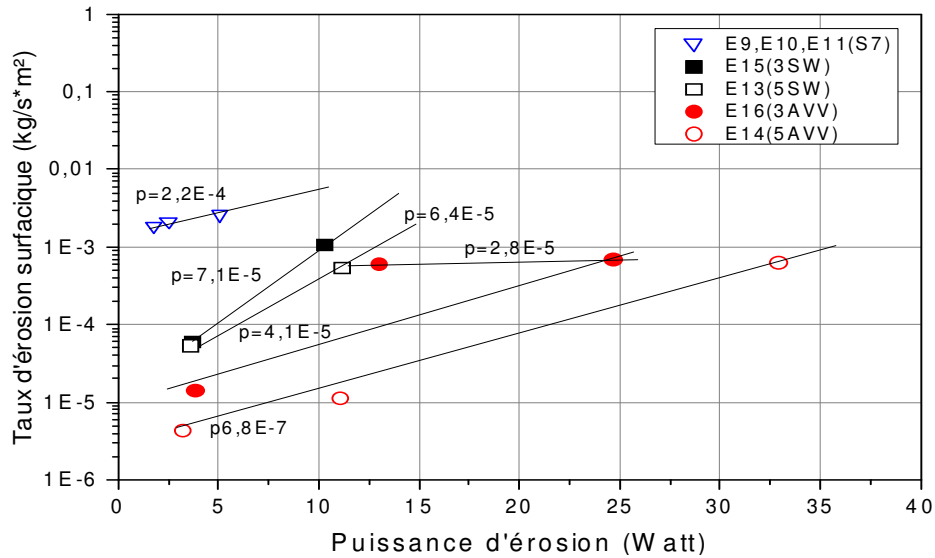


Figure IV-42 Evolution de taux d'érosion surfacique à la fin de chaque palier pour les différents matériaux testés en fonction de la puissance d'érosion

IV-2-6 Influence de la densité

IV-2-6-1 Principe et conditions des essais

Pour étudier l'influence de la densité de mise en place sur l'érodabilité des matériaux testés, deux essais sont réalisés avec le matériau S3. Le choix de matériau S3 est basé sur le fait que c'est le matériau le plus stable parmi les matériaux testés dans la partie §4-1-1, avec un pourcentage de particules fines érodées ne dépassant pas les 2% de la masse des fines initialement introduites. Dans le premier essai E1, le matériau S3 est mis en place avec une densité sèche de $1,93 \text{ Mg/m}^3$, les résultats obtenus ont été déjà présentés dans la partie §4-1-1. Dans le deuxième essai E17, le matériau S3 est mis dans la conduite à une densité sèche de $1,8 \text{ Mg/m}^3$, qui est la densité de mise en place du matériau le plus érodable (S7), cette densité correspond à une densité des particules grossières de $1,41 \text{ Mg/m}^3$, ces données sont regroupées dans le *Tableau IV-9*.

Numéro d'essai	Matériau testé	ρ_d mise en place (Mg/m ³)	Pression appliquée	Masse totale érodée(g)
E1	S3	1,93	50	166 → 1,5%
E17	S3	1,81	50	350 → 7,5%

Tableau IV-9 Tableau des caractéristiques de mise en place des matériaux testés sous les différents états de densité

IV-2-6-2 Evolution temporelle des paramètres hydrauliques

Dans les essais E1 et E17 le matériau S3 est soumis à une pression d'écoulement de 50 kPa maintenue pendant 10 heures. Les courbes d'évolution temporelle du gradient hydraulique moyen et du débit d'écoulement sont regroupées sur la *Figure IV-43*. Sur les courbes de gradient moyen *Figure IV-43(a)*, on remarque que celui-ci évolue faiblement au début de l'essai avant de stabiliser pour les deux essais, pour l'essai E1 le gradient enregistré après stabilisation est de 9 m/m et pour l'essai E17 le gradient est autour de 11 m/m. La *Figure IV-43(b)* représente l'évolution du débit d'écoulement pour les deux essais. Pour l'essai E1 avec une densité de 1,93 Mg/m³, le débit d'écoulement après stabilisation est de 0,08 l/s, alors que dans l'essai E17 avec une densité de 1,8 Mg/m³ le débit d'écoulement enregistré est de 0,11 l/s.

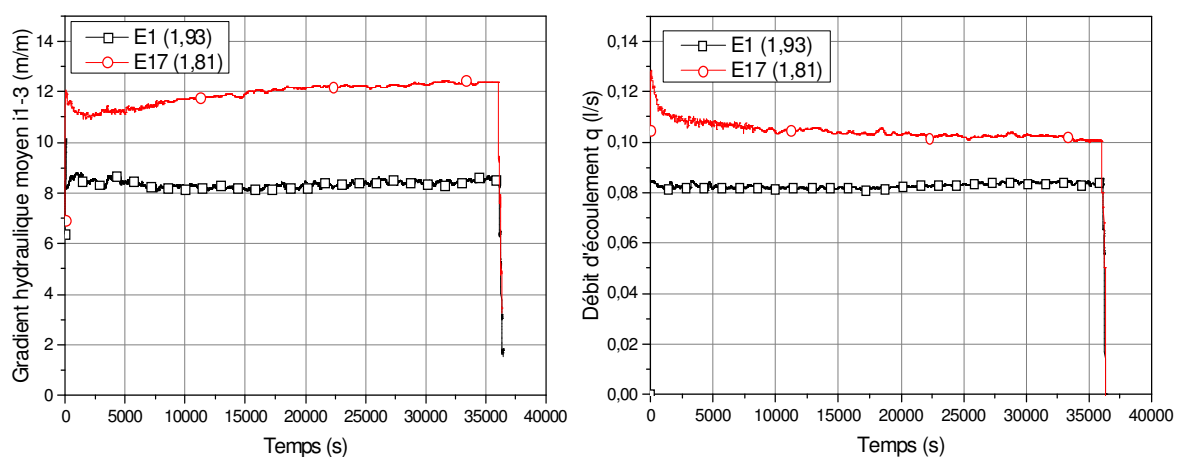


Figure IV-43 Evolution temporelle de gradient hydraulique moyen et de débit d'écoulement pour les essais E1 et E17 : (a) Gradient hydraulique moyen; (b) débit d'écoulement

IV-2-6-3 Evolution temporelle de la masse des particules fines érodées

Comme pour les autres essais décrits plus haut, les particules fines érodées sont récupérées et pesées à des intervalles de temps différents, et les courbes d'évolution de ces masses pour les deux essais sont représentées sur la *Figure IV-44*. On rappelle que dans l'essai E1 ou le matériau S3 est mis dans la conduite à une densité de $1,93 \text{ Mg/m}^3$, la masse totale des particules fines érodée est de 166 g, ce qui correspond à 1,5%. Dans l'essai E17 sur le même matériau, mais avec une densité de mise en place de $1,8 \text{ Mg/m}^3$ la masse totale des fines érodées est de 350g, ce qui correspond à 7,5% de la masse des particules fines de même taille initialement introduites.

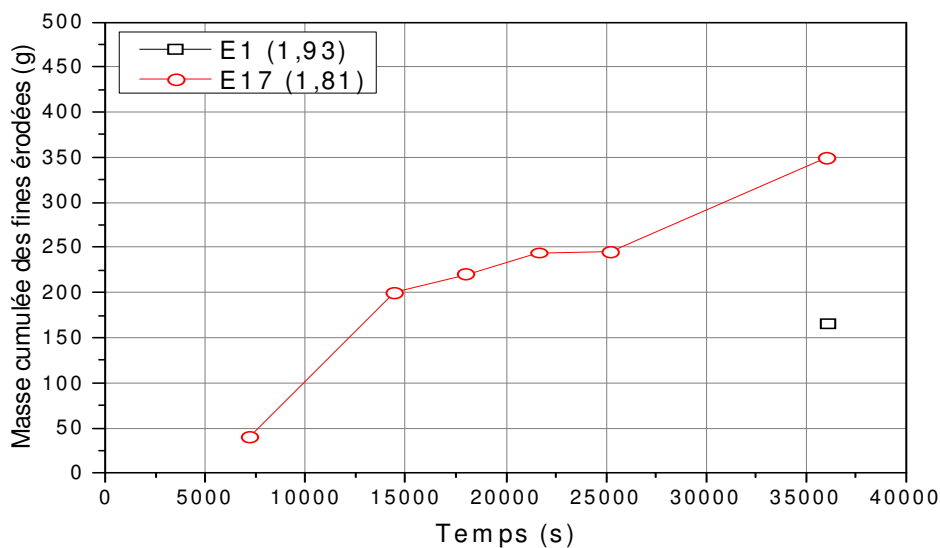


Figure IV-44 Evolution temporelle de la masse cumulée des particules fines érodées pour les essais E1 et E17

IV-2-6-4 Méthode énergétique

Dans l'analyse des essais réalisés sur l'influence de la granulométrie (§IV-2-2) on a mis en lumière l'influence de la puissance d'érosion sur l'érodabilité des matériaux testés, la quantité des particules fines érodées augmente avec l'augmentation de la puissance d'érosion, qui est la combinaison du gradient de pression et du débit d'écoulement. Sur la courbe d'évolution de cette puissance d'érosion (*Figure IV-45*), on remarque que la puissance d'érosion dans l'essai E17 qui, est de 3,5 watts, est supérieure à celle enregistrée dans l'essai E1 et qui est de 1,9 watt. Cette tendance de la puissance d'érosion explique l'augmentation de la masse des fines érodées

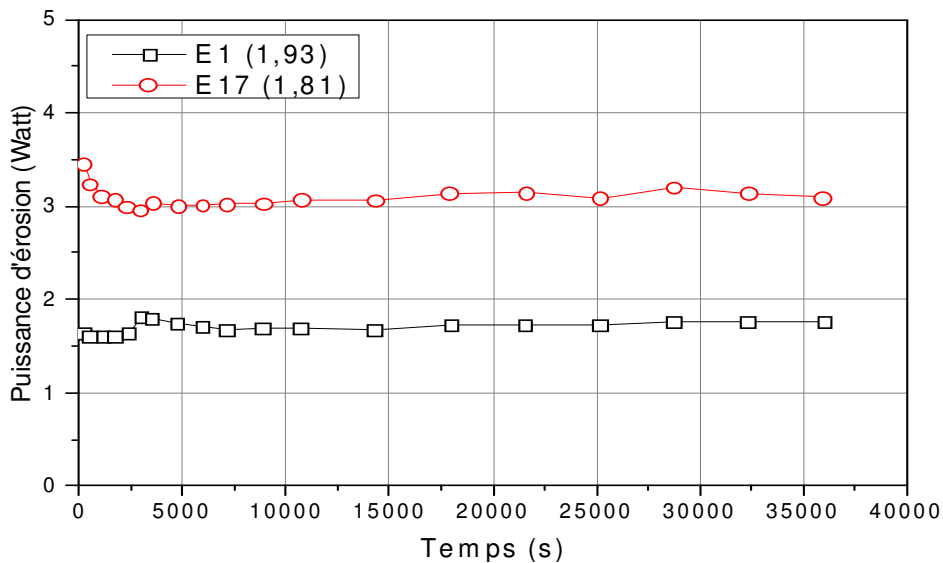


Figure IV-45 Courbe d'évolution de la puissance d'érosion pour les essais E1 et E17

Les deux essais réalisés avec deux densités de mise en place différentes montrent que pour le même matériau, la quantité des particules fines érodées augmente avec la diminution de la densité de matériau. Il serait intéressant de réaliser d'autres essais avec d'autres valeurs de densité de mise en place, afin de pouvoir tracer des courbes de tendance de l'érodabilité des matériaux testés en fonction de la densité de mise en place.

IV-2-6-5 Applications aux critères d'érodabilité : Confrontation aux critères existants.

IV-2-6-6 Influence de la granulométrie

Comme reporté dans le chapitre 1, plusieurs critères géométriques ont été définis. On signale que les matériaux testés par les auteurs ne sont pas toujours les mêmes. Néanmoins, on distingue quatre critères les plus utilisés dans la littérature, notamment celui de *Sherard (1979)*, *Kenney et Lau (1986)*, *Burenkova (1993)* et le plus récent celui *Wan et Fell de (2008)*. Ces critères sont déterminés notamment en fonction des dimensions caractéristiques obtenues à partir des courbes granulométriques des matériaux.

La classification des matériaux testés dans les cadres de cette étude par rapport à ces quatre critères ainsi que le pourcentage de la masse des particules fines érodées par rapport à la masse initiale des particules fines de la même taille sont présentés dans le *Tableau IV-10*.

Numéro d'essai	Matériau testé	Sherard 1979	Kenney et Lau 1986	Burenkova 1993	Wan et Fell 2008	% Fines érodées
E1	S3	Instable	Instable	Instable	Stable	1,5
E2	S4	Instable	Instable	Instable	Instable	3,8
E3	S5	Stable	Instable	Instable	Instable	11
E4	S6	Instable	Instable	Instable	Transition	25,7 ^(*)
E5	S7	Instable	Instable	Instable	Instable	65 ^(*)
E6	S1	Stable	Stable	Instable	Stable	1,64
E7	S2	Stable	Instable	Instable	Transition	2,53

(*) :La durée de ces essais est de 10 min

Tableau IV-10 Classification des matériaux testés en fonction des différents critères d'érodabilité.

On rappelle que les essais sont réalisés à une pression constante de 50 kPa, et qu'à l'exception des matériaux S1 et S2, les autres matériaux sont tous reconstitués à partir des mélanges de mêmes matériaux élémentaires, mais avec des proportions différentes. Pour cela et pour une meilleure lecture, l'analyse des critères portera surtout sur les matériaux S3 à S7. Dans le cas des matériaux S1 et S2 on ne trouve pas le HN2/4 écrêté.

Si on fixe une limite pour le rapport de la masse des fines érodées sur la masse des fines initialement introduite à 10%, au-delà duquel le matériau est considéré comme instable, on trouve que les matériaux S3 et S4 sont non érodables avec des pourcentages de 1,5 et 3,8 respectivement, S5 est sur la limite de la zone des sols érodables (on peut le classer dans la zone intermédiaire) et que les matériaux S6 et S7 sont érodables avec des pourcentages des particules fines érodées supérieur à 20 %. Sauf pour le matériau S4 cette classification obtenue correspond à celle de *Wan et Fell (2008)*. Pour les autres critères, l'ensemble de ces matériaux sont classés comme instables. Cette classification est aussi valable pour les matériaux S1 et S2 avec des pourcentages des fines érodées de 1,6% et 2,5%.

En fait, pour la même pression appliquée, on remarque qu'en augmentant la quantité des particules fines, on érode moins de particules, et pour la même densité de particules grossières (S3 à S6). Ceci peut s'expliquer par le fait que le taux de remplissage de l'espace poral est plus élevé pour les matériaux contenant plus de particules fines dont la densité globale est plus élevée pour la même densité des particules grossières. Dans la littérature, on trouve que les courbes discontinues et étalées sont plus érodables, c'est le cas notamment du matériau S7. Ceci s'explique par l'absence des particules de taille intermédiaire qui pourront empêcher le déplacement des particules fines à travers la porosité formée par les particules grossières.

Cette classification montre le caractère conservatif des critères de *Sherard (1979)*, *Kenney et Lau (1986)* et de *Burenkova (1993)*, comme déjà mentionné dans *Wan et Fell (2008)*.

Néanmoins, en ce qui concerne la taille des fines érodables, le critère de *Kenney et Lau (1986)*, permet de bien estimer le diamètre maximal de ces particules fines érodables, dans le cas où le matériau, en question, est classé comme érodable.

IV-2-6-7 Influence de la sollicitation hydraulique appliquée

Le deuxième critère analysé dans l'étude d'érodabilité des matériaux est le critère hydraulique, qui revient à étudier de l'influence de la sollicitation hydraulique sur l'érodabilité de matériaux testés. A ce propos, deux types de sollicitations hydrauliques peuvent être utilisés, soit des essais à gradient hydraulique imposé, soit des essais à débit d'écoulement imposé (*Nguyen et al. (2012)*). Dans la littérature on retrouve deux catégories d'essai, soit la sollicitation est appliquée par palier sur le même échantillon, soit la sollicitation maintenue constante au cours de l'essai et dans ce cas les essais sont réalisés sur des échantillons différents pour chaque sollicitation tout en gardant les mêmes caractéristiques. A ce stade d'étude l'objectif est de déterminer la sollicitation critique, gradient hydraulique, débit d'écoulement... qui correspond à la valeur à partir de laquelle l'érosion s'initie, et d'étudier l'évolution de cette érodabilité en fonction de la sollicitation appliquée.

Les essais réalisés dans le cadre de cette étude sont majoritairement des essais à pression imposée maintenue constante à l'amont des échantillons testés, sauf pour l'étude de l'influence des particules fines argileuses, où les pressions imposées sont maintenues constantes du début jusqu'à la fin des essais.

Dans certains essais, on a enregistré des débits importants ce qui génère des pertes de charge importantes dans le circuit amont, 28 kPa pour le matériau S7 pour une pression imposée de 50 kPa. Cela fait diminuer la pression à l'amont de l'échantillon testé, et par conséquent diminuer le gradient hydraulique.

Les résultats montrent une augmentation de la masse des fines érodées en augmentant la pression appliquée sur le même matériau. Ces résultats sont en concordance avec la plupart des résultats déjà obtenus (*Sail (2012), Sibille et al. (2015)...*)

Les valeurs des sollicitations critiques d'initiation d'érosion n'ont pas été déterminées. En fait, dans l'essai réalisé à la pression minimale de la pompe, qui est de 10 kPa, la masse des fines érodées correspond à plus de 45 % de fines érodables du matériau S7, qui est déjà très important. Les valeurs critiques en débit et en gradient semblent être induites par des pressions appliquées qui doivent être inférieures à 10 kPa, ce qui n'est pas réalisable avec notre dispositif.

L'étude de taux d'érosion surfacique en fonction de la puissance d'érosion, qui est une combinaison de gradient de pression et de débit d'écoulement, est un bon indicateur pour étudier l'érodabilité des matériaux, l'évolution est linéaire avec des pentes qui diffèrent en fonction des matériaux étudiés.

IV-2-6-8 Influence des particules argileuses

Dans la troisième partie de l'étude paramétrique, nous avons étudié l'influence de l'ajout des particules fines de différentes natures sur l'érodabilité des matériaux testés. Pour cela, nous avons réalisé cinq essais sur des matériaux dérivés du matériau S7, le plus érodable, auquel on a ajouté des particules fines de nature différente, sable broyé C10, kaolinite Speswhite et l'illite argile verte de Velay, et avec des proportions de 3% et 5%.

Pour la pression appliquée de 20 kPa et pour un pourcentage de fines ajoutées de 5%, la masse des fines érodées varie très significativement en fonction de la nature de ces fines. Pour les matériaux contenant de l'illite et de la kaolinite le pourcentage des fines érodées est de 0,1% et 1,25% respectivement, qui restent faibles comparées à celle du matériau S7 qui est de 60%. Et même en augmentant la pression appliquée à 100 kPa la masse des fines érodées dans le matériau contenant de l'argile verte ne dépasse pas les 10 % des fines initialement

introduites. On a aussi constaté que le pourcentage des fines érodées augmente en diminuant la quantité des fines argileuses ajoutées.

Ces essais montrent que l'ajout des particules argileuses dans la composition des matériaux testés procure à ces derniers une meilleure résistance vis-à-vis de l'érosion. Et que l'illite donne aux matériaux testés une meilleure résistance à l'érosion comparée à la kaolinite, et qui à son tour donne une meilleure résistance à l'érosion comparée aux matériaux contenant de sable broyé. On note aussi que cette résistance est proportionnelle à la quantité des fines argileuses ajoutées. Ceci peut s'expliquer par la variabilité des caractéristiques dites chimiques des particules argileuses, notamment l'indice de plasticité et la dispersivité de ces matériaux. L'illite a une résistance à la dispersivité très élevée, ce qui lui permet de rester « coller » sur les particules sableuses érodables, et colle également ces particules entre elle, ce qui procure une cohésion élevée de l'ensemble de matériaux et rend leur érodabilité plus difficile. La Speswhite, qui est une kaolinite, est plus dispersive que l'illite. Le C10 qui est un sable broyé de même nature chimique que les particules sableuses érodables (siliceuses), est plus dispersif que les argiles, avec une cohésion plus faible. L'érosion rapide de ces fines provoque une augmentation de la porosité du squelette grossier, ce qui favorise l'érosion des particules érodables. Ces conclusions vont dans le même sens celles obtenues par *Benamar et al. (2012)*.

IV-2-6-9 Influence de la densité

Le dernier paramètre étudié est la densité de mise en place. Pour ce faire, nous avons réalisé deux essais sur le matériau S3, qui est le moins érodable des matériaux sableux testés, mis dans la conduite avec deux densités différentes. Le matériau est ensuite soumis à des écoulements sous une pression constante. Les résultats des deux essais montrent qu'en diminuant la densité de mise en place, le matériau s'érode plus facilement. Ce résultat est à prendre à titre indicatif, il est nécessaire de réaliser d'autres essais pour arriver à des résultats plus concluants.

IV-3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence de cinq paramètres sur l'initiation et l'évolution de l'érosion. Les résultats montrent que :

- ✓ L'érosion des matériaux diminue en augmentant leur teneur en particules fines.
- ✓ L'érosion des sols est proportionnelle aux sollicitations hydrauliques appliquées

- ✓ L'ajout des particules fines argileuses a une conséquence directe sur l'érosion des matériaux. Les particules argileuses augmentent la cohésion des sols, et par conséquent diminuent leur sensibilité à l'érosion, cette diminution est d'autant plus importante que la teneur en particules argileuse est grande. Cette sensibilité dépend également de la nature de ces particules argileuses.
- ✓ Les sols les moins denses s'érodent plus facilement que les sols les plus denses.

Conclusion générale et perspectives

La sécurité et la durabilité des ouvrages hydrauliques tels que les barrages et les digues restent toujours une préoccupation majeure pour les autorités et les exploitants de ces ouvrages. En effet, les structures de ces ouvrages peuvent être altérées sous l'effet des écoulements parasites traversant ces structures ou leur fondation. Ces écoulements s'ils ne sont pas détectés et arrêtés à temps peuvent induire la rupture de l'ouvrage par érosion interne. Dans le cas des sols grossiers pulvérulents, l'érosion interne peut se manifester par suffusion, elle correspond à l'arrachement et au transport des particules fines à travers l'espace poral de particules grossières. Les études antérieures sur ce phénomène ont montré ses aspects très complexes (nature et caractéristiques du sol, caractéristiques de l'écoulement...).

Dans l'étude bibliographique, on a pu voir que de nombreux travaux ont été réalisés sur le phénomène de suffusion, et que plusieurs critères ont été établis en fonction des caractéristiques des sols (granulométrie, densité...) et des caractéristiques de l'écoulement (gradient hydraulique, débit d'écoulement...). Néanmoins, certains de ces critères sont dépendants des dispositifs d'essais utilisés et de l'interprétation des résultats obtenus. De ce fait, on a cherché, dans cette étude, à mieux comprendre l'initiation et l'évolution de l'érosion interne par suffusion dans les sols pulvérulents à partir d'un nouveau dispositif d'essai.

L'approche retenue pour cette étude a été de type modélisation physique par l'utilisation d'une conduite d'écoulement en plexiglas de 18 cm de diamètre et d'une longueur variable selon les essais. Cette conduite a permis de simuler localement d'éventuels écoulements parasites similaires à ceux pouvant se produire dans la structure des ouvrages hydrauliques. Cette conduite a été instrumentée avec des capteurs de pression, un turbidimètre et un débitmètre pour permettre le suivi de l'évolution de la caractéristique hydraulique des sols testés. Un dispositif de collecte de particules fines érodées a également été aussi installé, afin de récupérer et de peser les particules érodées à des intervalles de temps choisis.

Dans cette étude, nous avons utilisé des sols reconstitués pour réaliser les essais. L'avantage de ce choix réside dans le fait que la reconstitution nous a permis d'avoir des matériaux homogènes et répétables. Il a cependant été nécessaire de développer une procédure adaptée. En effet, les matériaux reconstitués sont des mélanges de sables, de graviers avec la présence ou non des particules argileuses et le mélange de ces particules ensemble n'est pas trivial : un mélange à sec favorise la ségrégation alors qu'un mélange trop humide favorise la formation

de grumeaux. Il a donc fallu élaborer un protocole de reconstitution des matériaux permettant d'avoir des mélanges homogènes tout en assurant la répétabilité. Le protocole élaboré a consisté à humidifier le mélange à une teneur en eau relative proportionnelle à la masse des particules fines. La valeur retenue pour la reconstitution correspondait à 30 % de la masse de ces particules fines. Les essais ont été réalisés en suivant une succession d'étapes : reconstitution des matériaux, mise en place dans la conduite, saturation de l'échantillon puis génération de l'écoulement et finalement démontage de la conduite et réalisation des analyses granulométriques post-essai.

Le choix de la configuration expérimentale et des matériaux à tester a nécessité des concessions. Ainsi, la conduite a été initialement disposée dans une configuration horizontale. Cette dernière permet en effet de reproduire d'une façon plus réelle les écoulements parasites dans les ouvrages hydrauliques (écoulements qui peuvent être horizontaux ou subhorizontaux). Néanmoins, la réalisation des essais avec cette configuration a posé de nombreux problèmes. Les matériaux contenant les particules argileuses n'ont pas pu être saturés de manière satisfaisante, et une fois l'écoulement généré par la pompe, on a observé des affaissements dans le sol à l'amont, favorisant l'apparition de poches d'eau. On a également rencontré, dans ces matériaux, des difficultés dans la mesure des pressions le long de la conduite et un dépôt de particules érodées sur le turbidimètre situé à l'aval de la conduite, faussant les lectures de turbidité. Pour surmonter ces problèmes, une configuration verticale du dispositif a été développée.

La configuration verticale nous a permis de surmonter le problème de dépôt de fines dans le turbidimètre, mais le problème de saturation et de mesure de pression persistait toujours avec ce type de matériau (sable + argile). Deux solutions ont été envisagées : soit utilisé un autre procédé pour saturer les matériaux dans la conduite (Slurry deposition par exemple), soit travailler sur des matériaux plus simples, et surtout avec une plus faible teneur en particules argileuses. Au total, une vingtaine d'essais ont été réalisés afin de choisir les matériaux les plus adaptés. Sur la base des résultats obtenus, on a opté pour la seconde solution.

Les matériaux choisis pour l'étude paramétrique ont donc été reconstitués uniquement à partir de mélanges de sables d'Hostun, auxquels on a ajouté éventuellement une portion des particules argileuse ne dépassant pas les 5% de la masse totale. L'étude paramétrique portait sur l'influence de certains paramètres sur l'initiation et l'évolution de la suffusion, à savoir :

la forme de la courbe granulométrique, la pression d'écoulement appliquée sur la pompe, la teneur en particules argileuses ainsi que leur nature et l'effet de la densité de mise en place.

Les essais ont été réalisés à une masse volumique sèche de particules grossières constante égale à $1,5 \text{ Mg/m}^3$. Pour l'influence de la forme de la courbe granulométrique, nous avons testé sept matériaux avec des granulométries différentes. Pour une teneur en particules fines allant de 7,5% à 22,5% et pour une pression d'entrée de 50 kPa, les résultats ont montré des différences très significatives dans les quantités de particules fines érodées. En effet, on a érodé moins de 2% des particules fines initiales après 10 heures d'essai pour les matériaux contenant 22,5 % de particules fines, et environ 30 % de particules fines initiales pour le matériau contenant 7,5 % de particules fines, et ce uniquement après 10 minutes d'essai. Pour un matériau contenant 17,5% de particules fines, mais avec une granulométrie discontinue, on a érodé plus de 60 % de la masse initiale de ces particules fines. En diminuant la quantité des particules fines, les courbes granulométriques deviennent plus concaves, et c'est ce type de courbe qui est le plus sensible à la suffusion par rapport aux courbes granulométriques discontinues.

Le deuxième paramètre étudié a été la pression d'écoulement d'entrée appliquée par la pompe. Quatre pressions (10 kPa, 20 kPa, 30 kPa et 50 kPa) ont été appliquées sur le matériau S7 (granulométrie discontinue avec 17,5 % de particules fines) qui correspond au matériau le plus érodable des essais cités plus haut. Les résultats ont montré que l'érodabilité du matériau augmente en augmentant la pression d'entrée. Plus on augmente la pression et plus on chasse de particules fines. Sur la cinématique de l'érosion, on a remarqué que l'érosion est plus accentuée au début des essais puis celle-ci diminue avec le temps. L'utilisation de la méthode énergétique permet de mieux caractériser les conditions d'écoulement puisqu'elle combine le débit d'écoulement et le gradient de pression.

Le troisième paramètre étudié est la nature des particules fines ajoutées à la composition du matériau S7 (le plus érodable). Pour cela, on dispose de trois types de fine, une illite (argile verte de Velay), une kaolinite (Speswhite) et un sable broyé C10. On a ajouté 5% de chacun de ces trois types à la composition de matériaux S7. Chaque mélange a été testé séparément et la comparaison a porté sur la masse des particules sableuses érodées. Une comparaison des essais à une pression d'entrée de 20 kPa a montré que la nature des fines a une très grande influence sur l'érosion des matériaux testés. On a érodé plus de 50 % pour le matériau S7

soumis à une pression de 20 kPa, le même pourcentage est enregistré pour le mélange contenant, en plus, le sable broyé C10. Au contraire, les mélanges contenant l'illite ou la kaolinite ont présenté des érosions beaucoup plus faibles : on n'a érodé que 10% pour le cas de Speswhite et 8% pour l'illite à une pression de pompe de 100 kPa. Le pourcentage de ces fines a aussi eu une influence sur l'érodabilité des mélanges. A deux pourcentages différents de 3 % et 5%, le pourcentage des fines érodées a été différent : il est passé de 10 % pour 5% de kaolinite à une pression de 100 kPa à environ 25% pour 3% de kaolinite à une pression de 80 kPa. Pour l'illite, ce pourcentage est passé de 8 % pour 5% d'illite à une pression de 100 kPa à environ 15% pour 3% d'illite à une pression de 100 kPa. Ces résultats s'expliquent par la différence de dispersivité de ces trois types de fine, en effet l'illite est moins dispersive que la kaolinite, qui à son tour, est moins dispersive que le sable broyé C10.

Le dernier paramètre étudié est la densité totale de mise en place. Pour cela, on a testé le matériau S3 contenant 22,5% de particules fines, qui est le moins érodables des matériaux déjà testés. Deux densités ont été choisies : $1,93 \text{ Mg/m}^3$ (qui correspond à une densité de particules grossières de $1,5 \text{ Mg/m}^3$), et $1,81 \text{ Mg/m}^3$ (qui correspond à une densité de particules grossières de $1,4 \text{ Mg/m}^3$). Les deux matériaux ont été soumis à une pression d'entrée de 50 kPa. En termes de masse érodée, les résultats ont été différents. En effet, après 10 heures d'essai, le pourcentage des particules fines érodées pour le matériau mis à la densité de $1,81 \text{ Mg/m}^3$ est cinq (5) fois supérieur à celui de matériau mis à la densité $1,93 \text{ Mg/m}^3$, il passe de 7,5% à 1,5%.

Ces essais ont permis de mettre en évidence l'influence de cinq paramètres sur l'érodabilité des matériaux testés. La comparaison en termes de pourcentage de masse érodée par rapport à la masse initiale de ces particules érodables semble être un bon indicateur.

Sur l'influence de la granulométrie, cette étude a montré le caractère conservatif des critères le plus anciens par rapport aux critères les plus récents. En effet, pour notre étude, le critère de *Wan et Fell (2008)* a permis de mieux décrire la classification vis-à-vis de l'érosion obtenue. Mais cette classification semble être dépendante de la densité de mise en place et donc de l'état initial. En effet, la diminution de la densité de mise en place a favorisé l'érosion pour un même chargement hydraulique. L'érodabilité des matériaux dépend aussi des sollicitations hydrauliques appliquées. En effet, la quantité des particules érodées a augmenté avec les pressions d'écoulement imposées. La méthode énergétique adaptée par *Marot (2012)* semble

être adaptée pour caractériser les sollicitations hydrauliques, car elle prend en compte le gradient de pression, le débit d'écoulement et la taille des échantillons.

En ajoutant des particules argileuses dans la composition des matériaux testés, l'érodabilité des matériaux diminue considérablement même en augmentant la pression d'écoulement appliquée. En effet, en ajoutant de l'illite, de la kaolinite ou du sable broyé, la proportion des particules fines érodées a diminué considérablement. Les résultats ont montré qu'en ajoutant de l'illite, les matériaux deviennent plus résistants à la suffusion comparée à l'ajout de la kaolinite, qui donne à son tour des matériaux plus résistants comparé à l'ajout de sable broyé. Cette influence est plus importante si on augmente la proportion des particules fines ajoutées. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par *Benamar (2012)*.

Néanmoins ce programme mérite d'être complété. On pourra s'intéresser aux points suivants pour poursuivre les recherches :

- Développer un dispositif pour la procédure de « Slurry deposition » pour tester d'autres matériaux avec des pourcentages élevés de particules argileuses qui se rapprochent des matériaux naturels
- Etudier l'influence de la masse volumique initiale
- Faire des essais avec des paliers de pression.
- Développer un dispositif afin de permettre d'étudier l'influence des sollicitations mécaniques combinée avec les sollicitations hydrauliques.
- Réaliser des modélisations numériques en simulant l'influence de ces différents paramètres, afin de proposer des modèles de prédiction de l'érosion des matériaux.

L'objectif sera d'établir des critères d'érosion combinant l'influence de tous ces paramètres, et d'évaluer leur influence relative afin de déterminer les critères les plus pertinents.

Références bibliographiques

Ahlinhan M F, Achmus M. (2010) « Experimental investigation of critical hydraulic gradients of unstable soils » 5th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-5), San Francisco, California, USA, 599-608.

Ahlinhan M F, Achmus M, Hoog S, Wouya E K. (2012) « Stability of non-cohesive soils with respect to internal erosion » 6th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-6), Paris, France, 329-336.

Benamar A, Karoui T, Bennabi A, Seghir A, Wang H Q. (2012) « Influence of fine particles on internal erosion of sandy Soils » 6th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-6), Paris, France, 1097-1104.

Bendahmane F. (2006) « Influence du confinement et du gradient hydraulique sur l'érosion interne des sols sablo-argileux » 24^{ème} Rencontres de l'Association Universitaire de Génie Civil, Montpellier, 8 pp.

Bendahmane F, Marot D, Alexis A. (2008) « Experimental Parametric Study of Suffusion and Backward Erosion » Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE), 134, 1, 57-67.

Bonelli S. (2012) « Erosion des géomatériaux », Edition Hermes Science, 403 pp.

Burenkova V. (1993) « Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils » Proceedings, the 1st International Conference Geo-Filters, Karlsruhe, Germany, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 357-360.

Chapuis R P, Constant A, Baass K A. (1996) « Migration of fines in 0-20mm crushed base during placement, compaction, and seepage under laboratory conditions » Canadian Geotechnical Journal, 33, 168-176.

De Mello V F B. (1975) « Some lessons learned from unexpected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil » 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa, 285-304.

Den Adel H, Bakker K J, Breteler M K. (1988) « Internal stability of minestone » International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interactions, Rotterdam: A.A Balkema, 225-231.

Fell R, Fry J J . (2007) « The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations » Internal Erosion of Dams and their Foundations. Taylor et Francis Group, London, 1-23.

Foster M, Fell R, Spannagle M. (2000) « The statistics of embankment dam failures and accidents » Canadian Geotechnical Journal, 37, 1000-1024.

- Fry J J, Degoutte G, Goubet A. (1997) « L'érosion interne : typologie, détection et réparation » Barrages & Réservoirs, n°6, 126 pp.
- Garner S J, Sobkowicz J C. (2002) « Internal stability in gap-graded cores and filters » Proceeding of Canadian dam association annual conference, Victoria, BC, Canada.
- Guide ERINOH. (2015) (Erosion INterne dans les Ouvrages Hydraulique) : « méthodologie de caractérisation expérimentale, (édition en cours).
- Honjo Y, Haque M.A, Tsai K.A. (1996) «Self-filtration behavior of broadly and gap graded cohesionless soils » Geofilters' 96, BiTech Publishers, Montreal, Canada, 227-236.
- Istomina V S. (1957) « Filtration stability of soils (in Russian) » Gostroizdat, Moscow, Leningrad.
- Kenney T C, Lau D. (1985) « Internal stability of granular filters » Canadian Geotechnical Journal, 22, 2, 215-225.
- Kenney T C, Lau D. (1986) « Internal stability of granular filters: Reply » Canadian Geotechnical Journal, 23, 420-423.
- Kezdi A (1979) « Soil physics – Developments in geotechnical engineering- selected topics » Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, Oxford, New York, 159pp.
- Kovacs G. (1981) « Seepage hydraulics » Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 730 pp.
- Kuerbis R H et Vaid Y P. (1988) « Sand sample preparation – The slurry deposition method » Soils and Foundations, 28, 4, 420-423.
- Lafleur J, Mlynarek J, Rollon A L. (1989) « Filtration of broadly graded cohesionless soils » Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115, 12, 1747-1768.
- Li M, Fannin J. (2008) « Comparison of two criteria for internal stability of granular soil » Canadian Geotechnical Journal, 45, 9, 1303-1309.
- Lowe J. (1988) « Seepage analysis, in advanced dam engineering, for design, construction and rehabilitation» ed. Robert B. Jansen, Van Nostrand Rheinhold, 270-275.
- Lubochkov, E.A. (1969) «The calculation of suffosion properties of noncohesive soils when using the non-suffosion analog» (in Russian). International Conference on Hydraulic Research, Brno, Czechoslovakia, 135-148.
- Mao, C.X. (2005) «Study on piping and filters: Part I of piping», Rock and Soil Mechanics, 26, 2, 209-215.
- Maoxin L. (2008), «Seepage induced instability in widely graded soils », PhD thesis, University of British Columbia (Vancouver), 319pp.

Marot D, Bendahmane F, Konrad J M. (2011-a) «Multichannel optical sensor to quantify particle stability under seepage flow», *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 1772–1787.

Marot D, Regazzoni PL, Wahl T. (2011-b) « Energy based method for providing soil surface erodibility rankings » *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 137, 12, 1290-1294.

Marot D, Sail Y, Alexis A. (2010) « Experimental bench for study of internal erosion in cohesionless soils » *5th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-5)*, San Francisco, California, USA, 418-427.

Marot D, Sail Y, Sibille L. (2012) « Effects of loading history and size-scale in suffusion process in granular matter » *6th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-6)*, Paris, 8pp.

Moffat R, Fannin J, Garner S J. (2011) «Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil» *Canadian Geotechnical Journal*, 48, 399–412.

Moffat R, Fannin J. (2006) « A large permeameter for study of internal stability in cohesionless soils » *Geotechnical Testing Journal*, 29, 4, 273-279.

Moffat R. (2005) « Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils » PhD Thesis, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Monnet A. (1998) « Boullance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement » *Revue Française de Géotechnique*, 82, 3-10.

Nguyen H H, Marot D, Bendahmane F. (2012) « Erodibility characterisation for suffusion process in cohesive soil by two types of hydraulic loading » *6th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-6)*, Paris, France, 863-870.

Papamichos E, Vardoulakis I, Tronvoll J, Skjaerstein A. (2001) « Volumetric sand production model and experiment » *International Journal for Numerical and Methods in Geomechanics*, 25, 8, 789-808.

Philipponnat G. (1979) « Fondation et ouvrages en terre » Editions Eyrolles.

Reddi L N, Bonala m V S. (1997) « Critical shear stress and its relationship with cohesion for sand-kaolinite mixtures » *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 1, 26-33.

Regazzoni P L. (2009) « Confrontation et analyse d'érodimètres et caractérisation de la sensibilité à l'érosion d'interface » Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France.

Richard K S, Reddy K R. (2007) « Critical appraisal of piping phenomena in earth dams» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 4, 381-402.

- Sail Y, Marot D, Sibille L, Alexis A. (2011) « Suffusion tests on cohesionless granular matter » *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15, 5, 799-817.
- Sail Y. (2012) « Caractérisation expérimentale de l'érosion de volume de matériaux pulvérulents », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.
- Shuler U, Brauns J. (1997) « The safety of geotechnical filters » *Hydropower and Dams*, N°6.
- Schuler U. (1995) « How to deal with the problem of suffusion » *Research and Development in the Field of Dams*, Swiss National Committee on Large Dams, 1995, 145-159.
- Sherard J L. (1979) « Sinkholes in dams of coarse broadly graded soils » *Transactions*, 13th Congress on Large Dams, New Delhi, India, 2, 25-34.
- Shields A. (1936) « Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung [Application des principes de similitude et recherches sur turbulence au charriage] » *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Berlin, N° 26.
- Sibille L, Marot D, Sail Y. (2015) « A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter », *Acta geotechnica*, 10,6, 735–748.
- Skempton A W, Brogan J M. (1994) « Experiments on piping in sandy gravels » *Géotechnique*, 44, 3, 449 – 460.
- St-Arnaud G. (1995) « The high pore pressures within embankment dams: an unsaturated soil approach » *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 892-898.
- Terzaghi K. (1939) « Soil mechanics: a new chapter in engineering science » *Journal of Civil Engineering*, 12, 106-141.
- Tomlinson S S, Vaid Y P. (2000) « Seepage Forces and Confining Pressure Effects on Piping Erosion » *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 1-13.
- Truong Q Q. (2012) « Etude des mécanismes de blocage d'un écoulement par l'injection d'un produit de colmatage » Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 223pp.
- USACE. (1953) « Filter experiments and design criteria » *Technical memorandum*, n°3-360, Waterways Station, Vicksburg.
- 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 (ASCE)*, 134, 3, 401-407.
- Wan, C.F. and Fell, R. (2004) « Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations » UNICIV Report No. R-429, the University of New South Wales, Sydney, Australia, 223pp.

Annexe 1

Calcul des pertes de charges dans le circuit amont

Dans le circuit amont, on distingue douze points qui présentent des singularités, ils sont référencés sur la figure ci-dessous.

Les pertes de charges dans chacune des singularités se calculent par la formule suivante :

$$\Delta H = \kappa \frac{v^2}{2g} \quad (\text{IV-1})$$

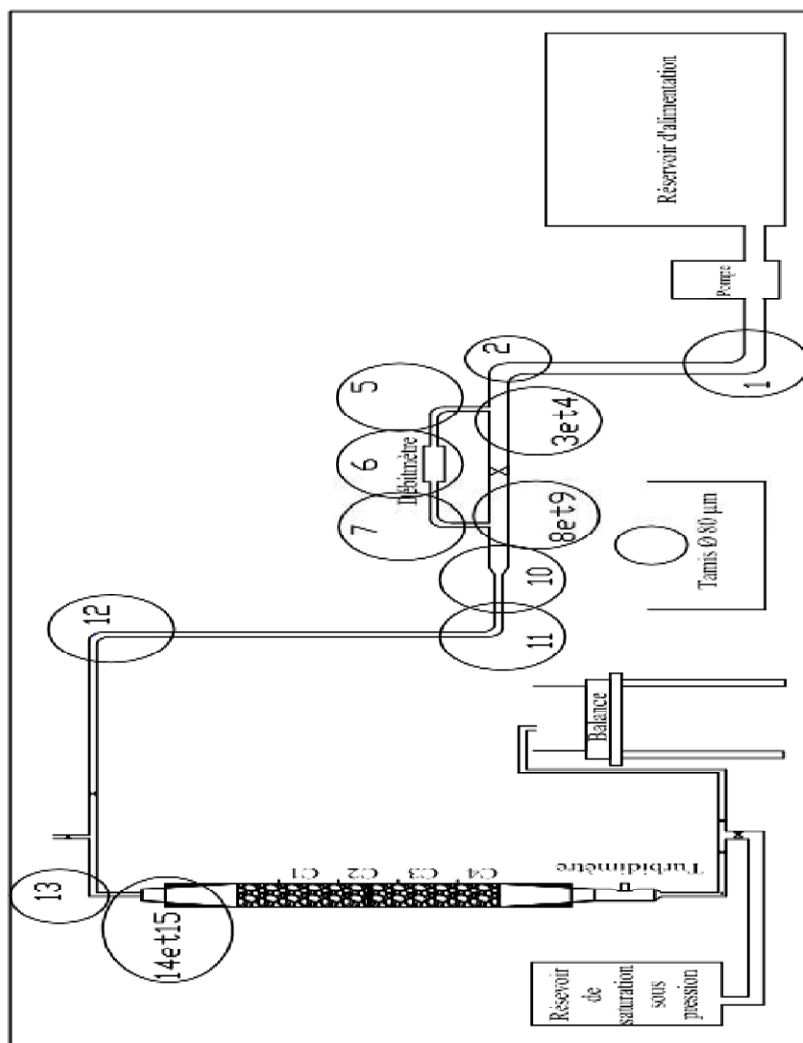
Dans laquelle :

ΔH : perte de charge du fluide (m)

κ : coefficient sans dimension dépendant de la nature du point considéré

v : vitesse moyenne du liquide à travers la section considérée (m/s)

g : accélération de la pesanteur (m/s^2)



Exemple de calcul pour le cas de matériau S7 soumis à une pression de 50 kPa

Numéro de la singularité	S7		
	P1	18,4	
	Q	0,00097	
	k	V (m/s)	Formule (m)
1	0,17	0,22	0,00
2	0,17	0,22	0,00
3	1,28	0,22	0,00
4	0,43	1,70	0,06
5	0,17	1,70	0,02
6	15,3	1,70	2,24
7	0,17	1,70	0,02
8	0,75	1,70	0,11
9	0,6	0,22	0,00
10	0,43	1,70	0,06
11	0,17	1,70	0,02
12	0,17	1,70	0,02
13	1,13	1,70	0,17
14	0,75	1,70	0,11
15	0,68	0,22	0,00
Perte totale (m)			2,85
Perte totale (kPa)			28,54

Cela donne une perte de charge de 28 kPa. On remarque que la perte de charge la plus importante est au niveau de la singularité n°6 qui correspond au débitmètre.

Pour les autres matériaux soumis à une pression de 50 kPa, les résultats sont donnés ci-dessous :

Matériaux	Perte de charge totale (kPa)
S1	2,73
S2	2,21
S3	0,20
S4	0,59
S5	0,03
S6	26,80
S7	26,80

Le même calcul est réalisé pour les pertes de charge dans les essais sur le matériau S7 à différentes pressions d'entrée. Les résultats obtenus sont dans le tableau ci-dessous.

Pression d'entrée (kPa)	Perte de charge totale (kPa)
10	8,20
20	12,04
30	19,41
50	28,54