



HAL
open science

Étude de l'infiltration de sédiments fins dans un lit de sédiments grossiers

José Manuel Tunqui Neira

► **To cite this version:**

José Manuel Tunqui Neira. Étude de l'infiltration de sédiments fins dans un lit de sédiments grossiers. Sciences de l'environnement. 2014. hal-02600065

HAL Id: hal-02600065

<https://hal.inrae.fr/hal-02600065v1>

Submitted on 16 May 2020

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.



Etude de l'infiltration de sédiments fins dans un lit de sédiments grossiers

Rapport de Stage

José Manuel TUNQUI NEIRA



ENCADRANTS :

Céline BERNI

Chargée de Recherche

Unité de Recherche HHLY - équipe hydraulique des rivières Irstea – Lyon

Albert HERRERO

Post-Doctorant

Unité de Recherche HHLY - équipe hydraulique des rivières Irstea – Lyon

Jean-Philippe CARLIER

Enseignant Chercheur

Université de Lille 1

Université de Lille 1 – Polytech Lille

Master 2 Mécanique, Génie Civil, Génie Mécanique

Spécialité Sol et Eau

Année 2013/2014

Remerciements

Je remercie Céline BERNI et Albert HERRERO pour l'encadrement de mon stage, pour leur immense patience, leur persévérance, leur disponibilité et l'enthousiasme qu'ils ont pu me communiquer. Vous avez été à chaque étape de votre encadrement, un merveilleux guide pour l'avancée de mes travaux pour l'aboutissement à ce document.

Je souhaite également remercier la contribution et la collaboration du personnel de l'unité de recherche Hydrologie-Hydraulique Lyon-Villeurbanne, le cadre fut convivial, accompagné d'une ambiance favorable à l'avancement des travaux.

Enfin tous mes respects et ma reconnaissance vont à l'égard de ma famille, source de ma motivation et de mes espoirs.

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, qui m'ont montré leur intérêt et qui ont contribué à la réalisation de ce présent rapport.

Résumé

Le colmatage fait référence au dépôt et à l'infiltration de sédiments fins au sein du lit de cours d'eau. Il en résulte un comblement des interstices du substrat, dont la structure est ainsi modifiée et le fonctionnement altéré. Le colmatage du substrat par des sédiments fins est un phénomène assez récurrent dans les cours d'eau français, Il est donc important de connaître dans quelles conditions le colmatage s'effectue et quels sont les paramètres aggravants. Pour connaître ces paramètres, des nouvelles expériences sont actuellement en cours sur le canal inclinable d'Irstea afin de caractériser l'infiltration de sédiments fins dans une matrice de sédiments grossiers, et être capable de prédire, pour une concentration de sédiments en suspension constante et un agencement de la matrice donné, le taux de sédiments fins obtenu à l'équilibre dans le lit (l'instant à partir duquel le taux de sédiments fins ne variera plus). Durant ce stage, de nouvelles techniques pour prélever des échantillons du lit du canal ont été testées. J'ai également étudié comment en fonction du taux de sédiments fins piégés dans le gravier, les caractéristiques physiques de l'ensemble gravier-sédiment fin telles que la porosité, la granulométrie et la perméabilité variaient. Un second objectif était de voir s'il était possible d'utiliser la perméabilité du lit pour quantifier le taux de sédiments fins, donc le colmatage du lit de gravier. Pour calculer la perméabilité, l'équation empirique de Kozeny-Carman a été choisie. Cette dernière fait intervenir un paramètre qui est fortement lié au taux de sédiments fins dans le lit de gravier : la porosité. Cette équation a été analysée en détail et les résultats obtenus comparés à ceux obtenus expérimentalement dans un perméamètre à charge variable, construit pendant ce stage à Irstea Lyon spécialement pour ce cas. Ce perméamètre est spécial dans le sens où la charge de l'eau est appliquée de bas en haut, notamment pour empêcher le mouvement et la chute par action de la gravité des particules fines qui sont piégés dans le gravier. Les résultats de la comparaison des deux méthodes, sont cohérents.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Présentation de l'organisme d'accueil.....	2
2.1	Présentation Générale	2
2.2	Irstea centre Lyon-Villeurbanne	3
3	Expériences dans le canal inclinable	4
3.1	Description du canal.....	4
3.2	Alimentation en eau et en sédiments	4
3.3	Montage expérimental pour l'étude d'infiltration des sédiments fins.....	5
4	Revue bibliographique	6
4.1	Conductivité hydraulique	6
5	Premiers Essais De Laboratoire.....	8
5.1	Analyse granulométrique	8
5.2	Porosité	11
6	Calcul de la conductivité hydraulique	21
6.1	Equation de Kozeny-Carman	21
6.2	Essais de laboratoire pour mesurer la conductivité hydraulique.....	23
6.3	Tableau comparatif des résultats de conductivité hydraulique obtenus avec le perméamètre à charge variable et l'équation de Kozeny-Carman	26
6.4	Relation entre la masse infiltrée et la perméabilité :.....	27
7	Taux de sédiments fins des échantillons prélevés dans le canal inclinable.....	28
7.1	Méthode 1 : Pièges de sédiments fins cylindriques	29
7.2	Méthode 2. Tuyau enfoncé dans le lit du gravier	31
8	Conclusions	33
9	Références.....	34
	Annexe 1 : Analyse granulométrique et calcul du diamètre géométrique moyen du gravier.....	35
	Annexe 2 : Analyse granulométrique et calcul du diamètre géométrique moyen du sédiment fin.....	38
	Annexe 3 : Calcul du diamètre géométrique moyen du mélange gravier+ sédiment fin.	42
	Annexe 4 : Tableau de la porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 1)	49
	Annexe 5 : Tableau de la mesure de taux de sédiment fin (c) méthode pièges de sédiments fins cylindriques.	50
	Annexe 6 : Tableau de la mesure de taux de sédiment fin (c) méthode tuyau enfoncé.	51

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Diamètres caractéristiques du gravier.....	9
Tableau 2: Coefficients d'uniformité et courbure	9
Tableau 3: Appellations pour des granulats EN 12620	9
Tableau 4: Pourcentage en masse des passants pour les 3 essais granulométriques	10
Tableau 5: Diamètres moyens géométriques	10
Tableau 6: Diamètres caractéristiques du sédiment fin.....	11
Tableau 7: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 2).....	13
Tableau 8: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 3).....	15
Tableau 9: Calcul de la densité apparente, la porosité et ses incertitudes.....	16
Tableau 10: Calcul de la porosité et ses incertitudes.....	18
Tableau 11: Récapitulatif de la porosité.....	18
Tableau 12: Mesure du taux de sédiment fin (c)	19
Tableau 13: Calcul de la porosité et des incertitudes associées	20
Tableau 14: Méthode 1	20
Tableau 15: Méthode 2	20
Tableau 16: Méthode 3	20
Tableau 17 : Volume de gravier placé dans le canal inclinable.....	22
Tableau 18: Calcul de la conductivité hydraulique équation Kozeny-Carman.....	22
Tableau 19: Mesure du taux de sédiment fin (c) essais de perméabilité.....	24
Tableau 20: Mesure de la conductivité hydraulique (expérimentale).....	26
Tableau 21 : Tableau récapitulatif coeff.perméabilité (charge variable et Kozeny-Carman)	27
Tableau 22: Caractéristiques générales des cylindres mis dans le canal inclinable.....	29

Liste des Figures

Figure 1: Centres Irstea France Métropolitaine	2
Figure 2: Canal inclinable IRSTEA-Lyon.....	4
Figure 3: Schéma d'alimentation en eau et sédiments canal inclinable	5
Figure 4: Montage expérimental dans le canal inclinable pour l'étude d'infiltration de sédiment fin dans le lit du gravier	6
Figure 5: Capteurs utilisés dans le montage expérimental dans le canal inclinable.....	6
Figure 6: Micro-géométrie de l'hypothèse "Ideal Packing" pour un mélange gravier-sédiment fine	7
Figure 7: porosité en fonction de la fraction volumique de sédiments fins basée sur le volume total (sédiment fin et gravier).....	7
Figure 8: Courbes granulométriques du gravier.	8
Figure 9: Courbe Granulométrique du sédiment fin.....	10
Figure 10: Densité apparente et incertitudes associées	12
Figure 11: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 1).....	12
Figure 12: Schéma pour expliquer l'incertitude due à l'irrégularité du gravier	13
Figure 13: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 2).....	14
Figure 14: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 3).....	15
Figure 15: Densité apparente et incertitudes associées pour les 6 essais réalisés.....	16
Figure 16: Barres d'erreurs (incertitudes) porosité.....	16
Figure 17: Schéma pour montrer la mesure de la porosité faite par la méthode de volume d'eau déplacé	17
Figure 18: Barres d'erreurs (incertitudes) porosité.....	18
Figure 19: Résultats de la porosité gravier-sédiment fin pour chaque méthode	21
Figure 20: Perméamètre à charge variable	24
Figure 21: Schéma de fonctionnement du perméamètre à charge variable	25
Figure 22: Comparaison entre résultats trouvés par le perméamètre et l'équation K-C.....	27
Figure 23 : Relation entre la masse infiltrée de sédiment fin et la perméabilité.....	28

Figure 24 : Vue de la masse infiltré du sédiment fin dans le gravier (canal inclinable)	28
Figure 25: Emplacement choisi pour l'application des 2 méthodes dans le canal inclinable	29
Figure 26: Piège de sédiment fin cylindrique (gauche), Cylindre enterré dans le lit de gravier du canal (droite).....	29
Figure 27 : Schéma d'utilisation du cylindre	30
Figure 28: Variation de taux de sédiment fin par rapport à la profondeur	31
Figure 29: Vue des échantillons pris par la méthode du tuyau enfoncé.....	32
Figure 30: Variation du taux de sédiment fin par rapport à la profondeur	32
Figure 31: Comparaison entre les 2 méthodes appliquées.....	33

Nomenclature

k	: conductivité hydraulique (m/s)
ρ	: densité de l'eau (998.29kg/m ³)
g	: force de la pesanteur (9.81m/s ²)
μ	: viscosité dynamique de l'eau (0.001kg/ [m s])
θ	: porosité du mélange gravier-sédiment fin (-)
D_g	: diamètre moyen géométrique du grain (m)
V_g	: volume de gravier (sans pores) (m ³)
V_f	: volume de fin (sans pores) (m ³)
d_g^n	: ouverture du tamis du refus.
ε_i^n	: fraction volumique pré-mélangée de la catégorie « n »
V_{iy}	: volume de refus sur le tamis « n ».
θ_g	: porosité du Gravier
θ_f	: porosité du sédiment fin
c	: taux de sédiment fin infiltré dans le lit de gravier (-)
d_{10}	: diamètre de grains à 10% du tamisât (mm)
d_{30}	: diamètre de grains à 30% du tamisât (mm)
d_{50}	: diamètre de grains à 50% du tamisât (mm)
d_{60}	: diamètre de grains à 60% du tamisât (mm)
d_{90}	: diamètre de grains à 90% du tamisât (mm)
$\Delta\theta_g$: incertitude sur la porosité du gravier (-)
ΔV_w	: incertitude sur le volume d'eau versé (mL)
ΔV_t	: incertitude sur le volume du matériau (gravier et/ou sédiment fin) placé dans l'éprouvette (mL)
V_w	: volume d'eau versé (mL)
V_t	: volume du matériau (gravier et/ou sédiment fin) (pores inclus) placé dans l'éprouvette (mL)
M_w	: poids de l'eau versée (g)
M_t	: Poids du gravier placé dans l'éprouvette (g)
ρ_g	: densité du gravier (g/mL)
ρ_w	: densité de l'eau (g/mL)
ΔM_w	: incertitude sur le poids d'eau versé (g)
ΔM_t	: incertitude sur le poids du gravier placé dans l'éprouvette (g)
D_r	: Densité Réelle du matériau (g/mL)
D_a	: Densité Apparente du matériau (g/mL)

ΔD_a	: incertitude sur la densité apparente (-)
ΔD_r	: incertitude sur la densité réelle (-)
V_v	: volume de pores remplis d'eau (mL)
V_{wi}	: volume d'eau initial (mL)
V_{wf}	: volume d'eau final (mL)
$\Delta \theta_f$: incertitude sur la porosité du fin (-)
ΔV_v	: incertitude sur le volume de pores remplis d'eau (mL)
Δk	: incertitude sur la conductivité hydraulique (m/s)
Q	: débit circulant dans l'échantillon (m ³ /s)
A	: surface de l'échantillon perpendiculaire à l'écoulement (m ²)
a	: surface en section transversal du tuyau vertical de la charge d'eau (m ²)
ΔH	: différence de charge (m)
L	: longueur de l'échantillon (m)
dt	: temps d'essai perméamètre charge variable (sec.)
H_i	: différence de charge au début de l'essai (mH ₂ O)
H_f	: différence de charge à la fin de l'essai (mH ₂ O)
z_1	: cote du point 1 (m)
z_2	: cote du point 2 (m)
ΔL	: incertitude sur la longueur de l'échantillon (m)
Δt	: incertitude sur le temps de l'essai (seg.)
ΔH_i	: incertitude sur la différence de charge au début de l'essai (mH ₂ O)
ΔH_f	: incertitude sur la différence de charge à la fin de l'essai (mH ₂ O)
M_{if}	: masse de sédiment fin infiltré dans le lit de gravier (kg)
V'_g	: fraction du volume de gravier sur le volume total (sans pores) (-)
V'_f	: fraction du volume de fins sur le volume total (sans pores) (-)

1 Introduction

Le colmatage fait référence au dépôt et à l'infiltration de sédiments fins au sein du lit de cours d'eau. Il en résulte un comblement des interstices du substrat, dont la structure est modifiée et le fonctionnement altéré. Le colmatage du substrat par des sédiments fins est un phénomène assez récurrent dans les cours d'eau français. Il peut avoir des conséquences importantes sur l'évolution morphologique du lit et la qualité environnementale du milieu :

- Le colmatage influence significativement l'évolution du tracé en plan du lit et la topographie des formes (ou structures) fluviales associées (bras secondaires, bancs...). En effet, il peut réduire la mobilité du lit et favoriser le développement de systèmes figés (ex. bancs de sable ou de gravier et/ou îles peu érodables). Dans certains cas, la présence d'une fraction fine dans la matrice granulaire peut contribuer au développement de la végétation sur les bancs ou les berges. Celle-ci piégera davantage le transport sédimentaire, en favorisant l'aggradation des bancs alluviaux et en réduisant l'érosion des berges.
- Le colmatage peut compromettre la survie de certaines espèces de poissons qui pondent dans les interstices créés par une matrice de sédiments grossiers.
- Il peut également nuire à certaines activités économiques comme le captage d'eau potable.

Il est donc important de connaître dans quelles conditions le colmatage s'effectue et quels sont les paramètres aggravants. L'étude des mécanismes régissant ce processus est toujours du domaine de la recherche. Peu de travaux ont été publiés sur le sujet, permettant en particulier d'obtenir une estimation pertinente de la contrainte critique de mise en mouvement d'un matériau colmaté (très utile pour les études d'ingénierie).

Les deux objectifs principaux de ce stage sont de :

- Réaliser de nouvelles expériences de laboratoire pour caractériser l'infiltration de sédiments fins dans une matrice de sédiments grossiers, pour être capable de prédire, pour une concentration en sédiments en suspension constante et un agencement de la matrice donné, le taux de sédiments fins obtenu à l'équilibre dans le lit (l'instant à partir duquel le taux de sédiments fins ne variera plus).
- Retrouver la relation entre le taux de sédiments fins et la conductivité hydraulique, donnée par l'équation empirique de Kozeny-Carman. La conductivité hydraulique nous servira pour suivre l'évolution de la masse de sédiment fin infiltré dans le lit de gravier. Cette équation sera analysée et les résultats comparés avec des essais de perméabilité (perméamètre à charge variable) afin de tester sa validité pour notre cas d'étude.

Le travail sera effectué sur le canal inclinable de l'IRSTEA, de 18 m de long et 1 m de large. Celui-ci est équipé d'une boucle de recirculation en sédiments fins et de capteurs nécessaires à la mesure de concentration de l'écoulement, de vitesse et de pression dans le lit de graviers. Ces différentes mesures seront utilisées pour, au-delà de la prédiction quantitative, identifier les processus sous-jacents et déterminer le degré de généralisation de l'étude.

Après une brève présentation de l'établissement dans lequel j'ai effectué mon stage, le présent rapport détaille dans un premier temps les caractéristiques et les expériences réalisées dans le canal inclinable. Dans un second temps, l'équation de Kozeny-Carman, les différentes variables qui y apparaissent et résultats trouvés sont analysés en détail et comparés à ceux trouvés expérimentalement. Finalement deux essais pour mesurer le taux de sédiment fin infiltré dans le lit de gravier sont présentés, analysés et comparés.

2 Présentation de l'organisme d'accueil

J'ai effectué mon stage sous la tutelle de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, au sein du centre Lyon-Villeurbanne, dans l'unité de recherche Hydrologie-Hydraulique (HHLy), équipe hydraulique des rivières.

2.1 Présentation Générale

2.1.1 Du Cemagref à Irstea

« Le Cemagref, Centre national du machinisme agricole, du génie rural et des Eaux et Forêts est né en 1981 de la fusion du Centre technique du GREF (CTGREF) et du Centre national d'études et d'expérimentations du machinisme agricole (CNEEMA). Il devient Irstea en novembre 2011, afin de faire coïncider son nom avec la réalité actuelle de ses recherches, qui ont évolué, en 30 ans, des problèmes de mécanisation et d'aménagement rural vers les questions agro-environnementales.

Fondé sur des enjeux de la période des trente glorieuses, le Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts va évoluer rapidement. La modernisation et l'équipement des campagnes, le développement de la production agricole, vont progressivement laisser la place à de nouveaux défis comme la qualité de l'alimentation, la gestion des ressources en eau, la maîtrise des pollutions, la gestion des risques naturels ou le développement de territoires ruraux en déclin démographique. Toujours opérant sur des thématiques situées au cœur du développement et de l'avenir de notre société, toujours avec le même modèle de recherche finalisée, le Cemagref, devient Irstea institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture et, continuera à se mobiliser pour trouver et construire des solutions aux questions agro-environnementales ». (web d'Irstea)

2.1.2 Chiffres Clés

Le budget (année 2013) a été de 16 millions d'euros, dont 27% de ressources propres. Irstea est géographiquement organisé autour de 9 centres en France Métropolitaine (figure 1). Il regroupe 3 départements de recherche (eaux, écotéchnologies et territoires), 18 unités de recherche, 5 unités mixtes L'institut emploie environ 1604 collaborateurs, dont 1219 sont ingénieurs, doctorants et post-doctorants.



Figure 1: Centres Irstea France Métropolitaine

30 % des recherches sont liés aux changements globaux, notamment climatiques.

70 % portent sur les questions liées aux eaux continentales.

Le Taux de succès aux appels d'offres ANR est d'environ 45 %.

L'institut obtient plus de 2 m€ par an de financements européens et 25 projets ont été retenus au 7^e PCRD (taux de succès de 30 %).

Il a été labélisé Institut Carnot en 2006 et 2011.

130 contrats de recherche ont été conclus avec des industriels.

Ses équipes sont impliquées dans 11 pôles de compétitivité, dont 2 à dimension mondiale.

Elles participent à incubateur d'entreprises innovantes (Minéa à Montpellier) ce qui conduit à la création d'une entreprise en moyenne par an.

2.2 Irstea centre Lyon-Villeurbanne

Mieux gérer la ressource en eau, réduire les impacts des rejets de polluants et de toxiques sur les écosystèmes aquatiques, diminuer la vulnérabilité aux risques associés au cycle de l'eau, inondations et aussi sécheresses, sont autant d'objectifs majeurs de la production des connaissances nouvelles à Lyon.

Le centre de Lyon conduit des études expérimentales sur le terrain (bassins versants instrumentés de l'Yzeron, de la Morcille, de l'Arc), dans les deux halls technologiques dédiés à l'hydraulique et à l'épuration des eaux usées, et en laboratoires. Les équipes de Lyon construisent des modèles, produisent des outils de diagnostic des pollutions, développent des concepts et méthodes.

La densité des partenariats avec les universités et écoles membres du PRES Université de Lyon, l'Université de Strasbourg, les organismes de recherche et leurs groupements régionaux (Envirhonalp, ZABR, OTHU), le nouvel Institut des Sciences Analytiques, les collectivités locales et les entreprises, plusieurs laboratoires étrangers, permet de construire des programmes de recherche très diversifiés.

Le centre de Lyon est constitué de trois unités :

- Milieux aquatiques, écologie et pollutions (MAEP)
- Hydrologie-Hydraulique (HHLY)
- Gestion territoriale de l'eau et de l'environnement.

L'unité Hydrologie-Hydraulique, dans laquelle j'ai effectué mon stage, est présentée plus en détails ci-dessous.

2.2.1 Unité de Hydrologie-Hydraulique

En vue de mieux gérer les ressources en eau et les risques liés aux inondations et aux sécheresses, l'unité Hydrologie - Hydraulique mène des recherches et des activités d'appui technique sur les bassins versants. Ces recherches sont effectuées dans le but d'une connaissance quantitative et qualitative des eaux superficielles à partir de la modélisation couplée des régimes hydrologiques et de l'hydraulique des écoulements en rivières, et d'études expérimentales en laboratoire et in situ.

D'autre part, elles s'intéressent à une modélisation des pluies et des processus hydrologiques à petite échelle pour une représentation spatialisée des transferts d'eaux, de sédiments et de solutés. Les méthodes et les outils élaborés apportent des réponses aux demandes sociales parfois contradictoires, liées aux usages de l'eau, à la protection contre les événements extrêmes ainsi qu'à la qualité des hydro systèmes.

Les différentes questions traitées concernent la lutte contre les crues, inondations et sécheresses ; le dimensionnement des aménagements ; l'entretien et la gestion du lit des rivières ; l'impact des activités humaines et du changement climatique sur la quantité et la qualité des ressources en eaux.

L'unité HHLY est composée des équipes suivantes :

- Hydraulique des rivières
- Métrologie
- Hydrologie de bassins versants

Mon stage s'est déroulé au sein de l'équipe Hydraulique des rivières. Cette équipe est en charge du fonctionnement physique des cours d'eau, de leur compréhension, leur modélisation et l'étude des matières qu'ils transportent tels que les polluants et les sédiments.

Les domaines de recherche de l'équipe sont entre autre :

- Les risques liés aux inondations naturelles ou aux ruptures d'ouvrages
- Les transferts de polluants

- L'aménagement des rivières

Ces études de recherche seront utilisées plus tard pour résoudre différents types de problèmes associés à des rivières tels que :

- Gestion de la ressource en eau et des risques associés.
- Risques d'inondation
- Dimensionnement des aménagements
- Aménagement et entretien de rivière
- Changement climatique, de l'influence humaine et de l'impact des aménagements sur le bilan hydrologique et les flux d'eau et de sédiments hydrodynamiques

3 Expériences dans le canal inclinable



Figure 2: Canal inclinable IRSTEA-Lyon

3.1 Description du canal

Le canal inclinable de l'Unité HH Lyon-Villeurbanne a été conçu plus spécifiquement pour l'étude du transport sédimentaire. C'est dans ce canal que nous étudierons les phénomènes d'infiltration de sédiments fins dans un substrat de sédiments grossiers.

Sa longueur effective est de 18 m, sa largeur de 1 m et sa profondeur de 0,80 m. La pente peut être réglée entre 0 et 5%. Le débit maximal d'alimentation en eau claire est de 300 L/s. À l'aval il est équipé d'une guillotine pour réguler la hauteur d'eau.

Le canal est aussi équipé de plusieurs capteurs :

- Mesure de hauteur d'eau par capteurs ultrasons (1 capteur à l'amont, 1 à l'aval),
- Mesure de débit par débitmètre électromagnétique en entrée du canal,
- Mesure de vitesse par sonde de Pitot (vitesse de l'eau sub-superficielle), par vélocimètre acoustique Doppler (vitesse de l'écoulement principal),
- Mesure de pression,
- Mesure de concentrations (Turbidimètres).

3.2 Alimentation en eau et en sédiments

Le canal inclinable est équipé d'un système d'alimentation avec trois différents modes d'utilisation :

- Il peut être alimenté en eau claire via une tour de régulation à charge constante. L'eau circule alors en circuit fermé via une cuve souterraine.
- Il peut être alimenté en eau chargée en sédiments en suspension (granulométrie < 1 mm) en circuit fermé également. La circulation s'effectuera dans ce cas via une cuve souterraine plus petite, équipée d'un agitateur pour homogénéiser la concentration en sédiments.
- Enfin, il est possible, de travailler en circuit ouvert pour des sédiments plus grossiers. Les canaux sont alimentés en eau claire par la tour de régulation et en sédiments sec par une trémie. A la sortie, l'eau est dirigée vers une cuve souterraine où les sédiments se déposent, puis elle se déverse à nouveau vers la cuve d'eau claire.

Le schéma ci-dessous illustre ces trois modes d'utilisation :

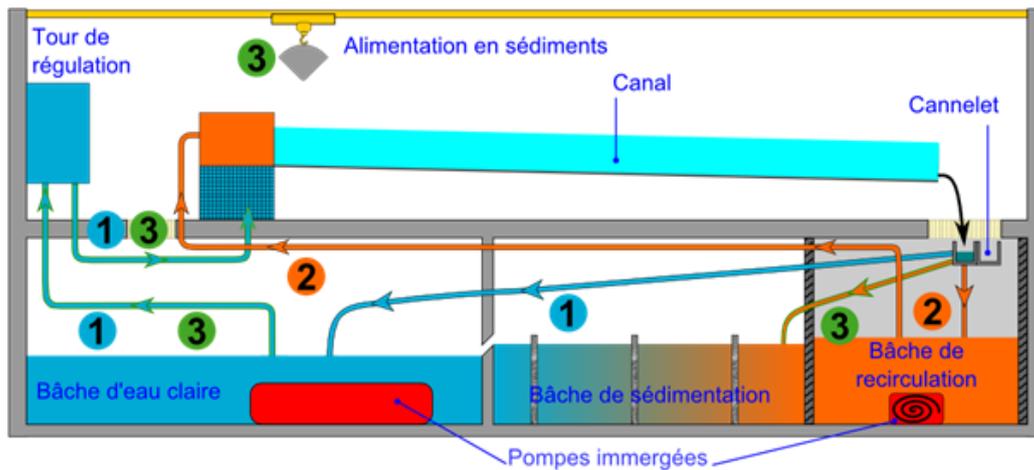


Figure 3: Schéma d'alimentation en eau et sédiments canal inclinable

Pour les expériences présentées dans ce rapport, le deuxième mode d'alimentation sera utilisé.

3.3 Montage expérimental pour l'étude d'infiltration des sédiments fins

Pour l'étude d'infiltration de sédiment fin dans le lit de gravier, nous avons procédé comme suit :

Nous avons installé au fond du canal un lit de graviers propres (i.e. sans sédiments fin < 1 mm) présentant une granulométrie étendue (2-10 mm) sur les 18 m de longueur, 1m de largeur et d'une épaisseur de 7cm environ.

Le sédiment fin utilisé est de la silice de granulométrie étendue (0,1-100 μm). Le mélange eau-sédiment fin est réalisé dans la bache de recirculation (20 m³) qui se trouve au sous-sol, en dessous du canal inclinable. Une pompe immergée dans cette bache permet de faire recirculer le mélange. Le débit a été fixé à 30 L/s, ce qui correspond à une hauteur d'eau uniforme dans le canal de 5 cm environ (pour la pente choisie de 1 %).

La concentration en sédiment fin en suspension avec l'eau a été fixée à 10 g/L. Nous avons cherché à travailler à concentration constante dans la colonne d'eau, parce qu'elle est plus représentative des conditions naturelles d'une rivière. Ce processus a nécessité un ajout régulier de sédiment fin dans la bache de recirculation afin de compenser les pertes dues au piégeage des sédiments fins dans le lit.

La pente était fixée en 1%. Cette pente intermédiaire permet d'éviter des vitesses très fortes et ainsi d'accélérer l'infiltration du sédiment fin dans le lit de gravier. L'influence de la pente n'a pas pu être étudiée dans le cadre de ce stage, elle le sera par la suite. Au début de l'expérience la pente était à 0%, pour éviter la mise en mouvement des particules du gravier lors de la mise en eau. Une fois la première « vague » d'eau passe au long du canal, la pente a été augmentée à 1%.

Des grilles type nids d'abeille ont été installées à l'entrée du canal afin d'obtenir des vitesses relativement uniformes dans la section et à la fin du canal pour retenir le lit de gravier tout en permettant au besoin l'écoulement de l'eau (selon le niveau de la guillotine).

Les capteurs utilisés pour cette étude étaient (voir Figure 5) : un capteur ultrason (hauteur d'eau), un vélocimètre acoustique Doppler et deux turbidimètres (mesure concentration). Les turbidimètres sont particulièrement importants car ils nous permettent de mesurer la concentration de l'eau en sédiment et de vérifier si elle est constante (10 g/L).

Le schéma ci-dessous résume le montage expérimental.

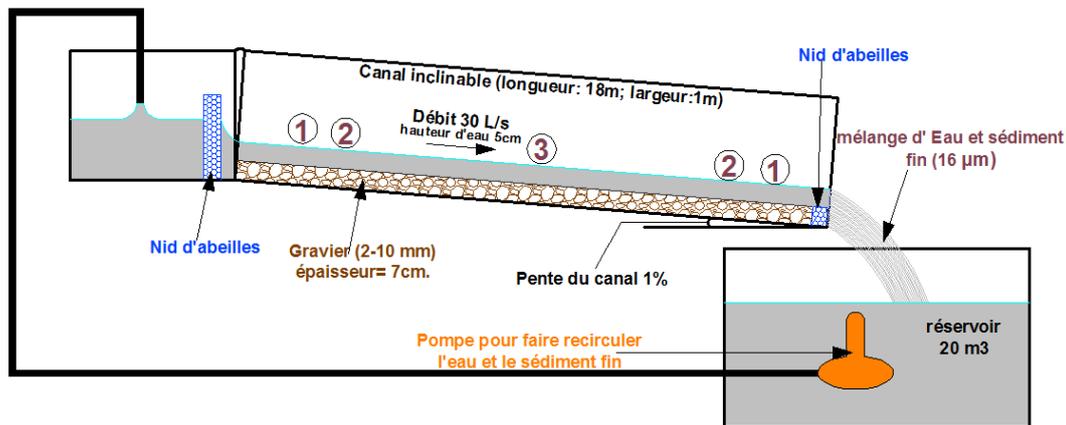


Figure 4: Montage expérimental dans le canal incliné pour l'étude d'infiltration de sédiment fin dans le lit de gravier



Figure 5: Capteurs utilisés dans le montage expérimental dans le canal incliné

4 Revue bibliographique

4.1 Conductivité hydraulique

Nous cherchons dans ce stage à savoir s'il est possible d'utiliser la perméabilité du lit pour quantifier le taux de colmatage du lit. Nous montrerons que la perméabilité de la matrice du lit de gravier diminue lorsque la concentration en sédiments fins augmente donc lorsque le colmatage augmente. Il existe différentes formules empiriques pour calculer la conductivité hydraulique pour sédiments avec une distribution uniforme des tailles du grain du gravier, mais nous avons choisi d'utiliser l'équation de Kozeny-Carman (Bear, 1972). En effet, selon la recherche bibliographique réalisée pour cette étude, l'équation KC prédit assez bien la conductivité hydraulique à saturation de la plupart des sols (Chapuis et Aubertin, 2003) et le mélange des sédiments et matériaux avec des distributions assez uniformes de taille de grains (ex : gravier) (O'connor et Harvey, 2008). L'équation s'écrit :

$$k = \frac{\rho g}{\mu} \times \frac{\theta^3}{(1 - \theta)^2} \times \frac{D_g^2}{180}$$

Notons que certains de ces paramètres devront être calculés à partir de mesures expérimentales (D_g). La porosité de l'ensemble (θ) sera d'une part déterminée à partir de mesures expérimentales et d'autre part à partir d'équations empiriques.

Pour vérifier la validité de l'équation précédente pour nos conditions d'expérimentations, des essais de perméabilité en laboratoire (perméamètre à charge variable) avec des échantillons prélevés dans le canal incliné seront réalisés.

4.1.1 Diamètre moyen géométrique du grain

Ce paramètre se calcule à partir de la distribution granulométrique du mélange de sédiments issue d'analyses granulométriques (selon la NF) de la façon suivante (Porter et al., 2013) :

$$D_g = \exp\left(\frac{\sum_{n=1}^N \varepsilon_i^n \times \ln(d_g^n)}{\sum_{n=1}^N \varepsilon_i^n}\right)$$

Où $\varepsilon_i^n = \frac{V_{iy}}{\sum_{n=1}^N V_{iy}} \times 100$

4.1.2 Porosité

On définit la porosité comme « la propriété d'un corps, d'un milieu, de comporter des vides interconnectés ou non, exprimée quantitativement par le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu (en pratique d'un " volume représentatif élémentaire " de ce milieu) » (DFH, 1977). Dans notre cas, nous considérons un mélange de graviers et de sédiments fins, et nous utiliserons l'hypothèse d' « Ideal Packing » (Koltermann and Gorelick, 1995).

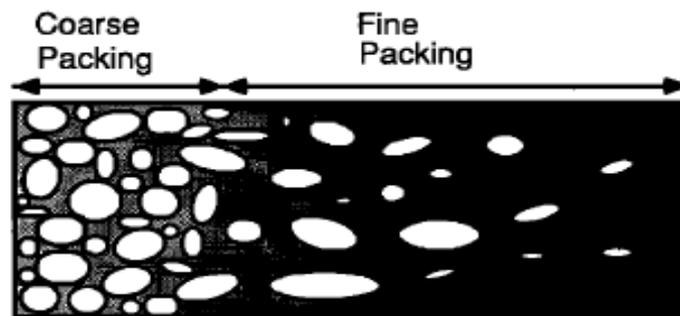


Figure 6: Micro-géométrie de l'hypothèse "Ideal Packing" pour un mélange gravier-sédiment fin

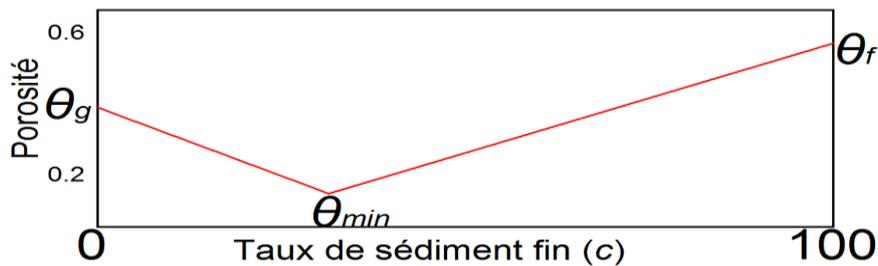


Figure 7: porosité en fonction de la fraction volumique de sédiments fins basée sur le volume total (sédiment fin et gravier)

La figure 6 présente la configuration volumique du mélange gravier- sédiment fin proposé pour le modèle d'« ideal packing ». Le « Coarse packing » se produit lorsque la matrice principale est formée par le gravier, et les particules de sédiment fin se mettent dans les pores créés par les grains du gravier, et le « fine packing » lorsque les particules du gravier sont dispersées dans une matrice de sédiment fin.

Pour pouvoir calculer la porosité, le modèle « Ideal Packing » propose les équations suivantes :

$$\theta = \theta_g - c(1 - \theta_f), \quad c < \theta_g$$

$$\theta_{min} = \theta_g \times \theta_f, \quad c = \theta_g$$

$$\theta = c \times \theta_f, \quad c > \theta_g$$

$$c = \frac{V_f}{V_f + V_g}$$

La figure 7 présente la porosité attendue en fonction du taux de sédiment fin dans le gravier ou (c). Lorsque la masse de sédiment fin augmente dans la matrice du gravier mais c continue d'être inférieur à la porosité du gravier (Coarse Packing), la porosité de l'ensemble (gravier-sédiment fin) diminue jusqu'à arriver à un minimum noté θ_{min} ($c = \theta_g$). A partir de ce point, les particules de la matrice du gravier ($c > \theta_f$) commence à se disperser et le sédiment fin devient le composant le plus

important de l'ensemble (Fine Packing), et la porosité du mélange augmente jusqu'à atteindre la valeur de la porosité du sédiment fin.

Pour notre travail on fera l'hypothèse que la fraction de sédiments fins reste faible, (i.e. $c < \theta_g$). En effet, les particules de gravier ne bougent pas, les particules de sédiments fins se mettent dans les vides du gravier sans modifier la structure de la matrice et le mélange reste dans la configuration du « coarse packing ».

Notons que le paramètre c est très important pour nous, car c'est un paramètre qui nous servira aussi à quantifier le degré colmatage du lit de gravier.

5 Premiers Essais De Laboratoire

5.1 Analyse granulométrique

5.1.1 Analyse granulométrique du gravier

L'analyse granulométrique permet de déterminer la taille et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant un échantillon. L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon (gravier) en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes de haut en bas. Le matériau analysé est placé dans le tamis supérieur et le tri des grains s'obtient par vibration de l'ensemble de la colonne des tamis.

L'équipement nécessaire pour l'analyse granulométrique est composé de tamis qui sont constitués d'un maillage métallique définissant des trous carrés de dimensions normalisés. La colonne de tamis est placée dans une machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire. Dans notre cas on utilisera une machine à tamiser électrique par voie humide, qui en outre, arrose le gravier avec de l'eau pour faciliter le tri.

La quantité de matériau (gravier) à utiliser pour l'analyse granulométrique doit être suffisante pour que l'échantillon soit représentatif et en même temps assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable. Nous avons choisi de travailler avec une masse de gravier d'environ $M = 1,3$ Kg.

Pour obtenir des résultats fiables, 3 analyses granulométriques du gravier successives ont été réalisées. Le résultat de ces trois analyses est représenté sur la figure suivante :

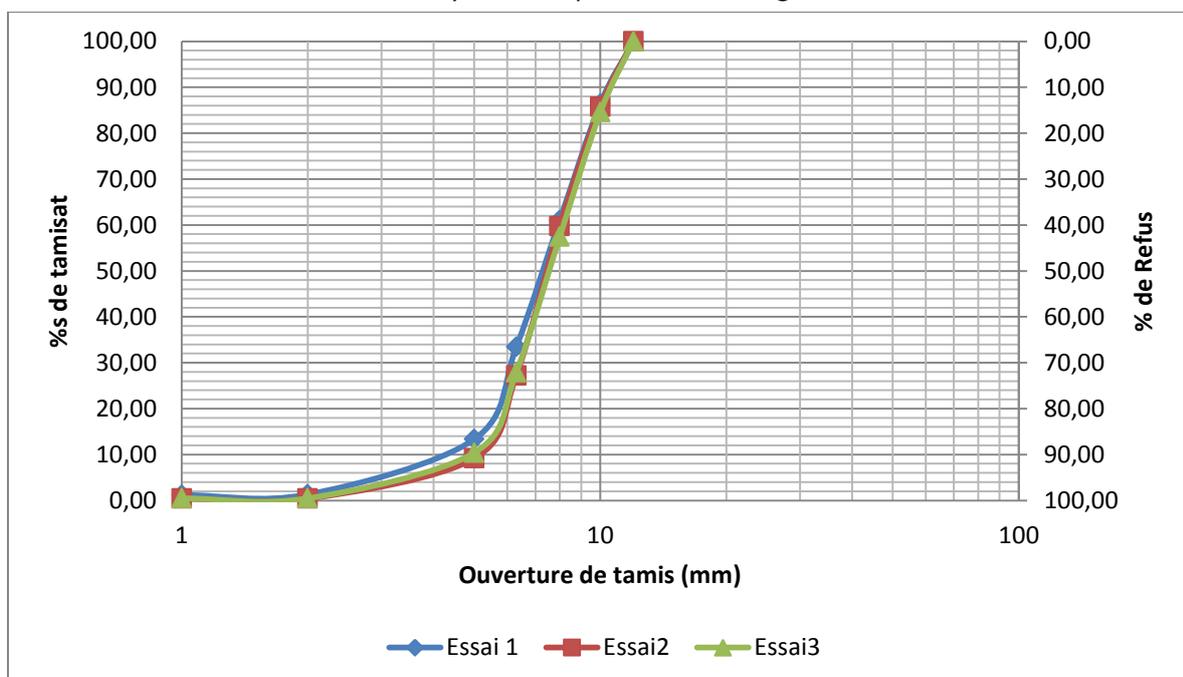


Figure 8: Courbes granulométriques du gravier.

A partir la courbe granulométrique, et selon la norme NF EN 933-1, les différents diamètres caractéristiques peuvent être obtenus. Le (d_{90}) par exemple est le diamètre pour lequel 90 % (en poids) des grains de l'échantillon sont de diamètre inférieur à (d_{90}). Ces différents diamètres sont utilisés dans certaines formules empiriques pour déterminer des propriétés caractéristiques du matériau (diamètre pores, perméabilité...) ou le transport sédimentaire par exemple. Ils sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Diamètres caractéristiques du gravier

Diamètre Caractéristique	essai 1	essai 2	essai 3
d_{90}	10,3	10,4	10,6
d_{60}	7,99	8	8,01
d_{50}	7,2	7,3	7,35
d_{30}	6,1	6,25	6,25
d_{10}	4,1	4,99	5,05

Les diamètres caractéristiques obtenus pour les trois essais sont cohérents. Les différences obtenues sont au plus de l'ordre de 1 mm, ce qui semble raisonnable compte tenu de la discrétisation de la courbe granulométriques (peu de tamis ont été utilisés). Nous pouvons également déterminer les coefficients d'uniformité (C_u) et courbure (C_c) des 3 courbes granulométriques :

Tableau 2: Coefficients d'uniformité et courbure

Coefficient	essai 1	essai 2	essai 3
$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$	1,9	1,6	1,6
$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$	1,1	1,0	1,0

Les valeurs obtenues pour le coefficient d'uniformité sont inférieures à 2 ($C_u < 2$), ce qui signifie que selon la norme NF EN 933-1, notre matériau est uniforme, et il contient une quantité importante de vides, qui jouent un rôle primordial dans la définition de la porosité. Le coefficient de courbure est compris dans l'intervalle suivant (norme NF EN 933-1) : $1 \leq C_c \leq 3$, donc la continuité de notre matériau est bien répartie ou bien graduée. Il n'y a pas une fraction de grain prédominante dans le gravier utilisé.

Finalement nous allons chercher à valider l'appellation d/D donnée par les fournisseurs grâce à nos essais granulométriques. Nous allons pour cela utiliser le tableau suivant qui rappelle ce que doivent satisfaire les dimensions inférieures (d) et supérieure (D) de cette appellation :

Tableau 3: Appellations pour des granulats EN 12620

Granulat	Dimensions	Pourcentage en masse du passant				
		2*D	1,4*D	D	d	d/2
Gravier	$D \leq 11,2$ mm	100	98 à 100	80 à 99	0 à 20	0 à 5

L'appellation d/D donnée par le fournisseur est 2/10. Nous allons utiliser pour la valider le pourcentage de masse passant mesurés pour chaque essai, présentés dans le Tableau 4 :

Tableau 4: Pourcentage en masse des passants pour les 3 essais granulométriques

Ouverture de tamis (mm)	Refus cumulés (% massique)		
	essai 1	essai 2	essai 3
12	100,00	100,00	100,00
10 (D)	86,37	85,77	84,53
8	61,00	59,77	57,41
6,3	33,44	27,22	27,92
5	13,34	9,19	10,39
2 (d)	1,31	0,39	0,46
1	1,18	0,39	0,46

Ces valeurs sont comparées à celles présentées dans le Tableau 3. Les valeurs mesurées sont conformes aux exigences de cette table donc l'appellation 2/10 est valable.

A partir des courbes granulométriques, nous pouvons calculer le diamètre moyen géométrique, un paramètre qui nous servira pour pouvoir appliquer l'équation de Kozeny-Carman. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 5. Le détail des calculs est donné en annexe.

Tableau 5: Diamètres moyens géométriques

analyse granulométrique n°	diamètre moyen géométrique (D_g) (mm)
1	5,91
2	6,21
3	6,19
moyenne	6,10

5.1.2 Analyse granulométrique du sédiment fin

Pour l'analyse granulométrique du sédiment fin on a utilisé la méthode de la granulométrie laser. Elle permet la mesure de tailles de grains comprises entre 0,05 et 900 μm . La technique par tamis ne permet pas de mesurer la granulométrie de sédiments si fins. La granulométrie laser convient particulièrement aux suspensions de polymères ou à tout type de poudre (notre cas). Elle est basée sur le principe de la diffraction de la lumière. Les particules en suspension (dans l'eau) diffractent la lumière émise par un faisceau laser. La répartition spatiale de cette lumière, fonction de la taille des particules, est enregistrée par un ensemble de photodiodes. L'analyse de cette distribution dans le plan focal permet de déterminer la proportion de chaque classe de taille de particule.

On a fait trois analyses granulométriques pour le sédiment fin, dont les résultats sont présentés Figure 9. Les trois courbes sont superposées.

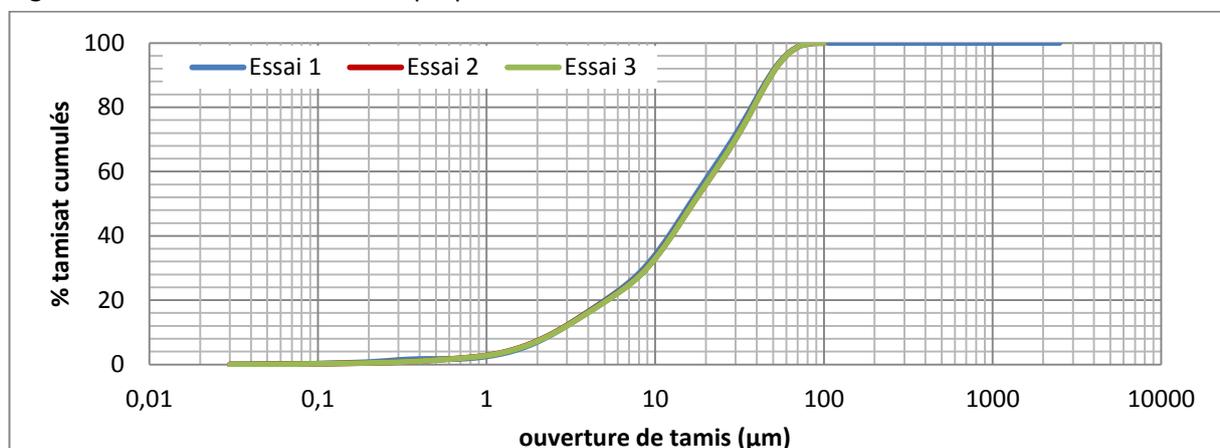


Figure 9: Courbe Granulométrique du sédiment fin

A partir la courbe granulométrique, et selon la norme NF EN 933-1, les différents diamètres caractéristiques peuvent être obtenus. Ils sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6: Diamètres caractéristiques du sédiment fin

Item	Diamètres Caractéristiques		
	d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀
Analyse1	2.56 µm	16,07µm	48,16 µm
Analyse2	2.56 µm	16,70 µm	48,84µm
Analyse3	2.53 µm	16,68 µm	48,78 µm

Le Tableau 6 nous montre que les différences entre les diamètres des trois analyses granulométriques sont très faibles. Les échantillons pris pour ces analyses semblent représentatifs.

5.2 Porosité

5.2.1 Porosité du gravier

Trois différentes méthodes ont été utilisées pour déterminer la porosité du gravier. Elles sont présentées dans les trois paragraphes suivants.

5.2.1.1 Méthode 1

La porosité peut être calculée au moyen de la densité apparente. La densité apparente est le rapport entre la masse du matériau contenue dans un volume donné et ce volume (volume d'air interstitiel inclus). C'est-à-dire :

$$D_a = \frac{\text{masse sédiments}}{\text{volume (vides inclus)}} = \frac{M_t}{V_t}$$

Une fois trouvée la densité apparente, on calcule la porosité en utilisant l'équation suivante :

$$\theta = \frac{D_r - D_a}{D_r}$$

La procédure est simple : on commence par mettre dans des récipients de volume connu (éprouvettes graduées), différents échantillons de gravier, jusqu'à une certaine graduation. Les échantillons sont ensuite pesés, à l'aide de deux balances de précisions respectives de $\pm 1g$ et $\pm 0.01g$. La densité apparente (D_a) puis la porosité est ensuite calculée à partir des données trouvées (poids, volume).

Pour ce calcul on utilise 2 groupes de données : le premier (date : 14/05/2014) sont des données prises spécifiquement pour ce calcul ; et le deuxième (date : 13/03/2014) sont des données prises pour l'essai présenté dans le paragraphe suivant, mais qui servent aussi pour cette expérience. Leur comparaison permettra une meilleure interprétation des résultats.

Calcul d'incertitude :

Nous devons pour cette méthode considérer l'incertitude sur la densité apparente pour calculer ensuite celle sur la porosité.

Il y a pour la densité apparente (D_a) deux sources d'incertitudes (Figure 12) : l'irrégularité du volume des particules de gravier (ΔV_t), qui fait qu'on ne peut pas arriver à lire précisément la graduation exacte de volume dans les éprouvettes graduées. Cette différence est environ de 5 mm ce qui correspond à un volume de matériau qui varie selon l'éprouvette utilisée.

Pour la porosité (θ_g), les erreurs proviennent de la densité apparente (D_a), et de la densité réelle. Pour ces erreurs on utilisera la méthode des différentielles totales exactes :

$$\Delta \theta_g = \left| \frac{\partial(\theta_g)}{\partial D_a} \right| \times \Delta D_a + \left| \frac{\partial(\theta_g)}{\partial D_r} \right| \times \Delta D_r$$

En explicitant les dérivées, on obtient l'expression suivante pour l'incertitude sur la porosité :

$$\Delta \theta_g = \left| -\frac{\Delta D_a}{D_r} \right| + \frac{D_a}{D_r^2} \times \Delta D_r$$

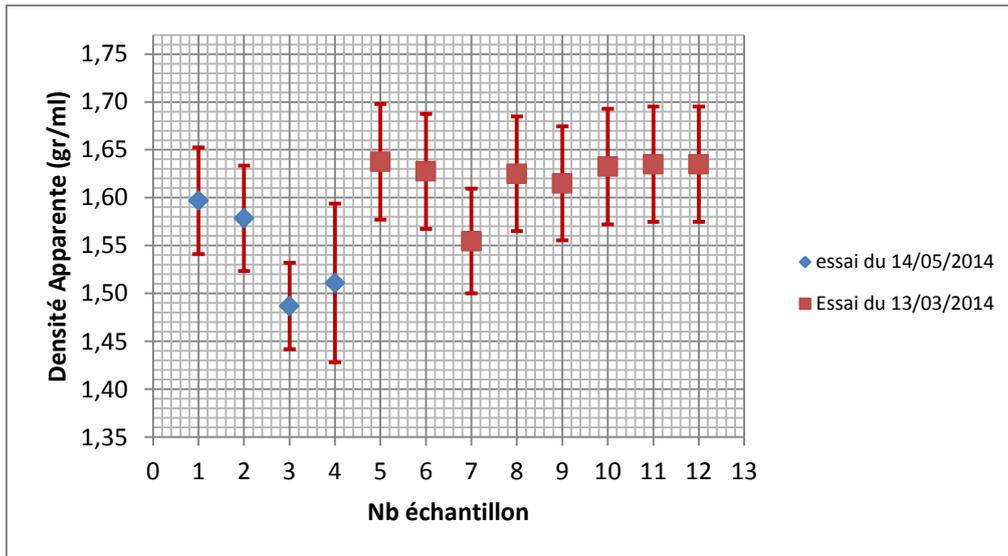


Figure 10: Densité apparente et incertitudes associées

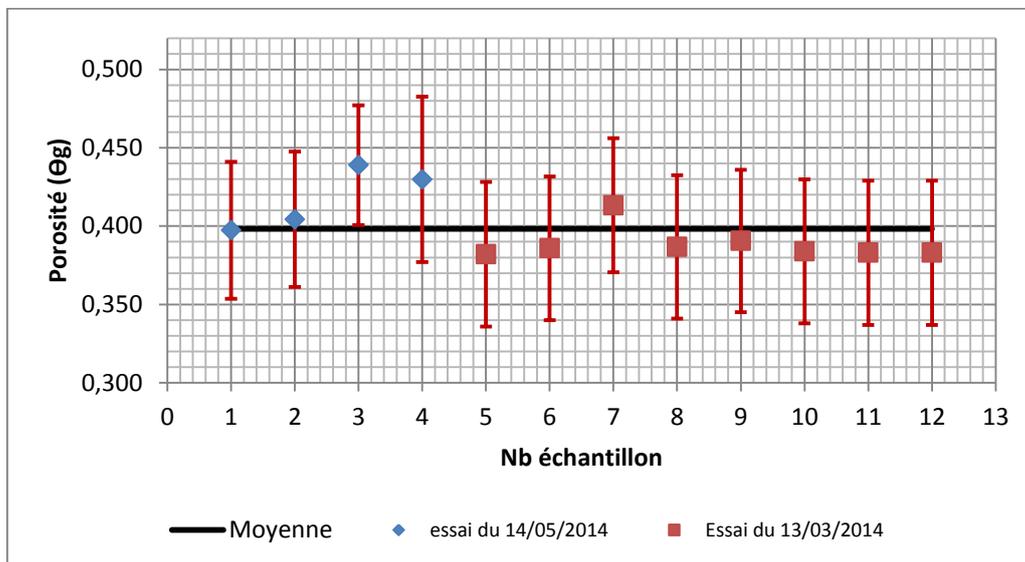


Figure 11: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 1)

Les résultats sont présentés sur les Figure 10 et Figure 11. Il semblerait que les résultats trouvés en la date du 13/03/2014 sont plus homogènes (sauf l'échantillon n°7) que les essais en la date du 14/05/2014. Ceci est probablement dû au fait que pour les essais du 14/05/2014, en particulier pour les échantillons n° 3 et 4, on a utilisé pour la mesure du volume des éprouvettes de 250 et 500 mL avec des diamètres « étroits ». La manipulation pour introduire le gravier dans ces éprouvettes est plus difficile, ce qui peut empêcher l'entrée des grains plus gros et conduire à ce qu'il y ait plus de particules de petite taille que pour les autres échantillons des 2 essais pour lesquels les éprouvettes utilisées de 1000 mL avaient un diamètre plus grand. En effet, l'introduction du gravier dans les grandes éprouvettes était plus facile, par conséquent les échantillons avaient une distribution de tailles particules plus uniformes. La taille de particules pour cet essai est importante, puisque elle détermine le volume de vides entre les particules du matériau, ce qui influe sur le poids du volume total (volume de grains plus le volume de vides) du matériau ; paramètre qui est utilisée pour mesurer la densité apparente, ensuite la porosité. Mais si on considère les incertitudes, on peut dire que les résultats des 2 essais sont dans la même fourchette. Finalement on calcule la moyenne des 8 résultats de la porosité trouvés dans cette expérience. La valeur obtenue est de **0.40**.

5.2.1.2 Méthode 2

Pour cet essai on verse 8 échantillons de gravier dans différents éprouvettes (éprouvette graduée de 1000 mL \pm 10mL), jusqu'à la graduation environ de 400 mL. Puis dans une autre éprouvette (éprouvette graduée 100 mL \pm 1mL), on verse de l'eau jusqu'à la graduation de 100 mL. Après, pour chaque volume d'échantillon du gravier, on verse de l'eau lentement et soigneusement, pour éviter qu'il reste de l'air dans les pores, jusqu'à ce qu'elle arrive exactement au niveau du gravier. Finalement pour calculer la porosité du gravier, on divise le volume d'eau versé dans l'éprouvette par le volume total de l'échantillon, donc :

$$\theta_g = \frac{VOLUME_{vides}}{VOLUME_{TOTAL}} = \frac{V_{eau}}{V_{total}} = \frac{V_w}{V_t}$$

Calcul d'incertitudes :

Ici l'incertitude est due à l'irrégularité de forme du gravier, ce qui fait qu'il est difficile de décider le moment à partir duquel le gravier est rempli d'eau. La graduation exacte du volume dans les éprouvettes graduées ne peut être déterminée précisément. Cette différence est d'environ 5 mm (diamètre médian de l'échantillon de gravier), ce qui correspond à un volume de 14 mL pour l'éprouvette utilisée. Le schéma ci-dessous un schéma explicite ce problème :

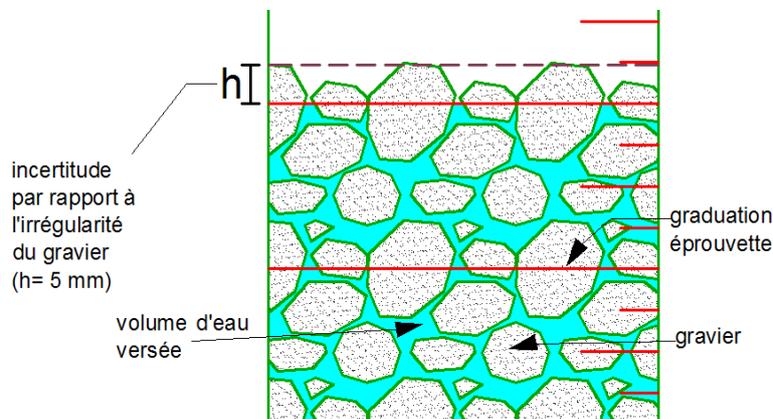


Figure 12: Schéma pour expliquer l'incertitude due à l'irrégularité du gravier

Pour le calcul de l'erreur on utilisera la méthode des différentielles totales exactes :

$$\Delta\theta_g = \left| \frac{\partial(\theta_g)}{\partial V_w} \right| \times \Delta V_w + \left| \frac{\partial(\theta_g)}{\partial V_t} \right| \times \Delta V_t$$

En explicitant les dérivées, on obtient l'expression suivante pour l'incertitude sur la porosité :

$$\Delta\theta_g = \frac{\Delta V_w}{V_t} + \frac{V_w \times \Delta V_t}{V_t^2}$$

Les résultats (porosité et mesure de l'erreur) sont présentés dans le tableau et sur la figure ci-dessous :

Tableau 7: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 2)

	Unité	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8
Volume échantillon (V_t)	mL	400	400	420	400	400	400	400	400
ΔV_t	mL	14	14	14	14	14	14	14	14
Masse échantillon (M_t)	g	655	651	653	650	646	653	654	654
Volume d'eau versée (V_w)	mL	152	157	166	152	150	151	152	156
ΔV_w	mL	14	14	14	14	14	14	14	14
Porosité ($\theta_g = V_w/V_t$)	---	0.380	0.393	0.395	0.380	0.375	0.378	0.380	0.390
$\Delta\theta_g$	---	0.049	0.049	0.047	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049

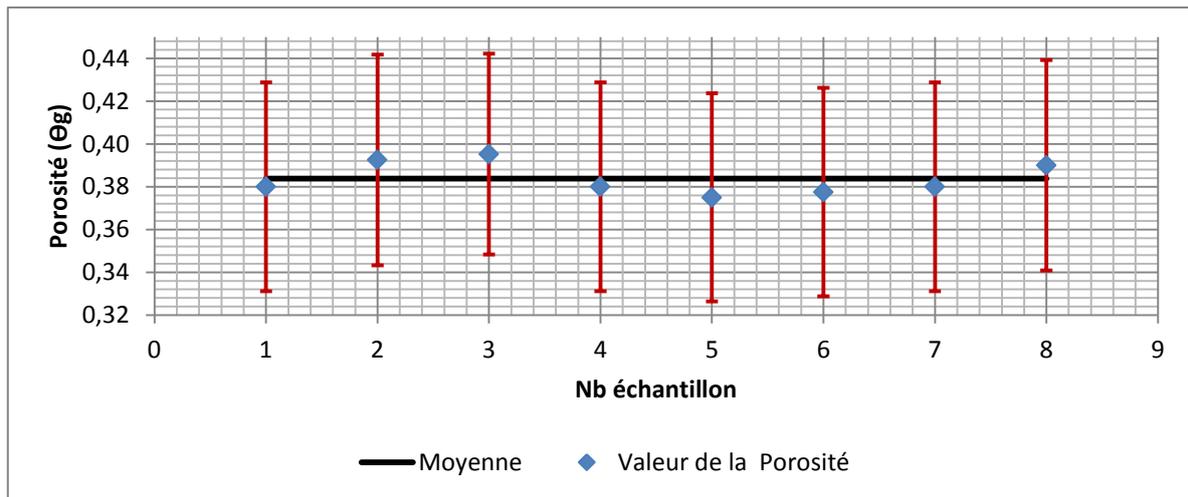


Figure 13: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 2).

Toutes les données mesurées nécessaires au calcul de la porosité sont présentées dans le Tableau 7. Les valeurs de porosité trouvées qui sont présentées Tableau 7 sont assez cohérentes, la différence des porosités trouvées entre les 8 échantillons prélevés varie très peu (entre 0.375 à 0.395) et les différences observées sont de l'ordre de grandeur voire inférieures à l'incertitude sur la mesure. On peut donc considérer la porosité comme constante et la moyenne de la porosité pour les 8 échantillons est de l'ordre de **0.38**.

5.2.1.3 Méthode 3

Nous utiliserons pour ce calcul les mêmes données que celles utilisées pour le premier essai, mais plutôt que d'utiliser les volumes d'eau versés et de gravier pour calculer la porosité, nous allons considérer les masses de l'eau et du gravier, ainsi que leurs densités respectives pour pouvoir calculer la porosité du matériau. Celle-ci s'exprime alors de la façon suivante :

$$\theta_g = \frac{V_w}{V_t} = \frac{M_w \times \rho_g}{(M_w \times \rho_g) + (M_t \times \rho_w)}$$

Calcul d'incertitudes :

Dans ce cas, il y a une incertitude sur les poids mesurés, surtout sur la quantité (volume) d'eau ajoutée. En effet, comme pour la méthode 1 (voir Figure 12), l'irrégularité de la surface formée par les grains du gravier introduit une subjectivité sur le moment où l'on considère que le gravier est rempli d'eau. Ceci conduit à une incertitude sur le volume d'eau versée (14 mL environ) ; par conséquent, il existera aussi une incertitude sur le poids d'eau versée, de l'ordre de 14 g.

Pour le calcul de l'erreur on utilisera la méthode des différentielles totales exactes :

$$\Delta\theta_g = \left| \frac{\partial(\theta_g)}{\partial M_w} \right| \Delta M_w + \left| \frac{\partial(\theta_g)}{\partial M_t} \right| \Delta M_t$$

En explicitant les dérivées, on obtient l'expression suivante pour l'incertitude sur la porosité :

$$\Delta\theta_g = \frac{[\rho_g(M_w \rho_g + M_t \rho_w) - \rho_g(M_w \rho_g)] \Delta M_w + [\rho_w(M_w \rho_g)] \Delta M_t}{[(M_w \rho_g) + (M_t \rho_w)]^2}$$

Les résultats (porosité et mesure de l'erreur) sont présentés dans le tableau et sur la figure ci-dessous :

Tableau 8: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 3)

	Unité	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8
Volume échantillon (V_t)	mL	400	400	420	400	400	400	400	400
Masse échantillon (M_t)	g	655	651	653	650	646	653	654	654
ΔM_t	g	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Volume d'eau versée (V_w)	mL	152	157	166	152	150	151	152	156
Masse de l'eau (M_w)	g	152	157	166	152	150	151	152	156
ΔM_w	g	14	14	14	14	14	14	14	14
Densité de l'eau (ρ_w)	g/mL	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Densité du gravier (ρ_g)	g/mL	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Porosité $\theta_g =$ $((\rho_g * M_w) / ((\rho_g * M_w) + (\rho_w * M_t)))$	---	0.381	0.390	0.403	0.383	0.381	0.380	0.381	0.387
$\Delta \theta_g$	---	0.022	0.022	0.021	0.022	0.023	0.022	0.022	0.022

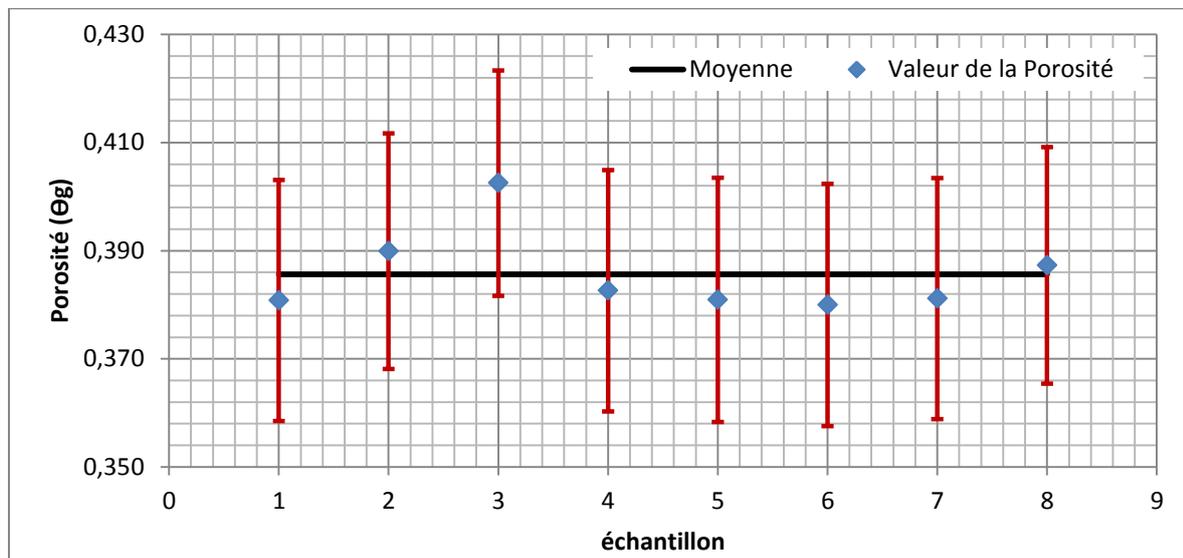


Figure 14: Porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 3)

Toutes les données mesurées pour les 8 échantillons, pour pouvoir calculer la porosité (θ_g) et l'erreur correspondante ($\Delta \theta_g$) sont présentées dans le Tableau 8.

On remarque sur la Figure 14 qu'il existe une certaine dispersion des résultats trouvés dans l'essai. Ceci est dû au fait que nos échantillons de graviers, qui ont différentes tailles de particules (entre 1 et 10 mm) ont été pris de manière aléatoire, et certains échantillons présentent possiblement plus de particules fines que de particules grossières et vice versa. Ceci influence notamment le volume des vides que contiennent l'échantillon, et par conséquent le volume et poids d'eau (paramètre pour calculer la porosité) qu'on doit utiliser pour remplir ces vides. Cependant, les résultats sont cohérents aux incertitudes près, donc on peut considérer l'essai valable. Finalement on calcule la moyenne des 8 résultats de la porosité trouvés dans cette expérience. La valeur obtenue est de **0.39**.

5.2.2 Porosité du sédiment fin

Pour pouvoir calculer la porosité du gravier on a utilisé 2 différents types d'essais de laboratoire, présentés ci-dessous.

5.2.2.1 Méthode 1

La méthode et l'évaluation des incertitudes sont les mêmes que celles présentées pour le gravier (paragraphe 5.2.1.1). Les résultats (porosité et mesures des erreurs) sont présentés dans le tableau et sur figures ci-dessous :

Tableau 9: Calcul de la densité apparente, la porosité et ses incertitudes

	Unité	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5
Volume échantillon (V_t)	mL	300	300	250	90	90
ΔV_t	mL	5	10	5	2	2
Masse Echantillon (M_t)	g	375,03	365,00	326,66	105,06	109,09
ΔM_t	g	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Densité Apparente (D_a)	g/mL	1,250	1,217	1,307	1,167	1,212
ΔD_a	g/mL	0,0209	0,0406	0,0262	0,0261	0,0270
Densité Réelle (D_r)	g/mL	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
ΔD_r	g/mL	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Porosité (θ_f)	---	0,53	0,54	0,51	0,56	0,54
$\Delta \theta_f$	---	0,026	0,033	0,028	0,026	0,027

Dans le Tableau 9 sont présentées les données mesurées pour calculer la densité apparente (D_a) et l'incertitude associée (ΔD_a). La porosité et l'incertitude associée (θ_f et $\Delta \theta_f$) sont ensuite calculées à partir de la densité réelle (D_r et ΔD_r).

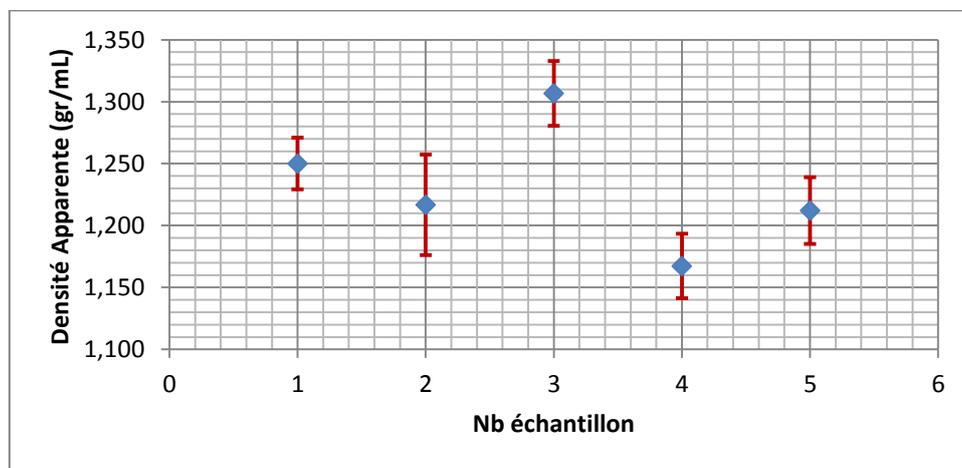


Figure 15: Densité apparente et incertitudes associées pour les 6 essais réalisés

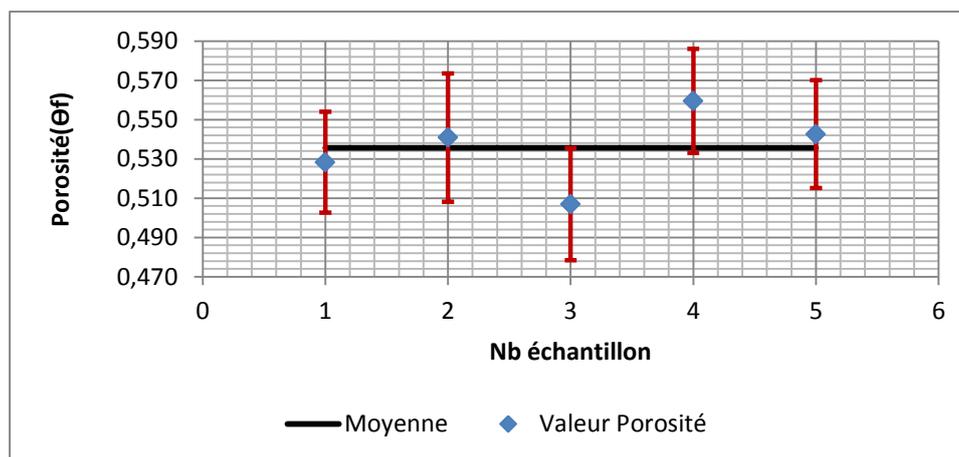


Figure 16: Barres d'erreurs (incertitudes) porosité

Ces résultats sont également présentés sur la Figure 15. La densité apparente des échantillons considérés est relativement dispersée. Ceci est probablement dû au fait que des petits coups à la base de l'éprouvette ont été donnés pour égaliser la surface du sédiment fin afin de pouvoir lire la graduation de volume dans l'éprouvette utilisée. Comme on l'a fait de façon aléatoire (sans compter le nombre de coups), nos échantillons de sédiment fin ont été compactés plus ou moins ce qui a probablement amené à des densités apparentes de sédiment fin variables.

Sur la Figure 16 les incertitudes de la porosité de chaque échantillon testé sont présentés ; les résultats trouvés sont cohérents, et sont comparables à ceux trouvés dans la bibliographie étudié pour ce cas (Allen, 1985 ; Wooster et al., 2008). Finalement la moyenne de la porosité des 5 échantillons faits pour cet essai est de **0.54**.

5.2.2.2 Méthode 2

La procédure est simple. Nous avons tout d'abord placé dans une éprouvette graduée un volume d'eau connu (V_{wi}). Nous avons ajouté à ce volume d'eau un volume de sédiments fins préalablement mesuré dans une seconde éprouvette (pores inclus, noté V_t). Le niveau d'eau augmente alors comme montré sur Figure 17, ce qui correspond à une augmentation de volume. S'il n'y avait pas de vides dans le sédiment fin, la lecture du volume final obtenu après le versement du sédiment fin, serait la somme des volumes de l'eau initial dans l'éprouvette et du sédiment fin versé. Le volume final (V_{wf}) est plus faible. On déduit que le volume d'eau « manquant » est le volume de pores du sédiment fin (ou volume des vides V_v), déterminé de la façon suivante :

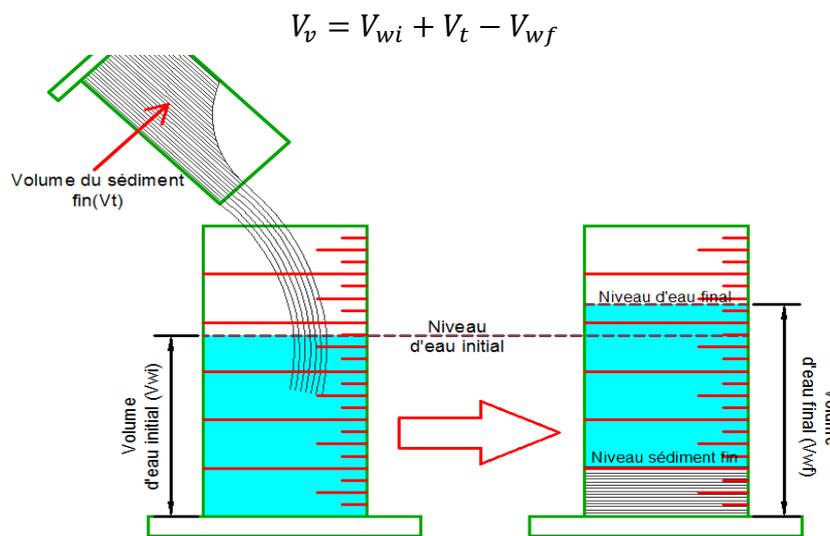


Figure 17: Schéma pour montrer la mesure de la porosité faite par la méthode de volume d'eau déplacé

La porosité est ensuite calculée à partir de ce volume :

$$\theta_f = \frac{VOLUME_{vides}}{VOLUME_{TOTAL}} = \frac{V_{vides}}{V_{fins(pores\ inclus)}} = \frac{V_v}{V_t}$$

Calcul d'incertitude :

Les instruments de mesure ne sont pas parfaits et les notices indiquent leurs précisions. Dans notre cas les précisions des éprouvettes graduées pour le gravier (250 mL) et l'eau (100 mL) sont ± 2 et ± 1 mL. Nous avons donc une incertitude sur la porosité. Pour le calcul de l'erreur on utilisera la méthode des différentielles totales exactes :

$$\Delta\theta_f = \left| \frac{\partial(\theta_f)}{\partial V_v} \right| \times \Delta V_v + \left| \frac{\partial(\theta_f)}{\partial V_t} \right| \times \Delta V_t$$

En explicitant les dérivées, on obtient l'expression suivante pour l'incertitude sur la porosité :

$$\Delta\theta_f = \frac{\Delta V_v}{V_t} + \frac{V_v \times \Delta V_t}{V_t^2}$$

Les résultats (porosité et mesure de l'erreur) sont présentés dans le tableau et sur la figure ci-dessous :

Tableau 10: Calcul de la porosité et ses incertitudes

	Unité	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4
Volume échantillon (V_t)	mL	40,00	50,00	60,00	70,00
ΔV_t	mL	2,00	2,00	2,00	2,00
volume d'eau initial (V_{wi})	mL	110,00	116,00	112,00	112,00
volume d'eau final (V_{wf})	mL	128,00	138,00	136,00	140,00
Volume de vides (V_v)	mL	22,00	28,00	36,00	42,00
ΔV_w	mL	2,00	2,00	2,00	2,00
Porosité $\theta_f = (V_v/V_t)$	---	0,550	0,560	0,600	0,600
$\Delta\theta_f$	---	0,078	0,062	0,053	0,046

Les données sont présentées dans le Tableau 10 ainsi que le résultat du calcul de la porosité du matériau (θ_f) et ses incertitudes ($\Delta\theta_f$).

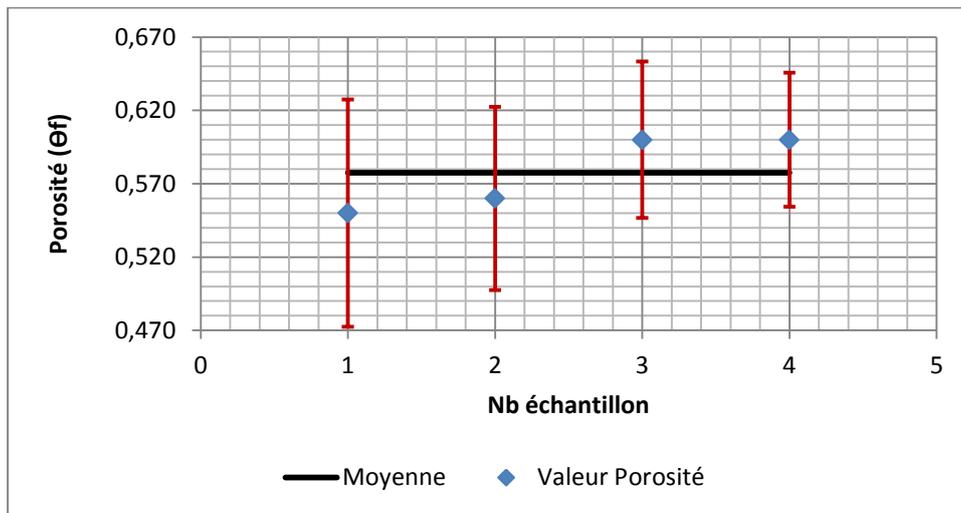


Figure 18: Barres d'erreurs (incertitudes) porosité

Les résultats obtenus, présentés Figure 18 (porosité et ses incertitudes), sont cohérents et présentent une dispersion relativement faible. L'essai semble valable et la moyenne de la porosité pour les 4 échantillons réalisés pour cet essai est de **0.58**.

5.2.3 Tableau récapitulatif de mesures trouvées des essais de la porosité

Un récapitulatif des différentes mesures de porosité est présenté dans le Tableau 11 pour le gravier et le sédiment fin. Les moyennes de la porosité de chaque essai, et l'erreur correspondante (moyenne aussi) sont rassemblées.

Tableau 11: Récapitulatif de la porosité

Méthode	Matériau			
	Gravier		Sédiment fin	
	Porosité (θ_g)	$\Delta\theta_g$	Porosité (θ_f)	$\Delta\theta_f$
Méthode1	0.398	0.045	0.536	0.028
Méthode2	0.384	0.049	0.578	0.060
Méthode3	0.386	0.022	---	---
θ et Δθ moyen	0.389	0.039	0.557	0.044

La porosité du gravier est presque identique pour les différentes méthodes (voir Tableau 11), mais les incertitudes mesurées dans la méthode de la densité apparente est plus importantes que pour les 2 autres méthodes. Ceci est dû au fait que dans cet essai on travaille avec 3 paramètres à mesurer (volume, poids et densité), tandis que les 2 autres méthodes se basent sur un seul paramètre à mesurer (soit le volume soit le poids). Dans le cas du sédiment fin, les résultats obtenus sont

cohérents avec ceux de la bibliographie (Allen, 1985 ; Wooster et al., 2008), même s'ils varient d'un test à l'autre. La différence peut s'expliquer par le fait que tandis que dans la première méthode, l'échantillon est légèrement compacté pour lire le volume, il est disposé de façon très lâche dans la deuxième méthode. Quant aux incertitudes de mesure, elles sont plus importantes pour le deuxième cas et permettent également d'expliquer les différences entre les deux tests. Il faut aussi préciser qu'en plus des incertitudes mesurées et détaillées dans chaque méthode, il peut y avoir d'autres sources d'incertitudes difficilement mesurables, comme le piégeage de bulles d'air, au moment de verser l'eau ou la difficulté à travailler avec un matériau dont les particules sont très petites (entre 0.1 et 100 μm). Ces difficultés peuvent aussi produire de fortes distorsions au moment de calculer la porosité du sédiment fin.

5.2.4 Porosité du mélange gravier-sédiment fin

Nous utiliserons pour la mesure de la porosité du mélange gravier + sédiment fin les mêmes méthodes que celles utilisées pour la mesure de la porosité du gravier.

Les résultats sont présentés par la suite.

5.2.4.1 Mesure du taux de sédiment fin (c)

Dans le Tableau 12 les valeurs du volume du gravier et sédiment fin (V_g et V_f), et la porosité du gravier (θ_g) et sédiment fin (θ_f) sont utilisés pour calculer le taux de sédiment fin (c), à partir de la formule suivante :

$$c = \frac{V_f(1-\theta_f)}{V_f(1-\theta_f) + V_g(1-\theta_g)} ,$$

Les autres valeurs du Tableau 12 sont utilisées dans les essais décrits dans le 5.2.4 : le volume de l'échantillon du mélange gravier-sédiment fin (V_{g+f}) dans les essais de volume d'eau versée et densité apparente, le poids du mélange gravier +sédiment fin (M) dans les essais de poids de matériaux et densité apparente.

A partir de c et de la porosité du gravier, on calcule tout d'abord la porosité du mélange avec l'équation du « ideal packing » (Koltermann and Gorelick, 1995), pour comparer ensuite avec les porosités du mélange gravier-sédiment fin trouvées dans les essais de laboratoire. Nous pourrions en déduire si pour nos conditions expérimentales, cette équation est valable ou pas.

Tableau 12: Mesure du taux de sédiment fin (c)

	Unité	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6
Volume échantillon gravier (pores inclus) (V_g)	mL	500	500	500	500	500	500
ΔV_g	mL	16	16	16	16	16	16
Masse échantillon gravier (M_g)	g	751,00	796,00	784,00	782,00	784,00	773,00
ΔM_t	g	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Volume échantillon sédiment fin (pores inclus) (V_f)	mL	50	70	90	100	110	130
ΔV_f	mL	2	2	2	2	2	2
Masse échantillon sédiment fin (M_f)	g	58	90	121	141	153	170
ΔM_t	g	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Volume échantillon gravier+ sédiment fin (V_{g+f})	mL	500	530	540	540	540	540
ΔV	mL	23	23	23	23	23	23
Poids échantillon du mélange (M)	g	815	870	904	923	930	948
ΔM	g	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Porosité Gravier (θ_g)	---	0,389	0,389	0,389	0,389	0,389	0,389
Porosité Sédiment fin (θ_f)	---	0,557	0,557	0,557	0,557	0,557	0,557
Taux de sédiment fin (c)	---	0,07	0,09	0,12	0,13	0,14	0,16

5.2.4.2 Application de l'équation « ideal packing » pour la porosité du mélange gravier-sédiment fin

L'équation à utiliser est :

$$\theta = \theta_g - c(1 - \theta_f) \quad c < \theta_g$$

Calcul d'incertitude :

La porosité du gravier et du sédiment fin ont été mesurées d'une manière expérimentale avec une certaine incertitude. Nous utiliserons la méthode des différentielles totales exactes pour en déduire l'incertitude sur la porosité du mélange :

$$\Delta\theta = \left| \frac{\partial\theta}{\partial\theta_g} \right| \times \Delta\theta_g + \left| \frac{\partial\theta}{\partial\theta_f} \right| \times \Delta\theta_f$$

En explicitant les dérivées, on obtient l'expression suivante pour l'incertitude sur la porosité :

$$\Delta\theta = \Delta\theta_g + c \times \Delta\theta_f$$

Les résultats (porosité et mesure de l'erreur) sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13: Calcul de la porosité et des incertitudes associées

Coeff. c	θ	$\Delta\theta$
0.00	0.389	0.0453
0.07	0.359	0.0483
0.09	0.348	0.0494
0.12	0.338	0.0504
0.13	0.333	0.0509
0.14	0.328	0.0514
0.16	0.319	0.0523

Dans le Tableau 13, la 1^{ère} colonne montre les valeurs de (c) calculées dans le Tableau 12. Avec ces valeurs la porosité (θ) et ses incertitudes ($\Delta\theta$) ont été calculées.

5.2.4.3 Essais de laboratoire pour mesurer la porosité du mélange gravier-sédiment fin

Comme dit au début de ce chapitre, les 3 méthodes (incertitudes incluses) utilisées pour la mesure de la porosité du gravier sont appliquées pour ce cas. Les données de volume et de poids des échantillons du gravier, du sédiment fin et du mélange gravier-sédiment fin qui se trouvent dans le Tableau 12, ont été utilisées pour les calculs de porosité dont les résultats présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 14: Méthode 1

Taux de sédiment fin (c)	---	0.07	0.09	0.12	0.13	0.14	0.16
Densité Apparente (D_a)	g/mL	1.63	1.64	1.67	1.71	1.72	1.76
ΔD_a	g/mL	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08
Densité Réel (D_r)	g/mL	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
ΔD_r	g/mL	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Porosité (θ)	---	0.38	0.38	0.37	0.35	0.35	0.34
$\Delta\theta$	---	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Tableau 15: Méthode 2

Taux de sédiment fin (c)	---	0.07	0.09	0.12	0.13	0.14	0.16
Volume d'eau versée (V_w)	mL	170	175	175	163	160	154
ΔV_w	mL	14	14	14	14	14	14
Porosité $\theta = (V_w/V_g + V_f)$	---	0.34	0.33	0.32	0.30	0.30	0.29
$\Delta\theta$	---	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Tableau 16: Méthode 3

Taux de sédiment fin (c)	---	0.07	0.09	0.12	0.13	0.14	0.16
Masse de l'eau (M_w)	g	170	175	175	163	160	154
ΔM	g	14	14	14	14	14	14

Densité de l'eau (ρ_w)	g/mL	1	1	1	1	1	1
Densité du mélange (ρ)	g/mL	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Porosité $\theta = ((\rho * M_w) / ((\rho * M_w) + (\rho_w * M)))$	---	0.36	0.35	0.34	0.32	0.31	0.30
$\Delta\theta$	---	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

5.2.4.4 Récapitulatif de résultats sur la porosité

Finalement, une figure récapitulative des résultats trouvés pour l'équation du « ideal packing » et les essais de laboratoire sur la porosité du mélange gravier- sédiment fin sont présentés ci-dessous :

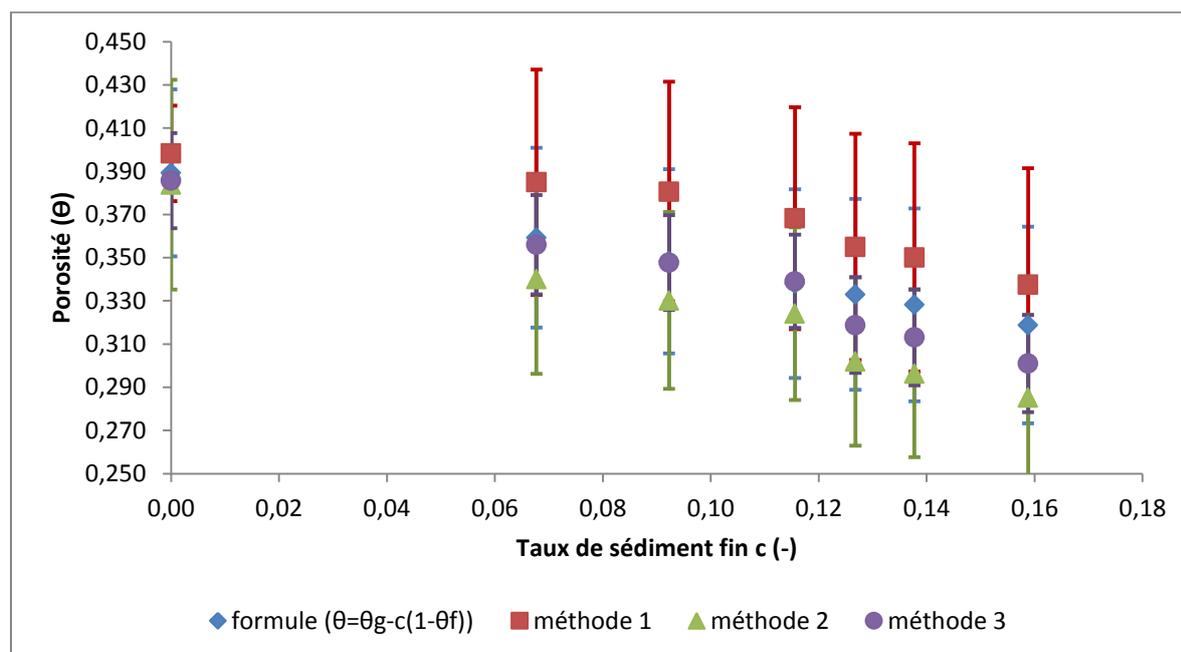


Figure 19: Résultats de la porosité gravier-sédiment fin pour chaque méthode

Les résultats des 4 méthodes utilisées sont relativement dispersés (voir Figure 19) mais restent cohérents au vue des incertitudes de mesure. Les résultats obtenus à partir de l'équation du « ideal packing » présentent des valeurs encadrées par celles des trois autres essais et la même tendance à la diminution avec l'augmentation de (c), de sorte que le calcul de la porosité avec l'équation du « ideal packing » (*Koltermann and Gorelick, 1995*) peut être considérée comme valide ou représentatif pour nos conditions expérimentales.

De la même façon que pour les essais avec le sédiment fin, certaines sources d'incertitude n'ont pas pu être quantifiées.

6 Calcul de la conductivité hydraulique

6.1 Equation de Kozeny-Carman

Le calcul de la conductivité hydraulique en utilisant l'équation de Kozeny-Carman (4.1), nécessite de connaître les paramètres suivants :

- Paramètres provenant des essais de laboratoire : ces paramètres sont ceux calculés dans le chapitre précédent :
 - Diamètre moyen géométrique du grain
 - Porosité du gravier et du sédiment fin
- Taux d'infiltration de sédiment fin (c). Plusieurs valeurs vont être considérées. Elles correspondent à celles qui ont pu être mesurées lors des expériences d'infiltration dans le canal inclinable.
- Porosité du mélange (équation « ideal packing »).

- Autres constantes (force de la pesanteur, densité de l'eau, viscosité dynamique de l'eau).

6.1.1 Procédure de calcul de la perméabilité

Pour quantifier la fraction volumique de sédiments fins dans le canal, nous pouvons considérer le canal dans sa globalité. La première étape consiste à déterminer la quantité totale de gravier dans le canal. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 17 : Volume de gravier placé dans le canal inclinable

Gruvier du canal		
longueur	m	17
largeur	m	1
épaisseur	m	0.07
V_t (Volume total)	m^3	1.19
Densité du gravier (ρ_g)	kg/m^3	2650
Porosité (Θ_g)	---	0.389
V_g (Volume de gravier)	m^3	0.727
V_{pg} (Volume des pores)	m^3	0.463

Finalement, dans le tableau ci-dessous, les valeurs de la conductivité hydraulique, pour différentes quantités de masse de sédiments fins infiltrés dans le canal inclinable sont présentés :

Tableau 18: Calcul de la conductivité hydraulique équation Kozeny-Carman

Masse infiltrée (kg)	Volume de sédiments infiltré (m ³)	c	$\theta = \theta_g - c(1 - \theta_f)$	$\Delta\theta$	$dg(m)$	$k(m/s)$	$\Delta k (m/s)$
0	0.00	0.00	0.39	0.05	0.006	0.32	0.16
1	0.00	0.001	0.39	0.05	0.006	0.31	0.16
10	0.01	0.01	0.38	0.05	0.006	0.26	0.13
20	0.02	0.02	0.38	0.05	0.005	0.22	0.11
40	0.03	0.04	0.37	0.05	0.005	0.15	0.08
44	0.04	0.05	0.37	0.05	0.005	0.14	0.07
62	0.05	0.07	0.36	0.05	0.004	0.10	0.06
91	0.08	0.10	0.35	0.05	0.003	0.06	0.04
100	0.09	0.10	0.34	0.05	0.003	0.05	0.03
133	0.11	0.13	0.33	0.05	0.003	0.03	0.02
140	0.12	0.14	0.33	0.05	0.003	0.03	0.02
165	0.14	0.16	0.32	0.05	0.002	0.02	0.01
200	0.17	0.19	0.31	0.05	0.002	0.01	0.01
260	0.22	0.23	0.29	0.06	0.001	0.01	0.003
300	0.26	0.26	0.27	0.06	0.001	0.003	0.002

Ces valeurs de conductivités ont été calculées pour différentes masses de sédiments fins infiltrés dans les pores du lit de gravier. Cette masse est ensuite convertie en volume de sédiment infiltré. Le volume de gravier permet de calculer le taux de sédiments fins (c). A partir de cette valeur et des valeurs de la porosité du gravier et sédiment fin (θ_g et θ_f), l'équation d'« ideal packing » est appliquée pour calculer la porosité du mélange gravier-sédiment fin (θ) puis, en utilisant l'équation de Kozeny-Carman, la conductivité hydraulique.

Calcul d'incertitude :

Dans la dernière colonne du Tableau 18, se trouvent les incertitudes associées à la conductivité hydraulique. Ces incertitudes proviennent de la porosité qui intervient dans le calcul de la conductivité hydraulique, car celle-ci a été mesurée d'une manière expérimentale.

Pour le calcul de l'erreur on utilisera la méthode des différentielles totales exactes :

$$\Delta k = \left| \frac{\partial(k)}{\partial \theta} \right| \times \Delta \theta$$

En explicitant les dérivées, on obtient l'expression suivante pour l'incertitude sur la perméabilité :

$$\Delta k = \frac{\rho g}{\mu} \times \frac{\theta^2 \times (3 - \theta)}{(1 - \theta)^3} \times \frac{d_g^2}{180} \times \Delta \theta$$

6.2 Essais de laboratoire pour mesurer la conductivité hydraulique.

6.2.1 Principe de l'essai

L'équation régissant l'écoulement dans un sol est la loi de Darcy :

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

6.2.2 Choix du perméamètre à utiliser

Les études de perméabilité où le gravier est le principal composant présentent un défi, car sous la condition d'écoulements typiques faits dans un laboratoire, le temps d'essai pour mesurer la perméabilité (dt) est si petit qu'il est difficile à mesurer (Ferreira et al., 2010). Nous avons commencé par tester un perméamètre à charge constante, mais malheureusement, les résultats obtenus étaient très sous-estimés, de l'ordre de grandeur de 10^{-4} à 10^{-5} m/s, lorsque la bibliographie consultée pour ce cas, disait que le coefficient de perméabilité devrait être entre le 10^{-1} et 10^{-3} m/s. Nous avons donc construit par la suite un perméamètre à charge variable, qui nous a donné des résultats plus cohérents, qui seront présentés ultérieurement.

6.2.3 Perméamètre à charge variable

Notre perméamètre à charge variable est composé des éléments suivants :

- Un tuyau d'acier dans lequel sera placé l'échantillon du mélange gravier-sédiment fin qui nous servira pour faire les essais de perméabilité, de hauteur de 19 cm environ. A la base de ce tuyau, une grille de 1 mm d'ouverture est placée pour éviter que l'échantillon ne tombe, ou il y ait des pertes de particules, au moment de commencer les essais de perméabilité. A la base de ce tuyau sera placé un bouchon pour éviter l'entrée incontrôlée d'eau dans l'échantillon, jusqu'à ce que l'essai commence.
- Un deuxième tuyau d'acier qui va être couplé au tuyau où l'échantillon est placé, formant ainsi un seul tuyau. Le but de ce deuxième tuyau est de canaliser l'écoulement d'eau qui monte depuis la base du premier tuyau et ainsi pouvoir mesurer le temps de montée d'eau à travers l'échantillon.
- Une tige d'acier, qui nous permettra de savoir à quel moment arrêter la mesure du temps de montée de l'eau.
- Un seau avec un volume d'eau assez grand pour immerger le perméamètre a charge variable ainsi construit.

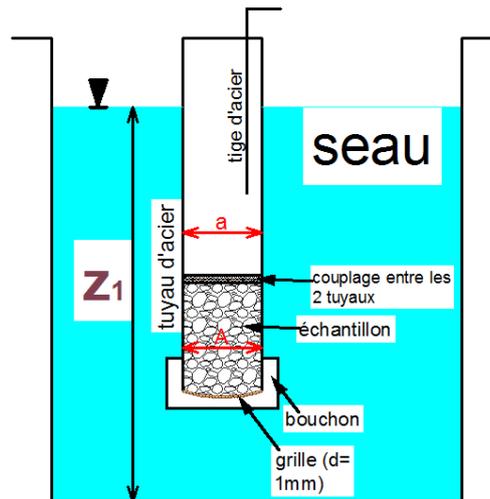


Figure 20: Perméamètre à charge variable

Le perméamètre à charge variable dans le seau rempli d'eau est schématisé Figure 20, à l'état initial, avant de commencer les essais de perméabilité. On remarque le bouchon qui empêche l'eau d'entrer à l'intérieur du tuyau. Ce bouchon sera ouvert une fois les opérateurs prêts à commencer les essais. L'eau circulera alors depuis la base du tuyau, et montera à travers l'échantillon jusqu'à que le niveau dans le tuyau s'égalise avec le niveau extérieur. L'avantage de ce perméamètre est que l'eau circule de bas en haut, ce qui limite les pertes de particules de sédiment fin dans le gravier car alors la force exercée par l'eau et la force de gravité s'opposent.

6.2.4 Mode Opérateur :

6.2.4.1 Préparation des échantillons

Les échantillons analysés seront composés d'un mélange de sédiment fin et de gravier, avec une fraction c déterminée par le volume de gravier et de sédiment fin de l'échantillon. Pour obtenir des résultats plus robustes, deux échantillons sont réalisés pour chaque test. Les valeurs de c , du volume de gravier et de sédiment fin sont présentées ci-dessous :

Tableau 19: Mesure du taux de sédiment fin (c) essais de perméabilité

Description	unit é	CALCUL DU TAUX DE SEDIMENT											
		Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4		Essai 5		Essai 6	
		Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2
V_g (pores inclus)	mL	700	700	700	700	680	680	700	700	640	640	650	650
V_f (pores inclus)	mL	50	50	70	70	100	100	150	150	170	170	210	210
θ_g	----	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
θ_f	----	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
V_g (sans pores)	mL	427.5 4	427.5 4	427.5 4	427.5 4	415.3 3	415.3 3	427.5 4	427.5 4	390.9 0	390.9 0	397.0 0	397.0 0
V_f (sans pores)	mL	22.17	22.17	31.04	31.04	44.34	44.34	66.51	66.51	75.38	75.38	93.12	93.12
c	----	0.049	0.049	0.068	0.068	0.096	0.096	0.135	0.135	0.162	0.162	0.19	0.19

Toutes les données mesurées nécessaires au calcul du taux de sédiment fin (c) sont présentées dans le Tableau 19: Mesure du taux de sédiment fin (c) essais de perméabilité les volumes du gravier et sédiment fin mesurés en éprouvettes graduées (V_g et V_f), la porosité du gravier et sédiment fin (θ_g et θ_f) et le volume solide des matériaux (sans pores) (V_g et V_f). On obtient finalement le taux de sédiment fin (c).

6.2.4.2 Conduite des essais

Le schéma de la conduite des essais dans le perméamètre est présenté ci-dessous :

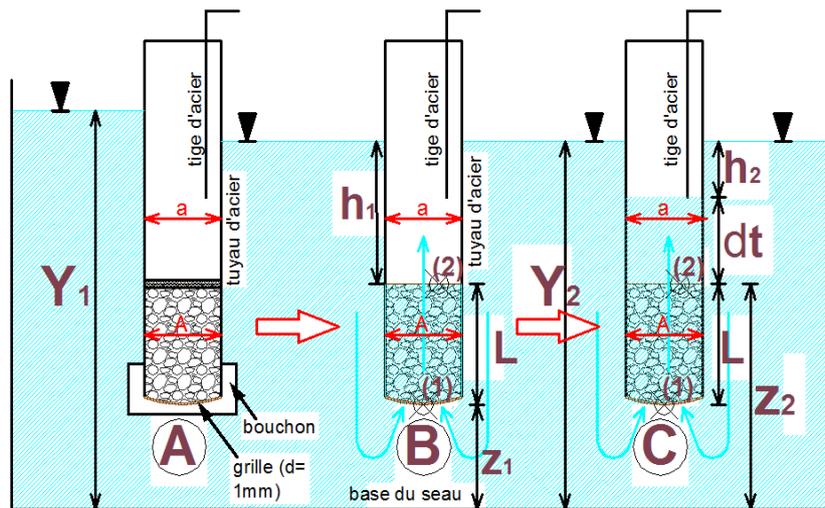


Figure 21: Schéma de fonctionnement du perméamètre à charge variable

La procédure exposée Figure 21 est composée de 3 étapes :

Etape A :

A cette étape l'essai de perméabilité n'a pas encore commencé. Le bouchon bouche le bas du tuyau pour éviter que l'eau n'entre dans le tuyau et circule à travers l'échantillon de gravier et de sédiment fin. Il n'y a pas de variation en la hauteur d'eau (Z_1) du seau. Le système est au « repos ».

Etape B :

L'essai de perméabilité commence. Le bouchon a été retiré de la base du tuyau. L'eau circule alors à partir du fond vers le haut du tuyau. L'équation pour mesurer la perméabilité dans un perméamètre à charge variable est :

$$k = \frac{L \times a}{A \times dt} \times \ln\left(\frac{H_i}{H_f}\right)$$

Pour notre perméamètre $A=a$, et on obtient :

$$k = \frac{L}{dt} \times \ln\left(\frac{H_i}{H_f}\right)$$

La charge (H_i) est la différence de charge entre l'entrée (i.e. le bas) et la sortie (i.e. le haut) de l'échantillon au début de l'essai (étape B). Cette valeur est calculée en faisant la différence de charge entre les points (1) et (2) (voir Figure 21) :

$$H_i = \frac{P_{atm} + \rho g \times (h_1 + L)}{\rho g} + z_1 - \left(\frac{P_{atm}}{\rho g} + z_2\right)$$

$$H_i = h_1$$

Etape C :

Le niveau d'eau monte depuis le haut de l'échantillon (2) jusqu'au bas de la tige d'acier (3) ; entre ces 2 points le temps (dt) sera mesuré. On considère cet intervalle de temps pour 2 raisons : on ne peut pas déterminer à quel moment l'eau commence à monter depuis la base de l'échantillon, et on souhaite que l'échantillon soit complètement mouillé, pour que l'eau circule à travers tout le volume de l'échantillon. L'essai prendra fin lorsque le niveau d'eau atteindra le bas de la tige d'acier. En plus de la mesure du temps, il faut mesurer aussi la charge (H_f), i.e. la différence de charge entre l'entrée et la sortie de l'échantillon à la fin de l'essai (étape C). On calcule à nouveau la différence de charge entre les points (1) et (2) (voir Figure 21) :

$$H_f = \frac{P_{atm} + \rho g(h_1 + L)}{\rho g} - \left(\frac{P_{atm} + \rho g(h_1 - h_2)}{\rho g} + z_2 \right)$$

$$H_f = H_1 - H_2$$

$$H_f = h_2$$

Calcul d'incertitudes

Ici certaines erreurs peuvent être commises par l'opérateur au moment de faire les mesures de longueur et de temps, ce qui engendre des incertitudes sur la perméabilité. Pour le calcul de cette incertitude on utilisera la méthode des différentielles totales exactes :

$$\Delta k = \left| \frac{\partial(k)}{\partial L} \right| \times \Delta L + \left| \frac{\partial(k)}{\partial dt} \right| \times \Delta t + \left| \frac{\partial(k)}{\partial H_i} \right| \times \Delta H_i + \left| \frac{\partial(k)}{\partial H_f} \right| \times \Delta H_f$$

En explicitant les dérivées, on obtient l'expression suivante pour l'incertitude sur la porosité :

$$\Delta k = \frac{\Delta L}{dt} \times \ln \left(\frac{H_i}{H_f} \right) + \frac{\Delta t \times L}{dt^2} \times \ln \left(\frac{H_i}{H_f} \right) + \frac{L \times \Delta H_i}{dt \times H_i} + \frac{L \times \Delta H_f}{dt \times H_f}$$

6.2.5 Exploitation des résultats

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 20: Mesure de la conductivité hydraulique (expérimentale)

Variables	unités	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4		Essai 5		Essai 6	
		Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2	Ech1	Ech2
<i>c</i>	----	0.049	0.049	0.068	0.068	0.096	0.096	0.135	0.135	0.162	0.162	0.190	0.190
<i>L</i>	m	0.190	0.190	0.190	0.190	0.180	0.180	0.190	0.190	0.190	0.190	0.185	0.180
ΔL	m	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
<i>a</i>	m ²	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
<i>A</i>	m ²	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
<i>dt</i>	s	4.70	3.19	7.42	7.85	8.66	8.20	14.51	10.24	13.22	15.85	17.17	21.09
Δt	s	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
<i>H_i</i>	m	0.393	0.402	0.394	0.385	0.367	0.370	0.380	0.382	0.357	0.353	0.375	0.387
ΔH_i	m	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
<i>H_f</i>	m	0.272	0.280	0.246	0.235	0.209	0.220	0.228	0.241	0.206	0.204	0.231	0.232
ΔH_f	m	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
<i>k</i>	m/s	0.0148	0.0217	0.0121	0.0119	0.0117	0.0114	0.007	0.009	0.008	0.007	0.005	0.004
Δk	m/s	0.010	0.018	0.006	0.005	0.005	0.005	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001

Dans le Tableau 20 sont présentées toutes les mesures faites dans le perméamètre pour le calcul du coefficient de la perméabilité. Deux échantillons ont été testés pour chaque essais de perméabilité afin d'être sûr de la précision de l'essai. Les résultats du calcul du coefficient de perméabilité (*k*) des 2 échantillons testés avec différentes valeurs de taux de sédiments fins (*c*), sont cohérents aux incertitudes (Δk) prêt.

6.3 Tableau comparatif des résultats de conductivité hydraulique obtenus avec le perméamètre à charge variable et l'équation de Kozeny-Carman

Un tableau et une figure récapitulative sont présentés ci-dessous pour établir si les résultats de la conductivité hydraulique de l'équation de Kozeny-Carman satisfont à celles trouvées dans les essais de perméabilité à charge variable :

Tableau 21 : Tableau récapitulatif coeff.perméabilité (charge variable et Kozeny-Carman)

c	0.049	0.049	0.068	0.068	0.096	0.096	0.135	0.135	0.162	0.162	0.190	0.190
ESSAIS DE PERMEABILITE A CHARGE VARIABLE												
k (m/s)	0.015	0.022	0.0121	0.0119	0.0117	0.0114	0.0067	0.0086	0.0079	0.0066	0.0053	0.0043
Δk (m/s)	0.010	0.018	0.006	0.005	0.005	0.005	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
EQUATION KOZENY-CARMAN												
k (m/s)	0.137	0.137	0.100	0.100	0.061	0.061	0.031	0.031	0.019	0.019	0.012	0.012
Δk (m/s)	0.074	0.074	0.055	0.055	0.035	0.035	0.019	0.019	0.013	0.013	0.008	0.008

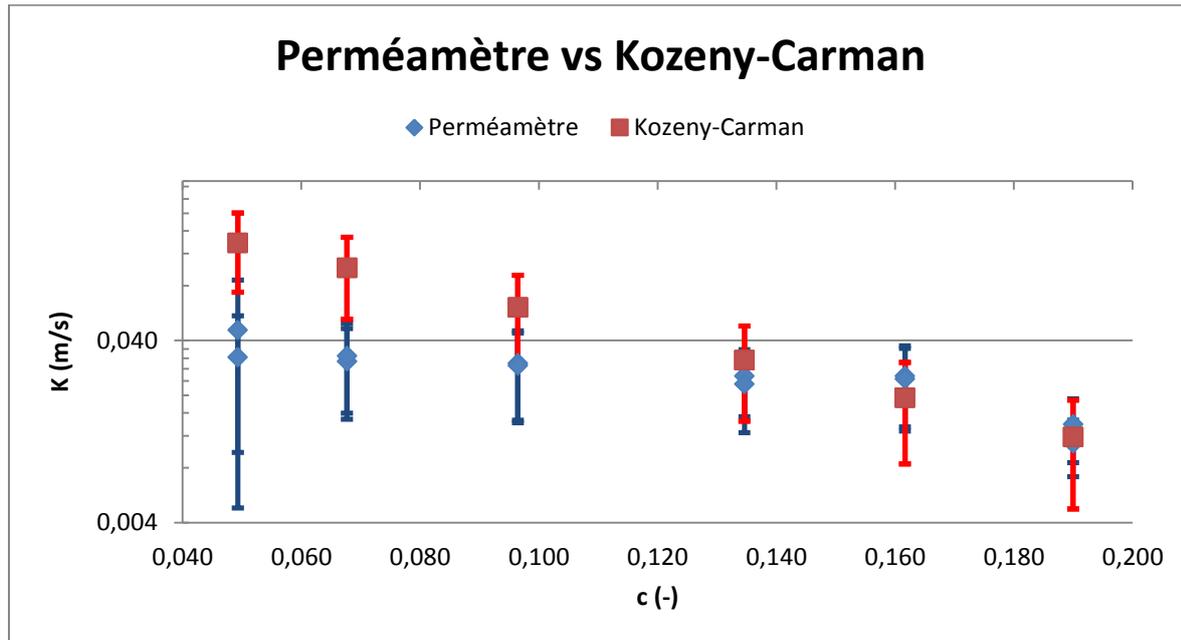


Figure 22: Comparaison entre résultats trouvés par le perméamètre et l'équation K-C

Nous n'avons pas réussi à mesurer, avec le perméamètre, la conductivité hydraulique du gravier seul. La conductivité est en effet tellement importante que la mesure du temps est impossible.

La vitesse de l'écoulement a posé des difficultés, surtout, avec des fractions volumiques de sédiment fin faibles, comme pour les trois premiers essais, ce qui peut expliquer les différences entre les résultats obtenus par le perméamètre et l'équation de Kozeny-Carman. Mais les autres 3 essais, avec coefficients c supérieurs, les résultats des 2 méthodes utilisés sont proches compte tenu des incertitudes, ce qui tend à montrer que l'application de l'équation de Kozeny-Carman à notre étude pour la mesure de la perméabilité est pertinente.

6.4 Relation entre la masse infiltrée et la perméabilité :

Pour obtenir la relation entre la masse infiltrée et la perméabilité, nous utilisons les données du Tableau 18 correspondant à la masse infiltrée et la perméabilité mesurée par l'équation de Kozeny-Carman. Le coefficient de perméabilité est représenté en fonction de la masse infiltrée sur la figure ci-dessous.

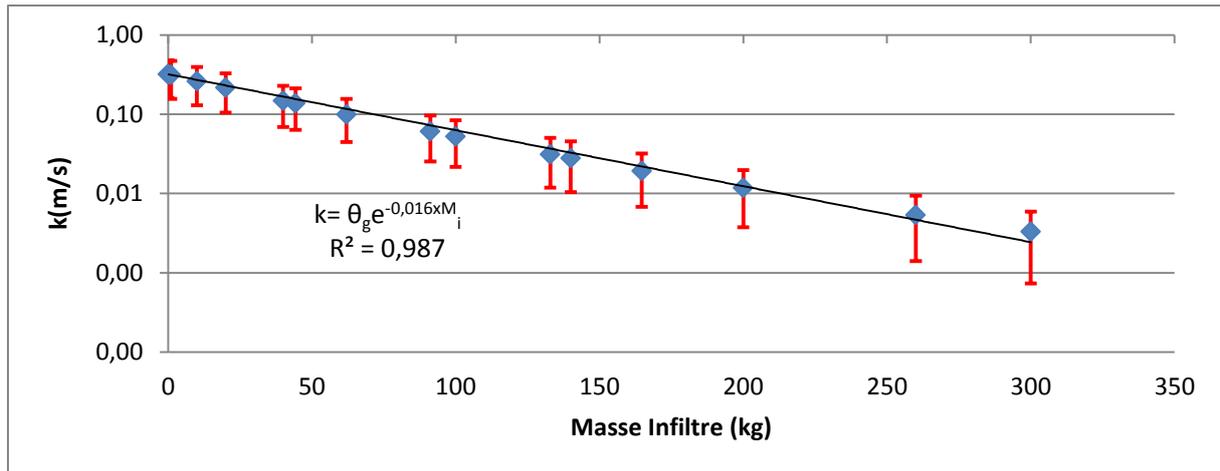


Figure 23 : Relation entre la masse infiltrée de sédiment fin et la perméabilité

La Figure 23 nous présente la courbe de tendance de la relation entre la masse infiltrée et la conductivité hydraulique mesurée avec l'équation de Kozeny-Carman. Cette courbe peut être ajustée par une courbe exponentielle décroissante dont la formule est :

$$k = \theta_g \times e^{-0.016 \times M_{if}}$$

Les incertitudes qui apparaissent sur la Figure 23 sont celles dues aux incertitudes sur la porosité, puisque dans l'équation de Kozeny-Carman les porosités du gravier et sédiment fin ont été mesurés d'une manière expérimentale.

7 Taux de sédiments fins des échantillons prélevés dans le canal inclinable

A la fin des expériences de infiltration de sédiment fin dans le lit de gravier dans le canal inclinable, nous souhaitons déterminer la fraction volumique de sédiment fin ou taux de sédiment fin infiltré dans le lit de gravier (c) définie comme le volume de sédiments fin piégés divisé par le volume total de sédiments (graviers + fins).

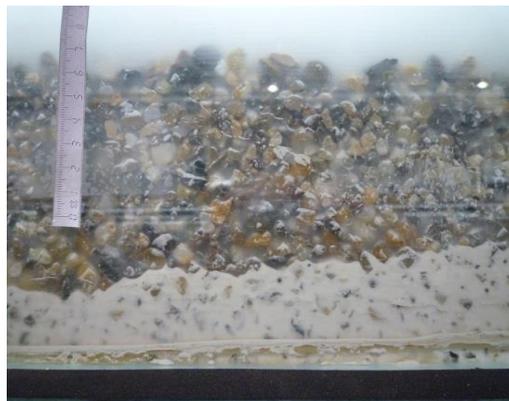


Figure 24 : Vue de la masse infiltrée du sédiment fin dans le gravier (canal inclinable)

Il est nécessaire pour cela de prélever des échantillons du lit. Durant ce stage, nous avons développé 2 méthodes pour le prélèvement des échantillons du sédiment fin infiltré et piégé dans le gravier qui sont :

- Pièges de sédiments fins cylindriques
- Tuyau enfoncé dans le lit de gravier

Avant d'explicitier ces 2 méthodes dans les deux paragraphes suivants, la figure ci-dessous présente où, dans le canal inclinable, nous avons choisis d'appliquer ces 2 méthodes :

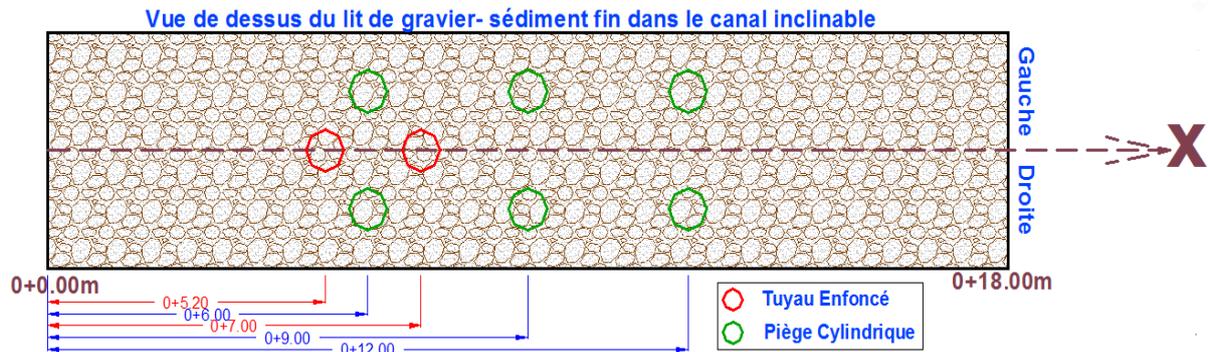


Figure 25: Emplacement choisi pour l'application des 2 méthodes dans le canal inclinable

7.1 Méthode 1 : Pièges de sédiments fins cylindriques

7.1.1 Principe de la méthode

Il s'agit d'enterrer dans le lit de gravier du canal, des pièges de sédiment cylindriques faits d'une grille d'acier de 1mm d'ouverture. Durant les essais dans le canal inclinable, les cylindres serviront de pièges pour les sédiments fins infiltrés dans le gravier. A la fin des expériences dans le canal, lesdits cylindres seront retirés du lit afin mesurer masse de sédiments fins infiltrés et de déterminer le taux c . A base de ces cylindres nous avons mis du géotextile pour éviter, au moment de les sortir du canal, la perte de sédiment fin.



Figure 26: Piège de sédiment fin cylindrique (gauche), Cylindre enterré dans le lit de gravier du canal (droite)

Les caractéristiques de chaque cylindre utilisé dans le canal sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 22: Caractéristiques générales des cylindres mis dans le canal inclinable

cylindre n°	Position	Poids Cylindre vide (g)	Volume Cylindre			Poids Cylindre +gravier + fin sec (g)	Poids Cylindre vide sec (g)
	x		d_m	h_m	$V (m^3)$		
1	6	42.39	0.08	0.07	3.8E-04	655	43.65
2	6	47	0.08	0.08	4.0E-04	694	48.55
3	9	41.24	0.08	0.07	3.3E-04	570	41.24
4	9	41.82	0.08	0.07	3.3E-04	546	41.82
5	12	45.7	0.08	0.08	4.3E-04	708	47.8
6	12	44.68	0.09	0.08	4.4E-04	698	46.77

Le Tableau 22 présente les données suivantes : la date d'enlèvement des cylindres, leur position dans le canal inclinable, leurs poids (sans l'échantillon), leurs dimensions et volume et le poids du cylindre avec le gravier, avant de les mettre dans le lit de gravier.

7.1.2 Mode Opérateur

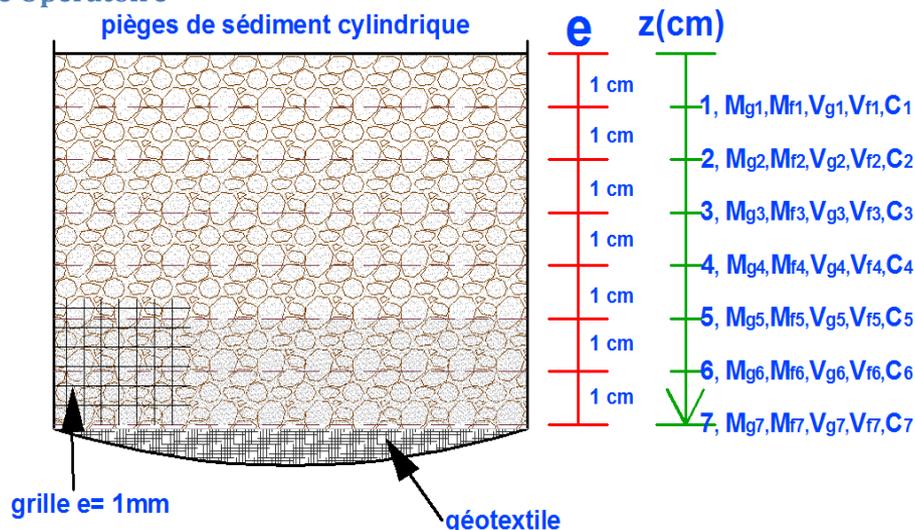


Figure 27 : Schéma d'utilisation du cylindre

Dès que les cylindres sont récupérés du canal, les actions à suivre sont les suivantes :

Les cylindres, avec les échantillons de gravier et sédiment fin, sont introduits dans le four, afin de les faire sécher (24 h).

Une fois secs, les cylindres avec les échantillons sont pesés. Avec une cuillère nous sortons de petites couches d'une épaisseur de 1 cm des cylindres du haut jusqu'à au fond des cylindres. Les échantillons sortis sont mis dans des coupelles et pesés. Nous faisons ceci, pour faire établir la relation entre masse infiltrée (donc c) et la profondeur dans le lit de gravier. Lorsque toutes les couches sont enlevées, on repèse le cylindre vide sec. Généralement ce nouveau poids doit être supérieur à la première pesée à vide (Tableau 22), car il y a une certaine quantité de sédiments fins piégés dans le géotextile. Cette masse de sédiment est ajoutée à la dernière couche de l'échantillon (fond du cylindre).

Dès que tous les échantillons sont sortis des cylindres et placés dans les coupelles, **nous lavons les échantillons, en laissant le gravier propre, sans aucune particule de sédiment fin.** Après de cette action, les échantillons propres sont mis une autre fois au four.

Finalement, après avoir fait sécher les échantillons, ceux-ci sont pesés. La différence entre les deux poids secs des échantillons est la masse infiltrée de sédiment fin dans chaque couche. Avec cette masse de sédiment, la masse de gravier (sec et propre) et les dimensions du cylindre, nous calculons le volume de sédiment fin et de gravier, et par conséquent, le taux de sédiment (c).

7.1.3 Exploitation des résultats

Les données et résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous :

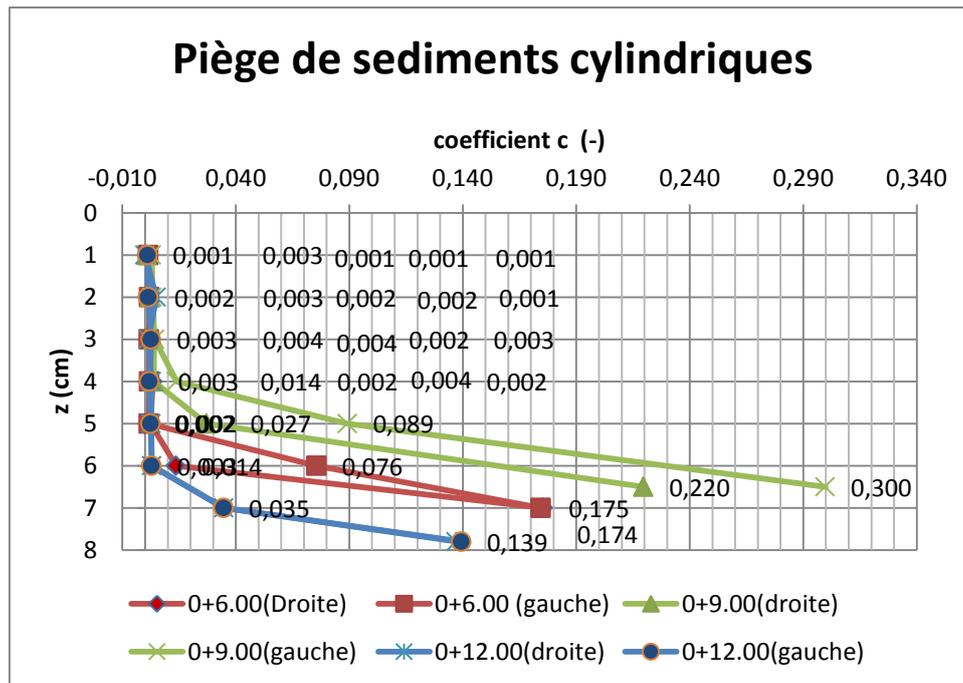


Figure 28: Variation de taux de sédiment fin par rapport à la profondeur

Notons que pour chaque cylindre entre 6 et 8 couches ont été analysées, toutes de 1 cm d'épaisseur, sauf celle du fond dont l'épaisseur pouvait atteindre 1.8 cm (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour chaque couche nous avons mesuré le poids du mélange sec. Les mesures de poids du gravier propre et sédiment fin sont également présentées, et avec les valeurs de la porosité du gravier (θ_g) et du sédiment fin (θ_f), les volumes du gravier (V_g) et sédiment fin (V_f) ont été calculés. Finalement avec ces volumes, le taux de sédiment fin (c) est déterminé.

Sur la Figure 28, la variation du (c) par rapport à la profondeur est présentée. Notons que les taux de sédiment fin les plus importants se trouvent dans les dernières couches étudiées (entre 6 et 8 cm). Ces valeurs fortes de (c) varient entre 0.15 et 0.22, sauf pour le cylindre 4, pour lequel on obtient $c = 0.37$. Les plus faibles valeurs de c se trouvent dans les couches supérieures (entre 1 et 5 cm) et varient entre 0.001 et 0.005. Aussi nous observons que les courbes de chaque essai présentent la même tendance, même si les cylindres n'ont pas la même profondeur. Cette tendance est par ailleurs conforme aux observations (voir la photo Figure 24) qui montrent une couche au fond très colmatée surmontée d'une couche plus faiblement colmatée. Ceci semble confirmer que cet essai est fiable.

7.2 Méthode 2. Tuyau enfoncé dans le lit du gravier

7.2.1 Principe de la méthode

Cet essai est réalisé dès que les expériences d'infiltrations de sédiment fin dans le lit de gravier sont finies dans le canal inclinable. Il s'agit d'enfoncer un tuyau creux dans différents endroits du lit de gravier du canal. Avec l'aide d'une cuillère, on commence à prendre des échantillons de l'intérieur du tuyau, du haut jusqu'au fond du lit du gravier (7 cm environ). Les échantillons pris, ont une épaisseur de l'ordre de 2 cm.



Figure 29: Vue des échantillons pris par la méthode du tuyau enfoncé

7.2.2 Mode Opérateur

La démarche à suivre est la même que celle pour la méthode des pièges de sédiments cylindriques. Les données utilisées, et les résultats trouvés sont présentés dans la figure ci-dessous :

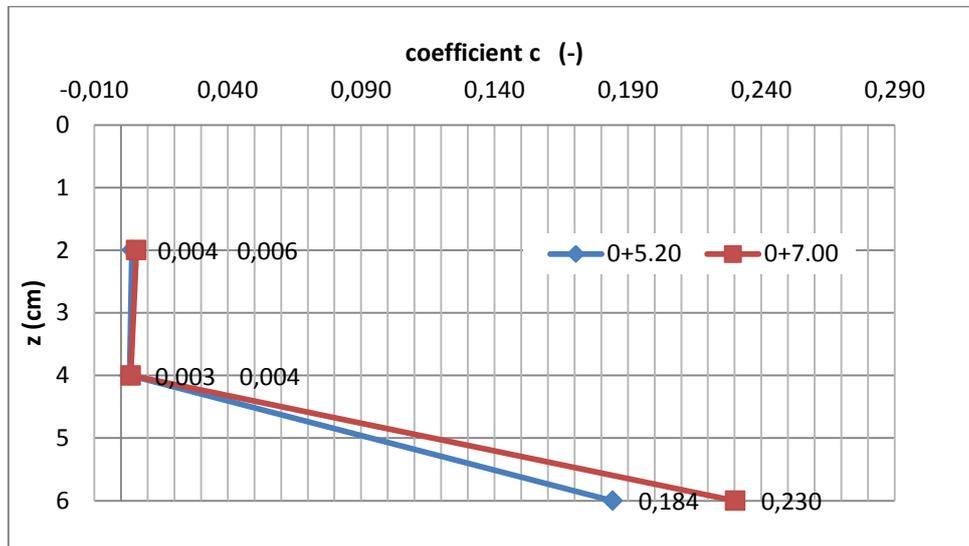


Figure 30: Variation du taux de sédiment fin par rapport à la profondeur

Le taux de sédiment fin (c) en fonction de la profondeur est représenté Figure 30. Les deux essais présentent des résultats similaires. Les valeurs plus fortes de c se trouvent comme pour la première méthode dans la dernière couche, avec des valeurs qui varient entre 0.21 et 0.28. Les couches supérieures présentent également des similitudes avec la première méthode, la masse infiltrée est presque nulle. L'inconvénient de la deuxième méthode est que l'on n'obtient que 3 points d'études, tandis que dans l'autre, il y a au minimum 6 points d'études. La méthode du tuyau enfoncé permet une moins bonne discrétisation que la méthode des pièges cylindriques.

Finalement les comparaisons entre les courbes des 2 méthodes sont présentées ci-dessous :

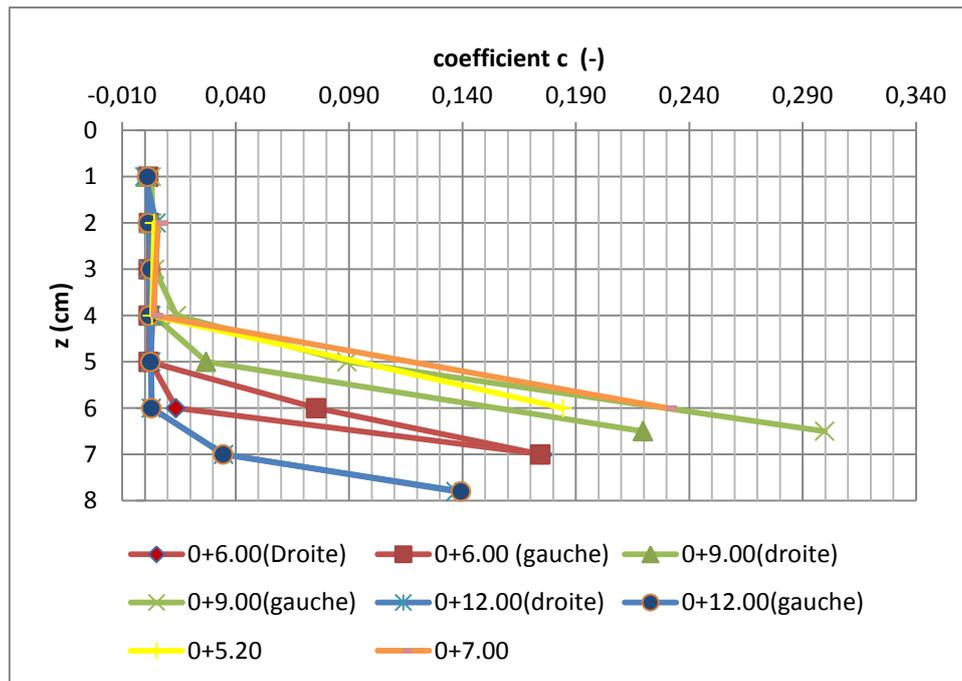


Figure 31: Comparaison entre les 2 méthodes appliquées

Les 2 méthodes montrent des tendances similaires ce qui tend à les valider. Nous privilégierons cependant la première car elle permet une meilleure discrétisation sur la verticale des taux d'infiltration.

8 Conclusions

L'objectif de ce stage était de trouver des méthodes pour quantifier le colmatage d'un lit de gravier par des sédiments fins, lors d'expériences en canaux.

Une première méthode consiste à utiliser la perméabilité comme indicateur du taux de sédiments fins. Durant ce stage, j'ai caractérisé la porosité des graviers, du sédiment fin et d'un mélange par différentes méthodes expérimentales. À partir de ces données, j'ai pu calculer à partir d'une formule empirique (la formule de Kozeny-Carman) la perméabilité d'un mélange gravier + sédiments fins pour différents taux de sédiments fins. La perméabilité décroît significativement en fonction du taux de sédiments fins et peut servir d'indicateur de colmatage.

J'ai d'autre part développé un perméamètre pour la mesure de la perméabilité du mélange gravier + sédiments fins. La tendance observée à la décroissance a été confirmée. Cependant, les valeurs expérimentales et celles calculées avec la formule de Kozeny-Carman sont différentes pour des taux de sédiments fins faibles. Ceci est probablement dû au fait que la mesure pour ces perméabilités fortes est difficile. Le perméamètre réalisé est un prototype qui nous a permis d'obtenir des résultats mais peut montrer certaines limites.

Dans un second temps, j'ai développé deux méthodes pour prélever des échantillons dans le canal et quantifier directement le taux de sédiments fins dans le lit via l'analyse de ces échantillons. J'ai d'une part installé, avant l'expérience d'infiltration, des cylindres grillagés pour piéger les sédiments fins au fur et à mesure de l'infiltration de ceux-ci dans le lit de gravier. J'ai d'autre part réalisé des prélèvements a posteriori à l'aide d'un cylindre métallique. Les deux méthodes se sont avérées cohérentes. L'infiltration remplit le lit de graviers de bas en haut, ce qui est caractéristique d'un rapport très important entre le diamètre du gravier et celui du sédiment fin. Le taux de sédiments fins obtenu dans les couches du fond colmatées est proche mais reste inférieur à la porosité du lit de gravier. Le lit est complètement colmaté. Ces méthodes vont permettre de caractériser le colmatage du lit de gravier pour différentes configurations expérimentales et voir l'effet de la pente, du débit ou de l'épaisseur du lit de gravier par exemple sur l'infiltration des sédiments fins.

9 Références

- Allen, J. R. L.** 1985. *Principles of Physical Sedimentology*. George Allen & Unwin. London. ISBN 0-04-551095-4.
- Bear, J.** 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media* 764. Dover. New York.
- Bally, F.X., and J.M. Berroir.** 2008. Incertitudes Expérimentales. Centre de préparation Interuniversitaire à l'agrégation. Universités Paris 6, Paris 7, Paris11.
- Carman, P.C.** 1937. Fluid flow through granular beds. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, no.15: 4–20.
- Chapuis, R.P., and M. Aubertin.** 2003. On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal* 40, no. 3: 616–628.
- Cumberland, D. J., and R. J. Crawford.** 1987. The Packing of Particles. *Handb. Powder Technol.*, vol. 6, 148 pp. Elsevier, New York.
- Esselburn, J.D., R.W. Ritz, and D.F. Dominic.** 2011. Porosity and Permeability in Ternary Sediment Mixtures. *Ground Water* 49, no.3: 393-402.
- Ferreira, J., R. Ritz, and D. Dominic.** 2010. Measuring the permeability of open-framework gravel. *Ground Water* 48, no. 4: 593–597. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2010.00675.x.
- Kamann, P.J., R.W. Ritz, D.F. Dominic, and C.M. Conrad.** 2007. Porosity and permeability in sediment mixtures. *Ground Water* 45, no. 4: 429–438.
- Koltermann, C.E., and S.M. Gorelick.** 1995. Fractional packing model for hydraulic conductivity derived from sediment mixtures. *Water Resources Research* 31, no. 12:3283–3297.
- Kozeny, J.** 1927. Über kapillare leitung des wassers in boden, Sitzungsber. *Akademie der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse* 136, no. 2a: 271–306.
- Marion, D., A. Nur, H. Yin, and D. Han.** 1992. Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures, *Geophysics* 57, no. 4: 554-563.
- Norme Européenne et Française EN 993-1.** 2012. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage .Groupe Afnor. Paris
- Nagaoka, H., and S. Ohgaki.** 1990. Mass transfer mechanism in a porous riverbed, *Water Resource Research* 24, 417– 425.
- Porter, L.B., R.W. Ritz, L.J. Mastera, D.F. Dominic, and B. Ghanbarian-Alavijeh.** 2013. The Kozeny Carman Equation with a Percolation Threshold. *Ground Water* 51, no. 1: 92-99.
- O'Connor, B. L., and J. W. Harvey.** 2008. Scaling hyporheic exchange and its influence on biogeochemical reactions in aquatic ecosystems. *Water Resources Research* 44, W12423, doi:10.1029/2008WR007160.
- Rouaud, M.** 2013. *Calcul d'incertitudes*. License Creative Commons : attribution 2.0.
- Schälchli, U.** 1992. The clogging of coarse gravel river beds by fine sediments. *Hydrobiologia* 235/236, 189–197.
- Shakoor, A., and B. D. Cook.** 1990. The effect of stone content, size, and shape on the engineering properties of a compacted silty clay. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 23, no.2: 245-253.
- Wooster, J. K., S. R. Dusterhoff, Y. Cui, L. S. Sklar, W. E. Dietrich, and M. Malko .**2008. Sediment supply and relative size distribution effects on fine sediment infiltration into immobile gravels. *Water Resource Research* 44, W03424.doi:10,1029/2006WR005815.

Pages Webs :

<http://www.irstea.fr>

<http://hydrologie.org>

<http://apps.webofknowledge.com>

Annexe 1 : Analyse granulométrique et calcul du diamètre géométrique moyen du gravier.

Essai 1.

Courbe Granulométrique						diamètre moyen géométrique (D_g)				
Ouverture de tamis d_g^n (mm)	Masse de Refus (g)	Pourcentage masse refus sur chaque tamis $(R_i/Ms1)*100$	Refus Cumulé (R_i) (g)	Pourcentage cumulés de refus $\sum (R_i/Ms1)*100$	Pourcentages de tamisât 100- $((R_i/Ms1)*100)$	Masse de Refus (g) (M_i)	Volume de refus (cm^3) (V_{ig})	$\epsilon_g^n = (V_{ig}/\sum(V_{ig}))*100$	Tamis (d_g^n) (mm)	$\gamma_i = \epsilon_g^n * \ln(d_g^n)$ (mm)
12	0.0	0.0	0.0	0.0	100.00	0	0.00	0.00	12	0.00
10	179.13	13.63	179.13	13.63	86.37	179.13	67.60	13.79	10	31.75
8	333.53	25.37	512.66	39.00	61.00	333.53	125.86	25.67	8	53.39
6.3	362.43	27.57	875.09	66.56	33.44	362.43	136.77	27.90	6.3	51.35
5	264.2	20.10	1139.29	86.66	13.34	264.2	99.70	20.34	5	32.73
2	158.16	12.03	1297.45	98.69	1.31	158.16	59.68	12.17	2	8.44
1	1.66	0.13	1299.11	98.82	1.18	1.66	0.63	0.13	1	0.00
Matériau reste au fond (P)	0.5	0.04	$\sum (Ms1) = 1314.67$ g			1299.11	490.23	100.00	$\sum(\gamma_i)$	177.65
$\sum (M1s)$	1299.61	98.85							$\sum(\gamma_i)/\sum(\epsilon_g^n)$	1.78
$((\sum (Ms1)-\sum (M1s))/\sum (Ms1))*100$	1.15	<2%							D_g (mm)	5.91

Essai 2.

Courbe Granulométrique						diamètre moyen géométrique (D_g)				
Ouverture de tamis d_g^n (mm)	Masse de Refus (g)	Pourcentage masse refus sur chaque tamis $(R_i/Ms1)*100$	Refus Cumulé (R_i) (g)	Pourcentage cumulés de refus $\sum (R_i/Ms1)*100$	Pourcentages de tamisât 100- $((R_i/Ms1)*100)$	Masse de Refus (g) (M_i)	Volume de refus (cm^3) (V_{ig})	$\epsilon_g^n = (V_{ig}/\sum(V_{ig}))*100$	Tamis (d_g^n) (mm)	$Y_i = \epsilon_g^n * \ln(d_g^n)$ (mm)
12	0	0.00	0	0.00	100.00	0	0.00	0.00	12	0.00
10	190.1	14.23	190.1	14.23	85.77	190.1	71.74	14.28	10	32.88
8	347.55	26.01	537.65	40.23	59.77	347.55	131.15	26.11	8	54.29
6.3	434.99	32.55	972.64	72.78	27.22	434.99	164.15	32.68	6.3	60.15
5	240.91	18.03	1213.55	90.81	9.19	240.91	90.91	18.10	5	29.13
2	117.55	8.80	1331.1	99.61	0.39	117.55	44.36	8.83	2	6.12
1	0.03	0.00	1331.13	99.61	0.39	0.03	0.01	0.00	1	0.00
Matériau reste au fond (P)	0.14	0.01	$\sum (Ms1) = 1336.35$ g			1331.13	502.31	100.00	$\sum(Y_i)$	182.57
$\sum (M1s)$	1331.27	99.62							$\sum(Y_i)/\sum(\epsilon_g^n)$	1.83
$((\sum (Ms1) - \sum (M1s))/\sum (Ms1))*100$	0.38	<2%							D_g (mm)	6.21

Essai 3.

Courbe Granulométrique						diamètre moyen géométrique (D_g)				
Ouverture de tamis d_g^n (mm)	Masse de Refus (g)	Pourcentage masse refus sur chaque tamis $(R_i/Ms1)*100$	Refus Cumulé (R_i) (g)	Pourcentage cumulés de refus $\sum (R_i/Ms1)*100$	Pourcentages de tamisât 100- $((R_i/Ms1)*100)$	Masse de Refus (g) (M_i)	Volume de refus (cm^3) (V_{ig})	$\varepsilon_g^n = (V_{ig}/\sum(V_{ig}))*100$	Tamis (d_g^n) (mm)	$Y_i = \varepsilon_g^n * \ln(d_g^n)$ (mm)
12	0	0.00	0	0.00	100.00	0	0.00	0.00	12	0.00
10	210	15.47	210	15.47	84.53	210	79.25	15.54	10	35.78
8	368.29	27.12	578.29	42.59	57.41	368.29	138.98	27.25	8	56.66
6.3	400.41	29.49	978.7	72.08	27.92	400.41	151.10	29.63	6.3	54.53
5	238	17.53	1216.7	89.61	10.39	238	89.81	17.61	5	28.34
2	134.79	9.93	1351.49	99.54	0.46	134.79	50.86	9.97	2	6.91
1	0.1	0.01	1351.59	99.54	0.46	0.1	0.04	0.01	1	0.00
Matériau reste au fond (P)	0.14	0.01	$\sum (Ms1) = 1357.79$ g			1351.59	510.03	100.00	$\sum(Y_i)$	182.22
$\sum (M1s)$	1351.73	99.55							$\sum(Y_i)/\sum(\varepsilon_g^n)$	1.82
$((\sum (Ms1) - \sum (M1s))/\sum (Ms1))*100$	0.45	<2%							D_g (mm)	6.19

Annexe 2 : Analyse granulométrique et calcul du diamètre géométrique moyen du sédiment fin.

Essai 1.

Courbe Granulométrie				diamètre moyen géométrique (D_g)		
Diamètre (d_g^n) (μm)	Pourcentages de tamisât	Pourcentage cumulés de refus	Volume de Refus Cumulé	Volume de Refus (V_{if})	$\mathcal{E}_f^n = (V_{if}/\sum(V_{if}))$	$Y_i = \mathcal{E}_f^n * \ln(d_g^n)$ (μm)
0.03	0	100	1.000	0.000	0	0.000
0.04	0.05	99.95	1.000	0.000	0.05	-0.161
0.07	0.16	99.84	0.998	0.001	0.11	-0.293
0.1	0.25	99.75	0.998	0.001	0.09	-0.207
0.2	0.74	99.26	0.993	0.005	0.49	-0.789
0.3	1.4	98.6	0.986	0.007	0.66	-0.795
0.4	1.69	98.31	0.983	0.003	0.29	-0.266
0.5	1.71	98.29	0.983	0.000	0.02	-0.014
0.6	1.72	98.28	0.983	0.000	0.01	-0.005
0.7	1.76	98.24	0.982	0.000	0.04	-0.014
0.8	1.95	98.05	0.981	0.002	0.19	-0.042
0.9	2.21	97.79	0.978	0.003	0.26	-0.027
1	2.51	97.49	0.975	0.003	0.3	0.000
1.1	2.86	97.14	0.971	0.003	0.35	0.033
1.2	3.23	96.77	0.968	0.004	0.37	0.067
1.3	3.64	96.36	0.964	0.004	0.41	0.108
1.4	4.07	95.93	0.959	0.004	0.43	0.145
1.6	5.01	94.99	0.950	0.009	0.94	0.442
1.8	6.01	93.99	0.940	0.010	1	0.588
2	7.04	92.96	0.930	0.010	1.03	0.714
2.2	8.1	91.9	0.919	0.011	1.06	0.836
2.4	9.15	90.85	0.909	0.011	1.05	0.919
2.6	10.19	89.81	0.898	0.010	1.04	0.994
3	12.17	87.83	0.878	0.020	1.98	2.175
4	16.44	83.56	0.836	0.043	4.27	5.919
5	19.86	80.14	0.801	0.034	3.42	5.504
6	22.81	77.19	0.772	0.030	2.95	5.286
6.5	24.2	75.8	0.758	0.014	1.39	2.602
7	25.57	74.43	0.744	0.014	1.37	2.666
7.5	26.94	73.06	0.731	0.014	1.37	2.760
8	28.33	71.67	0.717	0.014	1.39	2.890
8.5	29.76	70.24	0.702	0.014	1.43	3.060
9	31.21	68.79	0.688	0.015	1.45	3.186
10	34.12	65.88	0.659	0.029	2.91	6.701
11	37.01	62.99	0.630	0.029	2.89	6.930
12	39.83	60.17	0.602	0.028	2.82	7.007
13	42.55	57.45	0.575	0.027	2.72	6.977
14	45.14	54.86	0.549	0.026	2.59	6.835
15	47.58	52.42	0.524	0.024	2.44	6.608
16	49.85	50.15	0.502	0.023	2.27	6.294
17	51.98	48.02	0.480	0.021	2.13	6.035

18	53.98	46.02	0.460	0.020	2	5.781
19	55.84	44.16	0.442	0.019	1.86	5.477
20	57.59	42.41	0.424	0.018	1.75	5.243
22	60.82	39.18	0.392	0.032	3.23	9.984
25	65.17	34.83	0.348	0.044	4.35	14.002
28	69.11	30.89	0.309	0.039	3.94	13.129
32	74.02	25.98	0.260	0.049	4.91	17.017
36	78.62	21.38	0.214	0.046	4.6	16.484
38	80.82	19.18	0.192	0.022	2.2	8.003
40	82.92	17.08	0.171	0.021	2.1	7.747
45	87.6	12.4	0.124	0.047	4.68	17.815
50	91.33	8.67	0.087	0.037	3.73	14.592
53	93.14	6.86	0.069	0.018	1.81	7.186
56	94.67	5.33	0.053	0.015	1.53	6.159
63	97.28	2.72	0.027	0.026	2.61	10.814
71	98.97	1.03	0.010	0.017	1.69	7.204
75	99.4	0.6	0.006	0.004	0.43	1.857
80	99.74	0.26	0.003	0.003	0.34	1.490
85	99.91	0.09	0.001	0.002	0.17	0.755
90	100	0	0	0.0009	0.09	0.405
95	100	0	0	0	0	0.000
100	100	0	0	0	0	0.000
$\Sigma(V_{if})$					100	262.809
$\Sigma(Y_i)/\Sigma(\varepsilon_g^n)$						2.628
$D_g (\mu\text{m})$						13.847
$D_g (\text{m})$						0.0000138

Essai 2.

Courbe Granulométrie				diamètre moyen géométrique (D_g)		
Diamètre (d_g^n) (μm)	Pourcentages de tamisât	Pourcentage cumulés de refus	Volume de Refus Cumulé	Volume de Refus (V_{if})	$\varepsilon_f^n =$ ($V_{if}/\Sigma(V_{if})$)	$Y_i = \varepsilon_f^n * \ln(d_g^n)$ (μm)
0.03	0	100	1.000	0.000	0	0.000
0.04	0.03	99.97	1.000	0.000	0.03	-0.097
0.07	0.14	99.86	0.999	0.001	0.11	-0.293
0.1	0.23	99.77	0.998	0.001	0.09	-0.207
0.2	0.49	99.51	0.995	0.003	0.26	-0.418
0.3	0.75	99.25	0.993	0.003	0.26	-0.313
0.4	1.06	98.94	0.989	0.003	0.31	-0.284
0.5	1.39	98.61	0.986	0.003	0.33	-0.229
0.6	1.69	98.31	0.983	0.003	0.3	-0.153
0.7	1.96	98.04	0.980	0.003	0.27	-0.096
0.8	2.21	97.79	0.978	0.002	0.25	-0.056
0.9	2.48	97.52	0.975	0.003	0.27	-0.028
1	2.79	97.21	0.972	0.003	0.31	0.000
1.1	3.15	96.85	0.969	0.004	0.36	0.034
1.2	3.55	96.45	0.965	0.004	0.4	0.073
1.3	3.98	96.02	0.960	0.004	0.43	0.113
1.4	4.43	95.57	0.956	0.005	0.45	0.151

1.6	5.37	94.63	0.946	0.009	0.94	0.442
1.8	6.35	93.65	0.937	0.010	0.98	0.576
2	7.35	92.65	0.927	0.010	1	0.693
2.2	8.35	91.65	0.917	0.010	1	0.788
2.4	9.34	90.66	0.907	0.010	0.99	0.867
2.6	10.31	89.69	0.897	0.010	0.97	0.927
3	12.17	87.83	0.878	0.019	1.86	2.043
4	16.23	83.77	0.838	0.041	4.06	5.628
5	19.5	80.5	0.805	0.033	3.27	5.263
6	22.31	77.69	0.777	0.028	2.81	5.035
6.5	23.61	76.39	0.764	0.013	1.3	2.433
7	24.89	75.11	0.751	0.013	1.28	2.491
7.5	26.18	73.82	0.738	0.013	1.29	2.599
8	27.49	72.51	0.725	0.013	1.31	2.724
8.5	28.85	71.15	0.712	0.014	1.36	2.910
9	30.24	69.76	0.698	0.014	1.39	3.054
10	33.06	66.94	0.669	0.028	2.82	6.493
11	35.9	64.1	0.641	0.028	2.84	6.810
12	38.68	61.32	0.613	0.028	2.78	6.908
13	41.37	58.63	0.586	0.027	2.69	6.900
14	43.93	56.07	0.561	0.026	2.56	6.756
15	46.33	53.67	0.537	0.024	2.4	6.499
16	48.57	51.43	0.514	0.022	2.24	6.211
17	50.66	49.34	0.493	0.021	2.09	5.921
18	52.62	47.38	0.474	0.020	1.96	5.665
19	54.44	45.56	0.456	0.018	1.82	5.359
20	56.16	43.84	0.438	0.017	1.72	5.153
22	59.34	40.66	0.407	0.032	3.18	9.830
25	63.67	36.33	0.363	0.043	4.33	13.938
28	67.67	32.33	0.323	0.040	4	13.329
32	72.71	27.29	0.273	0.050	5.04	17.467
36	77.51	22.49	0.225	0.048	4.8	17.201
38	79.82	20.18	0.202	0.023	2.31	8.403
40	82.03	17.97	0.180	0.022	2.21	8.152
45	86.98	13.02	0.130	0.050	4.95	18.843
50	90.93	9.07	0.091	0.040	3.95	15.452
53	92.84	7.16	0.072	0.019	1.91	7.583
56	94.45	5.55	0.056	0.016	1.61	6.481
63	97.18	2.82	0.028	0.027	2.73	11.311
71	98.94	1.06	0.011	0.018	1.76	7.502
75	99.39	0.61	0.006	0.005	0.45	1.943
80	99.73	0.27	0.003	0.003	0.34	1.490
85	99.91	0.09	0.001	0.002	0.18	0.800
90	100	0	0	0.0009	0.09	0.405
95	100	0	0	0	0	0.000
100	100	0	0	0	0	0.000
$\Sigma(V_{if})$					100	265.476
$\Sigma(Y_i)/\Sigma(\varepsilon_q^n)$						2.655
$D_g(\mu m)$						14.222
$D_g(m)$						0.000014

Essai 3.

Courbe Granulométrie				diamètre moyen géométrique (D_g)		
Diamètre (d_g^n) (μm)	Pourcentages de tamisât	Pourcentage cumulés de refus	Volume de Refus Cumulé	Volume de Refus (V_{if})	$\varepsilon_f^n =$ ($V_{if}/\sum(V_{if})$)	$\gamma_i = \varepsilon_f^n * \ln(d_g^n)$ (μm)
0.03	0	100	1.000	0.000	0	0.000
0.04	0.03	99.97	1.000	0.000	0.03	-0.097
0.07	0.13	99.87	0.999	0.001	0.1	-0.266
0.1	0.22	99.78	0.998	0.001	0.09	-0.207
0.2	0.48	99.52	0.995	0.003	0.26	-0.418
0.3	0.74	99.26	0.993	0.003	0.26	-0.313
0.4	1.04	98.96	0.990	0.003	0.3	-0.275
0.5	1.37	98.63	0.986	0.003	0.33	-0.229
0.6	1.67	98.33	0.983	0.003	0.3	-0.153
0.7	1.94	98.06	0.981	0.003	0.27	-0.096
0.8	2.18	97.82	0.978	0.002	0.24	-0.054
0.9	2.45	97.55	0.976	0.003	0.27	-0.028
1	2.76	97.24	0.972	0.003	0.31	0.000
1.1	3.11	96.89	0.969	0.003	0.35	0.033
1.2	3.5	96.5	0.965	0.004	0.39	0.071
1.3	3.92	96.08	0.961	0.004	0.42	0.110
1.4	4.36	95.64	0.956	0.004	0.44	0.148
1.6	5.29	94.71	0.947	0.009	0.93	0.437
1.8	6.25	93.75	0.938	0.010	0.96	0.564
2	7.24	92.76	0.928	0.010	0.99	0.686
2.2	8.23	91.77	0.918	0.010	0.99	0.781
2.4	9.22	90.78	0.908	0.010	0.99	0.867
2.6	10.19	89.81	0.898	0.010	0.97	0.927
3	12.05	87.95	0.880	0.019	1.86	2.043
4	16.12	83.88	0.839	0.041	4.07	5.642
5	19.39	80.61	0.806	0.033	3.27	5.263
6	22.21	77.79	0.778	0.028	2.82	5.053
6.5	23.51	76.49	0.765	0.013	1.3	2.433
7	24.79	75.21	0.752	0.013	1.28	2.491
7.5	26.08	73.92	0.739	0.013	1.29	2.599
8	27.4	72.6	0.726	0.013	1.32	2.745
8.5	28.76	71.24	0.712	0.014	1.36	2.910
9	30.15	69.85	0.699	0.014	1.39	3.054
10	32.97	67.03	0.670	0.028	2.82	6.493
11	35.8	64.2	0.642	0.028	2.83	6.786
12	38.59	61.41	0.614	0.028	2.79	6.933
13	41.28	58.72	0.587	0.027	2.69	6.900
14	43.84	56.16	0.562	0.026	2.56	6.756
15	46.26	53.74	0.537	0.024	2.42	6.553
16	48.51	51.49	0.515	0.023	2.25	6.238
17	50.61	49.39	0.494	0.021	2.1	5.950
18	52.58	47.42	0.474	0.020	1.97	5.694
19	54.41	45.59	0.456	0.018	1.83	5.388
20	56.14	43.86	0.439	0.017	1.73	5.183
22	59.34	40.66	0.407	0.032	3.2	9.891

25	63.67	36.33	0.363	0.043	4.33	13.938
28	67.65	32.35	0.324	0.040	3.98	13.262
32	72.66	27.34	0.273	0.050	5.01	17.363
36	77.43	22.57	0.226	0.048	4.77	17.093
38	79.75	20.25	0.203	0.023	2.32	8.439
40	81.96	18.04	0.180	0.022	2.21	8.152
45	86.93	13.07	0.131	0.050	4.97	18.919
50	90.88	9.12	0.091	0.039	3.95	15.452
53	92.81	7.19	0.072	0.019	1.93	7.663
56	94.42	5.58	0.056	0.016	1.61	6.481
63	97.17	2.83	0.028	0.028	2.75	11.394
71	98.93	1.07	0.011	0.018	1.76	7.502
75	99.39	0.61	0.006	0.005	0.46	1.986
80	99.73	0.27	0.003	0.003	0.34	1.490
85	99.91	0.09	0.001	0.002	0.18	0.800
90	100	0	0	0.0009	0.09	0.405
95	100	0	0	0	0	0.000
100	100	0	0	0	0	0.000
$\Sigma(V_{if})$					100	265.828
$\Sigma(Y_i)/\Sigma(\varepsilon_g^n)$						2.658
$D_g(\mu m)$						14.272
$D_g(m)$						0.000014

Annexe 3 : Calcul du diamètre géométrique moyen du mélange gravier + sédiment fin.

Lorsque nous avons un seul matériau (soit gravier ou sédiment fin) le volume total de sédiment est :

$$V_t = V_g \text{ ou } V_t = V_f$$

Et l'équation du diamètre géométrique peut être appliquée directement (item 4.1.1). Mais lorsqu'il existe un mélange des sédiments (gravier+ sédiment fin) le volume total est :

$$V_t = V_g + V_f$$

La fraction volumique de chaque matériau formant l'ensemble est la suivante :

$$V'_g = \frac{V_g}{V_t} = \frac{V_g}{V_g + V_f}$$

$$V'_f = \frac{V_f}{V_t} = \frac{V_f}{V_g + V_f}$$

Pour obtenir la fraction volumique d'une classe de sédiments dans le mélange gravier + fins ε_g^{n*} , on peut utiliser celle du gravier seul ε_g^n que multiplie la fraction volumique du gravier. De même pour le sédiment fin.

$$\varepsilon_g^{n*} = \varepsilon_g^n \times V'_g$$

$$\varepsilon_f^{n*} = \varepsilon_f^n \times V'_f$$

Où ε_i^n est la même valeur que celle utilisée pour le diamètre géométrique d'un seul matériau :

$$\varepsilon_g^n = \frac{V_{ig}}{\sum_{n=1} V_{ig}} \times 100$$

$$\varepsilon_f^n = \frac{V_{if}}{\sum_{n=1} V_{if}} \times 100$$

Ce calcul est facilité par le fait que graviers et sédiments fins ne participent pas aux mêmes classes granulométriques.

Pour finir, la formule pour calculer le diamètre géométrique du mélange gravier + sédiment fin est :

$$D_g = \exp\left(\frac{\sum_{n=1} \varepsilon_g^{n*} \ln(d_g^n) + \sum_{n=1} \varepsilon_f^{n*} \ln(d_g^n)}{\sum_{n=1} \varepsilon_g^{n*} + \sum_{n=1} \varepsilon_f^{n*}}\right)$$

Pour notre cas d'étude le volume du gravier sera constante (matrice de gravier mis dans le canal inclinable), tandis que le volume de sédiment fin sera variable, afin de représenter les conditions d'infiltration et colmatage du lit de gravier du canal inclinable. Les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

diamètre moyen géométrique (D_g)				diamètre moyen géométrique (D_g)			
$V_g (m^3)$	0.727	V'_g	0.999	$V_g (m^3)$	0.727	V'_g	0.988
$V_f (m^3)$	0.001	V'_f	0.001	$V_f (m^3)$	0.009	V'_f	0.012
$V_t (m^3)$	0.728	c	0.001	$V_t (m^3)$	0.735	c	0.012
ε_i^n	ε_i^{n*}	Tamis (d_g^n) (mm)	$\varepsilon_i^{n*} \ln(d_g^n)$ (mm)	ε_i^n	ε_i^{n*}	Tamis (d_g^n) (mm)	$\varepsilon_i^{n*} \ln(d_g^n)$ (mm)
0.0000	0.0000	12	0.0000	0.0000	0.0000	12	0.0000
0.1454	0.1452	10	0.3343	0.1454	0.1437	10	0.3308
0.2634	0.2631	8	0.5472	0.2634	0.2604	8	0.5415
0.3007	0.3003	6.3	0.5528	0.3007	0.2972	6.3	0.5470
0.1868	0.1866	5	0.3003	0.1868	0.1847	5	0.2972
0.1033	0.1031	2	0.0715	0.1033	0.1021	2	0.0707
0.0005	0.0005	1	0.0000	0.0005	0.0005	1	0.0000
0.0000	0.0000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0950	0.0000	0.0000	0.0000	0.0950	0.0000
0.0009	0.0000	0.0900	0.0000	0.0009	0.0000	0.0900	0.0000
0.0017	0.0000	0.0850	0.0000	0.0017	0.0000	0.0850	0.0000
0.0034	0.0000	0.0800	0.0000	0.0034	0.0000	0.0800	-0.0001
0.0043	0.0000	0.0750	0.0000	0.0043	0.0000	0.0750	-0.0001
0.0169	0.0000	0.0710	-0.0001	0.0169	0.0002	0.0710	-0.0005
0.0261	0.0000	0.0630	-0.0001	0.0261	0.0003	0.0630	-0.0008
0.0153	0.0000	0.0560	-0.0001	0.0153	0.0002	0.0560	-0.0005
0.0181	0.0000	0.0530	-0.0001	0.0181	0.0002	0.0530	-0.0006
0.0373	0.0000	0.0500	-0.0001	0.0373	0.0004	0.0500	-0.0013
0.0468	0.0001	0.0450	-0.0002	0.0468	0.0005	0.0450	-0.0017
0.0210	0.0000	0.0400	-0.0001	0.0210	0.0002	0.0400	-0.0008
0.0220	0.0000	0.0380	-0.0001	0.0220	0.0003	0.0380	-0.0008
0.0460	0.0001	0.0360	-0.0002	0.0460	0.0005	0.0360	-0.0018
0.0491	0.0001	0.0320	-0.0002	0.0491	0.0006	0.0320	-0.0020
0.0394	0.0000	0.0280	-0.0002	0.0394	0.0005	0.0280	-0.0016
0.0435	0.0001	0.0250	-0.0002	0.0435	0.0005	0.0250	-0.0019
0.0323	0.0000	0.0220	-0.0001	0.0323	0.0004	0.0220	-0.0014
0.0175	0.0000	0.0200	-0.0001	0.0175	0.0002	0.0200	-0.0008
0.0186	0.0000	0.0190	-0.0001	0.0186	0.0002	0.0190	-0.0009
0.0200	0.0000	0.0180	-0.0001	0.0200	0.0002	0.0180	-0.0009
0.0213	0.0000	0.0170	-0.0001	0.0213	0.0002	0.0170	-0.0010
0.0227	0.0000	0.0160	-0.0001	0.0227	0.0003	0.0160	-0.0011

0.0244	0.0000	0.0150	-0.0001	0.0244	0.0003	0.0150	-0.0012
0.0259	0.0000	0.0140	-0.0001	0.0259	0.0003	0.0140	-0.0013
0.0272	0.0000	0.0130	-0.0001	0.0272	0.0003	0.0130	-0.0014
0.0282	0.0000	0.0120	-0.0001	0.0282	0.0003	0.0120	-0.0014
0.0289	0.0000	0.0110	-0.0002	0.0289	0.0003	0.0110	-0.0015
0.0291	0.0000	0.0100	-0.0002	0.0291	0.0003	0.0100	-0.0016
0.0145	0.0000	0.0090	-0.0001	0.0145	0.0002	0.0090	-0.0008
0.0143	0.0000	0.0085	-0.0001	0.0143	0.0002	0.0085	-0.0008
0.0139	0.0000	0.0080	-0.0001	0.0139	0.0002	0.0080	-0.0008
0.0137	0.0000	0.0075	-0.0001	0.0137	0.0002	0.0075	-0.0008
0.0137	0.0000	0.0070	-0.0001	0.0137	0.0002	0.0070	-0.0008
0.0139	0.0000	0.0065	-0.0001	0.0139	0.0002	0.0065	-0.0008
0.0295	0.0000	0.0060	-0.0002	0.0295	0.0003	0.0060	-0.0017
0.0342	0.0000	0.0050	-0.0002	0.0342	0.0004	0.0050	-0.0021
0.0427	0.0000	0.0040	-0.0003	0.0427	0.0005	0.0040	-0.0027
0.0198	0.0000	0.0030	-0.0001	0.0198	0.0002	0.0030	-0.0013
0.0104	0.0000	0.0026	-0.0001	0.0104	0.0001	0.0026	-0.0007
0.0105	0.0000	0.0024	-0.0001	0.0105	0.0001	0.0024	-0.0007
0.0106	0.0000	0.0022	-0.0001	0.0106	0.0001	0.0022	-0.0008
0.0103	0.0000	0.0020	-0.0001	0.0103	0.0001	0.0020	-0.0007
0.0100	0.0000	0.0018	-0.0001	0.0100	0.0001	0.0018	-0.0007
0.0094	0.0000	0.0016	-0.0001	0.0094	0.0001	0.0016	-0.0007
0.0043	0.0000	0.0014	0.0000	0.0043	0.0000	0.0014	-0.0003
0.0041	0.0000	0.0013	0.0000	0.0041	0.0000	0.0013	-0.0003
0.0037	0.0000	0.0012	0.0000	0.0037	0.0000	0.0012	-0.0003
0.0035	0.0000	0.0011	0.0000	0.0035	0.0000	0.0011	-0.0003
0.0030	0.0000	0.0010	0.0000	0.0030	0.0000	0.0010	-0.0002
0.0026	0.0000	0.0009	0.0000	0.0026	0.0000	0.0009	-0.0002
0.0019	0.0000	0.0008	0.0000	0.0019	0.0000	0.0008	-0.0002
0.0004	0.0000	0.0007	0.0000	0.0004	0.0000	0.0007	0.0000
0.0001	0.0000	0.0006	0.0000	0.0001	0.0000	0.0006	0.0000
0.0002	0.0000	0.0005	0.0000	0.0002	0.0000	0.0005	0.0000
0.0029	0.0000	0.0004	0.0000	0.0029	0.0000	0.0004	-0.0003
0.0066	0.0000	0.0003	-0.0001	0.0066	0.0001	0.0003	-0.0006
0.0049	0.0000	0.0002	0.0000	0.0049	0.0001	0.0002	-0.0005
0.0009	0.0000	0.0001	0.0000	0.0009	0.0000	0.0001	-0.0001
0.0011	0.0000	0.0001	0.0000	0.0011	0.0000	0.0001	-0.0001
0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	-0.0001
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.00	$\Sigma(Y_i)$	1.80	$\Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.00	$\Sigma(Y_i)$	1.74
		$\Sigma(Y_i) / \Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.80			$\Sigma(Y_i) / \Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.74
		D_g (mm)	6.06			D_g (mm)	5.68

diamètre moyen géométrique (D_g)				diamètre moyen géométrique (D_g)			
$V_g(m^3)$	0.727	V'_g	0.951	$V_g(m^3)$	0.727	V'_g	0.932
$V_f(m^3)$	0.038	V'_f	0.049	$V_f(m^3)$	0.053	V'_f	0.068
$V_t(m^3)$	0.765	c	0.049	$V_t(m^3)$	0.780	c	0.068
ε_i^n	ε_i^{n*}	Tamis (d_g^n) (mm)	$Y_i = \varepsilon_i^{n*} * \ln(d_g^n)$ (mm)	ε_i^n	ε_i^{n*}	Tamis (d_g^n) (mm)	$Y_i = \varepsilon_i^{n*} * \ln(d_g^n)$ (mm)
0.0000	0.0000	12	0.0000	0.0000	0.0000	12	0.0000
0.1454	0.1382	10	0.3182	0.1454	0.1355	10	0.3120
0.2634	0.2505	8	0.5208	0.2634	0.2456	8	0.5107
0.3007	0.2858	6.3	0.5261	0.3007	0.2803	6.3	0.5159
0.1868	0.1776	5	0.2858	0.1868	0.1742	5	0.2803
0.1033	0.0982	2	0.0680	0.1033	0.0963	2	0.0667
0.0005	0.0004	1	0.0000	0.0005	0.0004	1	0.0000
0.0000	0.0000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0950	0.0000	0.0000	0.0000	0.0950	0.0000
0.0009	0.0000	0.0900	-0.0001	0.0009	0.0001	0.0900	-0.0001
0.0017	0.0001	0.0850	-0.0002	0.0017	0.0001	0.0850	-0.0003
0.0034	0.0002	0.0800	-0.0004	0.0034	0.0002	0.0800	-0.0006
0.0043	0.0002	0.0750	-0.0005	0.0043	0.0003	0.0750	-0.0008
0.0169	0.0008	0.0710	-0.0022	0.0169	0.0011	0.0710	-0.0030
0.0261	0.0013	0.0630	-0.0036	0.0261	0.0018	0.0630	-0.0049
0.0153	0.0008	0.0560	-0.0022	0.0153	0.0010	0.0560	-0.0030
0.0181	0.0009	0.0530	-0.0026	0.0181	0.0012	0.0530	-0.0036
0.0373	0.0018	0.0500	-0.0055	0.0373	0.0025	0.0500	-0.0076
0.0468	0.0023	0.0450	-0.0072	0.0468	0.0032	0.0450	-0.0098
0.0210	0.0010	0.0400	-0.0033	0.0210	0.0014	0.0400	-0.0046
0.0220	0.0011	0.0380	-0.0035	0.0220	0.0015	0.0380	-0.0049
0.0460	0.0023	0.0360	-0.0075	0.0460	0.0031	0.0360	-0.0104
0.0491	0.0024	0.0320	-0.0083	0.0491	0.0033	0.0320	-0.0114
0.0394	0.0019	0.0280	-0.0069	0.0394	0.0027	0.0280	-0.0095
0.0435	0.0021	0.0250	-0.0079	0.0435	0.0029	0.0250	-0.0109
0.0323	0.0016	0.0220	-0.0061	0.0323	0.0022	0.0220	-0.0083
0.0175	0.0009	0.0200	-0.0034	0.0175	0.0012	0.0200	-0.0046
0.0186	0.0009	0.0190	-0.0036	0.0186	0.0013	0.0190	-0.0050
0.0200	0.0010	0.0180	-0.0040	0.0200	0.0014	0.0180	-0.0054
0.0213	0.0011	0.0170	-0.0043	0.0213	0.0014	0.0170	-0.0059
0.0227	0.0011	0.0160	-0.0046	0.0227	0.0015	0.0160	-0.0064
0.0244	0.0012	0.0150	-0.0051	0.0244	0.0017	0.0150	-0.0069
0.0259	0.0013	0.0140	-0.0055	0.0259	0.0018	0.0140	-0.0075
0.0272	0.0013	0.0130	-0.0058	0.0272	0.0018	0.0130	-0.0080
0.0282	0.0014	0.0120	-0.0061	0.0282	0.0019	0.0120	-0.0084
0.0289	0.0014	0.0110	-0.0064	0.0289	0.0020	0.0110	-0.0088
0.0291	0.0014	0.0100	-0.0066	0.0291	0.0020	0.0100	-0.0091
0.0145	0.0007	0.0090	-0.0034	0.0145	0.0010	0.0090	-0.0046
0.0143	0.0007	0.0085	-0.0034	0.0143	0.0010	0.0085	-0.0046
0.0139	0.0007	0.0080	-0.0033	0.0139	0.0009	0.0080	-0.0045
0.0137	0.0007	0.0075	-0.0033	0.0137	0.0009	0.0075	-0.0045
0.0137	0.0007	0.0070	-0.0034	0.0137	0.0009	0.0070	-0.0046
0.0139	0.0007	0.0065	-0.0035	0.0139	0.0009	0.0065	-0.0047

0.0295	0.0015	0.0060	-0.0074	0.0295	0.0020	0.0060	-0.0102
0.0342	0.0017	0.0050	-0.0089	0.0342	0.0023	0.0050	-0.0123
0.0427	0.0021	0.0040	-0.0116	0.0427	0.0029	0.0040	-0.0160
0.0198	0.0010	0.0030	-0.0057	0.0198	0.0013	0.0030	-0.0078
0.0104	0.0005	0.0026	-0.0031	0.0104	0.0007	0.0026	-0.0042
0.0105	0.0005	0.0024	-0.0031	0.0105	0.0007	0.0024	-0.0043
0.0106	0.0005	0.0022	-0.0032	0.0106	0.0007	0.0022	-0.0044
0.0103	0.0005	0.0020	-0.0032	0.0103	0.0007	0.0020	-0.0043
0.0100	0.0005	0.0018	-0.0031	0.0100	0.0007	0.0018	-0.0043
0.0094	0.0005	0.0016	-0.0030	0.0094	0.0006	0.0016	-0.0041
0.0043	0.0002	0.0014	-0.0014	0.0043	0.0003	0.0014	-0.0019
0.0041	0.0002	0.0013	-0.0013	0.0041	0.0003	0.0013	-0.0018
0.0037	0.0002	0.0012	-0.0012	0.0037	0.0003	0.0012	-0.0017
0.0035	0.0002	0.0011	-0.0012	0.0035	0.0002	0.0011	-0.0016
0.0030	0.0001	0.0010	-0.0010	0.0030	0.0002	0.0010	-0.0014
0.0026	0.0001	0.0009	-0.0009	0.0026	0.0002	0.0009	-0.0012
0.0019	0.0001	0.0008	-0.0007	0.0019	0.0001	0.0008	-0.0009
0.0004	0.0000	0.0007	-0.0001	0.0004	0.0000	0.0007	-0.0002
0.0001	0.0000	0.0006	0.0000	0.0001	0.0000	0.0006	-0.0001
0.0002	0.0000	0.0005	-0.0001	0.0002	0.0000	0.0005	-0.0001
0.0029	0.0001	0.0004	-0.0011	0.0029	0.0002	0.0004	-0.0015
0.0066	0.0003	0.0003	-0.0026	0.0066	0.0004	0.0003	-0.0036
0.0049	0.0002	0.0002	-0.0021	0.0049	0.0003	0.0002	-0.0028
0.0009	0.0000	0.0001	-0.0004	0.0009	0.0001	0.0001	-0.0006
0.0011	0.0001	0.0001	-0.0005	0.0011	0.0001	0.0001	-0.0007
0.0005	0.0000	0.0000	-0.0002	0.0005	0.0000	0.0000	-0.0003
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.00	$\Sigma(Y_i)$	1.51	$\Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.00	$\Sigma(Y_i)$	1.40
		$\Sigma(Y_i) / \Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.51			$\Sigma(Y_i) / \Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.40
		D_g (mm)	4.52			D_g (mm)	4.04

diamètre moyen géométrique (D_g)				diamètre moyen géométrique (D_g)			
$V_g (m^3)$	0.727	V'_g	0.767	$V_g (m^3)$	0.727	V'_g	0.740
$V_f (m^3)$	0.221	V'_f	0.233	$V_f (m^3)$	0.255	V'_f	0.260
$V_t (m^3)$	0.948	c	0.233	$V_t (m^3)$	0.982	c	0.260
ε_i^n	ε_i^{n*}	Tamis (d_g^n) (mm)	$Y_i = \varepsilon_i^{n*} * \ln(d_g^n)$ (mm)	ε_i^n	ε_i^{n*}	Tamis (d_g^n) (mm)	$Y_i = \varepsilon_i^{n*} * \ln(d_g^n)$ (mm)
0.0000	0.0000	12	0.0000	0.0000	0.0000	12	0.0000
0.1454	0.1114	10	0.2566	0.1454	0.1076	10	0.2477
0.2634	0.2020	8	0.4200	0.2634	0.1950	8	0.4054
0.3007	0.2305	6.3	0.4243	0.3007	0.2225	6.3	0.4095
0.1868	0.1432	5	0.2305	0.1868	0.1383	5	0.2225
0.1033	0.0792	2	0.0549	0.1033	0.0764	2	0.0530
0.0005	0.0004	1	0.0000	0.0005	0.0003	1	0.0000
0.0000	0.0000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0950	0.0000	0.0000	0.0000	0.0950	0.0000
0.0009	0.0002	0.0900	-0.0005	0.0009	0.0002	0.0900	-0.0006
0.0017	0.0004	0.0850	-0.0010	0.0017	0.0004	0.0850	-0.0011

0.0034	0.0008	0.0800	-0.0020	0.0034	0.0009	0.0800	-0.0022
0.0043	0.0010	0.0750	-0.0026	0.0043	0.0011	0.0750	-0.0029
0.0169	0.0039	0.0710	-0.0104	0.0169	0.0044	0.0710	-0.0116
0.0261	0.0061	0.0630	-0.0168	0.0261	0.0068	0.0630	-0.0188
0.0153	0.0036	0.0560	-0.0103	0.0153	0.0040	0.0560	-0.0115
0.0181	0.0042	0.0530	-0.0124	0.0181	0.0047	0.0530	-0.0138
0.0373	0.0087	0.0500	-0.0261	0.0373	0.0097	0.0500	-0.0290
0.0468	0.0109	0.0450	-0.0339	0.0468	0.0122	0.0450	-0.0377
0.0210	0.0049	0.0400	-0.0158	0.0210	0.0055	0.0400	-0.0176
0.0220	0.0051	0.0380	-0.0168	0.0220	0.0057	0.0380	-0.0187
0.0460	0.0107	0.0360	-0.0357	0.0460	0.0120	0.0360	-0.0397
0.0491	0.0115	0.0320	-0.0394	0.0491	0.0128	0.0320	-0.0439
0.0394	0.0092	0.0280	-0.0329	0.0394	0.0102	0.0280	-0.0366
0.0435	0.0102	0.0250	-0.0374	0.0435	0.0113	0.0250	-0.0417
0.0323	0.0075	0.0220	-0.0288	0.0323	0.0084	0.0220	-0.0320
0.0175	0.0041	0.0200	-0.0160	0.0175	0.0045	0.0200	-0.0178
0.0186	0.0043	0.0190	-0.0172	0.0186	0.0048	0.0190	-0.0192
0.0200	0.0047	0.0180	-0.0188	0.0200	0.0052	0.0180	-0.0209
0.0213	0.0050	0.0170	-0.0203	0.0213	0.0055	0.0170	-0.0226
0.0227	0.0053	0.0160	-0.0219	0.0227	0.0059	0.0160	-0.0244
0.0244	0.0057	0.0150	-0.0239	0.0244	0.0063	0.0150	-0.0266
0.0259	0.0060	0.0140	-0.0258	0.0259	0.0067	0.0140	-0.0287
0.0272	0.0063	0.0130	-0.0276	0.0272	0.0071	0.0130	-0.0307
0.0282	0.0066	0.0120	-0.0291	0.0282	0.0073	0.0120	-0.0324
0.0289	0.0067	0.0110	-0.0304	0.0289	0.0075	0.0110	-0.0339
0.0291	0.0068	0.0100	-0.0313	0.0291	0.0076	0.0100	-0.0348
0.0145	0.0034	0.0090	-0.0159	0.0145	0.0038	0.0090	-0.0178
0.0143	0.0033	0.0085	-0.0159	0.0143	0.0037	0.0085	-0.0177
0.0139	0.0032	0.0080	-0.0157	0.0139	0.0036	0.0080	-0.0174
0.0137	0.0032	0.0075	-0.0156	0.0137	0.0036	0.0075	-0.0174
0.0137	0.0032	0.0070	-0.0159	0.0137	0.0036	0.0070	-0.0177
0.0139	0.0032	0.0065	-0.0163	0.0139	0.0036	0.0065	-0.0182
0.0295	0.0069	0.0060	-0.0352	0.0295	0.0077	0.0060	-0.0392
0.0342	0.0080	0.0050	-0.0423	0.0342	0.0089	0.0050	-0.0471
0.0427	0.0100	0.0040	-0.0550	0.0427	0.0111	0.0040	-0.0613
0.0198	0.0046	0.0030	-0.0268	0.0198	0.0051	0.0030	-0.0299
0.0104	0.0024	0.0026	-0.0144	0.0104	0.0027	0.0026	-0.0161
0.0105	0.0025	0.0024	-0.0148	0.0105	0.0027	0.0024	-0.0165
0.0106	0.0025	0.0022	-0.0151	0.0106	0.0028	0.0022	-0.0169
0.0103	0.0024	0.0020	-0.0149	0.0103	0.0027	0.0020	-0.0166
0.0100	0.0023	0.0018	-0.0147	0.0100	0.0026	0.0018	-0.0164
0.0094	0.0022	0.0016	-0.0141	0.0094	0.0024	0.0016	-0.0157
0.0043	0.0010	0.0014	-0.0066	0.0043	0.0011	0.0014	-0.0073
0.0041	0.0010	0.0013	-0.0064	0.0041	0.0011	0.0013	-0.0071
0.0037	0.0009	0.0012	-0.0058	0.0037	0.0010	0.0012	-0.0065
0.0035	0.0008	0.0011	-0.0056	0.0035	0.0009	0.0011	-0.0062
0.0030	0.0007	0.0010	-0.0048	0.0030	0.0008	0.0010	-0.0054
0.0026	0.0006	0.0009	-0.0043	0.0026	0.0007	0.0009	-0.0047
0.0019	0.0004	0.0008	-0.0032	0.0019	0.0005	0.0008	-0.0035
0.0004	0.0001	0.0007	-0.0007	0.0004	0.0001	0.0007	-0.0008

0.0001	0.0000	0.0006	-0.0002	0.0001	0.0000	0.0006	-0.0002
0.0002	0.0000	0.0005	-0.0004	0.0002	0.0001	0.0005	-0.0004
0.0029	0.0007	0.0004	-0.0053	0.0029	0.0008	0.0004	-0.0059
0.0066	0.0015	0.0003	-0.0125	0.0066	0.0017	0.0003	-0.0139
0.0049	0.0011	0.0002	-0.0097	0.0049	0.0013	0.0002	-0.0108
0.0009	0.0002	0.0001	-0.0019	0.0009	0.0002	0.0001	-0.0022
0.0011	0.0003	0.0001	-0.0025	0.0011	0.0003	0.0001	-0.0027
0.0005	0.0001	0.0000	-0.0012	0.0005	0.0001	0.0000	-0.0013
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$\Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.00	$\Sigma(Y_i)$	0.39	$\Sigma (V_{ig}, V_{if})$	1.00	$\Sigma(Y_i)$	0.23
		$\Sigma(Y_i) / \Sigma (V_{ig}, V_{if})$	0.39			$\Sigma(Y_i) / \Sigma (V_{ig}, V_{if})$	0.23
		D_g (mm)	1.47			D_g (mm)	1.25

Annexe 4 : Tableau de la porosité et incertitudes associées (gravier, méthode 1)

Date : 14/05/2014						Date : 13/03/2014							
Item	Unité	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4	Ech5	Ech6	Ech7	Ech8	Ech9	Ech10	Ech11	Ech12
Volume échantillon (V_t)	mL	300.00	300.00	190.00	270.00	400.00	400.00	420.00	400.00	400.00	400.00	400.00	400.00
ΔV_t	mL	10	10	5	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Poids échantillon (M_t)	g	479.06	473.56	282.52	408.00	655.00	651.00	653.00	650.00	646.00	653.00	654.00	654.00
Densité Apparente (D_a)	g/mL	1.60	1.58	1.49	1.51	1.64	1.63	1.55	1.63	1.62	1.63	1.64	1.64
ΔM_t	g	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ΔD_a	g/mL	0.06	0.05	0.05	0.08	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Densité Réelle (D_r)	g/mL	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
ΔD_r	g/mL	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Porosité (θ_g)	---	0.40	0.40	0.44	0.43	0.38	0.39	0.41	0.39	0.39	0.38	0.38	0.38
$\Delta \theta_g$	---	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Annexe 5 : Tableau de la mesure de taux de sédiment fin (c) méthode pièges de sédiments fins cylindriques.

cylindre n°	z théorique (cm)	Masse échantillon sec (gravier+sédiment fin) (g)	lavage sédiment fin				C
			M_g sec(g)	V_g (cm3)	M_f sec(g)	V_f (cm3)	
1	1	93.67	93.57	35.31	0.10	0.04	0.001
	2	92.23	92.07	34.74	0.16	0.06	0.002
	3	73.12	72.92	27.52	0.20	0.08	0.003
	4	74.16	73.91	27.89	0.25	0.09	0.003
	5	78.40	78.21	29.51	0.19	0.07	0.002
	6	86.79	85.60	32.30	1.19	0.45	0.014
	7	113.08	93.24	35.18	19.84	7.49	0.175
2	1	103.67	103.52	39.06	0.15	0.06	0.001
	2	87.17	87.00	32.83	0.17	0.06	0.002
	3	96.01	95.84	36.17	0.17	0.06	0.002
	4	80.82	80.67	30.44	0.15	0.06	0.002
	5	84.95	84.80	32.00	0.15	0.06	0.002
	6	94.05	86.94	32.81	7.11	2.68	0.076
	7	96.47	79.64	30.05	16.83	6.35	0.174
3	1	83.28	83.22	31.40	0.06	0.02	0.001
	2	78.88	78.69	29.69	0.19	0.07	0.002
	3	83.33	83.00	31.32	0.33	0.12	0.004
	4	87.89	87.55	33.04	0.34	0.13	0.004
	5	64.25	62.51	23.59	1.74	0.66	0.027
	6.5	131.10	102.30	38.60	28.80	10.87	0.220
4	1	64.19	64.00	24.15	0.19	0.07	0.003
	2	80.03	79.77	30.10	0.26	0.10	0.003
	3	93.19	92.79	35.02	0.40	0.15	0.004
	4	73.90	72.87	27.50	1.03	0.39	0.014
	5	64.44	58.69	22.15	5.75	2.17	0.089
	6.5	128.66	90.09	34.00	38.57	14.55	0.300
5	1	70.94	70.93	26.77	0.01	0.00	0.000
	2	83.73	83.31	31.44	0.42	0.16	0.005
	3	69.72	69.62	26.27	0.10	0.04	0.001
	4	102.08	101.79	38.41	0.29	0.11	0.003
	5	83.26	83.03	31.33	0.23	0.09	0.003
	6	76.97	76.74	28.96	0.23	0.09	0.003
	7	90.49	87.34	32.96	3.15	1.19	0.035
	7.8	82.36	71.06	26.82	11.30	4.26	0.137
6	1	86.50	86.40	32.60	0.10	0.04	0.001
	2	68.18	68.08	25.69	0.10	0.04	0.001

	3	79.65	79.44	29.98	0.21	0.08	0.003
	4	91.66	91.48	34.52	0.18	0.07	0.002
	5	94.54	94.31	35.59	0.23	0.09	0.002
	6	71.23	71.02	26.80	0.21	0.08	0.003
	7	85.25	82.30	31.06	2.95	1.11	0.035
	7.8	73.16	62.96	23.76	10.20	3.85	0.139

Annexe 6 : Tableau de la mesure de taux de sédiment fin (c) méthode tuyau enfoncé.

Distance x	z (cm)	Masse échantillon sec (gravier+sédiment fin) (g)	lavage sédiment fin				C
			M_g sec(g)	V_g (cm3)	M_f sec(g)	V_f (cm3)	
0+5,20	2	128.11	127.58	48.143	0.53	0.200	0.004
	4	128.27	127.86	48.249	0.41	0.155	0.003
	6	218.35	178.11	67.211	40.24	15.185	0.184
0+7,00	2	126.71	125.98	47.540	0.73	0.275	0.006
	4	142.42	141.9	53.547	0.52	0.196	0.004
	6	171.86	132.29	49.921	39.57	14.932	0.230