



GESTION DES EAUX PLUVIALES ET DEPOLLUTION AVEC MATERIAUX BIOSOURCES

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

SPECIALITE GENIE DE L'EAU DE L'ASSAINISSEMENT ET DES
AMENAGEMENTS HYDRO AGRICOLES

Présenté et soutenu publiquement par

HAOUWA II TIDJANY MALAM (20220066)

Directeur de mémoire : Dr (MC) Harinaivo Anderson ANDRIANISA, Maitre de conférences, 2iE

Maîtres de stage :

Dr Bouamama ABBAR, Maitre de conférences, LOMC

Dr HDR Abdellah ALEM, Maitre de conférences HDR, LOMC

Prof. Anne PANTET, Professeur d'Universités, LOMC

DR Anicet Jules YAMONCHE, UNSTIM

Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC)-ULHN

Promotion [2024-2025]

DEDICACES

*À mes mères,
pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leurs prières,
qui ont toujours été ma source de force et de persévérance.*

*À mon père,
pour ses encouragements et ses sacrifices,*

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire de fin d'études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au **Directeur Général** ainsi qu'à l'ensemble du corps professoral de l'**Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)** pour le cadre d'études de qualité offert durant tout mon parcours.

Je remercie particulièrement **Dr (MC) ANDRIANISA Harinaivo Anderson**, mon Directeur de mémoire, pour son accompagnement, et la confiance qu'il m'a accordé tout au long de ce projet.

Je tiens également à remercier les coordinateurs du programme **PEA-ICAT Prof ADJOVI Edmond** et **Prof. PANTET Anne** ainsi que **Pr MARIN François** Directeur du LOMC qui m'ont permis d'obtenir cette opportunité de stage au sein d'une institution aussi prestigieuse que le **LOMC**, ainsi que pour leur accompagnement attentif durant tout mon séjour.

Ma profonde reconnaissance va à mes encadrants au LOMC **Dr ABBAR Bouamama** et **Dr HDR ALEM Abdellah** pour leur présence bienveillante, leur accompagnement indéfectible et leurs encouragements constants. Grâce à eux, j'ai pu évoluer dans un environnement de travail motivant, qui m'a donné l'envie de poursuivre dans la voie de la recherche.

Je remercie tout particulièrement **Prof. PANTET Anne**, responsable de l'axe **GCE**, pour son écoute attentive et sa capacité à toujours trouver des solutions face aux difficultés rencontrées.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à mon encadrant de l'**UNSTIM Dr YAMONCHE Anicet**, qui a su, malgré la distance, m'apporter un accompagnement constant et précieux.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes du laboratoire et de l'institution particulièrement **Dr HDR AHFIR Nasre-Dine** qui, directement ou indirectement, ont apporté leur soutien et ont enrichi cette expérience.

RESUME

La gestion qualitative et quantitative des eaux pluviales est une préoccupation majeure dans les zones urbaines et périurbaines où les craintes de pollution diffuse et de changement climatique limitent les capacités d'action. Le présent mémoire aborde ce problème en se concentrant sur la performance d'un dispositif de filtration composite réalisé avec des géotextiles composés de fibres de lin qui est un matériau biosourcé local et du sable concassé, dans le traitement des eaux de ruissellement avant qu'elles ne soient rejetées dans des structures végétalisées telles que des fossés ou des bassins d'infiltration. Il a été testé en laboratoire pour mesurer la capacité de ce filtre à capturer les particules en suspension contenant des polluants. Les analyses ont révélé que l'utilisation de géotextiles améliorait la rétention des particules, l'homogénéisation du flux et prolongeait la durée de vie du filtre. Cette étude démontre le potentiel des fibres de lin pour développer des systèmes de gestion des eaux pluviales simples, économiques et respectueux de l'environnement. Les résultats ouvrent également de nombreuses perspectives prometteuses pour des expérimentations en conditions réelles, la prise en compte d'autres types de polluants, et le développement d'outils de modélisation et de dimensionnement adaptés à l'environnement urbain.

MOTS CLES :

- 1- Eaux de ruissèlements**
- 2- Filtre**
- 3- Géotextile**
- 4- Particules en suspensions**
- 5- Rétention**

ABSTRACT

The qualitative and quantitative management of rainwater is a major issue in urban and peri-urban areas, due to the risks of diffuse pollution and the constraints associated with climate change. This dissertation addresses this issue by studying the performance of a composite filtration system combining crushed sand and flax fiber geotextiles, a local bio-sourced material, to treat run-off water before it is discharged into vegetated structures such as swales or infiltration basins. Laboratory tests were carried out to assess the filter's ability to retain suspended particles, which carry pollutants. The results showed that the addition of geotextiles improves particle retention, helps homogenize flows and extends the filter's lifespan. This work highlights the potential of flax fibers in the design of simple, economical and sustainable solutions for stormwater management. It also opens up interesting prospects for experiments under real conditions, the inclusion of other types of pollutants and the development of modelling and design tools adapted to urban contexts.

KEY WORDS:

- 1- Filter**
- 2- Geotextile**
- 3- Retention**
- 4- Stream water**
- 5- Suspended particles**

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
BF	Bruit de fond
CDE	Convection-Dispersion Équation
DBO5	Demande biologique en oxygène sur 5 jours
DCO	Demande chimique en oxygène
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
LOMC	Laboratoire Ondes et Milieux Complexes
MES	Matières en suspension
MIM	Mobile Immobile
Minj	Masse injectée
Mdepr	Masse déposée réelle
Mdepth	Masse déposée théorique
Mrest	Masse restituée
NTU	Nephelometric Turbidity Units
NW	Non Woven
PES	Particules en suspension
PCB	Polychlorobiphényles
Tinj	Temps d'injection
UNSTIM	Université Nationale des Sciences , Technologies Ingénierie et Mathématiques
VP	Volume des pores
VW	Volumetric water

Table des matières

RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS.....	v
Table des matières	0
LISTE DES TABLEAUX	2
LISTE DES FIGURES.....	3
INTRODUCTION.....	4
I. PRESENTATION DU LABORATOIRE D’ACCEUIL	6
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	8
II.1 Les eaux pluviales	8
II.1.1 Définition.....	8
II.1.2 Pollution des eaux pluviales	8
II.1.3 Paramètres de mesure de pollutions des eaux pluviales.....	9
II.1.4 Procédés de traitement des eaux pluviales	10
II.1.5 Règlementation Française	11
II.2 Généralité sur la filtration.....	12
II.2.1 Filtration sur milieux poreux	12
II.2.2 Paramètres physiques des milieux poreux.....	13
II.3 Matériaux biosourcés	13
III. MATERIELS ET METHODES	15
III.1 Matériaux utilisés	15
III.1.1 Choix du milieu poreux	15
III.1.2 Particules argileuses en suspension	16
III.1.3 Géotextile de lin (NonWoven « NW »).....	18
III.1.4 Utilisation de l’intelligence artificiel.....	19
III.2 METHODES	19
III.2.1 Dispositif expérimental	19
III.3 Traceurs et méthode d’analyse	24
IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	24
IV.1 Analyse des données Expérimentales.....	24

IV.1.1	Teneur en eau.....	24
IV.1.2	Débit	26
IV.2	Etalonnages des dispositifs de détection	27
IV.2.1	Etalonnage du turbidimètre	27
IV.2.2	Etalonnage Spectrophotomètre UV- visible	27
IV.3	Expériences d'élution sur colonnes.....	28
IV.3.1	Injections instantanées.....	28
IV.3.2	Essais d'injection continue de fluorescéine.....	30
IV.4	Expériences de filtration.....	32
IV.4.1	Courbes de restitution.....	32
IV.4.2	Efficacité de filtration.....	34
IV.4.3	Profil de rétention.....	36
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		41
V. BIBLIOGRAPHIE		42
VI. ANNEXES		44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Paramètres physiques du sable utilisé	16
Tableau II: Paramètres physiques Kaolinite P300	17
Tableau III: Paramètres physiques géotextile NW (Abbar, 2018).....	19
Tableau IV: Bilan de masse du traçage de fluorescéine.....	29
Tableau V: récapitulatif des paramètres de modélisation MIM et CDE.....	30
Tableau VI: Récapitulatif de paramètres d'injection continu de fluorescéine sur colonnes	31
Tableau VII : Bilan de masse expériences d'injection de kaolinite.....	33
Tableau VIII: Rétention de kaolinite par le géotextile.....	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Distribution granulométrique du sable utilisé.....	16
Figure 2: Spectres XRD de la kaolinite utilisée dans les expériences. (Abbar et al., 2018)	18
Figure 3: Géotextile non tissé de lin (NW) fournit par l'entreprise Depestelle (Normandie, France)	18
Figure 4: Dispositif expérimental	20
Figure 5: Configurations étudiées : Sable seul, sable avec NW placé en haut, sable avec NW placé au milieu, sable avec NW placé en bas de la colonne	21
Figure 6 : Evolution de la teneur en eau dans les différentes configurations de colonnes pendant une injection continue de l'eau ou de la fluorescéine. (VW1 : capteur placé en haut ; VW2 : capteur placé au milieu ; VW3 : capteur placé en bas).....	25
Figure 7 : courbe de variation du débit pendant expériences	27
Figure 8 : courbes de restitutions de fluorescéine pour injection instantanée sur les colonnes.....	28
Figure 9 : courbes d'ajustements des expériences d'élution sur colonnes avec les deux modèles MIM et CDE	30
Figure 10: courbe de restitution d'injection continue du traceur.....	31
Figure 11 : Courbes de restitution de la kaolinite P300	32
Figure 12 : Courbes d'efficacité de filtration des colonnes.....	35
Figure 13 : Profil de rétention de la Kaolinite dans les différentes configurations de colonnes.....	37
Figure 14: Rétention globale du milieu	38
Figure 15: Effet de la position du géotextile	39
Figure 16: colonnes avant et après injection de kaolinite.....	40

INTRODUCTION

L'eau est une ressource vitale dont la préservation est devenue un enjeu majeur à l'échelle mondiale. Dans les zones urbaines et périurbaines, les eaux pluviales qui s'écoulent sur des surfaces imperméables sont souvent chargées en polluants, notamment en matières en suspension (MES). En l'absence de traitement, ces eaux contribuent fortement à la pollution diffuse : lorsqu'elles s'infiltrent ou sont rejetées dans les milieux naturels, elles peuvent altérer la qualité des sols, des nappes phréatiques et des écosystèmes aquatiques (Gromaire et al., 2001 ; Gasperi et al., 2012).

Dans ce contexte, maîtriser la qualité des eaux de ruissellement avant leur retour dans le cycle naturel constitue un enjeu environnemental, sanitaire et technique. Le développement de solutions de dépollution simples, efficaces et économiquement viables, notamment à base de matériaux biosourcés, apparaît comme une voie prometteuse (Dalahmeh et al., 2014 ; García et al., 2020). Plusieurs travaux ont déjà mis en évidence l'efficacité de dispositifs filtrants utilisant des fibres végétales en conditions saturées, que ce soit dans des filtres plantés ou des bassins de rétention (Bratieres et al., 2008).

En Normandie, cette problématique est particulièrement présente. Lors d'épisodes pluvieux intenses, les volumes d'eaux de ruissellement générés excèdent souvent les capacités des stations d'épuration (STEP), provoquant des rejets d'eaux polluées dans l'environnement (Abbar, 2018). D'où l'importance de développer des traitements alternatifs en amont des STEP afin d'atténuer leur surcharge.

Le présent travail s'inscrit dans la continuité des recherches menées par ABBAR (2018), dont la thèse de doctorat a permis de concevoir un dispositif de filtration à base de sable et de fibres végétales, efficace en conditions saturées. L'objectif du mémoire est d'évaluer la performance de ce type de filtre en régime **non saturé**, dans le but d'approcher davantage les conditions réelles de fonctionnement sur le terrain.

Deux hypothèses sont formulées pour guider ce travail expérimental :

- **Hypothèse 1** : l'ajout d'un géotextile dans la colonne améliore les performances globales du filtre composite en régime non saturé.
- **Hypothèse 2** : la position du géotextile dans la colonne influence la capacité du filtre à retenir les matières en suspension (MES).

Le mémoire est structuré comme suit : une première partie présente la revue de littérature sur les techniques de filtration et les matériaux utilisés. La seconde partie décrit la méthodologie expérimentale, notamment la conception du dispositif, les conditions de test et les paramètres mesurés. La troisième partie expose et analyse les résultats obtenus au regard des hypothèses posées. Enfin, la conclusion revient sur les principaux enseignements du travail et ouvre des perspectives pour la suite.

Face aux enjeux environnementaux liés à la gestion des eaux de ruissellement en milieu urbain et périurbain, le présent travail vise à contribuer au développement de solutions de filtration performantes, simples et respectueuses de l'environnement. Il s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs menés sur les filtres à base de sable et de fibres végétales en conditions

saturées, en se concentrant ici sur leur fonctionnement en **régime non saturé**, plus représentatif des conditions réelles d'infiltration sur le terrain.

❖ Objectif global

L'objectif global de cette étude est d'évaluer la performance de filtres composites constitués de sable et de fibres végétales en régime non saturé, dans le but d'optimiser le traitement des eaux pluviales chargées en matières en suspension (MES), notamment par l'intégration d'un géotextile naturel.

❖ Objectifs spécifiques

Pour atteindre cet objectif général, l'étude poursuit les objectifs spécifiques suivants :

- Évaluer l'effet de l'ajout d'un géotextile dans le filtre composite sur ses performances globales en régime non saturé, en particulier la rétention des MES.
- Analyser l'influence de la position du géotextile dans la colonne filtrante sur l'efficacité de piégeage des particules et sur le comportement hydraulique du filtre.
- Comparer les performances de différentes configurations de filtres composites, avec ou sans géotextile, afin d'identifier les agencements les plus efficaces en conditions de filtration non saturée.

I. PRESENTATION DU LABORATOIRE D'ACCEUIL

Le **Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC)** est une **Unité Mixte de Recherche (UMR 6294)** placée sous la tutelle conjointe du CNRS et de l'Université Le Havre Normandie. Créé en 2008 à la suite de la fusion du Laboratoire d'Acoustique Ultrasonore et d'Électronique (LAUE) et du Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences (LMPG), il est reconnu pour la qualité de ses travaux dans les domaines de l'ingénierie, de la physique et de l'environnement.

Le LOMC compte une centaine de membres, dont environ 42 chercheurs permanents, 32 doctorants, 10 post-doctorants et 12 personnels techniques et administratifs. Il accueille également chaque année de nombreux stagiaires de Master ainsi que des chercheurs internationaux.

Les activités de recherche du LOMC s'articulent autour de trois grands axes :

- Acoustique des matériaux et des structures (AMS),
- Génie civil, composites et environnement littoral (GCE),
- Instabilités, réactivité, énergie et hydrodynamique marine (NRGy).

Le laboratoire mène une recherche interdisciplinaire mêlant physique, mécanique, électronique, génie civil et sciences de la Terre, en combinant des approches expérimentales avancées, modélisations numériques et analyses théoriques. Il dispose de plateformes expérimentales uniques au niveau régional, telles que MECAFLUIDES, CAUSME et PRESEN, permettant des mesures de haute précision.

Impliqué dans le Labex EMC3, le LOMC contribue activement à l'innovation dans les domaines des matériaux, de l'énergie et de l'environnement. Son engagement dans la formation et la recherche en fait un acteur central du développement scientifique et technologique en Normandie.

Notre stage se déroule dans l'équipe Génie Civil, Composites, Environnement littoral (GCE) qui est composée de 15 enseignants chercheurs (UFR ST-IUT), d'un ingénieur de recherche, d'un ingénieur d'études appartenant aux deux sections du CNU (60 et 36) et d'un enseignant-chercheur membre associé au LOMC de l'INSA de Rouen.

Des approches terrain, expérimentales, théoriques et numériques sont développées au sein de cette équipe pluridisciplinaire.

Pour répondre aux attentes sociétales majeures dans le cadre de la gestion des territoires maritimes, de l'aménagement durable des ouvrages et de la valorisation des matériaux, l'équipe GCE développe des travaux de recherche sur :

- Matériaux composites
- Génie Civil
- Géosciences - Transport sédimentaire

L'équipe GCE est membre de la FR SCALE 3730 « Sciences Appliquées à l'Environnement » qui réunit 8 laboratoires normands. Elle participe régulièrement à plusieurs GDR (DUMBIO, MBS,...), des Projets Nationaux (PN Terre, PN ASIRI+) et internationaux (Programmes, Interreg, PeA).

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1 Les eaux pluviales

II.1.1 Définition

Les eaux pluviales désignent les eaux issues des précipitations atmosphériques (pluie, neige fondue, grêle) qui s'écoulent sur des surfaces naturelles ou artificielles après avoir atteint le sol ou un élément susceptible de les intercepter (toitures, chaussées, végétation, etc.). Une fois au contact du sol, ces eaux deviennent des eaux de ruissellement. Elles peuvent soit s'infiltrer naturellement, soit rejoindre les milieux aquatiques (cours d'eau, nappes phréatiques), soit être collectées par des réseaux pour un éventuel traitement ou un usage spécifique. Lorsqu'elles ruissellent sur des surfaces non polluées, les eaux pluviales peuvent être réutilisées à des fins non potables, telles que l'arrosage ou l'alimentation des chasses d'eau. En revanche, si elles traversent des surfaces potentiellement contaminées (routes, zones industrielles, toitures en matériaux sensibles...), elles peuvent se charger en polluants (hydrocarbures, métaux lourds, nutriments, etc.) et devenir nuisibles pour l'environnement et la santé humaine. La gestion durable des eaux pluviales vise donc à limiter les risques de pollution et d'inondation, à favoriser leur infiltration naturelle et, lorsque nécessaire, à assurer leur traitement avant rejet, conformément aux exigences du Code de l'environnement et de la Directive Cadre sur l'Eau.

II.1.2 Pollution des eaux pluviales

L'Homme est une partie intégrante des écosystèmes terrestres. Pour répondre à ses besoins sans cesse plus importants en termes alimentaire et sanitaire, il a synthétisé volontairement toutes sortes de molécules de plus en plus complexes, comme les médicaments à usage médical ou vétérinaire, les produits phytosanitaires, les plastifiants etc. Ces activités ont généré ou augmenté la présence naturelle d'autres contaminants, sans réelle maîtrise de leur gestion. Finalement, il a modifié les cycles naturels, comme celui de l'eau, en dégradant sa qualité et en cherchant à canaliser son écoulement. Des lors, on entend par substances polluantes pour l'eau celles qui rendent l'eau impropre à sa consommation ou qui dégradent certaines de ses propriétés (Bliefert et Perraud, 2001). Parmi ces composés, outre certains composés biologiquement dégradables comme les substances nutritives, on compte aussi de nombreux polluants difficilement voire pas dégradables, par exemple ceux qui contiennent des huiles minérales, des résidus de pesticides, des métaux ou des hydrocarbures halogénés. Dans le cas idéal, les déchets organiques se décomposent par auto épuration biologique jusqu'à minéralisation complète pour finir sous forme de substances inorganiques.

II.1.3 Paramètres de mesure de pollutions des eaux pluviales

Les eaux pluviales, en ruisselant sur diverses surfaces urbaines et industrielles, peuvent se charger en polluants avant d'atteindre les réseaux d'assainissement ou les milieux naturels. L'évaluation de leur qualité repose sur l'analyse de plusieurs paramètres physico-chimiques et microbiologiques, qui permettent de mesurer leur impact sur l'environnement et la santé humaine, ces paramètres sont les suivants :

❖ Les matières en suspension (MES)

Elles sont l'ensemble des particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée. Les matières en suspension (MES) dans les eaux de surface sont d'origine très variées ou produites par des facteurs naturels (érosion hybride des sols, production de plancton, décomposition de matière morte d'origine végétale ou animale...) et anthropiques (rejets d'eaux usées urbaines ou industrielles, effluents d'élevage...) leur nature, leur concentration et les polluants éventuels qu'elles contiennent ou transportent (hydrocarbures, HAP, PCB, éléments traces métalliques...), influencent la qualité de l'eau et perturbent la vie aquatique (obstacle à la fécondation des œufs colmatage des branchies etc) (MAES, Note technique) Des études ont montré que les MES sont responsables du transport des contaminants associés au ruissellement urbain (Berrouard, 2010).

❖ La demande biochimique en oxygène (DBO)

C'est la quantité d'oxygène à fournir nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques d'une eau par les micro-organismes du milieu. Ce paramètre traduit la consommation d'oxygène relative au phénomène d'autoépuration. On utilise généralement la DBO₅ comme indicateur de la quantité de pollution biodégradable contenue dans l'eau. Elle se mesure par l'oxygène consommée après 5 jours d'incubation dans l'obscurité de l'échantillon à 20°C.

❖ La demande chimique en oxygène (DCO)

C'est la quantité d'oxygène consommée, par l'ensemble des matières oxydables chimiquement contenues dans l'effluent, qu'elles soient biodégradables ou non. Le rapport DCO/DBO₅ donne une indication sur la biodégradabilité des effluents. Pour un rapport inférieur à 3, l'effluent est facilement biodégradable ; au-delà de 5, l'effluent est difficilement biodégradable.

❖ Les hydrocarbures totaux (Hc)

Le taux d'hydrocarbures (Hc) est la quantité d'hydrocarbures présente par litre d'eau. Ces polluants (essence, pétrole, mazout, huiles...), qui sont nocifs pour le milieu naturel et ses

écosystèmes, résultent de l'activité humaine elles proviennent généralement de l'entretien et du nettoyage d'installations de stockage et de distribution de carburant, de production et de distribution d'énergie et des activités de transport (station-service, fonds de cale des navires, etc.). Les déchets d'hydrocarbures peuvent également provenir d'une pollution accidentelle.

❖ Les métaux lourds

Les métaux lourds sont un groupe d'éléments métalliques ou semi-métalliques caractérisés par une densité élevée (généralement supérieure à 5 g/cm³) et une toxicité importante pour les organismes vivants, même à de faibles concentrations. Parmi les plus connus figurent le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le nickel (Ni) et le zinc (Zn).

Ces éléments peuvent s'accumuler dans les sols, les sédiments, les végétaux ou les tissus animaux, provoquant des effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement. Ils proviennent souvent de sources industrielles, agricoles ou urbaines, et sont couramment retrouvés dans les eaux usées, les eaux pluviales ou les lixiviats.

II.1.4 Procédés de traitement des eaux pluviales

Les changements climatiques ont amplifié la fréquence et l'intensité des pluies torrentielles, provoquant des phénomènes catastrophiques tels que l'érosion des sols, les inondations et les glissements de terrain. Parallèlement, l'urbanisation rapide a considérablement augmenté la part des surfaces imperméables (routes, toitures, parkings, etc.). Cette double pression rend la gestion des eaux pluviales en milieu urbain de plus en plus complexe, exposant les populations à des risques accrus d'inondation et de pollution des milieux aquatiques récepteurs. Les systèmes d'assainissement classiques, conçus pour des contextes hydrologiques désormais dépassés, peinent à répondre à ces nouveaux enjeux. Face à cette situation, des approches alternatives ont été développées pour compléter, voire remplacer les dispositifs traditionnels. Parmi elles figurent les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, qui constituent l'objet du présent travail. Ces solutions visent à gérer les eaux de ruissellement au plus près de leur point de chute, en favorisant leur infiltration, leur stockage temporaire ou leur évapotranspiration, plutôt que de les évacuer rapidement. Ainsi, elles permettent de réduire les volumes et les débits de pointe, de limiter la pollution transportée par les eaux de ruissellement et de contribuer, dans certains cas, à la recharge des nappes phréatiques.

Les études antérieures ont montré que ces ouvrages peuvent également jouer un rôle de traitement naturel des eaux pluviales, en retenant les matières en suspension et certains

polluants, selon leur conception et leurs caractéristiques spécifiques (Azzout et al, 1994 ; Abbar, 2018). Les techniques alternatives reposent essentiellement sur deux principes fondamentaux :

- La rétention et le stockage temporaire des eaux de ruissellement, permettant de ralentir les vitesses d'écoulement, de lisser les débits et d'éviter les surcharges des réseaux ;
- L'infiltration directe dans le sol, favorisant le retour de l'eau au cycle naturel, tout en participant à l'épuration partielle des eaux par filtration à travers les couches de sol.

Parmi les dispositifs les plus couramment utilisés, on peut citer les noues végétalisées, les tranchées d'infiltration, les chaussées réservoirs, les bassins de rétention/détention, ou encore les toitures végétalisées. Leur intégration dans le milieu urbain requiert une planification cohérente, ainsi qu'une adaptation au contexte local (climat, type de sol, densité urbaine, etc.).

II.1.5 Règlementation Française

En France, les normes relatives aux matières en suspension (MES) dans les eaux pluviales rejetées dans le milieu naturel varient en fonction des caractéristiques du rejet et des activités concernées. Voici les principales valeurs limites observées :

- ✧ Rejets d'eaux pluviales polluées (EPp) : Les valeurs limites de concentration en MES sont généralement fixées à 35 mg/L, avec un doublement toléré lors de prélèvements instantanés, soit jusqu'à 70 mg/L
- ✧ Objectifs qualitatifs de rejet : Les objectifs minimaux pour les eaux traitées sont :
 - MES < 30 mg/L
 - Hydrocarbures < 5 mg/L
- ✧ Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) : Les effluents non domestiques doivent respecter une limite de **600 mg/L** en MES totales avant rejet dans le réseau d'assainissement.

Ces normes de rejet des eaux pluviales sont encadrées par plusieurs arrêtés, tels que l'arrêté du 24 août 2017, qui modifie les prescriptions relatives aux rejets d'eaux pluviales, et l'arrêté du 21 novembre 2017, qui définit les prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement.

II.2 Généralité sur la filtration

La filtration est un procédé permettant de séparer les constituants d'un mélange qui possède une phase liquide et une phase solide au travers d'un milieu poreux. Le processus de filtration étudié ici sera la filtration granulaire sur lit de sable. La filtration sur milieux granulaires est une technique fondamentale et largement utilisée dans le traitement des eaux. Il s'agit d'un processus qui utilise un réservoir ou un récipient rempli de sable, de gravier ou d'autres matériaux granulaires pour éliminer les solides en suspension et les colloïdes des eaux. Cette méthode simple mais efficace joue un rôle crucial pour garantir la qualité et la sécurité de notre approvisionnement en eau.

II.2.1 Filtration sur milieux poreux

Les milieux poreux jouent un rôle essentiel dans les processus de filtration, que ce soit dans les domaines de l'environnement, du traitement des eaux, de la purification de l'air ou de l'industrie pharmaceutique. Ils sont définis comme des matériaux composés d'une matrice solide traversée par un réseau de pores, à travers lequel les fluides peuvent circuler. La structure de ce réseau conditionne les propriétés de transfert du matériau, notamment sa capacité à filtrer, retenir ou ralentir le passage des particules et des contaminants.

De nombreuses études ont mis en évidence l'efficacité de ces milieux dans la rétention des matières en suspension (MES). Par exemple, Kim et al. (2021) ont évalué les performances d'un système de filtration ascendant basé sur un média granulaire pour le traitement des eaux de ruissellement urbain. Leurs résultats ont confirmé l'intérêt des matériaux poreux, dont la structure et la porosité favorisent la capture des particules fines. D'autres recherches, comme celles de Zhang et al. (2012) et Deletic et al. (2008), ont également souligné l'efficacité des filtres à sable, des milieux granulaires ou des dispositifs de bio rétention pour réduire la pollution particulaire.

Dans cette même dynamique, Abbar (2018) a étudié en laboratoire l'influence de géotextiles en fibres de lin sur le transfert et la rétention de divers polluants dans des dispositifs de filtration des eaux de ruissellement, en conditions saturées. À l'aide d'une colonne horizontale en plexiglas (4,4 cm de diamètre, 41,5 cm de longueur), il a testé différentes configurations combinant du sable et jusqu'à trois nappes de géotextile. Ses résultats ont montré une amélioration notable de la rétention des particules en suspension (notamment la kaolinite), ainsi que des métaux lourds tels que le plomb, le cuivre et le zinc.

Dans la continuité de ces travaux, la présente étude vise à évaluer les performances d'un dispositif similaire, mais en régime non saturé, afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement sur le terrain. Pour cela, une colonne verticale de plus grande échelle (19,9 cm de diamètre, 32 cm de hauteur) a été mise en place. L'objectif est d'analyser l'effet de la position du géotextile dans la colonne sur la rétention des particules en suspension.

II.2.2 Paramètres physiques des milieux poreux

Dans le contexte de la filtration, un milieu poreux désigne un matériau constitué d'une structure solide contenant un réseau de pores interconnectés par lesquels un fluide peut s'écouler. La maîtrise des paramètres physiques de ce milieu est essentielle pour modéliser et optimiser les performances de filtration. Parmi ces paramètres, on distingue principalement :

- La porosité, qui exprime la fraction du volume total occupée par les vides. Elle influence directement la capacité du fluide à circuler dans le matériau.
- La perméabilité, qui mesure la facilité avec laquelle un fluide traverse le milieu sous l'effet d'un gradient de pression.
- La taille et la distribution des pores, qui conditionnent à la fois la facilité avec laquelle un fluide traverse le milieu, la rétention des particules et la perte de charge

L'analyse de ces paramètres permet d'évaluer les performances de filtration en termes d'efficacité, de débit et de colmatage, et guide le choix des matériaux en fonction des applications spécifiques (traitement de l'eau, purification de l'air, procédés industriels, etc.).

II.3 Matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés sont parmi les premiers matériaux utilisés par l'homme dans l'histoire, même si leur utilisation a évolué au fil du temps. Ils connaissent ensuite un déclin progressif, remplacés par d'autres matériaux modernes aux propriétés innovantes et techniquement plus performantes. Ces matériaux réapparaissent dans le domaine de la construction à partir des années 1970, suite à la sensibilisation croissante aux enjeux environnementaux et à un besoin marqué de retour au naturel et de recherche de durabilité. La recherche s'oriente alors de nouveau vers ces matériaux anciens, en les « redécouvrant » sous forme d'innovations adaptées aux exigences du secteur du bâtiment (Amoura, 2021). Par définition, les matériaux biosourcés désignent des matériaux issus de la biomasse, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Employés dans une logique de durabilité et de réduction de l'empreinte carbone, ils couvrent aujourd'hui un large éventail de produits et trouvent des

applications variées, notamment dans les domaines du bâtiment, de la construction, de l'isolation, ou encore de l'aménagement paysager. Parmi ces matériaux, les géotextiles biosourcés suscitent un intérêt croissant dans les milieux scientifiques et techniques. En effet, un géotextile est un matériau textile, généralement non tissé ou tissé, utilisé dans les ouvrages de génie civil, d'assainissement, d'hydraulique ou d'aménagement paysager pour ses propriétés mécaniques et hydrauliques. Placé dans le sol ou entre différentes couches de matériaux, il remplit plusieurs fonctions : filtration, drainage, renforcement, protection ou séparation. Il peut être fabriqué à partir de fibres synthétiques (polypropylène, polyester) ou de fibres naturelles (chanvre, lin, jute), selon les objectifs recherchés (durabilité, biodégradabilité, impact environnemental, etc.). Plusieurs travaux antérieurs ont mis en évidence leur potentiel dans des applications telles que le drainage, la stabilisation des sols ou la filtration. Des études ont notamment porté sur l'utilisation de fibres naturelles comme le jute, le coco ou le chanvre, montrant des performances comparables, voire supérieures, à certains géotextiles synthétiques dans des contextes spécifiques (Tian et al., 2020). Les recherches ont mis en avant leur bonne perméabilité, leur capacité à piéger les particules en suspension, ainsi que leur biodégradabilité, avantageuse dans des dispositifs temporaires ou intégrés à des milieux naturels (Mazzarella et D'Ayala, 2012). Dans le cadre de cette étude, le matériau biosourcé retenu pour la filtration des eaux pluviales est un géotextile non tissé à partir de fibres de lin, cultivé et transformé en Normandie. Notre choix d'utiliser le géotextile de lin s'inscrit dans une démarche écoresponsable, favorisant l'utilisation de ressources locales, renouvelables et à faible impact environnemental. Le lin utilisé provient des sous-produits de la production textile : il s'agit de fibres de moindre qualité, inexploitable pour la confection de vêtements, mais parfaitement adaptées pour des applications techniques telles que la stabilisation des sols et la filtration. L'utilisation de ce co-produit issu de la filière du lin permet non seulement de valoriser une ressource existante mais aussi de réduire les coûts de fabrication. La Normandie, étant la première région productrice de lin dans le monde, offre une disponibilité locale de la matière première, ce qui limite les coûts logistiques tout en soutenant la filière agricole régionale. De plus, grâce à sa structure poreuse et à ses bonnes propriétés mécaniques et hydrauliques, le géotextile en lin représente une alternative durable, économique et performante aux matériaux synthétiques habituellement employés pour la filtration. Il permet ainsi d'allier efficacité technique, respect de l'environnement et viabilité économique.

III. MATERIELS ET METHODES

Cette partie présente les matériels, les matériaux et les équipements utilisés, le dispositif expérimental mis en place ainsi que la méthodologie adoptée pour évaluer les performances du système de filtration en conditions non saturées.

III.1 Matériaux utilisés

III.1.1 Choix du milieu poreux

Compte tenu de la complexité des processus impliqués dans la filtration des particules solides à travers des milieux poreux, le choix du matériau constituant ce milieu repose sur plusieurs critères. Ces critères visent à faciliter l'analyse des paramètres influençant les mécanismes de transport. Le matériau sélectionné doit ainsi être :

- Facile à manipuler et représentatif du milieu naturel étudié ;
- Propre (sans risque d'érosion de particules susceptibles de perturber le signal mesuré à la sortie);
- Chimiquement stable dans son ensemble ;
- Non déformable (absence de gonflement ou de retrait).

Le milieu poreux utilisé dans cette étude est constitué de sable acheté chez Point P (au Havre), dont la granulométrie se situe entre **630 μm et 4000 μm** . Ce sable a été sélectionné afin d'être conforme aux caractéristiques exigées par le DTU 64.1 (Document Technique Unifié relatif aux systèmes d'assainissement autonome – Norme Française, AFNOR, FA139464-1, 2007). Il s'agit du même sable que celui utilisé dans les travaux de thèse de Abbar (2018). Ce choix permet de garantir la comparabilité des résultats et d'assurer une certaine cohérence expérimentale. Avant son utilisation, le sable a été soigneusement lavé à l'eau, puis séché en étuve pendant 24 heures à une température de 105°C. La distribution granulométrique a été ensuite déterminée par tamisage . La figure 1 présente la courbe granulométrique du sable utilisé. La granulométrie du sable sélectionné est quasi similaire au sable utilisé par Abbar (2018). Le potentiel zêta du sable, déterminé à l'aide du zétamètre zeta CAD (CAD Instruments), est de **- 25,3 ($\pm$ 2,6) mV**. Une diffraction des rayons X à grand angle a été réalisée sur le sable nettoyé en mode poudre à l'aide d'un diffractomètre Panalytical X'pert équipé d'une anode $\text{CoK}\alpha$ ($\lambda = 1,7903 \text{ \AA}$) alimentée à 40 kV et 40 mA. Il a été constaté que le sable était composé de **71 % de quartz, 22 % d'aragonite et 7 % de calcite** (Abbar et al., 2018). Le tableaux 1 récapitule les paramètres principaux du sable utilisé.

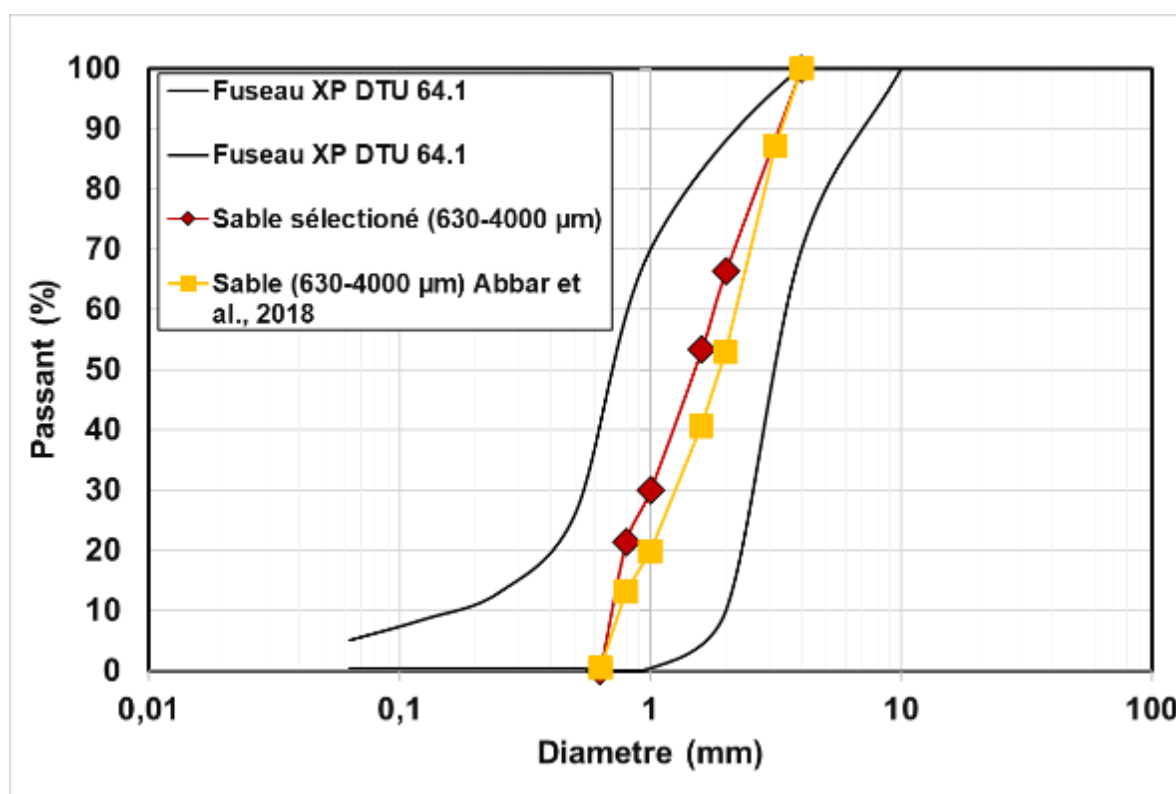


Figure 1: Distribution granulométrique du sable utilisé.

Tableau I: Paramètres physiques du sable utilisé

Paramètres	Valeurs
Granulométrie	600-4000 µm
Porosité moyenne (%)	0,38 (±0,004)
Conductivité Hydraulique (m/s)	$5,6 \cdot 10^{-3}$
Potentiel Zeta (mV)	-25,36 (±1,4) (Abbar, 2018)

III.1.2 Particules argileuses en suspension

Lors du ruissellement des eaux pluviales sur les surfaces naturelles ou urbaines, l'eau se charge de diverses particules solides, principalement constituées de matières en suspension. Parmi celles-ci, les particules argileuses occupent une place importante en raison de leur petite taille, de leur grande surface spécifique et de leur forte stabilité en suspension. Ces matières, difficiles à sédimenter, influencent considérablement la qualité de l'eau et les performances des dispositifs de filtration. Les particules argileuses se caractérisent par leur capacité à rester en

suspension sur de longues périodes, du fait de leur faible taille et de leurs propriétés colloïdales. Elles peuvent transporter des contaminants, tels que des métaux lourds ou des polluants organiques, et jouer ainsi un rôle majeur dans la pollution diffuse des eaux souterraines et des milieux aquatiques.

Dans le cadre de cette étude, afin de simuler une eau de pluie chargée de matières en suspension, notre choix s'est porté sur la kaolinite, et plus précisément sur la **kaolinite P300**. Ce matériau est un minéral argileux naturel, constitué majoritairement de silicate d'aluminium hydraté, réputé pour sa stabilité chimique, sa granulométrie fine et son comportement représentatif des argiles fréquemment retrouvées dans les eaux de ruissellement. Le choix de la kaolinite P300 permet de disposer d'une suspension homogène et reproductible, adaptée aux essais de filtration tout en restant représentative des conditions réelles de pollution par les matières fines. Les principaux paramètres physiques de la kaolinite utilisée sont regroupés dans le tableau 2. Une diffraction des rayons X à grand angle a été réalisée sur les particules de kaolinite à l'aide d'un diffractomètre Panalytical X'pert équipé d'une anode $\text{CoK}\alpha$ ($\lambda = 1,7903 \text{ \AA}$) alimentée à 40 kV et 40 mA. Il a été constaté que la kaolinite utilisée était composée de **82,62 % de kaolinite, de 17,25 % de quartz et de traces de muscovite et de calcite (< 1 %)** (Fig. 2).

Tableau II: Paramètres physiques Kaolinite P300

Paramètres	Valeurs
Granulométrie (μm)	1,7-40
D₅₀ (μm)	11
Surface spécifique (m^2/g)	28
Potentiel Zeta (mV)	-35,6 ($\pm 2,6$)

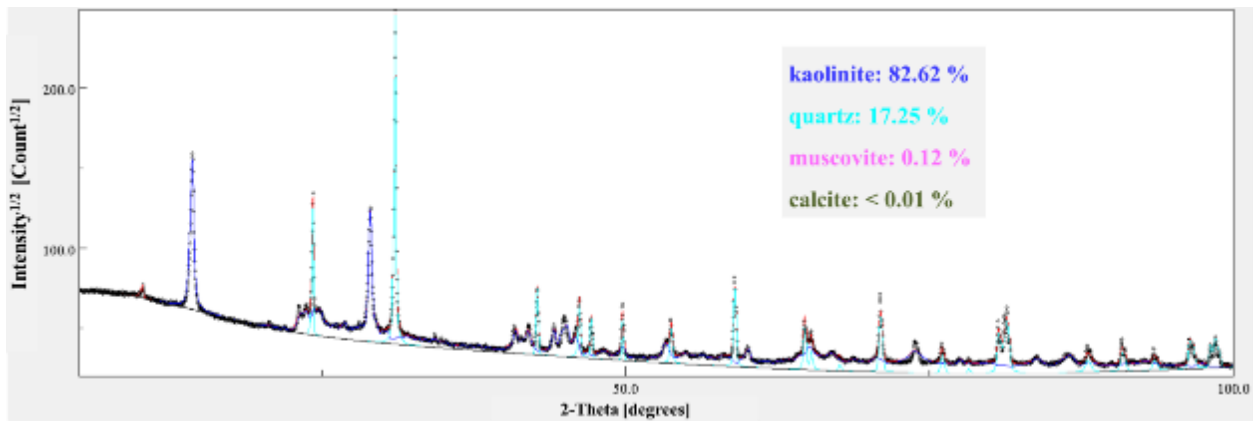


Figure 2: Spectres XRD de la kaolinite utilisée dans les expériences. (Abbar et al., 2018)

III.1.3 Géotextile de lin (NonWoven « NW »)

Le Géotextile utilisé dans les expériences de filtration est un non tissé (NW) fabriqué à partir de sous-produits de fibres de lin par l'entreprise Depestelle en Normandie (Fig. 3). Il est composé de longues fibres de lin dont le diamètre est compris entre **10 et 15 μm** . Ce géotextile présente une forte **porosité (86.17 %)** et une bonne conductivité hydraulique, ce qui permet à l'eau de circuler facilement tout en retenant les particules en suspension. Sa perméabilité est presque équivalente à celle du sable, ce qui évite les risques d'engorgement tout en maintenant un bon écoulement de l'eau. Le tableau 3 regroupe les paramètres physiques géotextile NW utilisé.



Figure 3: Géotextile non tissé de lin (NW) fournit par l'entreprise Depestelle (Normandie, France)

Tableau III: Paramètres physiques géotextile NW (Abbar, 2018)

Paramètres	Valeurs
Épaisseur (mm)	5
Masse surfacique (g/m ²)	479
Porosité (%)	86,17
Densité des fibres	1,5
Densité de géotextile	0,2
Conductivité Hydraulique (m/s)	$3,75 \cdot 10^{-3}$
Diamètre des fibres (µm)	10-15
Diamètre moyen des pores (µm)	110
Potentiel Zeta (mV)	-10

III.1.4 Utilisation de l'intelligence artificielle

Dans le cadre de la rédaction de notre mémoire, nous avons fait appel à des outils d'intelligence artificielle de manière ponctuelle pour améliorer la formulation des sections résumé et d'analyse des résultats. Ces outils ont aidé à clarifier certaines phrases et à alléger notre style d'écriture, tout en préservant le fond et l'intégrité du contenu scientifique. Chaque suggestion a été soigneusement relue et ajustée pour garantir la rigueur et la fidélité des propos par rapport aux données analysées

III.2 METHODES

III.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Fig. 4) utilisé dans cette étude est constitué d'une colonne en plexiglas d'un diamètre intérieur de **19,9 cm** et d'une longueur de **28,5 cm**. La colonne est alimentée par deux réservoirs ; l'un rempli d'eau claire et l'autre contenant une solution de traceur dissous (fluorescéine) ou de MES. Ces réservoirs sont placés en amont et reliés par une vanne à deux voies ; l'une permettant le passage de l'eau et l'autre de la solution de traceur dissous ou de MES. Une pompe péristaltique (Cole-Parmer Masterflex), équipée d'un débitmètre intégré, assure un débit constant lors de chaque essai d'injection. Pour chaque essai de filtration, l'effluent sortant de la colonne a été passé dans un turbidimètre à flux continu (Kobold Instruments) afin d'enregistrer les valeurs de turbidité en unités de turbidité

néphélogétries (NTU). Les concentrations en particules dans l'effluent ont été déterminées à l'aide de corrélations établies entre les concentrations de particules en suspension mesurées dans l'eau et les valeurs en NTU fournies par le système de détection. Les concentrations du traceur « fluorescéine » ont été déterminées à travers l'analyse des effluents par spectrophotométrie UV-Visible disponible au LOMC. Des calibrations de l'appareil sont nécessaires afin de convertir les absorbances mesurées en concentration. La colonne est équipée de trois capteurs de teneur en eau (**Teros 12**) de Campbell scientifique placés respectivement **au-dessus (à 10 cm du point d'injection), au milieu (à 18 cm) et en bas (à 25 cm)** de la colonne, permettant de suivre en continu les variations de teneur en eau le long du dispositif de filtration. Ces trois capteurs sont reliés à une centrale de mesure type **CR350** de Campbell Scientifique qui permet d'enregistrer les variations de teneur en eau dans le sable chaque minute. Un simulateur de pluie est installé au sommet de la colonne pour reproduire des conditions d'infiltration réalistes, en assurant une répartition homogène de l'eau sur toute la surface du milieu poreux. À la sortie du milieu, une grille à maille légèrement inférieure à la taille des grains de sable est mise en place afin de prévenir l'entraînement de ce dernier.

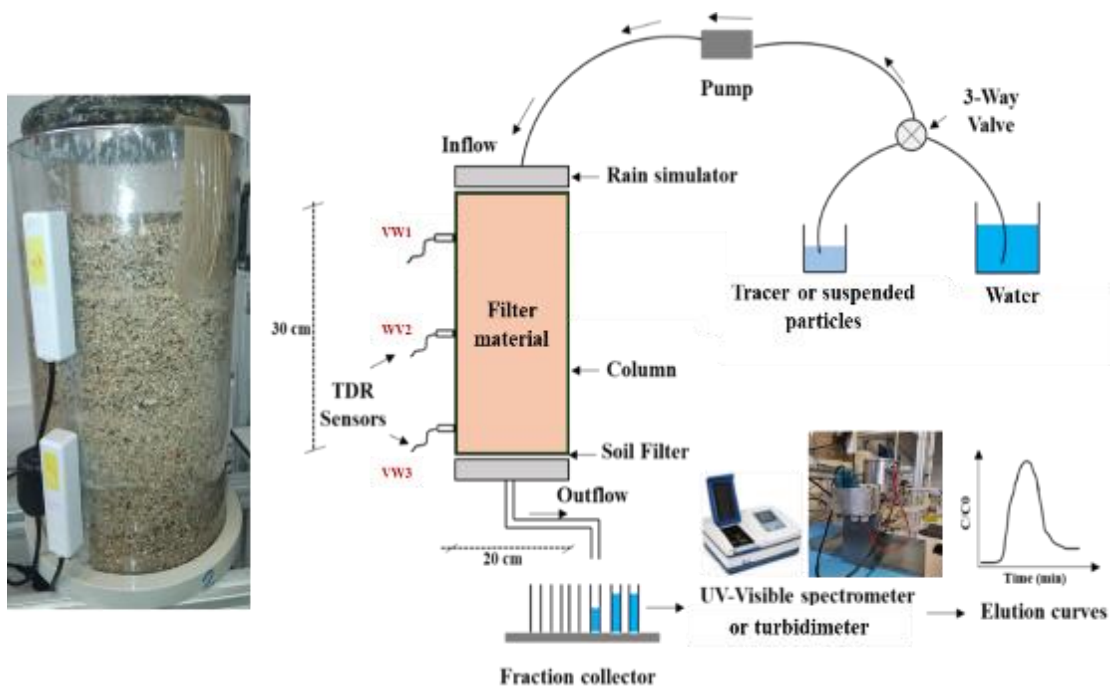


Figure 4: Dispositif expérimental

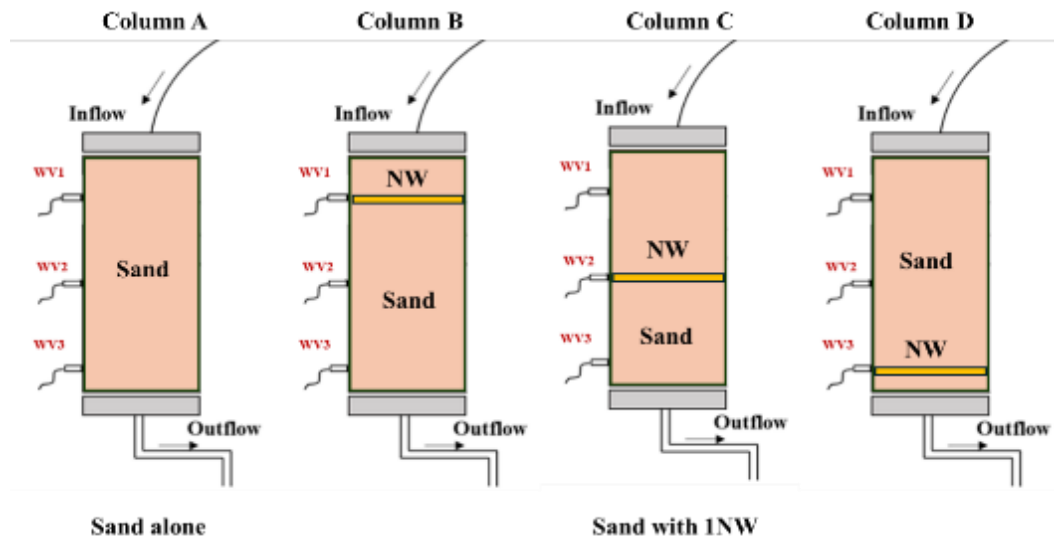


Figure 5: Configurations étudiées : Sable seul, sable avec NW placé en haut, sable avec NW placé au milieu, sable avec NW placé en bas de la colonne

Pour évaluer l'efficacité épuratoire du dispositif avec et sans NW et d'étudier l'effet de la position du géotextile, des essais de filtration ont été réalisées sur quatre configurations de filtre (Fig. 5)

En sortie de colonne, la concentration en particules en suspension est mesurée en continu à l'aide du turbidimètre. A l'issue de chaque expérience de filtrations, une mesure de la distribution spatiale des particules retenues dans le milieu poreux est réalisée de la manière suivante. La colonne est divisée en 7 tranches de 4 cm de hauteur. Chaque tranche de sable est prélevée soigneusement, séchée et pesée. Elle est ensuite lavée à l'eau sur un tamis de 200 μm , permettant ainsi de libérer les particules fines du sable. Ces derniers sont ensuite séchés à nouveau et pesés. La masse des particules retenues dans chaque tranche est calculée par différence entre les masses mesurées avant et après lavage. Un bilan massique global est réalisé pour chaque essai suivant la relation

$$\text{Masse de PES injectée} = \text{Masse de PES retenues} + \text{Masse de PES restituées} \quad (1)$$

La masse de particules injectée, la masse restituée ainsi que le taux de restitution sont calculées comme suit :

$$m_i = C_0 \times V_i$$

$$mR = Q \int_0^{\infty} c(t) \cdot dt = Q \times \sum [c(t) \times \Delta t] \quad (2)$$

$$R(\%) = 100 \times \frac{mR}{mi}$$

Avec :

mi : masse de particules injectée [g]

mR : masse restituée [g] ;

Q : débit observé à la sortie de la colonne [cm³/min] ;

c(t) : concentration mesurée à un temps t [mg/L] ;

Δt : différence de temps [min] ; **mi** : masse initiale [mg] ;

C0 : concentration de la solution injectée [mg/L] ;

Vi : volume injecté [L] ;

R : pourcentage de masse récupérée [-].

La masse totale déposée dans le milieu filtrant est obtenue en sommant les masses déposées dans les différentes tranches du milieu.

La même méthode a été utilisée pour quantifier les particules retenues dans les différentes configurations expérimentales.

Afin de caractériser le transfert des particules en suspension (PES) à travers le dispositif de filtration (composite sable avec et sans géotextile de lin) des éluions sur colonne sont réalisées en conditions non saturée. Chaque expérience de filtration des PES a été précédé d'un traçage avec la fluorescéine (en trois répétitions).

Les données expérimentales de traçage (Fluorescéine) sont ajustées en utilisant le logiciel STANMOD afin d'estimer les paramètres de transport en utilisant deux modèles à des fins de comparaisons : **l'Équation de Convection Dispersion « CDE »** (Equation 3) et le **Modèle eau Mobile-eau Immobile « MIM »** (Equation 4 et 5). L'Équation de Convection Dispersion est couramment utilisée pour décrire le mouvement des solutés dans les milieux poreux. Elle est utilisée dans des environnements considérés comme idéaux, homogènes et isotropes, et lorsqu'il s'agit d'un écoulement unidimensionnel et régulier (UE Transport des polluant - J. Bodin, 2022). Le modèle MIM est utilisée pour représenter le trajet de l'eau quand elle est répartie dans une double-porosité qui entraîne un hors-équilibre physique.

Modèle CDE

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3) \quad \text{avec} \quad D = \alpha u + Dm \approx \alpha u \quad (\text{si } u > 0,1 \text{ m/j})$$

D : coefficient de dispersion [cm²/min] ; **α** : dispersivité du sol [cm] ; **u** : vitesse réelle [cm/min];

Dm : Diffusion moléculaire [cm²/min].

Modèle MIM

Flux dans l'eau mobile :

$$\beta R \frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - \frac{\partial C_m}{\partial x} - \omega(C_m - C_{im}) - \mu_m.C_m + \gamma_m(x) \quad (4)$$

Flux dans l'eau immobile :

$$(1 - \beta)R \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \omega(C_m - C_{im}) - \mu_{im}.C_{im} + \gamma_{im}(x) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\theta_m}{\theta} \quad ; \quad \omega = \frac{\alpha L}{\theta u} \quad ; \quad R = 1 + \frac{\rho.Kd}{ns}$$

Avec :

C_m : concentration du soluté où l'eau est mobile [mg/L] ;

C_{im} : concentration du soluté où l'eau est immobile [mg/L] ;

β : coefficient de partition de l'eau mobile ;

ω : coefficient de transfert de masse adimensionné,

P : le nombre de Péclet [-] ;

θ_m : teneur en eau matricielle [-] ;

θ : teneur en eau [-] ;

L : longueur de la colonne [cm] ;

α : terme d'échange [min⁻¹] ;

ρ [kg/m³] densité de l'aquifère,

K_d [m³/kg] est le coefficient de partage des réactions de sorptions,

ns : porosité de l'aquifère accessible aux phénomènes de sorption [-]

III.3 Traceurs et méthode d'analyse

Afin de caractériser les mécanismes d'écoulement et de transfert au sein de la colonne de filtration en régime non saturé, l'utilisation d'un traceur dissous est indispensable. Dans cette étude, la fluorescéine a été choisie en raison de ses propriétés de forte solubilité dans l'eau, de sa bonne stabilité chimique et de sa faible adsorption sur les surfaces minérales. Elle présente également un maximum d'absorption à **490 nm**, ce qui permet une détection simple et fiable par spectrophotométrie UV-visible.

La concentration initiale des solutions injectées est de 0,05 g/L. Deux modes d'injection ont été utilisés :

- ✧ Des injections instantanées d'un volume de 300 ml, permettant de tracer la dynamique de l'écoulement sous la forme d'une courbe de restitution nette et courte.
- ✧ Une injection continue de 132 L de solution, destinée à évaluer le comportement du système à l'échelle d'une injection prolongée, proche des conditions réelles de ruissellement pluvial.

Des prélèvements à la sortie de la colonne ont été effectués chaque minute, afin de suivre l'évolution temporelle de la concentration du traceur. Les échantillons ont ensuite été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible, en mesurant l'absorbance à une longueur d'onde de 490 nm, correspondant au maximum d'absorption de la fluorescéine. Cette mesure d'absorbance est convertie en concentration réelle en s'appuyant sur un coefficient d'étalonnage déterminé en amont.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Analyse des données Expérimentales

IV.1.1 Teneur en eau

La vérification d'un régime permanent lors des éluions de MES et du traceur dissous a été effectuée en suivant l'évolution de la teneur en eau à différentes profondeurs dans la colonne (en haut, au milieu et en bas) et le débit de sortie de la colonne. L'évolution de la teneur en eau, aux différentes profondeurs et pour les différentes configurations de filtre est donnée sur la figure 6.

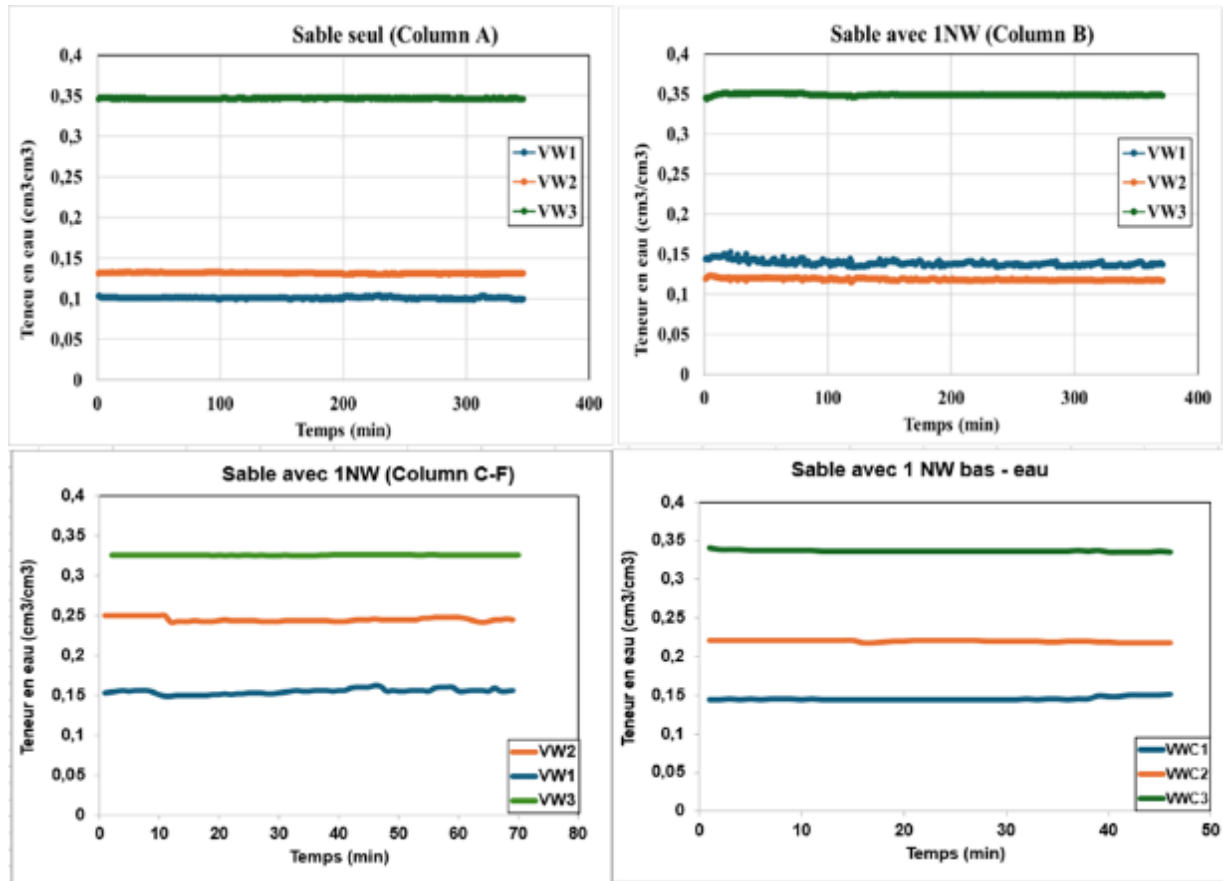


Figure 6 : Evolution de la teneur en eau dans les différentes configurations de colonnes pendant une injection continue de l'eau ou de la fluorescéine. (VW1 : capteur placé en haut ; VW2 : capteur placé au milieu ; VW3 : capteur placé en bas)

Pour les essais de traçage réalisés avec la fluorescéine et l'eau (Fig. 6) à travers le sable seul, le teneur en eau varie en fonction de la profondeur (avec un ordre de $\mathbf{VW3} > \mathbf{VW2} > \mathbf{VW1}$) : environ $\mathbf{0,1\ cm^3/cm^3}$ en haut (VW1), $\mathbf{0,13\ cm^3/cm^3}$ au milieu (VW2) et à $\mathbf{0,35\ cm^3/cm^3}$ en bas (VW3) de la colonne. Cette variation de teneur en eau en profondeur du sable est liée principalement à la gravité, cependant les valeurs de teneurs en eau sont très stables dans le temps. Cela donne une idée sur la stabilité des conditions physicochimiques pendant l'expérience de traçage avec la fluorescéine. Pour l'essai de traçage à travers la colonne sable + 1 NW placé en haut (au niveau du capteur VW1), nous avons observés des valeurs de teneur en eau en VW2 et VW3 similaires au cas du sable seul, avec $\mathbf{0,13\ cm^3/cm^3}$ et $\mathbf{0,35\ cm^3/cm^3}$ respectivement, cependant la valeur de teneur en eau en amont (VW1) est élevée : $\mathbf{0,15\ cm^3/cm^3}$ (avec un ordre de $\mathbf{VW3} > \mathbf{VW1} > \mathbf{VW2}$). Pour l'essai de traçage réalisé avec un géotextile placé au milieu de la colonne (au niveau du capteur VW2), la répartition de la teneur en eau suit

toujours l'ordre $VW3 > VW2 > VW1$. Toutefois, on observe une augmentation des valeurs de teneur en eau aux niveaux VW1 (on passe de $0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ pour le sable seul à $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) et VW2 (on passe de $0,13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ pour le sable seul à $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)³, tandis que VW3 reste stable à $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ et similaire à celle mesurée pour le sable seul. Ces résultats montrent que la présence du géotextile au milieu de la colonne favorise une légère rétention d'eau à l'amont et à l'interface du géotextile.

Enfin, pour l'essai de traçage avec le géotextile placé en bas de la colonne (au niveau du capteur VW3), la même hiérarchie des teneurs en eau ($VW3 > VW2 > VW1$) est observée. On note également une augmentation des teneurs en eau aux niveaux VW1 et VW2, qui atteignent respectivement $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ et $0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, tandis que la teneur en eau en VW3 reste élevée à $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Cette disposition du géotextile en bas de la colonne semble donc favoriser une augmentation de la teneur en eau dans les zones amont tandis que le VW3 reste stable car proche de la saturation.

Ces observations montrent aussi que l'ajout de géotextile modifie les profils d'humidité le long de la colonne. On remarque une plus grande accumulation d'eau au niveau du géotextile, ainsi que dans les zones situées au-dessus. Cette augmentation de la rétention est due à la redistribution locale du flux, causée par la présence du géotextile, qui ralentit l'écoulement et favorise une meilleure humidification du milieu. Ce phénomène a été documenté dans les travaux d'Abbar (2018), qui cite les recherches de Lamy et al. (2013), indiquant que les géotextiles permettent une homogénéisation locale de l'écoulement en réduisant les chemins préférentiels, ce qui entraîne une redistribution du flux d'eau et des particules dans les pores du milieu filtrant.

IV.1.2 Débit

La courbe de variation du débit (fig.7) mesuré au cours de l'expérience montre un comportement globalement stable, sans fluctuations significatives. Cette stabilité traduit le maintien de conditions hydrauliques constantes tout au long de l'essai. En effet, cela indique que le système expérimental est bien maîtrisé et que les paramètres tels que la pression appliquée ou encore l'état hydrique du matériau filtrant restent inchangés. Ainsi, cette stabilité du débit constitue un indicateur pertinent de la régularité des conditions hydrauliques au sein de la colonne de filtration pendant toute la durée de l'essai.

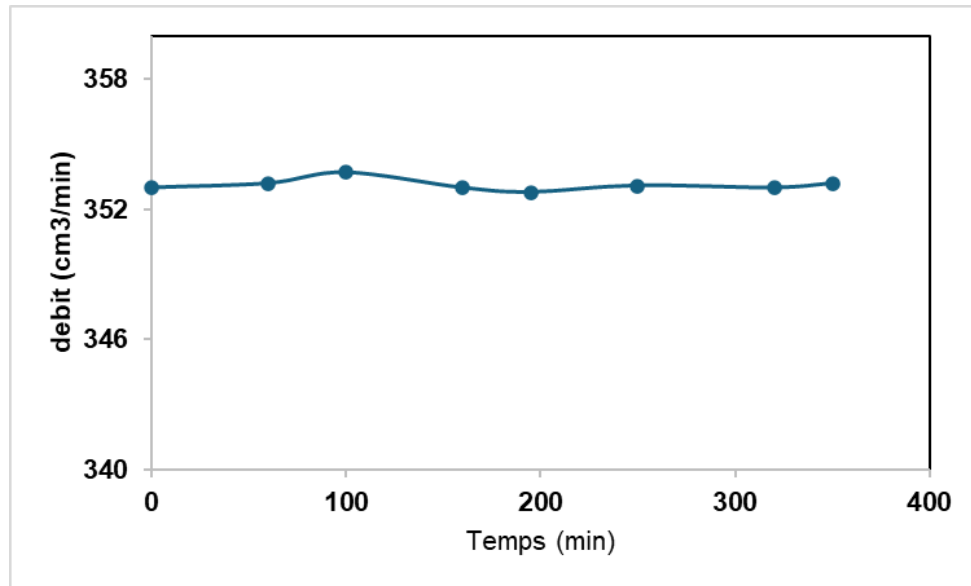


Figure 7 : courbe de variation du débit pendant expériences

IV.2 Etalonnages des dispositifs de détection

IV.2.1 Etalonnage du turbidimètre

L'étalonnage du turbidimètre a été réalisé en préparant des solutions étalons de kaolinite aux concentrations suivantes : 0,2 g/L, 0,5 g/L, 0,8 g/L, 1 g/L et 1,5 g/L. Chaque solution, d'un volume d'1 L, a été passée dans le turbidimètre et la valeur de turbidité affichée a été relevée. Les résultats ont permis de tracer la droite d'étalonnage reliant la concentration de particules à la turbidité mesurée (Voir annexe 1), dont la pente est de **0,0009** et le coefficient de détermination (R^2) atteint 0,9803.

IV.2.2 Etalonnage Spectrophotomètre UV- visible

L'étalonnage a été réalisé à partir d'une série de solutions étalons de kaolinite, préparées avec des concentrations allant de 0,003 g/L à 0,06 g/L (0,003 ; 0,005 ; 0,008 ; 0,01 ; 0,015 ; 0,02 ; 0,025). Pour chaque solution, l'absorbance a été mesurée à 490 nm et une courbe d'étalonnage a été tracée en représentant la concentration en fonction de l'absorbance. Les résultats ont permis de tracer la droite d'étalonnage, dont la pente est de **0,0131** et le coefficient de détermination (R^2) atteint 0,9921. Ce coefficient permet de convertir les mesures d'absorbance des échantillons en concentrations réelles de traceur afin de reconstituer les courbes de restitution et de quantifier les phénomènes de dispersion, de piégeage et de rétention dans la colonne filtrante. (Voir annexe 2)

IV.3 Expériences d'élution sur colonnes

IV.3.1 Injections instantanées

Des essais de traçage avec la fluorescéine ont été réalisés sur toutes les configurations de colonne afin de modéliser l'écoulement et d'obtenir les paramètres de transport tels que le coefficient de dispersion, la dispersivité, la vitesse réelle d'écoulement et la diffusion moléculaire. Chaque traçage a été effectué avec un même débit de 350 cm³/min et la même quantité de traceur a été injectée, soit 300 ml à une concentration de 0,05 g/l. La durée de chaque traçage est de 16 minutes. Les courbes de restitution sont tracées pour les différents essais (Fig.10). Un bilan de masse est effectué pour chaque essai (Tab. IV)

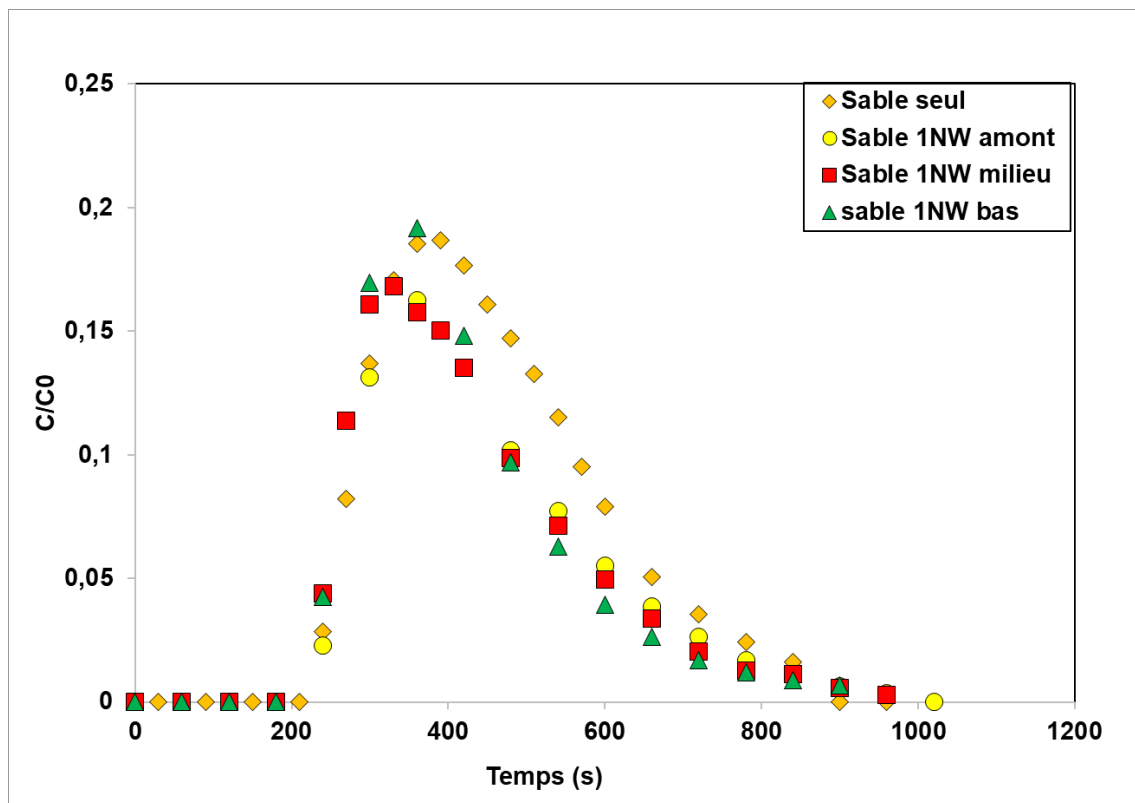


Figure 8 : courbes de restitutions de fluorescéine pour injection instantanée sur les colonnes

Sur la figure 10, on observe un léger rétrécissement des courbes avec la présence du géotextile, Cela signifie que l'introduction du géotextile modifie certainement les propriétés hydrodynamiques du milieu filtrant. Cependant ces modifications ne sont pas suffisantes pour entrainer des changements perceptibles des paramètres de transport (comme la vitesse ou la

dispersion) qui conservent des valeurs proches de celles mesurées dans la configuration sans géotextile (Tableau IV).

Tableau IV: Bilan de masse du traçage de fluorescéine

FLUOREISCEINE								
Essais	C0(g /l)	Vinj (l)	Masse Inj (g)	Q(Cm3/ min)	Mrest (g)	Mdepth (g)	Tr (%)	ERREUR (%)
Sable seul	0,05	0,3	0,015	350	0,0169	-0,0019	112,6 7	12,67
Sable+1NW en haut	0,05	0,3	0,015	350	0,014	0,001	93,33	-6,67
Sable+1NWau milieu	0,05	0,3	0,015	350	0,0137	0,0013	91,33	-8,67
Sable+1NW En bas	0,05	0,3	0,015	350	0,013	0,002	86,67	-13,33

La modélisation des données expérimentales permet de déterminer les paramètres de transport, à savoir le coefficient de dispersion total (D), le coefficient de dispersion du matériau (α) et la vitesse d'advection (u). Pour ce faire, le logiciel **STANMOD** est utilisé, avec la définition de paramètres initiaux. Deux modèles sont testés : le modèle de dispersion-convection (CDE) et le modèle à double domaine de porosité mobile-immobile (MIM). Ces modèles produisent des résultats de traçage différents. Toutefois, le modèle MIM présente une meilleure adéquation aux conditions expérimentales, ce qui est confirmé graphiquement sur la figure 11, où on observe une très bonne corrélation entre courbes expérimentales et courbes simulées avec des coefficients de corrélation R^2 très élevés (Tab.V). Le modèle MIM est plus adéquat ici car c'est un modèle de transport de soluté dans les milieux poreux plus réaliste que le modèle CDE car il prend en compte l'hétérogénéité du milieu.

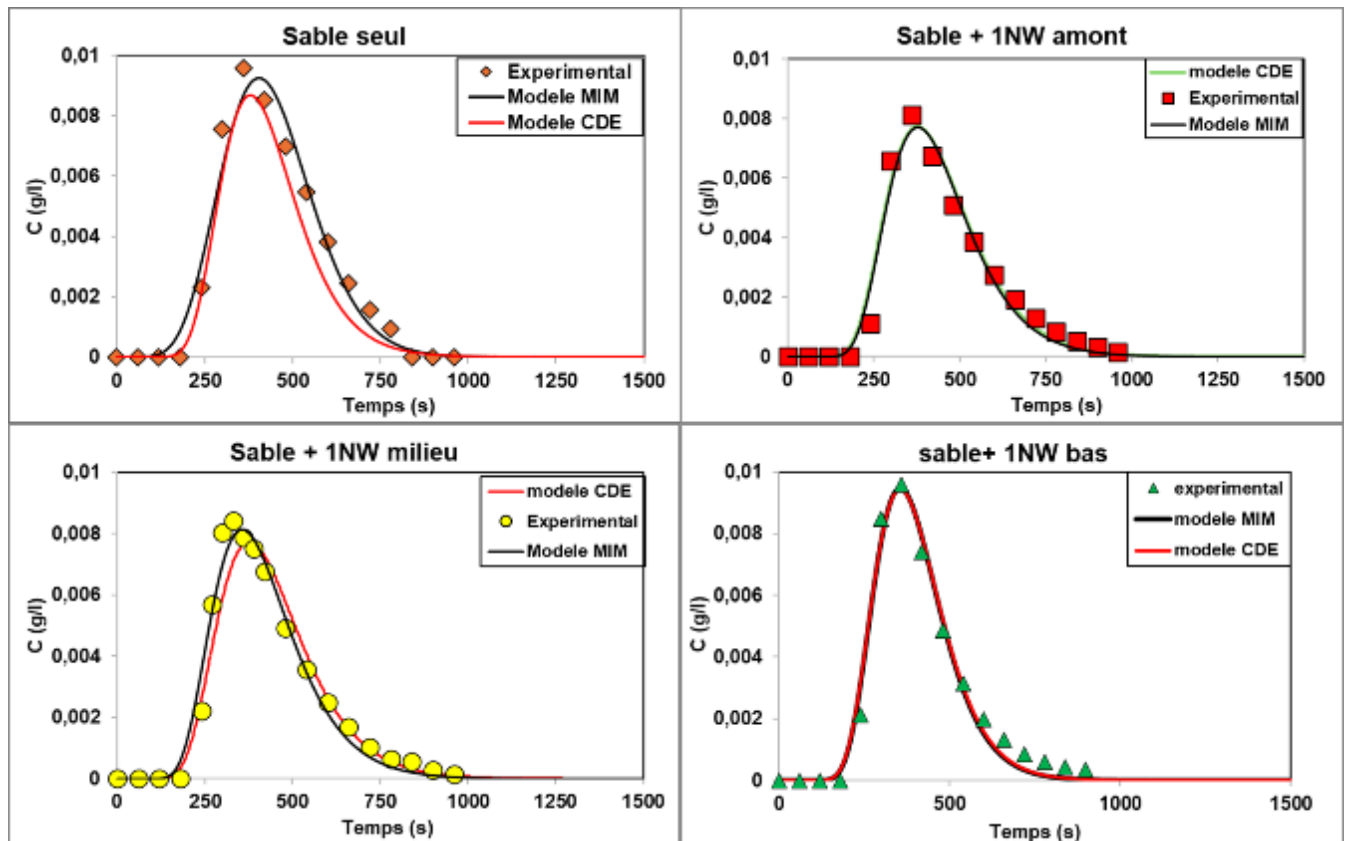


Figure 9 : courbes d'ajustements des expériences d'élution sur colonnes avec les deux modèles MIM et CDE

Tableau V: récapitulatif des paramètres de modélisation MIM et CDE

Modèles	Colonne	U(cm/min)	Dispersivite(cm ² /min)	α (cm)	R ² (%)
MODELE MIM	Sable seul	0,07212	1,299E-07	1,80116E-06	95
	Sable+1NW haut	0,007231	0,01163	1,608352925	95
	Sable+1NW milieu	0,007635	0,01311	1,717092338	95
	Sable+1NW bas	0,007971	0,01003	1,258311379	95
Modèle CDE	Sable seul	0,07381	0,09699	1,314049587	95
	Sable+1NW haut	0,07201	0,1202	1,669212609	95
	Sable+1NW Milieu	0,07201	0,1202	1,669212609	95
	Sable+1NW bas	0,07961	0,1017	1,277477704	95

IV.3.2 Essais d'injection continue de fluorescéine

Des essais d'injection continue de fluorescéine, équivalents à 40 volumes de pores (VP), ont été réalisés sur deux configurations expérimentales : l'une constituée uniquement de sable, l'autre intégrant un géotextile dans le sable. L'objectif de ces tests était d'observer le

comportement hydrodynamique des colonnes, de modéliser les mécanismes de transport, et de vérifier si l'ajout du géotextile modifie le fonctionnement du système.

Les courbes de traçage obtenues pour les deux configurations, présentées dans la figure 12 et le tableau VI, montrent des profils identiques. Le taux de restitution de la fluorescéine atteint 100 % dans les deux cas. Ces résultats indiquent que l'ajout du géotextile n'affecte pas la dynamique d'écoulement ni la capacité du filtre à restituer intégralement le traceur. Le système reste donc stable d'un point de vue hydrodynamique, même avec l'intégration du géotextile.

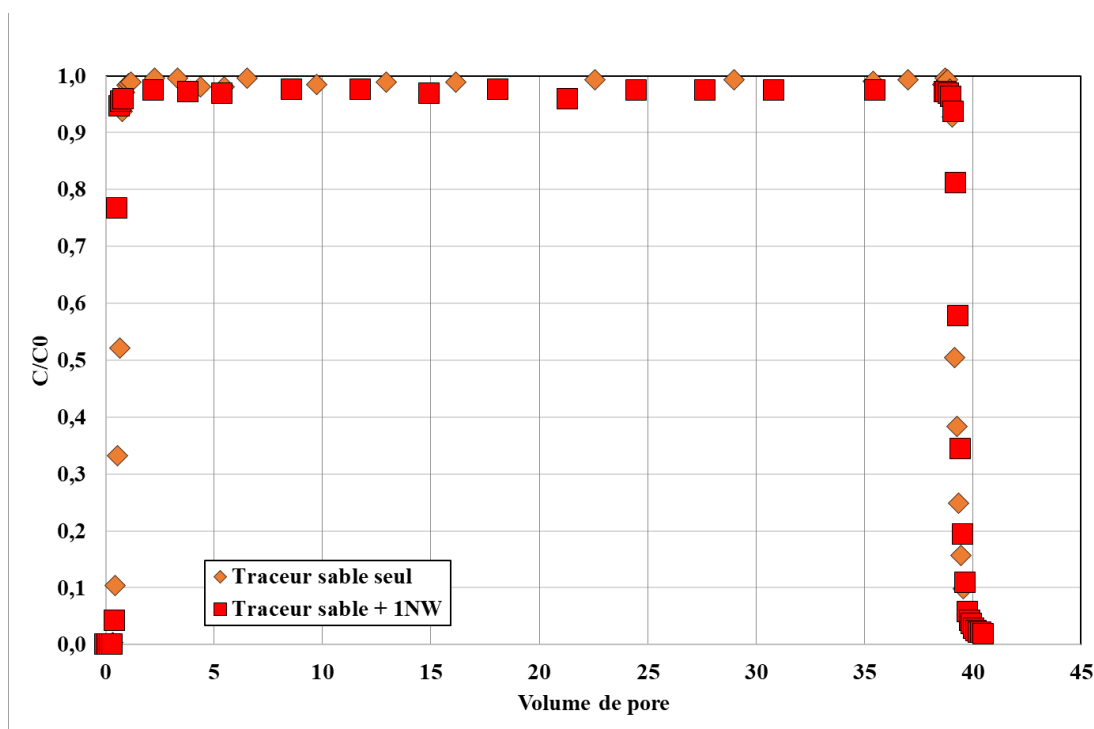


Figure 10: courbe de restitution d'injection continue du traceur

Tableau VI: Récapitulatif de paramètres d'injection continu de fluorescéine sur colonnes

FLUORESCEINE : injection continue								
Essais	C0 (g/l)	Vinj(l)	Masse Inj (g)	Q(Cm3/mi n)	Mrest(g)	Mdepth(g)	Tr(%)	ERREUR (%)
Sable seul	0,0 5	132	6,6	350	6,3	0,3	95,45	-4,55
Sable+1N W	0,0 5	132	6,6	350	6	0,6	90,91	-9,09

IV.4 Expériences de filtration

IV.4.1 Courbes de restitution

Des expériences de filtration ont été réalisées sur les différentes configurations de filtre. En effet ces expériences consistaient à une injection continue d'une solution de kaolinite de concentration 2g/l. La solution de kaolinite maintenue en suspension dans le réservoir est injectée à un débit de 350g/min à l'aide d'une pompe. Les courbes de restitution (fig. 13) représentent la concentration relative C/C_0 (C est la concentration à la sortie et C_0 la concentration injectée) en fonction du nombre de volumes de pores injectés qui est la quantité totale de vides de notre colonne en litres (1VP = 3, 30 l). Un bilan de masse est réalisé pour chaque essai (Tab. VII).

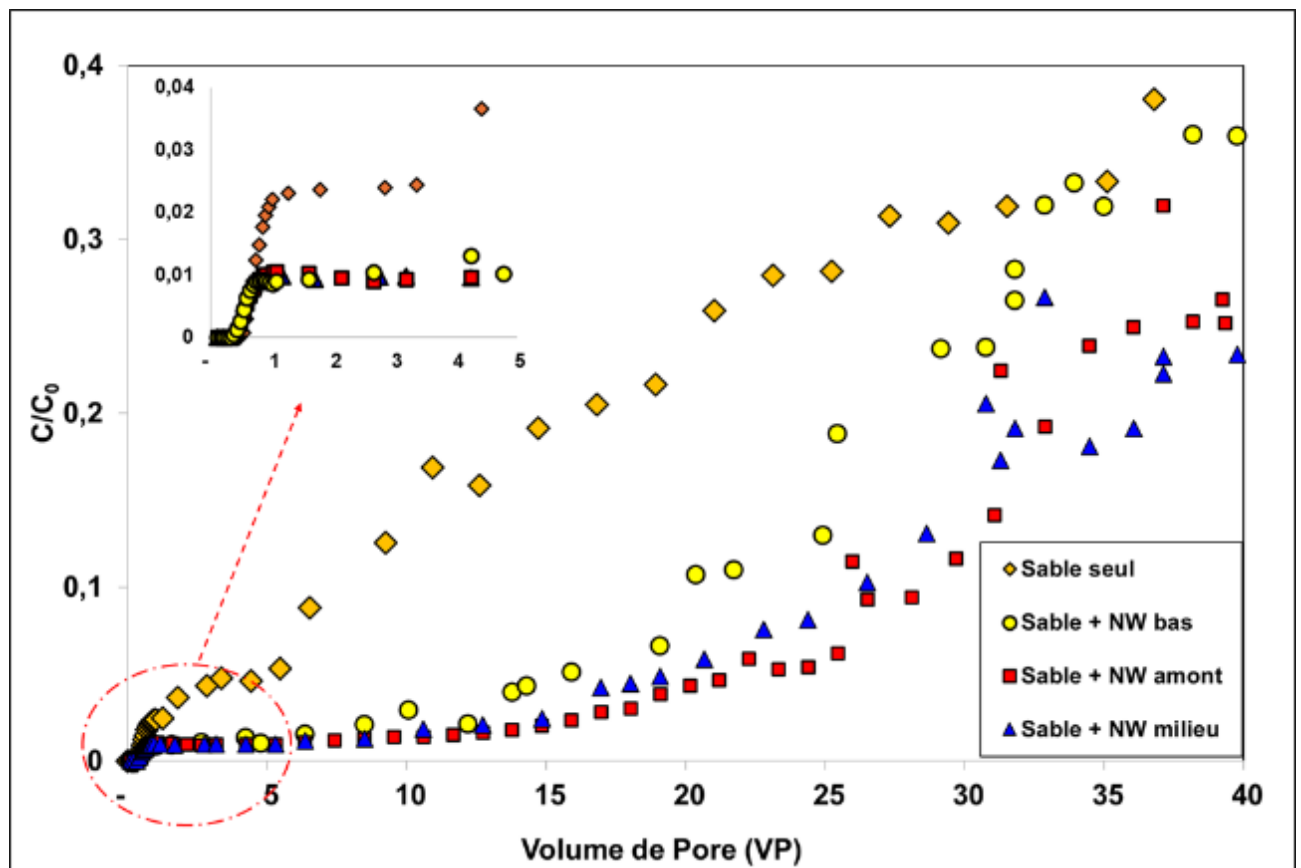


Figure 11 : Courbes de restitution de la kaolinite P300

Tableau VII : Bilan de masse expériences d'injection de kaolinite

	Kaolinite									
Essais	C0(g/l)	Tinj(min)	Masse Inj (g)	Q(Cm3/min)	Mrest(g)	Mdepth(g)	Mdepr(g)	Erreur (%)	Trestitution (%)	Rétention (%)
sable seul	2	380	266	350	59,5	206,5	208,20	0,82	22,37	78
sable+1NWA	2	380	266	350	24,71	241,29	221,10	8,37	9,29	91
Sable+1NWmil	2	380	266	350	24,55	241,45	215,80	10,62	9,23	91
Sable+1NWbas	2	380	266	350	37,83	228,17	229,20	0,45	14,22	86

Le tableau VII présente, pour chaque configuration étudiée, les pourcentages de masse de particules en suspension restituées dans l'effluent (Mrest), la masse totale réelle de particules déposées dans le milieu (Mdepr), la masse totale théorique (Mdepth) déposée dans le milieu qui correspond à la différence de la masse totale injectée moins la masse restituée. Il présente aussi le taux de rétention et taux de restitution de chaque configuration. La différence entre la masse totale réelle déposée (Mdepr) et la masse totale déposée théorique représente l'erreur qui peut être attribuée à des incertitudes de mesure.

D'après les courbes de restitution observées à la figure 14, le processus de filtration se déroule en deux étapes : une phase initiale suivie d'une phase transitoire.

La première phase est la filtration en lit propre, appelée étape du lit propre, qui n'est vraiment valable qu'au début du processus de filtration (Jegatheesan et Vigneswaram 2000), pendant cette phase, les particules en suspension se déposent facilement, car le milieu poreux est encore propre. Cela dure jusqu'à ce que le volume de solution de kaolinite injectée atteigne environ quatre fois le volume de pore du milieu. À ce moment-là, les courbes de restitution se stabilisent (Fig.13).

Après cette première phase, le système entre dans une phase transitoire. On observe alors que lorsque le volume injecté dépasse un certain seuil critique, estimé autour de 4 volumes de pores (VP), les courbes de restitution commencent à augmenter progressivement. Cela traduit une perte d'efficacité du filtre. En effet, les sites de rétention se saturent peu à peu à cause de l'accumulation des particules déjà déposées. Le filtre devient alors moins performant pour retenir les nouvelles particules (Jegatheesan et al., 2000 ; Brown et al., 2002 ; Alem et al., 2013). Plus les dépôts s'accumulent, plus la capacité de rétention diminue (Abbar, 2018).

La figure 13 met également en évidence l'impact de l'ajout d'un géotextile dans le dispositif de filtration. Ce dernier améliore nettement la capacité du filtre à retenir les matières en suspension (MES). Après l'injection de 40 volumes de pores, le taux de restitution atteint 22 % dans le cas du sable seul, alors qu'il n'est que de 9,29 %, 9,23 % et 14 % lorsque le géotextile est placé respectivement en haut, au milieu et en bas du filtre (voir tableau VII). Cette amélioration s'explique par la capacité des géotextiles à répartir plus uniformément le flux d'eau. Ils limitent les chemins préférentiels et dirigent l'eau et les particules vers des zones du filtre où les pores sont plus fins, favorisant ainsi leur capture (Lamy et al., 2013).

Les résultats montrent aussi que la position du géotextile joue un rôle important. Un positionnement en bas de la colonne s'avère moins efficace que lorsqu'il est placé en haut ou au milieu. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un géotextile situé trop bas agit trop tard dans le processus de filtration : une grande partie des particules a déjà traversé le milieu sans être interceptée. À l'inverse, un géotextile placé en haut ou au milieu permet une meilleure répartition du flux dès les premières phases, ralentit l'écoulement, allonge le temps de séjour des particules, et favorise leur dispersion dans le filtre. Cela augmente les chances que les particules atteignent des sites de rétention et soient captées.

IV.4.2 Efficacité de filtration

L'efficacité de filtration d'un milieu filtrant correspond au rapport entre la masse de particules retenue dans le filtre et la masse de particules injectée. Elle dépend principalement de l'état du filtre. La figure 14 illustre l'évolution de cette efficacité pour chaque configuration, fonction du nombre de volumes de pores injectés.

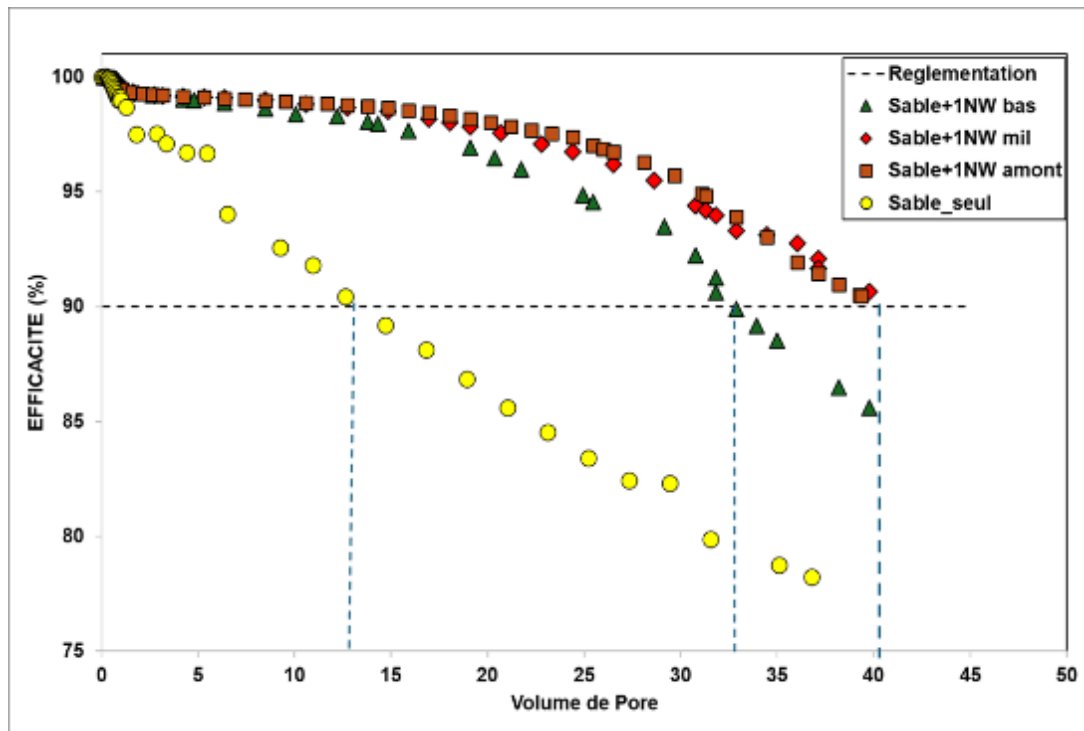


Figure 12 : Courbes d'efficacité de filtration des colonnes

La figure 14 intègre également la limite réglementaire de 90 % d'efficacité de filtration, exigée pour la rétention des solides en suspension dans les dispositifs de traitement des eaux pluviales (conformément à la loi sur l'eau – règlement du 22 décembre 1994, cité par Pons et al., 2008). Quelle que soit la configuration du filtre, on constate que l'efficacité, qui est de 100 % au départ, diminue progressivement avec le temps. Toutefois, la présence d'un géotextile dans le milieu filtrant permet de ralentir cette dégradation.

En effet, dans la configuration sans géotextile (sable seul), le seuil des **90 %** est franchi relativement tôt, après l'injection de **13** volumes de pores. À l'inverse, lorsque le géotextile est intégré, cette limite est atteinte beaucoup plus tard : après **33,5 VP** si le géotextile est placé en bas, et jusqu'à **40 VP** s'il est positionné au milieu ou en haut. Cela signifie que dans les configurations les plus efficaces, la quantité de suspension que le filtre peut traiter avant d'atteindre la limite réglementaire est environ **trois fois** plus élevée que dans le cas du sable seul. Ce résultat souligne l'apport significatif du géotextile pour prolonger la performance du filtre face au colmatage.

L'ajout de géotextiles améliore donc la capacité de rétention du filtre et prolonge sa durée de vie. Comme évoqué précédemment, les géotextiles favorisent une meilleure homogénéité des

flux, ce qui permet de mobiliser un plus grand nombre de sites de rétention. En outre, ils augmentent le stock de zones actives accessibles aux particules en suspension. Cette saturation plus progressive dans le temps résulte aussi du fait que les géotextiles fournissent eux-mêmes des sites de rétention supplémentaires. (Abbar, 2018).

En résumé, l'intégration de géotextiles améliore à la fois l'efficacité de filtration et la durée de vie du filtre. Ces observations sont cohérentes avec celles rapportées par Carmen et al. (2014) et Abbar et al. (2018), qui ont mis en évidence l'efficacité d'un géotextile pour la rétention des particules en suspension.

IV.4.3 Profil de rétention

Les profils de rétention correspondent à la répartition du dépôt de particules le long du filtre. Pour les établir, la masse de particules déposées dans chaque section de sable ainsi que dans les géotextiles a été déterminée selon la méthode présentée dans la section IV.2.1 (Matériels et Méthodes). Une valeur moyenne de rétention a ainsi été calculée pour chaque segment du milieu poreux. La rétention est exprimée comme le rapport entre la quantité de MES retenue et la quantité injectée. La figure 15 présente les profils de rétention obtenus le long de la colonne filtrante, pour les différentes configurations testées, après l'injection de 40 volumes de pores (VP) de suspension.

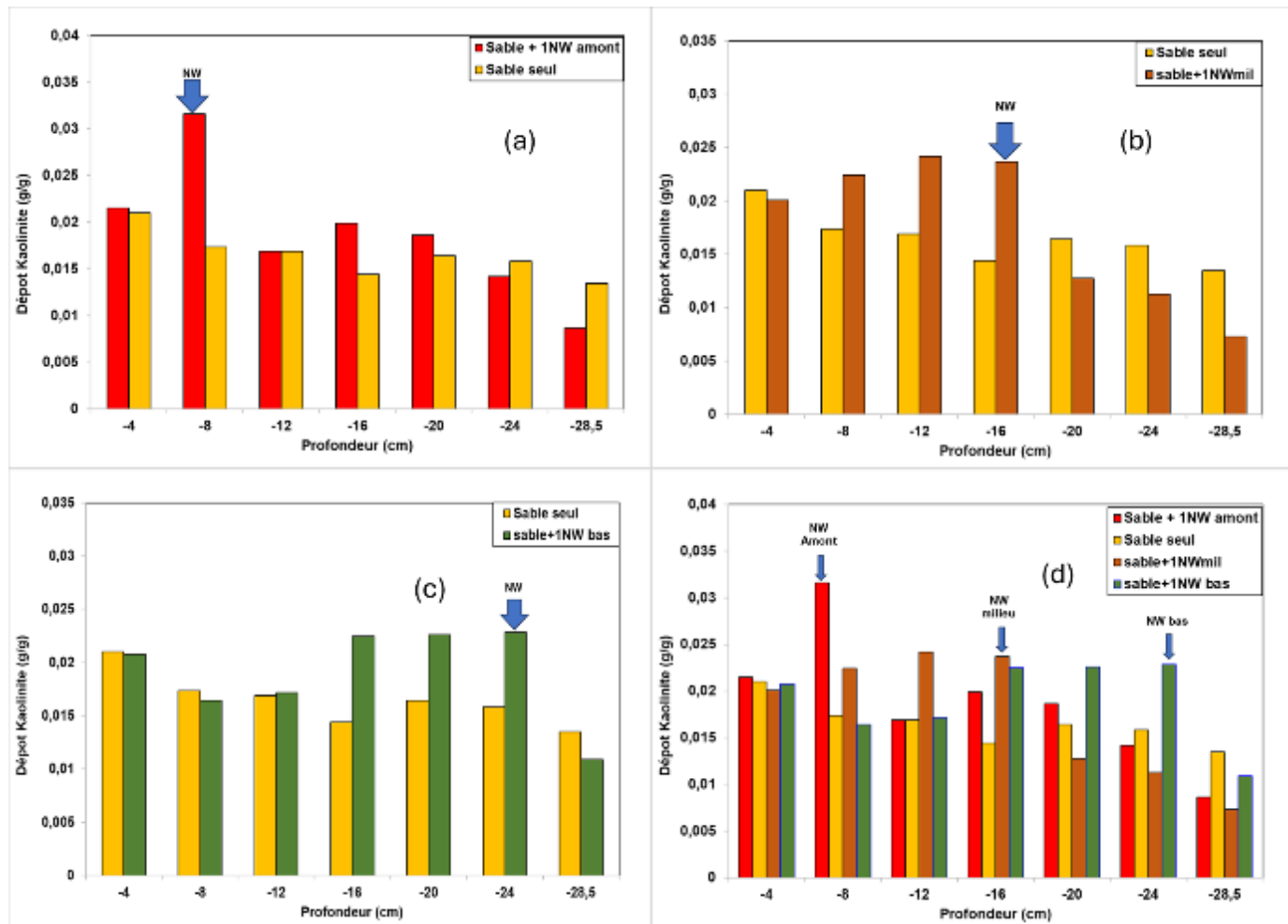


Figure 13 : Profil de rétention de la Kaolinite dans les différentes configurations de colonnes

La figure 15 met en évidence l'influence significative de la présence de géotextiles sur les profils de rétention qui sont modifiés. Par rapport à la configuration en sable seul, on observe que, dans toutes les configurations intégrant un géotextile, la rétention est améliorée, en particulier dans les couches de sable situées en amont. Les géotextiles contribuent ainsi à améliorer la rétention globale dans le milieu, tout en protégeant les couches de sable en aval du géotextile. Ce constat a également été souligné par Winiarski et al. (1999) et Lassabatère et al. (2004), dans leurs travaux sur la modification du transfert des polluants induite par l'introduction de géotextiles dans les sols, ainsi que par Abbar (2018). Cependant, même si les profils de rétention obtenus ne présentent pas de pics aussi marqués que ceux observés par Abbar (2018), cette différence peut s'expliquer par la grande quantité de suspension injectée, qui a probablement saturé l'ensemble des zones de stockage disponibles dans le milieu. Néanmoins, ces résultats confirment que les géotextiles améliorent la rétention globale des particules comme l'illustre la figure 16, mais qu'ils jouent également un rôle de réservoir de

rétenion. Par ailleurs, l'efficacité de cette rétenion dépend fortement de la position du géotextile dans la colonne. Le taux de rétenion est de **75%** pour le sable seul, il est de **91%** pour le sable avec le géotextile en haut ou au milieu et de **86%** pour le sable avec le géotextile en bas. (fig. 16)

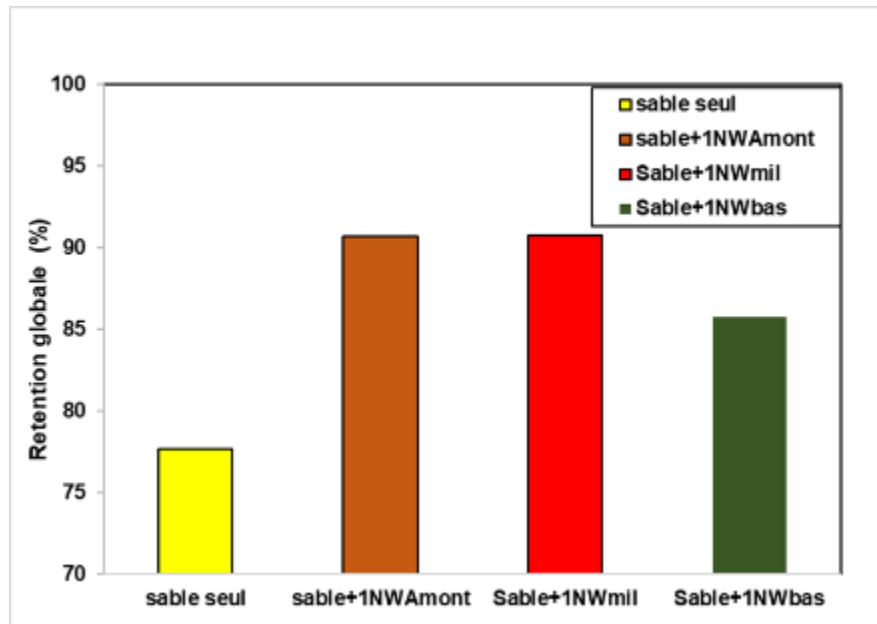


Figure 14: Rétention globale du milieu

Par ailleurs, contrairement aux géotextiles synthétiques, les géotextiles de lin, non seulement améliorent la rétenion du milieu sable mais ils participent eux aussi à la capture des particules. L'efficacité de cette rétenion propre au géotextile dépend fortement de la position du géotextile dans la colonne comme le montre la figure 17 le tableau VIII et la figure 18. La quantité de particules retenue par le géotextile placé en haut est plus importante (**19,1g**) que celle retenue par celui situé au milieu (**14,9 g**), elle-même supérieure à celle retenue par le géotextile en bas (**10,1g**). Cela s'explique par le fait que le géotextile en haut intercepte rapidement les particules en suspension dès leur entrée dans le système, alors que ceux placés plus bas interviennent plus tard, une fois que les particules ont déjà été partiellement captées par le sable. Cette observation est cohérente avec les résultats rapportés par Abbar (2018).

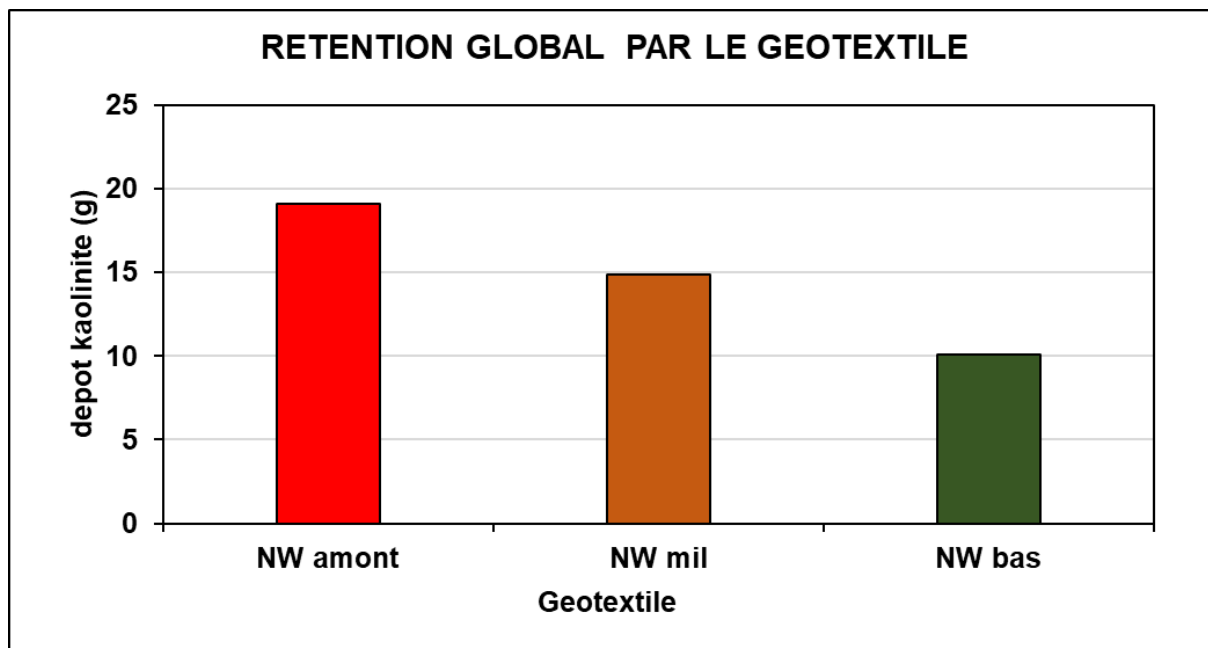


Figure 15: Effet de la position du géotextile

Tableau VIII: Rétention de kaolinite par le géotextile

RETENTION DE KAOLINITE			
Géotextile	NW amont	NW mil	NW bas
Kaolinite(g)	19,1	14,9	10,1

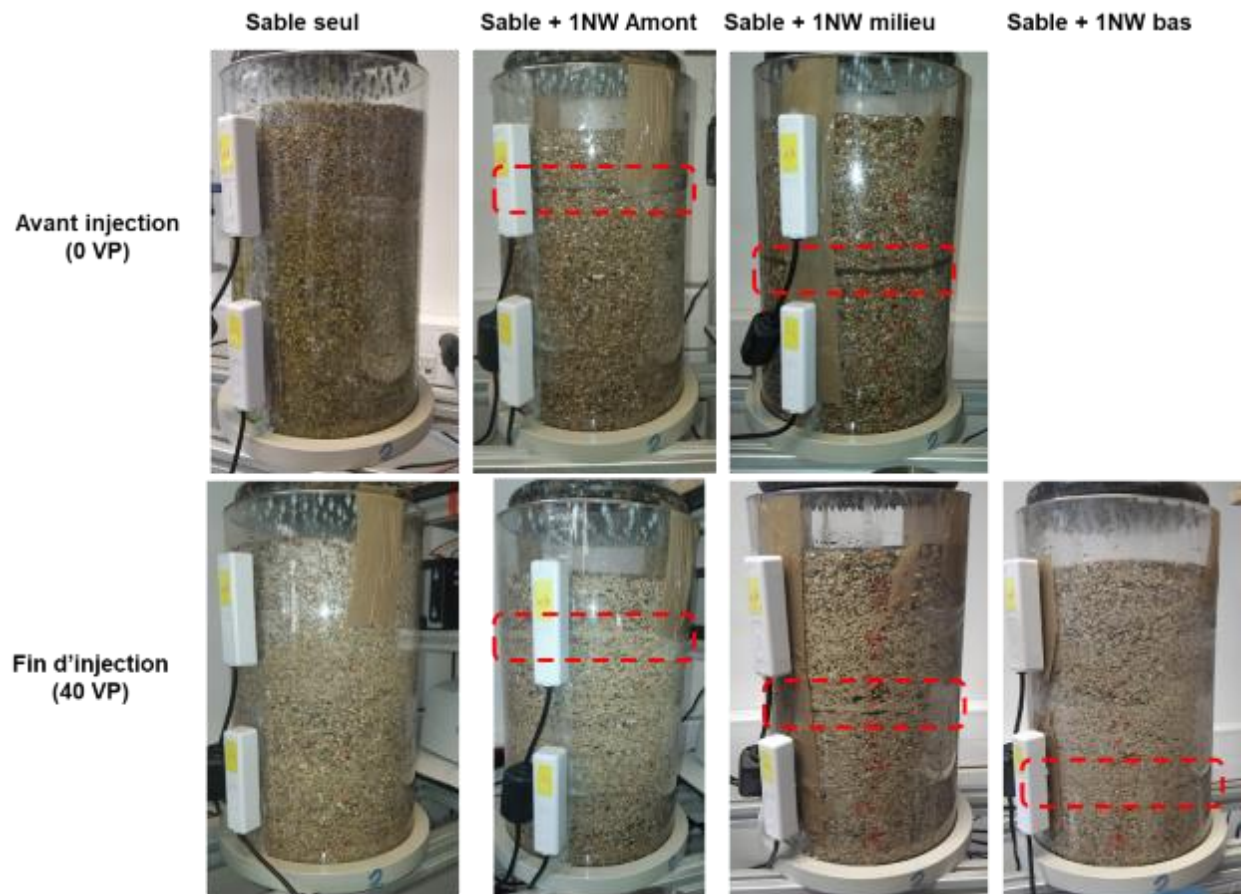


Figure 16: colonnes avant et après injection de kaolinite

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail expérimental a permis d'évaluer les performances d'un filtre composite associant du sable concassé à des géotextiles en fibres de lin, destiné au traitement des eaux de ruissellement en conditions non saturées. Les résultats montrent que l'intégration de géotextiles améliore nettement la rétention des particules en suspension. Elle agit également sur la répartition de l'humidité et le dépôt des particules à l'intérieur du filtre, rendant le dispositif plus homogène et plus efficace. En favorisant une meilleure répartition des flux, les géotextiles augmentent le nombre de zones actives de filtration et contribuent à prolonger la durée de vie du système. L'emplacement du géotextile dans la colonne s'est révélé avoir un impact important. Les meilleures performances ont été observées lorsque le géotextile était placé près de l'entrée du filtre, confirmant ainsi les résultats de l'étude d'Abbar (2018). Les tendances observées sont similaires, ce qui démontre que le dispositif conserve une bonne efficacité même en régime non saturé. Simple à mettre en œuvre, utilisant des matériaux biosourcés et facilement disponibles, ce filtre composite représente une solution à la fois efficace, économique et respectueuse de l'environnement pour améliorer la qualité des eaux de ruissellement. En perspectives, des essais en conditions réelles sur le terrain permettraient d'observer le comportement du filtre face aux variations saisonnières, à l'encrassement progressif ou encore à la variabilité des flux. Il serait également intéressant d'évaluer sa capacité à retenir d'autres types de polluants, notamment les polluants dissous comme les hydrocarbures ou les métaux lourds. Enfin, le développement d'une modélisation couplée des transferts d'eau et de particules pourrait ouvrir la voie à un outil de dimensionnement adapté aux contraintes et besoins des milieux urbains.

V. BIBLIOGRAPHIE

Abbar, B. (2018). *Influence de la physico-chimie des eaux de ruissellement sur la vulnérabilité des ouvrages de rétention*. Thèse de doctorat, Université du Havre Normandie.

Abbar, B., Alem, A., Pantet, A., et al. (2018). Nonwoven flax fibres geotextiles effects on solute heavy metals transport in porous media. *Environmental Technology*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1555284>

Amoura, R. (2021). *Matériaux biosourcés et développement durable*. Mémoire de recherche, Université de Strasbourg.

Azzout, O., Mandi, L., & Bouchaïr, A. (1994). Les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales en milieu urbain. *Revue des Sciences de l'Eau*, 7(4), 419-440.

Berrouard, É. (s.d.). *Caractérisation de la décantabilité des eaux pluviales*. Rapport technique.

Bliefert, C., & Perraud, R. (2001). *Chimie de l'environnement*. De Boeck Supérieur.

Bratieres, K., Fletcher, T. D., Deletic, A., & Zinger, Y. (2008). Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study. *Water Research*, 42(14), 3930–3940.

Brown DG, Stencel JR, Jaffe PR. Effect of porous media preparation on bacteria transport through laboratory columns. *Water Res.*2002; 36: 105-114

Carmen, Franks M, Allen P. Et al . Effects of runoff characteristics and filter type on geotextile storm water treatment. *Irrigation and Drainage Engineering*. 2014; 140.

Dalahmeh, S., Pell, M., Vinnerås, B., Hylander, L., Öborn, I., & Jönsson, H. (2014). Efficiency of bark, activated charcoal and sand filters in reducing pollutants from greywater. *Water Air and Soil Pollution*, 225(3), 1-13.

García, M. C., Barragán, J., & Romero, J. (2020). Use of natural fiber filters in constructed wetlands for greywater treatment. *Water*, 12(4), 1219.

Gasperi, J., Garnaud, S., Rocher, V., & Moilleron, R. (2012). Priority pollutants in urban stormwater: Part 1 – Case of separate storm sewers. *Water Research*, 46(20), 6683–6692.

Gromaire, M.-C., Garnaud, S., Saad, M., & Chebbo, G. (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, 35(2), 521–533.

Jegatheesan, V., Vigneswaram S. Transient stage deposition of submicron particles in deep bed filtration under unfavourable conditions. *Water Res.* 2000, 34: 2119- 2131

Kim, K., Hwang, S., & Choi, K. (2021). Evaluation of urban stormwater runoff treatment using an upflow filter system. *Journal of Water and Environment Technology*, 19(1), 15–27.

Lamy E Lassabatere L , Bechet B et al. Effect of a nonwoven geotextile on solute and colloid transport in porous media under both saturated and unsaturated conditions. *J GeotextGeomembranes* . 2013; 36: 55-65.

Lassabatère, L., Winiarski, T., et al. (2004). Étude de l'effet des géotextiles sur le transfert des polluants dans les sols. [Référence partielle].

Maes, E. (s.d.). *Les sédiments et les matières en suspension dans l'eau*. Note technique.

Mazzarella, L., and D' Ayala, D. (2012). Natural fibers and geotextiles in civil engineering applications. In *green Building Materials* (Springer), PP. 89-112

UE – J. Bodin (2022). *Cours sur le transport des polluants en milieux poreux*. Université de Lausanne.

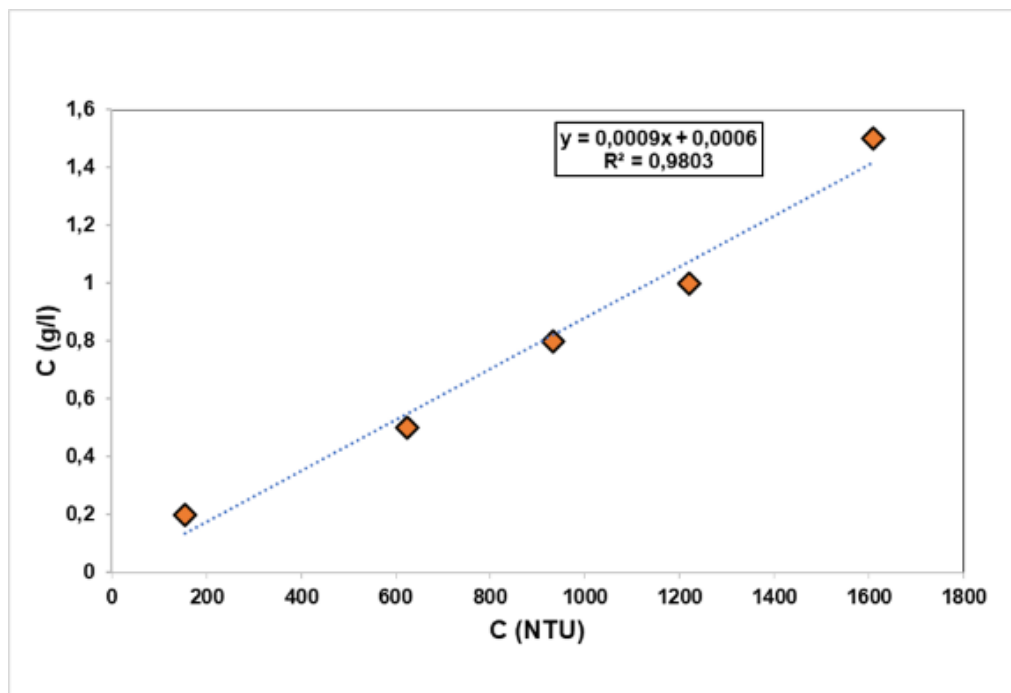
Tian, Y., Zhang, L., and Liang, S (2020) performance of jute and coir fiber geotextiles in erosion control and soil reinforcement. *Journal of Natural Fibers*, 17(2), 254-267.

Winiarski T , Lassabatere L, Influence d'un geotextile sur la retention du Zinc par un sol calcaire. France: Laboratory for roads and Bridges; 1999 (Report serie 4273). French. 2007; 69(9): 1499-1508

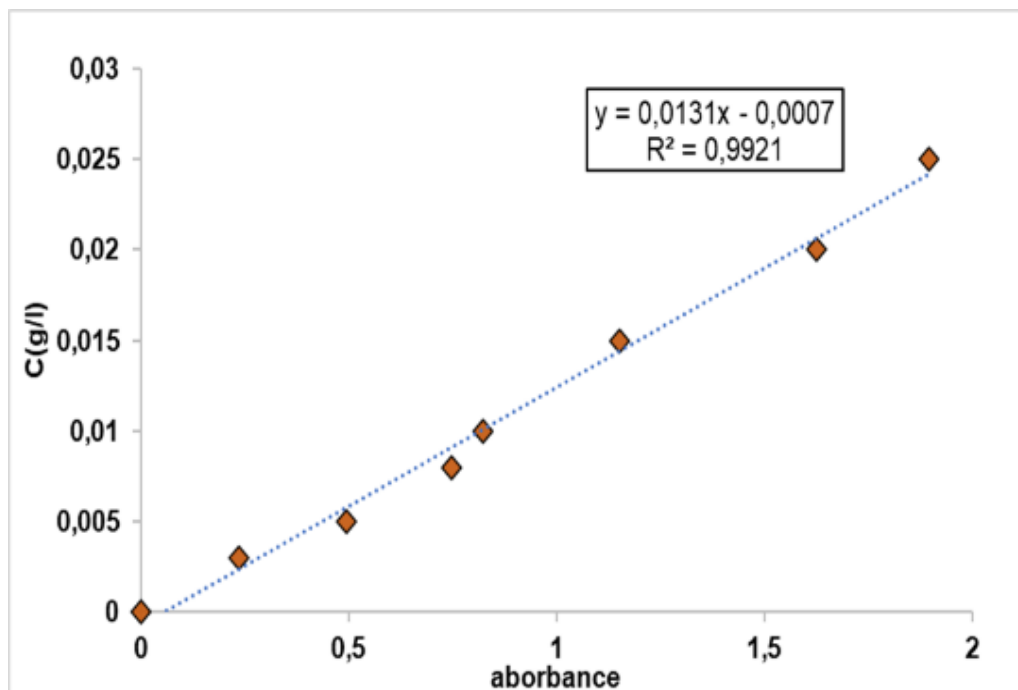
Zhang, K., Chui, T. F. M., & Jin, Y. (2012). Performance evaluation of two laboratory-scale bioretention cells for stormwater treatment. *Environmental Technology*, 33(8), 911–919.

VI. ANNEXES

Annexe 1 : Courbe étalonnage du turbidimètre



Annexe 2: Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre



❖ Choix de la représentation de la courbe d'étalonnage

Lors de l'étalonnage du turbidimètre, des solutions à concentration connue ont été préparées et leur turbidité mesurée à l'aide de l'appareil. Bien que la représentation conventionnelle d'une courbe d'étalonnage consiste à placer en abscisse la concentration (grandeur imposée) et en ordonnée la turbidité (valeur mesurée), la courbe a ici été exprimée avec la concentration en fonction de la turbidité.

Ce choix s'explique par la finalité pratique de l'étalonnage : obtenir un coefficient permettant de convertir directement les valeurs de turbidité mesurées en concentration en matières en suspension. Ainsi, l'équation obtenue sous la forme $\text{Concentration} = f(\text{Turbidité})$ permet d'appliquer simplement un facteur d'étalonnage aux mesures issues du turbidimètre.

Annexe 3 : Bilan de masse Injection Kaolinite sur sable seul

Temps (s)	VP	NTU	NTU-BF	C (g/l)	c/c0	mrest	minj	Mdépo	Efficacité
0	-	4,50	0,00	0	0	0	0	0	100
60	0	4,50	0,00	0	0	0	0,7	0,7	100
120	0	4,50	0,00	0	0	0	1,4	1,4	100
180	0	4,60	0,10	9E-05	4,5E-05	3,15E-05	1,75	1,7499685	99,9982
210	0	6,20	1,70	0,00153	0,000765	0,0002993	2,1	2,0997008	99,98575
240	0	11,20	6,70	0,00603	0,003015	0,0013545	2,45	2,4486455	99,944714
270	0	17,30	12,80	0,01152	0,00576	0,0033705	2,8	2,7966295	99,879625
300	1	24,60	20,10	0,01809	0,009045	0,0065363	3,15	3,1434638	99,7925
330	1	32,00	27,50	0,02475	0,012375	0,0108675	3,5	3,4891325	99,6895
360	1	37,30	32,80	0,02952	0,01476	0,0160335	3,85	3,8339665	99,583545
390	1	43,80	39,30	0,03537	0,017685	0,0222233	4,2	4,1777768	99,470875
420	1	48,00	43,50	0,03915	0,019575	0,0290745	4,55	4,5209255	99,361
450	1	51,00	46,50	0,04185	0,020925	0,0363983	4,9	4,8636018	99,257179

480	1	53,50	49,00	0,0441	0,02205	0,0441158	5,25	5,2058843	99,1597
510	1	55,90	51,40	0,04626	0,02313	0,0522113	5,6	5,5477888	99,067656
540	1	57,00	52,50	0,04725	0,023625	0,06048	5,95	5,88952	98,983529
570	1	57,80	53,30	0,04797	0,023985	0,0688748	7,7	7,6311253	99,105523
720	1	58,80	54,30	0,04887	0,024435	0,111636	11,2	11,088364	99,00325
1020	2	85,79	81,29	0,073161	0,0365805	0,2396678	18,2	17,960332	98,683144
1620	3	101,00	96,50	0,08685	0,043425	0,5436428	21,7	21,156357	97,494734
1920	3	110,00	105,50	0,09495	0,047475	0,7098053	28,7	27,990195	97,526811
2520	4	107,00	102,50	0,09225	0,046125	1,0326803	35,7	34,66732	97,107338
3120	5	123,00	118,50	0,10665	0,053325	1,4059553	42,7	41,294045	96,707365
3720	7	200,00	195,50	0,17595	0,087975	2,0217803	60,9	58,87822	96,680164
5280	9	283,00	278,50	0,25065	0,125325	4,3026953	72,1	67,797305	94,032323
6240	11	380,00	375,50	0,33795	0,168975	6,1952153	83,3	77,104785	92,562767
7200	13	357,00	352,50	0,31725	0,158625	7,9718153	97,3	89,328185	91,806973
8400	15	430,00	425,50	0,38295	0,191475	10,652465	111,3	100,64753	90,429052
9600	17	460,00	455,50	0,40995	0,204975	13,522115	125,3	111,77788	89,208208
10800	19	486,00	481,50	0,43335	0,216675	16,555565	139,3	122,74443	88,115172
12000	21	580,00	575,50	0,51795	0,258975	20,181215	153,3	133,11878	86,835476
13200	23	625,00	620,50	0,55845	0,279225	24,090365	167,3	143,20963	85,600499
14400	25	630,00	625,50	0,56295	0,281475	28,031015	181,3	153,26898	84,538877
15600	27	701,00	696,50	0,62685	0,313425	32,418965	195,3	162,88103	83,400427
16800	29	692,00	687,50	0,61875	0,309375	36,750215	209,3	172,54978	82,441369
18000	32	713,00	708,50	0,63765	0,318825	41,213765	233,1	191,88623	82,319277
20040	35	745,00	740,50	0,66645	0,333225	49,14452	244,3	195,15548	79,883537

21000	37	850,00	845,50	0,76095	0,380475	53,40584	251,3	197,89416	78,748173
21600	38	900,00	895,50	0,80595	0,402975	56,226665	258,3	202,07333	78,23203

Annexe 4: bilan de masse injection kaolinite sur sable+INW amont

	Temps		NTU	NTU -BF	c	c/c0	mrest	minj	mdépo	efficacité
0	0		5,6	0	0	0	0	0	0	#DIV/0!
60	1	0	5,6	0	0	0	0	0,7	0,7	100
120	2	0	5,7	0,1	9E-05	4,5E-05	3,15E-05	1,4	1,3999685	99,99775
180	3	0	5,9	0,3	0,00027	0,000135	0,000126	2,1	2,099874	99,994
210	3,5	0	7,6	2	0,0018	0,0009	0,000441	2,45	2,449559	99,982
240	4	0	10,4	4,8	0,00432	0,00216	0,001197	2,8	2,798803	99,95725
270	4,5	0	14,5	8,9	0,00801	0,004005	0,00259875	3,15	3,14740125	99,9175
300	5	1	17,8	12,2	0,01098	0,00549	0,00452025	3,5	3,49547975	99,87085
330	5,5	1	20,6	15	0,0135	0,00675	0,00688275	3,85	3,84311725	99,8212273
360	6	1	23	17,4	0,01566	0,00783	0,00962325	4,2	4,19037675	99,770875
390	6,5	1	25,1	19,5	0,01755	0,008775	0,0126945	4,55	4,5373055	99,721
420	7	1	26,3	20,7	0,01863	0,009315	0,01595475	4,9	4,88404525	99,6743929
450	7,5	1	28	22,4	0,02016	0,01008	0,01948275	5,25	5,23051725	99,6289
480	8	1	28	22,4	0,02016	0,01008	0,02301075	5,6	5,57698925	99,5890938
510	8,5	1	28,7	23,1	0,02079	0,010395	0,026649	5,95	5,923351	99,5521176
570	9,5	1	29	23,4	0,02106	0,01053	0,03402	6,65	6,61598	99,4884211
600	10	1	28,5	22,9	0,02061	0,010305	0,03762675	7	6,96237325	99,462475
900	15	2	26,7	21,1	0,01899	0,009495	0,07085925	10,5	10,4291408	99,32515
1200	20	2	25,7	20,1	0,01809	0,009045	0,10251675	14	13,8974833	99,2677375
1500	25	3	26,3	20,7	0,01863	0,009315	0,13511925	17,5	17,3648808	99,22789
1800	30	3	27	21,4	0,01926	0,00963	0,16882425	21	20,8311758	99,196075
2400	40	4	27	21,4	0,01926	0,00963	0,23623425	28	27,7637658	99,1563063
3000	50	5	29	23,4	0,02106	0,01053	0,30994425	35	34,6900558	99,114445
3600	60	6	32	26,4	0,02376	0,01188	0,39310425	42	41,6068958	99,0640375

4200	70	7	33,7	28,1	0,02529	0,012645	0,48161925	49	48,5183808	99,0171036
4800	80	8	36,6	31	0,0279	0,01395	0,57926925	56	55,4207308	98,9655906
5400	90	10	36	30,4	0,02736	0,01368	0,67502925	63	62,3249708	98,928525
6000	100	11	39,5	33,9	0,03051	0,015255	0,78181425	70	69,2181858	98,8831225
6600	110	12	41,4	35,8	0,03222	0,01611	0,89458425	77	76,1054158	98,8382023
7200	120	13	45,4	39,8	0,03582	0,01791	1,01995425	84	82,9800458	98,7857688
7800	130	14	50,2	44,6	0,04014	0,02007	1,16044425	91	89,8395558	98,7247865
8400	140	15	58	52,4	0,04716	0,02358	1,32550425	98	96,6744958	98,6474446
9000	150	16	68	62,4	0,05616	0,02808	1,52206425	105	103,477936	98,550415
9600	160	17	72,4	66,8	0,06012	0,03006	1,73248425	112	110,267516	98,4531391
10200	170	18	91,2	85,6	0,07704	0,03852	2,00212425	119	116,997876	98,3175426
10800	180	19	102	96,4	0,08676	0,04338	2,30578425	126	123,694216	98,1700125
11400	190	20	109	103,4	0,09306	0,04653	2,63149425	133	130,368506	98,0214329
12000	200	21	136	130,4	0,11736	0,05868	3,04225425	140	136,957746	97,8269613
12600	210	22	123	117,4	0,10566	0,05283	3,41206425	147	143,587936	97,6788679
13200	220	23	126	120,4	0,10836	0,05418	3,79132425	154	150,208676	97,5381011
13800	230	24	143	137,4	0,12366	0,06183	4,22413425	161	156,775866	97,3763141
14400	240	25	261	255,4	0,22986	0,11493	5,02864425	168	162,971356	97,0067594
14700	245	26	212	206,4	0,18576	0,09288	5,35372425	171,5	166,146276	96,8782949
15000	250	27	215	209,4	0,18846	0,09423	5,68352925	175	169,316471	96,752269
15900	265	28	264	258,4	0,23256	0,11628	6,90446925	185,5	178,595531	96,2779142
16800	280	30	320	314,4	0,28296	0,14148	8,39000925	196	187,609991	95,719383
17580	293	31	504	498,4	0,44856	0,22428	10,4309573	205,1	194,669043	94,914209
17700	295	31	433	427,4	0,38466	0,19233	10,7002193	206,5	195,799781	94,8182958
18600	310	33	536	530,4	0,47736	0,23868	13,2063593	217	203,793641	93,9141202
19500	325	34	560	554,4	0,49896	0,24948	15,8258993	227,5	211,674101	93,0435608
20400	340	36	715	709,4	0,63846	0,31923	19,1778143	238	218,822186	91,9420949
21000	350	37	567	561,4	0,50526	0,25263	20,9462243	245	224,053776	91,4505207
21600	360	38	595	589,4	0,53046	0,26523	22,8028343	252	229,197166	90,9512563
22200	370	39	565	559,4	0,50346	0,25173	24,5649443	259	234,435056	90,5154655
22260	371	39	568	562,4	0,50616	0,25308	24,7421003	259,7	234,9579	90,4728147

Annexe 5: Bilan de masse injection kaolinite sur sable+INW au milieu

VP	NTU	NTU-BF	C	C/C0 (g)	mrest (g)	minj (g)	mdep(g)	efficacite
0		0	0	0	0	0	0	
0	5,6	0	0	0	0	0,7	0,7	100
0	5,6	0	0	0	0	1,4	1,4	100
0	5,6	0	0	0	0	2,1	2,1	100
0	11,2	5,6	0,00504	0,00252	0,001764	2,8	2,798236	99,937
1	17,5	11,9	0,01071	0,005355	0,0055125	3,5	3,4944875	99,8425
1	20,1	14,5	0,01305	0,006525	0,00779625	3,85	3,84220375	99,7975
1	22,3	16,7	0,01503	0,007515	0,0104265	4,2	4,1895735	99,75175
1	24,2	18,6	0,01674	0,00837	0,013356	4,55	4,536644	99,7064615
1	25,3	19,7	0,01773	0,008865	0,01645875	4,9	4,88354125	99,6641071
1	26,9	21,3	0,01917	0,009585	0,0198135	5,25	5,2301865	99,6226
1	27	21,4	0,01926	0,00963	0,023184	5,6	5,576816	99,586
1	27,6	22	0,0198	0,0099	0,030114	6,3	6,269886	99,522
1	27,3	21,7	0,01953	0,009765	0,043785	7,7	7,656215	99,4313636
2	26,4	20,8	0,01872	0,00936	0,076545	11,2	11,123455	99,3165625
3	27,1	21,5	0,01935	0,009675	0,14427	18,2	18,05573	99,2073077
3	27,2	21,6	0,01944	0,00972	0,171486	21	20,828514	99,1834
4	26,9	21,3	0,01917	0,009585	0,238581	28	27,761419	99,147925
5	26,9	21,3	0,01917	0,009585	0,305676	35	34,694324	99,12664
6	31,3	25,7	0,02313	0,011565	0,386631	42	41,613369	99,07945
8	34,4	28,8	0,02592	0,01296	0,568071	56	55,431929	98,9855875
11	46,5	40,9	0,03681	0,018405	0,825741	70	69,174259	98,82037
13	52,3	46,7	0,04203	0,021015	1,119951	84	82,880049	98,666725
15	60	54,4	0,04896	0,02448	1,462671	98	96,537329	98,5074786
17	99,8	94,2	0,08478	0,04239	2,056131	112	109,943869	98,1641688
18	105	99,4	0,08946	0,04473	2,369241	119	116,630759	98,0090412
19	114	108,4	0,09756	0,04878	2,710701	126	123,289299	97,84865
21	136	130,4	0,11736	0,05868	3,326841	136,5	133,173159	97,5627538
23	174	168,4	0,15156	0,07578	4,387761	150,5	146,112239	97,0845442
24	186	180,4	0,16236	0,08118	5,240151	161	155,759849	96,7452478
27	234	228,4	0,20556	0,10278	6,679071	175	168,320929	96,183388
29	296	290,4	0,26136	0,13068	8,508591	189	180,491409	95,4981

31	462	456,4	0,41076	0,20538	11,383911	203	191,616089	94,3921621
31	390	384,4	0,34596	0,17298	11,989341	206,5	194,510659	94,1940237
32	431	425,4	0,38286	0,19143	12,659346	210	197,340654	93,97174
33	598	592,4	0,53316	0,26658	14,525406	217	202,474594	93,3062645
34	408	402,4	0,36216	0,18108	15,159186	220,5	205,340814	93,1250857
36	431	425,4	0,38286	0,19143	16,499196	227,5	211,000804	92,7476062
37	500	494,4	0,44496	0,22248	18,835236	238	219,164764	92,0860353
37	522	516,4	0,46476	0,23238	20,461896	245	224,538104	91,6482057
40	525	519,4	0,46746	0,23373	24,552171	262,5	237,947829	90,646792

Annexe 6: Bilan de masse injection kaolinite sur sable + INW en bas

Temps	VP	NTU	NTU-BF	C (g)	C/C0	mrest (g)	minj (g)	mdep (g)	efficacite(%)
0	0	11,9	0	0	0	0	0	0	
1	0	11,9	0	0	0	0	0,7	0,7	100
1,5	0	11,9	0	0	0	0	1,05	1,05	100
2	0	11,9	0	0	0	0	1,4	1,4	100
2,5	0	11,9	0	0	0	0	1,75	1,75	100
3	0	11,9	0	0	0	0	2,1	2,1	100
3,5	0	13	1,1	0,00099	0,000495	0,00017	2,45	2,4498	99,992
4	0	14,7	2,8	0,00252	0,00126	0,00061425	2,8	2,79938575	99,9780625
4,5	0	17,7	5,8	0,00522	0,00261	0,00152775	3,15	3,14847225	99,9515
5	1	21,7	9,8	0,00882	0,00441	0,00307125	3,5	3,49692875	99,91225
5,5	1	25,9	14	0,0126	0,0063	0,00527625	3,85	3,84472375	99,86295455
6	1	28,6	16,7	0,01503	0,007515	0,0079065	4,2	4,1920935	99,81175
6,5	1	30,6	18,7	0,01683	0,008415	0,01085175	4,55	4,53914825	99,7615
7	1	32	20,1	0,01809	0,009045	0,0140175	4,9	4,8859825	99,71392857
7,5	1	32,1	20,2	0,01818	0,00909	0,017199	5,25	5,232801	99,6724
8	1	32,3	20,4	0,01836	0,00918	0,020412	5,6	5,579588	99,6355
8,5	1	32	20,1	0,01809	0,009045	0,02357775	5,95	5,92642225	99,60373529
9	1	31,5	19,6	0,01764	0,00882	0,02666475	6,3	6,27333525	99,57675
9,5	1	31	19,1	0,01719	0,008595	0,029673	6,65	6,620327	99,55378947
10	1	32	20,1	0,01809	0,009045	0,03283875	7	6,96716125	99,530875
15	2	32,7	20,8	0,01872	0,00936	0,06559875	10,5	10,4344013	99,37525
25	3	35	23,1	0,02079	0,010395	0,13836375	17,5	17,3616363	99,20935
40	4	41	29,1	0,02619	0,013095	0,27586125	28	27,7241388	99,01478125
45	5	34,7	22,8	0,02052	0,01026	0,31177125	31,5	31,1882288	99,01025
60	6	45,9	34	0,0306	0,0153	0,47242125	42	41,5275788	98,8751875

80	8	58	46,1	0,04149	0,020745	0,76285125	56	55,2371488	98,63776563
95	10	77	65,1	0,05859	0,029295	1,07044875	66,5	65,4295513	98,39030263
115	12	59	47,1	0,04239	0,021195	1,36717875	80,5	79,1328213	98,3016413
130	14	100	88,1	0,07929	0,039645	1,78345125	91	89,2165488	98,04016346
135	14	108	96,1	0,08649	0,043245	1,93480875	94,5	92,5651913	97,95258333
150	16	125	113,1	0,10179	0,050895	2,46920625	105	102,530794	97,648375
180	19	159	147,1	0,13239	0,066195	3,85930125	126	122,140699	96,9370625
192	20	250	238,1	0,21429	0,107145	4,75931925	134,4	129,640681	96,45883984
205	22	256	244,1	0,21969	0,109845	5,75890875	143,5	137,741091	95,98682317
235	25	300	288,1	0,25929	0,129645	8,48145375	164,5	156,018546	94,84410106
240	25	430	418,1	0,37629	0,188145	9,13996125	168	158,860039	94,55954688
255	29	538	526,1	0,47349	0,236745	11,6257838	178,5	166,874216	93,48695588
275	31	540	528,1	0,47529	0,237645	14,9528138	192,5	177,547186	92,23230455
290	32	600	588,1	0,52929	0,264645	17,7315863	203	185,268414	91,26522845
300	32	640	628,1	0,56529	0,282645	19,7101013	210	190,289899	90,6142375
310	33	722	710,1	0,63909	0,319545	21,9469163	217	195,053084	89,88621371
320	34	750	738,1	0,66429	0,332145	24,2719313	224	199,728069	89,16431641
330	35	720	708,1	0,63729	0,318645	26,5024463	231	204,497554	88,52707955
360	38	812	800,1	0,72009	0,360045	34,0633913	252	217,936609	86,48278125
375	40	810	798,1	0,71829	0,359145	37,8344138	262,5	224,665586	85,58689

Annexe 7: Bilan de masse injections instantanées fluorescéine sur sable seul

sable seul				
Temps (s)	absorbance	C (g/l)	mrest	C/C0
0	0,01	0,00013	0	0,0026
30	0,018	0,000234	0	0,00468
60	0,02	0,00026	0	0,0052
90	0,022	0,000286	0	0,00572
120	0,018	0,000234	0	0,00468
150	0,016	0,000208	0	0,00416
180	0,018	0,000234	0	0,00468
210	0,021	0,000273	0	0,00546
240	0,109	0,001417	0,00024443	0,02834
270	0,313	0,004069	0,00094634	0,08138
300	0,522	0,006786	0,00211692	0,13572
330	0,651	0,008463	0,00357679	0,16926
360	0,707	0,009191	0,00516224	0,18382
390	0,713	0,009269	0,00676114	0,18538
420	0,674	0,008762	0,00827258	0,17524

450	0,613	0,007969	0,00964724	0,15938
480	0,561	0,007293	0,01090528	0,14586
510	0,506	0,006578	0,01203998	0,13156
540	0,44	0,00572	0,01302668	0,1144
570	0,363	0,004719	0,01384071	0,09438
600	0,301	0,003913	0,0145157	0,07826
660	0,193	0,002509	0,01538131	0,05018
720	0,136	0,001768	0,01599127	0,03536
780	0,093	0,001209	0,01640837	0,02418
840	0,062	0,000806	0,01668644	0,01612
900	0,045	0,000585	0,01688827	0,0117
960	0,024	0,000312	0,01699591	0,00624

Annexe 8: Bilan de masse injection instantanée fluorescéine sur sable+INW amont

SABLE +1NW Amont					
temps (s)	temps(min)	absorbance	C	C/C0	mrest
0	0	0	0	0	0
60	1	0	0	0	0
120	2	0	0	0	0
180	3	0	0	0	0
240	4	0,087	0,001131	0,02262	0,00039585
300	5	0,501	0,006513	0,13026	0,0026754
360	6	0,62	0,00806	0,1612	0,0054964
420	7	0,516	0,006708	0,13416	0,0078442
480	8	0,389	0,005057	0,10114	0,00961415
540	9	0,295	0,003835	0,0767	0,0109564
600	10	0,211	0,002743	0,05486	0,01191645
660	11	0,148	0,001924	0,03848	0,01258985
720	12	0,1	0,0013	0,026	0,01304485
780	13	0,065	0,000845	0,0169	0,0133406
840	14	0,04	0,00052	0,0104	0,0135226
900	15	0,024	0,000312	0,00624	0,0136318
960	16	0,013	0,000169	0,00338	0,01369095

Annexe 9: Bilan de masse injection instantanée fluorescéine sur sable+INW milieu

sable+1NW milieu					
Temps (s)	temps (min)	absorbance	C	C/C0	mrest
0	0	0	0	0	0
60	1	0	0	0	0
120	2	0	0	0	0
180	3	0	0	0	0
240	4	0,168	0,002184	0,04368	0,0007644

270	4,5	0,434	0,005642	0,11284	0,00175175
300	5	0,613	0,007969	0,15938	0,00314633
330	5,5	0,642	0,008346	0,16692	0,00460688
360	6	0,601	0,007813	0,15626	0,00597415
390	6,5	0,574	0,007462	0,14924	0,00728
420	7	0,516	0,006708	0,13416	0,0084539
480	8	0,376	0,004888	0,09776	0,0101647
540	9	0,272	0,003536	0,07072	0,0114023
600	10	0,189	0,002457	0,04914	0,01226225
660	11	0,129	0,001677	0,03354	0,0128492
720	12	0,078	0,001014	0,02028	0,0132041
780	13	0,049	0,000637	0,01274	0,01342705
840	14	0,043	0,000559	0,01118	0,0136227
900	15	0,021	0,000273	0,00546	0,01371825
960	16	0,011	0,000143	0,00286	0,0137683

Annexe 10: Bilan de masse injection instantanée fluorescéine sur sable+INW en bas

SABLE+INW BAS					
Temps(min)		Absorbance	C	C/C0	mrest
0	0	0	0	0	0
1	60	0	0	0	0
2	120	0	0	0	0
3	180	0	0	0	0
4	240	0,162	0,0021222	0,042444	0,00063666
5	300	0,647	0,0084757	0,169514	0,00317937
6	360	0,731	0,0095761	0,191522	0,0060522
7	420	0,565	0,0074015	0,14803	0,00827265
8	480	0,37	0,004847	0,09694	0,00972675
9	540	0,24	0,003144	0,06288	0,01066995
10	600	0,15	0,001965	0,0393	0,01125945
11	660	0,1	0,00131	0,0262	0,01165245
12	720	0,065	0,0008515	0,01703	0,0119079
13	780	0,046	0,0006026	0,012052	0,01208868
14	840	0,033	0,0004323	0,008646	0,01221837
15	900	0,026	0,0003406	0,006812	0,01232055

Annexe 11 : différence géotextile propre et géotextile colmate

