ETUDE DE DECONTAMINATION DES EAUX DE RUISSELLEMENT PAR UN COMPOSITE FIBRES NATURELLES ET SABLE

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 (GEAAH)

Présenté et soutenu publiquement le 20 Juillet 2026 par

ZINSONNI Elodie Laeticia (20210235)

Directeur de mémoire : Dr. Hela KAROUI

Maîtres de stage :

Dr. Bouamama ABBAR, Maitre de conférences, LOMC

Dr. Abdellah ALEM, Maitre de conférences HDR, LOMC

Dr. Justine DEGUENON, UNSTIM

Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC)

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : **Pr. Yacouba KONATE**

Membres et correcteurs :

Dr. Boukary SAWADOGO

Dr. Joseph WETHE

Promotion [2025/2026]

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je souhaite témoigner ma reconnaissance à tous ceux qui ont rendu cette expérience possible et enrichissante.

Je remercie le **Directeur Général** de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), ainsi que le corps enseignant et administratif, pour la qualité de la formation reçue tout au long de mon cursus.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Dr. KAROUI Hela**, ma directrice de mémoire, pour sa disponibilité, son encadrement et ses orientations qui ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie les coordonnateurs du programme PEA-ICAT, le **Pr. ADJOVI Edmond** et le **Pr. OUABI Tariq**, pour avoir rendu possible cette opportunité de stage.

J'adresse mes remerciements au **Pr. MARIN François**, Directeur du LOMC, pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire et m'avoir offert un cadre de travail propice à la recherche scientifique.

Je témoigne toute ma gratitude à mes maîtres de stage, **Dr. ABBAR Bouamama** et **Dr. HDR ALEM Abdellah**, pour leur disponibilité et le partage de connaissances qui ont enrichi ce travail et nourri mon intérêt pour la recherche. J'associe à ces remerciements **le Pr. PANTET Anne**, responsable de l'axe Génie Civil et Environnement, pour son écoute attentive et son accompagnement bienveillant tout au long de mon séjour.

Je remercie mon encadrante **Dr. DEGUENON Justine**, à l'UNSTIM (Bénin) pour le suivi constant et précieux qu'elle m'a apporté.

Mes remerciements vont également à **Dr. RICHARDSON Yohan**, responsable de la mobilité internationale à 2iE, et à Mme **LEFEVRE Chloé**, responsable des étudiants étrangers de l'ULHN, pour avoir facilité mon déplacement et mon installation.

Enfin, je remercie mes collègues stagiaires, les doctorants du laboratoire ainsi que toute ma famille.

RESUME

Les eaux de ruissellement urbaines, de plus en plus abondantes sous l'effet du changement climatique et de l'urbanisation, dépassent souvent la capacité de traitement des infrastructures existantes. Face aux limites des systèmes d'assainissement classiques pour le traitement des eaux pluviales urbaines chargées en matières en suspension et de polluants dissous, le filtre composite de sable et de géotextile de fibres de lin constitue une alternative prometteuse. Cette étude évalue l'influence du nombre de nappes de géotextile non tissé de fibres de lin sur les performances de filtration en conditions non saturées, et caractérise le comportement hydrodynamique du dispositif à l'aide du logiciel STANMOD. La caractérisation hydrodynamique a montré que l'ajout de géotextile améliore l'homogénéité de l'écoulement en limitant les chemins préférentiels. Les essais de filtration confirment que toutes les configurations avec géotextile dépassent le seuil règlementaire de 90 %, avec des taux de rétention allant de 98,19 % à 99,92 %, contre 88,12 % pour le sable seul. L'ensemble de ces résultats montre que l'optimisation du nombre de nappes de géotextile constitue un levier important pour améliorer la décontamination des eaux de ruissellement chargées en particules solides. Ce filtre, simple à mettre en œuvre et fondé sur une ressource locale et renouvelable, ouvre des perspectives prometteuses pour le traitement des eaux pluviales en conditions réelles.

Mots clés :

1- Eaux de Ruissellement
2- Filtration
3- Géotextile
4- Matières en suspension
5- Non saturée

ABSTRACT

Urban stormwater runoff, increasingly abundant due to climate change and urbanization, often exceeds the treatment capacity of existing infrastructure. Given the limitations of conventional wastewater treatment systems for treating urban stormwater loaded with suspended solids and dissolved pollutants, the composite sand and flax fibre geotextile filter constitutes a promising alternative. This study evaluates the influence of the number of nonwoven flax fibre geotextile layers on filtration performance under unsaturated conditions, and characterizes the hydrodynamic behaviour of the device using STANMOD software. The hydrodynamic characterization showed that the addition of geotextile improves flow homogeneity by limiting preferential flow paths. Filtration tests confirm that all configurations incorporating geotextile exceed the regulatory threshold of 90%, with retention rates ranging from 98.19% to 99.92%, compared to 88.12% for sand alone. Taken together, these results show that optimizing the number of geotextile layers is an important lever for improving the decontamination of stormwater runoff loaded with solid particles. This filter, simple to implement and based on a local, renewable resource, opens promising prospects for stormwater treatment under real conditions.

Key Words :

1- Filtration

2- Geotextile

3- Unsaturated Conditions

4- Suspended solids

5- Stormwater runoff

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Définition
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
CDE	Convection-Dispersion Equation
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DBO5	Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DRX	Diffraction des Rayons X
DTU	Document Technique Unifié
ETM	Éléments Traces Métalliques
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCT	Hydrocarbures Totaux
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
LOMC	Laboratoire Ondes et Milieux Complexes
MES	Matières En Suspension
MIM	Mobile-Immobile Model
NTU	Nephelometric Turbidity Units
NW	NoWoven (non tissé)
PCB	Polychlorobiphényles
STEP	Station d'épuration
STU	Service Technique Urbanisme
ULHN	Université Le Havre Normandie
UNSTIM	Université Nationale des Sciences Technologies et Mathématique
VP	Volume de Pores

Table des matières

REMERCIEMENTS ii
RESUME iii
ABSTRACT iv
LISTE DES FIGURES 3
LISTE DES TABLEAUX 4
INTRODUCTION 5
I. PRESENTATION DU LABORATOIRE D'ACCUEIL 7
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 8
II.1. Les eaux pluviales milieu urbain 8
II.1.1 Définition et cycle de l'eau en milieu urbain 8
II.1.2 Sources et nature de la pollution des eaux pluviales 9
II.1.2.1 Les éléments traces métalliques 9
II.1.2.2 Les matières en suspension (MES) 11
II.1.2.3 Autres polluants des eaux pluviales 11
II.2. Cadre règlementaire 12
II.3. Techniques de gestion et de dépollution des eaux pluviales 12
II.3.1 Les techniques alternatives 12
II.3.2 Filtration sur milieux poreux 13
II.4. Filtration en conditions saturées et non saturées 14
II.5. Les matériaux biosourcés 14
II.5.1 Définition 14
II.5.2 La filière lin en Normandie 14
II.6. Limites des filtres à sable 15
II.7. Travaux antérieurs sur le dispositif composite sable et géotextile de lin 16
III. MATERIELS ET METHODES 18

III.1. Matériaux utilisés 18
III.1.1 Le milieu poreux 18
III.1.2 Le géotextile non tissé de fibres de lin (NW) 19
III.1.3 La Fluorescéine 20
III.1.4 Les particules en suspension 20
III.2. METHODES 21
III.2.1 Dispositif expérimental 21
III.2.2 Configurations expérimentales 22
III.2.3 Protocoles expérimentaux 24
IV. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES 26
V. RESULTATS ET DISCUSSION 27
V.1. Teneur en eau et le débit d'écoulement 27
V.2. Caractérisation hydrodynamique du dispositif filtrant 29
V.2.1 Courbes de restitution de la fluorescéine 29
V.2.2 Paramètres hydrodynamiques obtenus par modélisation STANMOD 31
V.3. Filtration des matières en suspension (MES) 33
V.3.1 Restitution de la kaolinite 33
V.3.2 Performance de rétention du dispositif filtrant 36
V.3.3 Profil de rétention des particules dans la colonne 38
V.3.4 Dépôt de kaolinite sur le géotextile 40
V.4. Colmatage du milieu filtrant 41
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 43
BIBLIOGRAPHIE 44
ANNEXES 46

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Sources d'émission des polluants dans le milieu urbain (S. ZGHEIB, 2009) 8
Figure 2 : Distribution granulométrique du sable, source : (Abbar, 2018) 18
Figure 3 : Géotextile non tissé de fibres de lin :(a) observation au microscope optique (échelle : 600 µm) ; (b) aspect macroscopique 19
Figure 4 : Image réelle de la kaolinite P300 20
Figure 5 : Dispositif de filtration 22
Figure 6 : Schéma des différentes configurations de filtre testées 23
Figure 7 : Evolution de la teneur en eau à l'intérieur de la colonne pour les 5 configurations étudiées 27
Figure 8 : Suivi de la teneur en eau volumique dans le cas du sable seul et sable + 3 nappes de géotextile de Lin 28
Figure 9 : Évolution du débit en fonction du temps au cours de l'essai sable seul 29
Figure 10 : Courbes de restitution de la fluorescéine réalisées sur les 05 configurations étudiées 30
Figure 11 : La fluorescéine 31
Figure 12 : Courbes d'ajustements des expériences d'élution avec le modèle CDE 32
Figure 13 : Evolution du coefficient de dispersion hydrodynamique D (cm2/s) en fonction du nombre des nappes de géotextile utilisées dans le sable 33
Figure 14 : Courbes de restitution de la kaolinite sur les 05 configurations étudiées 35
Figure 15 : Courbes de restitution de la kaolinite sur les 04 configurations avec géotextile ... 36
Figure 16 : Courbes d'efficacité de filtration des différentes configurations étudiées 37
Figure 17 : Efficacité de Rétention globale de Kaolinite des différentes configurations 37
Figure 18 : (a) le sable sans géotextile, l'écoulement est préférentiel et la rétention des particules solides est incomplète ;(b) le sable avec un géotextile en fibres de lin, l'écoulement est homogénéisé (Abbar et al 2017a) 38
Figure 19 : Profils de dépôt spécifique de kaolinite le long de la colonne pour le Sable + géotextile après injection de 20 VP de kaolinite 39
Figure 20 : Dépôt de kaolinite sur le géotextile 40
Figure 21 : Accumulation d'eau en surface à partir de 14 VP observée lors de l'essai Sable + 6NW 42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Concentrations moyennes des polluants dans les eaux de ruissellement en fonction du type de toiture ; Source : Gromaire, M.-C., Veiga, L., Grimaldi, M., & Aires, N. (2013) ... 9
Tableau 2 : Concentrations moyennes en polluants selon le type de voirie et de parking (fourchette de variation et valeur médiane par site), Source : Agence de l'eau Seine-Normandie, Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines, juin 2014 10
Tableau 3 : Capacité maximale d'adsorption du cuivre, du plomb et du zinc par différents adsorbants à faible coût 15
Tableau 4 : Propriétés physiques du sable utilisé, source : (Abbar, 2018)..... 18
Tableau 5: Propriétés physiques du géotextile non tissé de lin (NW) ; Source : Abbar (2018) 19
Tableau 6 : Propriétés physiques de la kaolinite P300 20
Tableau 7 : Emplacement des capteurs de teneur en eau dans la colonne expérimentale..... 21
Tableau 8 : Paramètres hydrodynamiques obtenus par modélisation STANMOD..... 31
Tableau 9 : Bilan de masse (les valeurs du sable seul sont issues de Tidjany Malam, 2025).. 34

INTRODUCTION

Le changement climatique intensifie les épisodes pluvieux (IPCC, 2021), tandis que l'urbanisation croissante augmente les surfaces imperméabilisées. Ensemble, ces deux facteurs augmentent le volume des eaux de ruissellement. Ce volume dépasse souvent la capacité des stations d'épuration (STEP), lors des épisodes pluvieux intenses. Une partie de ces eaux, chargées de matières en suspension, de métaux et de micropolluants organiques (hydrocarbures, pesticides, résidus de plastiques), se retrouve ainsi rejetée dans le milieu naturel sans traitement. Face à ces enjeux, il devient nécessaire de développer des solutions de dépollution simples, efficaces, économiques et respectueuses de l'environnement. Les infrastructures conventionnelles de gestion des eaux pluviales montrent en effet leurs limites, car la charge polluante des eaux de ruissellement ne cesse d'augmenter et de se diversifier, avec notamment des polluants dissous que ces systèmes ne savent pas traiter. Pour répondre à ce besoin, les matériaux biosourcés, issus de ressources naturelles renouvelables, constituent une alternative intéressante. Parmi eux, les géotextiles non tissés de fibres de lin se distinguent par de bonnes propriétés hydrauliques et d'adsorption, ce qui en fait un matériau bien adapté pour répondre à ce problème.

Les travaux menés par Abbar et al. (2017a, 2017b, 2018) au Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC) de l'Université Le Havre Normandie ont démontré que l'association de ces géotextiles de lin avec un milieu sableux crée un dispositif composite capable de retenir efficacement les particules solides et les éléments traces métalliques (Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}). Ces résultats, obtenus en conditions saturées, ont ensuite été étendus aux conditions non saturées par Tidjany Malam (2025), qui a confirmé l'efficacité du dispositif. Cependant, l'effet du nombre de nappes de géotextile lin sur les performances du filtre en régime non saturé n'avait pas encore été étudié.

Ce travail cherche donc à répondre à la question suivante : comment le nombre de nappes de géotextile de fibres de lin influence-t-il les performances de filtration et le comportement hydrodynamique du filtre composite en régime non saturé ?

Le présent mémoire s'inscrit dans la continuité de ces travaux et vise à répondre à cette question.

- **Objectif général**

L'objectif général de cette étude est de déterminer dans quelle mesure l'intégration de nappes de géotextile non tissé en fibres de lin dans un filtre à sable améliore la rétention des matières en suspension en régime non saturé.

- **Objectifs spécifiques**

- Caractériser les propriétés hydrodynamiques du dispositif de filtration en condition non saturé ;
- Évaluer l'effet du nombre de nappes de géotextile non tissé de fibres de lin sur les performances de rétention des particules solides.

Le présent travail expérimental est guidé par deux (2) hypothèses :

Hypothèse 1 : Le modèle STANMOD reproduit fidèlement le comportement hydrodynamique du dispositif composite sable - géotextile de lin.

Hypothèse 2 : L'augmentation du nombre de nappes de géotextile de lin améliore les performances de rétention des particules solides en conditions non saturées ;

Ce mémoire s'articule autour de cinq parties. La partie I présente le laboratoire d'accueil, le Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), ainsi que le contexte de réalisation de ce travail. La partie II propose une synthèse bibliographique sur les eaux pluviales urbaines, leur pollution, les techniques de filtration et les matériaux biosourcés, en particulier les géotextiles de fibres de lin. La partie III détaille les matériaux et les protocoles expérimentaux mis en œuvre, les configurations testées et les méthodes de filtration des matières en suspension. La partie IV décrit le traitement et l'analyse des données recueillies. Enfin, la partie V présente et discute les résultats obtenus, avant une conclusion qui synthétise les principaux apports de l'étude et propose des perspectives de recherche.

I. PRESENTATION DU LABORATOIRE D'ACCUEIL

Le Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC) est une Unité Mixte de Recherche (UMR 6294) placée sous la double tutelle du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Le Havre Normandie. Fondé 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 regroupe environ une centaine de membres, dont des chercheurs permanents, des doctorants, des postdoctorants et des personnels techniques et administratifs. Il accueille également chaque année de nombreux stagiaires de master et des chercheurs.
Le laboratoire s'articule autour d'une Assemblée Générale, d'un Conseil de Laboratoire, d'un Bureau de Direction et d'un Comité Scientifique qui assurent une gouvernance collégiale et transparente.
Les activités scientifiques menées au sein du LOMC s'organisent en trois équipes de travail interdisciplinaires :

- **GCE : Génie Civil, Composites et Environnement :** cette équipe développe des travaux sur les géomatériaux, les géosciences et les risques environnementaux, les transferts en milieu poreux, le transport sédimentaire, ainsi que les matériaux composites à fibres végétales.
- **AMS : Acoustique des Matériaux et des Structures :** cette équipe est spécialisée dans l'acoustique sous-marine et environnementale, la caractérisation ultrasonore des matériaux et l'étude des structures phononiques.
- **NRGY : Instabilités, Réactivité, Énergie et Hydrodynamique Marine :** cette équipe travaille sur l'hydrodynamique marine, les instabilités et la turbulence, ainsi que les processus réactifs liés aux énergies marines.

Le présent travail s'est déroulé au sein de l'équipe GCE, dans le domaine des transferts en milieu poreux et de la filtration des eaux pluviales par matériaux biosourcés. Cette thématique de recherche, développée au LOMC depuis plusieurs années, vise à concevoir des dispositifs de traitement des eaux pluviales simples, efficaces et respectueux de l'environnement, à base de géotextiles non tissés en fibres de lin de Normandie.

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. Les eaux pluviales milieu urbain

II.1.1 Définition et cycle de l'eau en milieu urbain

Les eaux pluviales désignent l'ensemble des eaux issues des précipitations atmosphériques, neige fondue ou grêle qui atteignent la surface terrestre et s'écoulent sur des surfaces naturelles ou artificielles (Bliefert et Perraud, 2001). Dans le cycle hydrologique naturel, ces eaux peuvent s'infiltrer dans les sols pour alimenter les nappes phréatiques, s'évaporer ou rejoindre les cours d'eau par ruissellement de surface. Cependant, l'urbanisation croissante a profondément modifié ce cycle naturel en augmentant considérablement la part des surfaces imperméables réduisant ainsi les capacités d'infiltration et d'évapotranspiration (Tassin, 2012).

En milieu urbain, les eaux pluviales deviennent des eaux de ruissellement lorsqu'elles s'écoulent sur les surfaces imperméabilisées. En traversant ces surfaces, elles se chargent en polluants variés (particules solides, éléments traces métalliques, HAP…) avant d'être collectées par les réseaux d'assainissement ou rejetées directement dans les milieux naturels (Figure 1). La gestion de ces flux représente un enjeu environnemental, sanitaire et technique majeur dans les zones urbaines et périurbaines (Tedoldi, D., Gromaire, M.-C., & Chebbo, G. 2020).

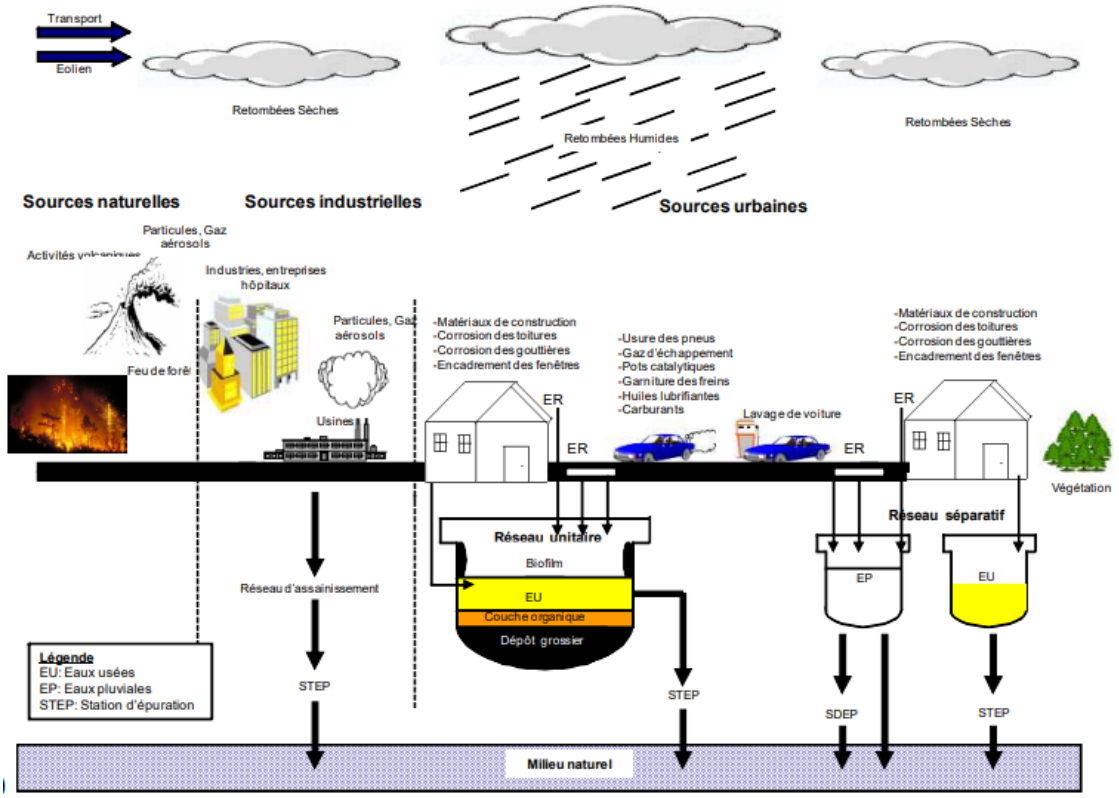


Figure 1 : Sources d'émission des polluants dans le milieu urbain (S. ZGHEIB, 2009)

II.1.2 Sources et nature de la pollution des eaux pluviales

Les eaux de ruissellement urbaines constituent une source majeure de pollution diffuse pour les milieux aquatiques récepteurs (les nappes souterraines, la mer, les océans ; les rivières ...). Elles transportent une grande variété de polluants dont la nature et la concentration sont étroitement liées aux activités humaines et aux caractéristiques du bassin versant (Gasperi et al., 2012). On distingue deux grandes catégories de polluants : les contaminants particulaires et les contaminants dissous.

II.1.2.1 Les éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques sont des contaminants dissous qui constituent l'une des familles de polluants les plus préoccupantes dans les eaux de ruissellement urbain. Leur présence résulte principalement du lessivage des surfaces imperméabilisées par les eaux pluviales, notamment les toitures (Tableau 1), les voiries et parkings (Tableau 2). La nature du matériau de toiture influence directement la qualité du ruissellement.

Tableau 1: Concentrations moyennes des polluants dans les eaux de ruissellement en fonction du type de toiture ; Source : Gromaire, M.-C., Veiga, L., Grimaldi, M., & Aires, N. (2013)

	Ordres de grandeurs des concentrations moyennes par site pour les différents types de toitures ***Valeur bibliographique - Fourchette minimum - maximum des concentrations moyennes par site***				
Polluant	**Petits éléments de couverture**	**Toit métallique**		**Toit terrasse**	**Toit végétalisé**
MES (mg/l)	19 - 64	25 - 40		3 - 29	9 - 37
DCO (mg/l)	4 - 78	12 - 49		6 - 12	9 - 41
Cu (µg/l)	10 - 304	**Toit en cuivre** 2600	**Autre** 4 - 153	5 - 166	10 - 58
Pb (µg/l)	3 - 470	**Toit en plomb** 7000 - 10600	**Autre** 15 - 300	3 - 56	3 - 6
Zn (µg/l)	10 - 3700	**Toit en zinc** 2300 - 11800	**Autre** 90 - 3200	9 - 2300	50 - 460
HAP (µg/l)	0,44 à 0,6 (très peu de données)				

Tableau 2 : Concentrations moyennes en polluants selon le type de voirie et de parking (fourchette de variation et valeur médiane par site), Source : Agence de l'eau Seine-Normandie, Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines, juin 2014

Polluant	Concentrations				
	Voiries urbaines			Autoroutes	Parkings
	Trafic faible (a)	Trafic moyen (b)	Trafic fort (c)		
MES (mg/l)	11,7 - 117 84,5	59,8 - 240 99	69,3 - 260 160	41,3 -762 92	98 - 150 129
DCO (mg/l)	70 - 368 120			107*	50 - 199 70
Cd (µg/l)	0,4 - 1,4 0,5	0,4 – 13,8 1,9		3,0 - 3,7 3,4	1,2*
Cu (µg/l)	47 - 75,9 60,4	51,7 - 103,8 97	65,6 - 143,5 90	16,1 - 120 40	6 - 80 43
Pb (µg/l)	25 - 535 170			2,4 - 224 100	15,4 - 137 78,5
Zn (µg/l)	129,3 - 1956 407			70 - 660 119	125 - 526 281
HA (µg/l)	393 - 1359 813			-	-
HAP (µg/l)	0,16 - 4,5 0,22			0,31 - 21,8 2,34	1,62 - 3,5 2,3
Hct (µg/l)	4000 - 11000 4170			21,8 - 4760 2391	150 - 1000 160

* : une seule valeur disponible

(a) Trafic faible : < 3 000 véhicules par jour

(b) Trafic moyen : 3 000 à 10 000 véhicules par jour

(c) Trafic fort : > 10 000 véhicules par jour

II.1.2.2 Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension sont des contaminants particulaires qui constituent l'un des principaux indicateurs de la qualité des eaux de ruissellement. Elles représentent l'ensemble des particules minérales ou organiques en suspension dans l'eau, dont la taille varie généralement de quelques micromètres à plusieurs centaines de micromètres. Les MES présentes dans les eaux pluviales urbaines proviennent de l'érosion des surfaces (chaussées, trottoirs), de l'abrasion des pneus et des freins, des dépôts atmosphériques secs et des activités de construction (Berrouard, 2010).

En raison de leur grande surface spécifique et de leurs propriétés colloïdales, les MES captent et transportent les polluants présents dans les eaux de ruissellement, notamment les métaux lourds, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les polychlorobiphényles (PCB). Les particules argileuses, parmi lesquelles la kaolinite est fréquemment représentée, présentent à cet égard une forte capacité d'adsorption pour les contaminants métalliques et organiques (Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S, 2008).

II.1.2.3 Autres polluants des eaux pluviales

En plus des matières en suspension et des éléments traces métallique, les eaux de ruissellement urbaines peuvent contenir des hydrocarbures totaux (HCT), des nutriments (azote, phosphore) responsables de phénomènes d'eutrophisation, des micropolluants organiques (pesticides, PCB, résidus médicamenteux) ainsi que des agents pathogènes d'origine biologique. La demande biochimique en oxygène (DBO_5) et la demande chimique en oxygène (DCO) sont utilisées pour évaluer la charge organique des effluents (Bliefert et Perraud, 2001). Le rapport **DCO/DBO_5**, lorsqu'il est **inférieur à 3**, indique un effluent facilement biodégradable. Pour **$3 \leq DCO/DBO5 \leq 5$**, l'effluent est considéré comme moyennement biodégradable, le traitement biologique reste envisageable mais avec une efficacité réduite. Au-delà d'un rapport **DCO/DBO5 supérieur** à **5** la matière organique est récalcitrante au traitement biologique et nécessite un traitement chimique.

II.2. Cadre règlementaire

En France, la gestion et le traitement des eaux pluviales sont réglementés par plusieurs textes de loi et de réglementation.

- La loi sur l'eau du 3 janvier 1992, renforcée par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) de l'Union Européenne (2000/60/CE), exige d'atteindre le bon état écologique et chimique des masses d'eau d'ici 2027 ;
- Concernant les rejets d'eaux pluviales dans les milieux naturels, le seuil de concentration en MES est en principe fixé à 35 mg/L, avec 70 mg/L pour les prélèvements instantanés ;
- Pour les 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 d'être rejetés dans le réseau d'assainissement (arrêtés du 24 août 2017 et du 21 novembre 2017).
- Conformément à la réglementation sur dispositifs de traitement des eaux pluviales (loi sur l'eau, règlement du 22 décembre 1994), une efficacité minimale de filtration de 90 % est exigée pour la rétention des solides en suspension.

II.3. Techniques de gestion et de dépollution des eaux pluviales

II.3.1 Les techniques alternatives

Face aux limites des systèmes d'assainissement classiques, conçus pour des contextes hydrologiques désormais dépassés par l'urbanisation et les changements climatiques, des approches alternatives ont été développées pour gérer les eaux pluviales au plus près de leur point de chute (Fardel, A., 2019). Ces 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 et de lisser les débits ;
- L'infiltration directe à un débit régulier 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.

Les dispositifs les plus couramment utilisés sont : les noues végétalisées, les tranchées d'infiltration, les chaussées réservoirs, les bassins de rétention et les toitures végétalisées. Ces

ouvrages peuvent 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 (Abbar,2018). Leur intégration dans le milieu urbain requiert une planification cohérente et une adaptation au contexte local (climat, type de sol, densité urbaine).

II.3.2 Filtration sur milieux poreux

La filtration est un procédé physique permettant de séparer les constituants d'un mélange hétérogène en faisant passer le fluide à travers un milieu poreux qui retient les particules solides tout en laissant passer le liquide. Dans le cadre du traitement des eaux pluviales, la filtration sur lit de sable est une technique fondamentale et largement utilisée (Kim et al., 2021). Le processus de filtration met en jeu des mécanismes physicochimiques complexes qui peuvent être regroupés en deux grandes catégories : le transport des particules jusqu'aux surfaces de collecte et leur attachement ou dépôt sur ces surfaces.

II.3.2.1 Mécanismes de transport et de dépôt des particules en suspension

Le transport des particules en suspension dans un milieu poreux résulte de la combinaison de plusieurs mécanismes élémentaires décrits dans la littérature :

- La sédimentation gravitationnelle : C'est le dépôt des particules sous l'effet de leur propre poids. Les particules qui ont une densité supérieure à celle du fluide, sédimentent et se déposent sur les collecteurs solides.
- La diffusion brownienne : C'est le mouvement aléatoire et désordonné des très petites particules (< 1 µm) dans un fluide causé par les chocs incessants des molécules d'eau contre ces particules.
- L'interception directe : Elle intervient lorsque la taille des particules est suffisante pour qu'elles entrent en contact avec les collecteurs solides tout en suivant les lignes de courant du fluide.
- Le blocage dans les volumes morts : certaines particules sont piégées dans des zones de faible écoulement au sein du réseau poreux (Bradford & Torkzaban, 2008 ; Molnar et al., 2019).

Le processus de filtration se déroule typiquement en deux phases successives. La première phase, dite de « lit propre », est caractérisée par une efficacité maximale car les sites de rétention

sont disponibles. La seconde phase, transitoire, voit l'efficacité décliner progressivement au fur et à mesure que les sites de rétention se saturent par accumulation des particules déjà déposées (Alem et al., 2013).

II.4. Filtration en conditions saturées et non saturées

En conditions saturées, l'ensemble des pores du milieu poreux est rempli d'eau, ce qui correspond à un état où le sol a atteint sa capacité maximale de rétention en eau. En conditions non saturées, seule une fraction des pores est occupée par l'eau, le reste étant occupé par de l'air; la teneur en eau y varie à la fois dans l'espace et dans le temps, en fonction de l'intensité et de la durée des apports d'eau.

Or, dans la réalité du terrain, les dispositifs de filtration des eaux de ruissellement fonctionnent la plupart du temps en régime non saturé. L'eau de pluie n'arrive pas de façon continue et homogène comme lors d'un essai en colonne saturée, mais par épisodes pluvieux intermittents, avec des périodes sèches entre deux événements (Browne et al., 2008). Étudier le comportement du filtre en conditions non saturées permet donc de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement sur le terrain, alors que les études en conditions saturées, plus simples à mettre en œuvre en laboratoire, ne permettent d'évaluer les performances du dispositif que dans un cas idéalisé.

II.5. Les matériaux biosourcés

II.5.1 Définition

Les matériaux biosourcés sont des matériaux dont les matières premières sont issues de la biomasse végétale ou animale. L'utilisation de ces matériaux s'inscrit dans une démarche de développement durable qui vise à réduire l'empreinte carbone et à valoriser des ressources naturelles renouvelables. Ces matériaux suscitent aujourd'hui un intérêt croissant dans les domaines du génie civil, de la construction et de l'environnement. Parmi ces matériaux, les géotextiles biosourcés faits à base de fibres de lin, de jute, de coco ou de chanvre suscitent un intérêt scientifique et technique (Mazzarella et D'Ayala, 2012).

II.5.2 La filière lin en Normandie

La culture du lin (*Linum usitatissimum)* est bien adaptée aux conditions agro climatiques normandes avec des précipitations régulières, températures modérées et sols limoneux fertiles. Après la récolte, les tiges de lin subissent plusieurs étapes de transformation rouissage, teillage, peignage qui permettent d'extraire les fibres longues destinées à l'industrie textile.

Les géotextiles utilisés dans les études de Abbar et al., 2017a ; 2018 sont fabriqués à partir des

étoupes de peignage, sous-produits de la production textile inexploitables pour la confection vestimentaire mais parfaitement adaptés à des applications techniques. Ces fibres de moindre qualité textile sont valorisées par l'entreprise Ecotechnilin (Normandie, France) sous forme de géotextiles non tissés (NW : NoWoven) obtenus par voie sèche et aiguilletage. Cette valorisation des coproduits agricoles s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, réduisant les coûts de fabrication tout en soutenant la filière agricole régionale. Ce géotextile de lin a été aussi retenu pour sa forte capacité d'adsorption (Tableau 3) des métaux

Tableau 3 : Capacité maximale d'adsorption du cuivre, du plomb et du zinc par différents adsorbants à faible coût

Adsorbent	Cu (mg g^{-1})	Pb (mg g^{-1})	Zn (mg g^{-1})	Sources
Coquille de palmier à huile	1,75	3,39	-	Chong et al., (2013)
Riz	2,95	-	-	Aydin et al., (2008)
Poudre de cône de pin	6,80 - 9,22	-	-	Ofomaja et al., (2009)
Kaolinite	**11,04**	**-**	**-**	**Yavuz et al., (2003)**
Paille d'orge	4,64	-	-	Pehlivan et al., (2009a)
Coquille d'amande	-	8,08	-	Pehlivan et al., (2009a, b, c)
Lentille	9,59	-	-	Aydin et al., (2008)
Fibres de coco	-	-	1,53	Shukla et al., (2006)
Fibres de jute	4,23	-	3,55	Shukla et Pai, (2005)
Fibres de lin	**9,92**	**10,74**	**8,45**	**Abbar (2018)**

II.6. Limites des filtres à sable

Malgré leur simplicité et leur efficacité reconnue pour la rétention des particules, les filtres à sable présentent deux limites principales.

La première est le colmatage. Avec le temps, les particules retenues s'accumulent dans les pores du sable et réduisent sa perméabilité (Sorrentino et al., 2025). Les pores les plus petits se bouchent rapidement, tandis que les plus grands se bouchent plus lentement, au fur et à mesure que les dépôts s'accumulent.

La seconde est leur faible capacité à retenir les polluants dissous. Le sable retient bien les polluants particulaires, mais laisse passer une grande partie des polluants dissous (Flanagan et al., 2018).

C'est pour compenser cette seconde limite que le géotextile de fibres de lin est ajouté. En plus d'améliorer la rétention des particules solides, il retient aussi une partie des métaux dissous (Cu, Pb, Zn), comme le montre Tableau 3.

II.7. Travaux antérieurs sur le dispositif composite sable et géotextile de lin

Les travaux menés sur le dispositif composite sable-géotextile de lin s'inscrivent dans une continuité progressive.

- Abbar (2018) a posé les bases expérimentales en conditions saturées,

A l'aide d'une colonne horizontale en plexiglas (Ø 4,4 cm, L = 41,5 cm), en étudiant le transfert et la rétention des particules en suspension (kaolinite) et des éléments traces métalliques (Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}) dans différentes configurations sable-géotextile de lin.

Pour la rétention des MES, quatre configurations ont été comparées : sable seul, sable + 1NW, sable + 2NW et sable + 3NW. Le coefficient de filtration initial augmente avec le nombre de nappes de géotextile, passant respectivement de 2,49 m^{-1} (sable seul) à 3,07 m^{-1} (1NW), 3,66 m^{-1} (2NW) et 4,04 m^{-1} (3NW), soit une amélioration d'environ 60% des performances initiales entre le sable seul et le sable + 3NW. En termes de bilan de masse, les taux de rétention de la kaolinite obtenus sont de 60,44% pour le sable seul, 67,7% pour le sable + 1NW, 69,5% pour le sable + 2NW et 81,16% pour le sable + 3NW, la configuration à trois nappes se révélant la plus performante, avec une contribution notable des géotextiles eux-mêmes qui ont retenu 14% de la masse totale injectée.

Pour l'étude du transfert des éléments traces métalliques, seules deux configurations ont été comparées : sable seul et sable + 3NW. Après l'injection de 120 volumes de pores, l'efficacité de rétention finale était de 71% pour le plomb, 72% pour le cuivre et 42% pour le zinc dans le cas du sable seul, contre 98% pour le plomb, 94% pour le cuivre et 63% pour le zinc avec le sable + 3NW. Le zinc reste le métal le plus mobile dans les deux configurations, suivi du cuivre puis du plomb.

- Dans la continuité de ces travaux, Tidjany Malam (2025) a conduit des expériences en conditions non saturées, à l'aide d'un dispositif de plus grande échelle (colonne verticale, Ø 19,9 cm, H = 30 cm), équipé d'un simulateur de pluie et de trois (3) capteurs de teneur en eau (TDR Teros 12). Quatre configurations ont été testées : sable seul, sable + 1NW en haut, sable + 1NW au milieu et sable + 1NW en bas, avec uniquement des particules en suspension comme polluant. Les résultats ont montré que l'ajout du géotextile améliore significativement la rétention de MES, avec un taux global de 91 % pour les positions haute et centrale, contre 75

% pour le sable seul. Le seuil règlementaire de 90 % d'efficacité de filtration (loi sur l'eau, décret du 22 décembre 1994) est maintenu jusqu'à 40 volumes de pores pour les configurations les plus performantes, contre seulement 13 volumes de pores pour le sable seul. La position centrale s'est révélée optimale, assurant une meilleure redistribution du flux et une utilisation plus homogène du milieu filtrant.

III. MATERIELS ET METHODES

III.1. Matériaux utilisés

III.1.1 Le milieu poreux

Le support filtrant utilisé dans cette étude est un sable concassé provenant de l'enseigne Point P (Le Havre, France). Le choix de ce matériau repose sur les exigences granulométriques du DTU 64.1 (AFNOR, FA139464-1, 2007) relatif aux dispositifs d'assainissement non collectif. La granulométrie du sable, déterminée par tamisage à sec, s'étend de 630 à 4 000 µm (Figure 2). L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) indique une composition de 71 % de quartz, 22 % d'aragonite et 7 % de calcite (Tableau 4).

Tableau 4 : Propriétés physiques du sable utilisé, source : (Abbar, 2018)

Paramètre	**Valeurs**
Granulométrie (µm)	630 - 4 000
Porosité moyenne	0,38 (± 0,004)
Conductivité hydraulique (m/s)	$5{,}6 \times 10^{-3}$
Potentiel zêta (mV)	-25,36 (± 1,4)
Composition minéralogique	71 % quartz, 22 % aragonite, 7 % calcite

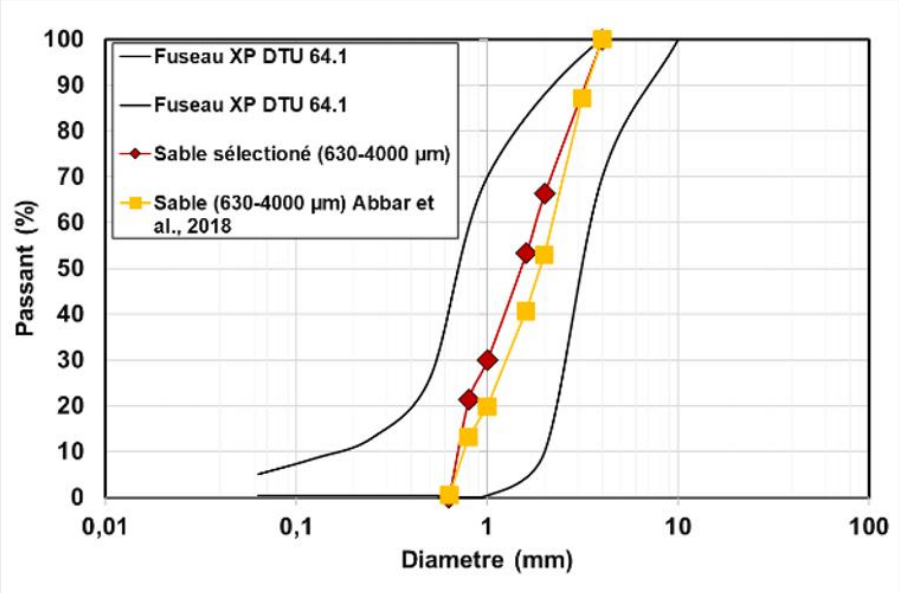


Figure 2 : Distribution granulométrique du sable, source : (Abbar, 2018)

III.1.2 Le géotextile non tissé de fibres de lin (NW)

Le géotextile utilisé (Figure 3) dans le cadre de cette étude est un non-tissé (NW - NoWoven) fabriqué à partir de sous-produits de fibres de lin (étoupes de peignage) par l'entreprise ***Ecotechnilin*** (Normandie, France). Il est composé de longues fibres de lin dont le diamètre est compris entre 10 et 15 µm, obtenues par voie sèche et consolidées par aiguilletage. Ce géotextile présente une forte porosité (86,17 %) et une conductivité hydraulique de $3{,}75 \times 10^{-3}$ m/s, quasi équivalente à celle du sable, ce qui évite tout risque d'engorgement tout en assurant un bon contact entre l'eau et les fibres actives. Dans la continuité des travaux antérieurs (Abbar, 2018 ; Tidjany Malam, 2025), ce géotextile a été retenu afin d'assurer la comparabilité des résultats. Ses propriétés physiques sont détaillées dans le Tableau 5.

Tableau 5: Propriétés physiques du géotextile non tissé de lin (NW) ; Source : Abbar (2018)

Paramètre	**Valeur**
Épaisseur (mm)	5
Masse surfacique (g/m²)	479
Porosité (%)	86,17
Densité des fibres	1,5
Conductivité hydraulique (m/s)	$3{,}75 \times 10^{-3}$
Diamètre des fibres (µm)	10 – 15
Diamètre moyen des pores (µm)	110
Potentiel zêta (mV)	-10



Figure 3 : Géotextile non tissé de fibres de lin :(a) observation au microscope optique (échelle : 600 µm) ; (b) aspect macroscopique

III.1.3 La Fluorescéine

La fluorescéine ($C_{20}H_{10}Na_2O_5$) est un traceur conservatif dissous. Elle a été retenue pour caractériser les propriétés hydrodynamiques du milieu filtrant en raison de sa solubilité en milieu aqueux, de sa stabilité à pH neutre et de sa faible adsorption sur les surfaces minérales. Sa détection est réalisée par spectrophotométrie UV-Visible à 490 nm.

III.1.4 Les particules en suspension

Afin de reproduire la charge particulaire des eaux pluviales, la kaolinite P300 (Figure 4) a été choisie comme argile modèle. Ce silicate d'aluminium hydraté ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) est couramment employé dans les essais de filtration pour sa stabilité chimique, sa finesse granulométrique et sa représentativité des argiles rencontrées dans le ruissellement urbain (Abbar, 2018 ; Tidjany Malam, 2025). D'après la diffraction des rayons X, la poudre utilisée renferme 82,62 % de kaolinite, 17,25 % de quartz et moins de 1 % de muscovite et de calcite. Les particules solides, préparées à 2 g/L dans de l'eau distillée, sont maintenues sous agitation permanente dans le bac d'alimentation afin de préserver leur homogénéité durant toute l'injection. Le Tableau 6 rassemble ses principales caractéristiques physiques.

Tableau 6 : Propriétés physiques de la kaolinite P300

Paramètre	**Valeur**
Granulométrie (µm)	1,7 - 40
Diamètre médian D50 (µm)	11
Surface spécifique (m^2/g)	28
Potentiel zêta (mV)	-35,6 (± 2,6)



Figure 4 : Image réelle de la kaolinite P300

III.2. METHODES

III.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 5) repose sur une colonne verticale en plexiglas transparent (diamètre intérieur 19,9 cm, hauteur totale 30 cm, hauteur utile 28,5 cm) garnie du milieu filtrant, sable seul ou associé au géotextile. Ce montage, déjà mis en œuvre par Tidjany Malam (2025), a été repris afin d'assurer la comparabilité des données. L'alimentation s'effectue en tête au moyen d'un simulateur de pluie qui répartit uniformément la solution sur la surface du filtre. En amont, deux réservoirs contenant respectivement l'eau et la solution à injecter (traceur ou MES) sont raccordés par une vanne trois voies, et une pompe péristaltique (Cole-Parmer Masterflex) assure un débit constant de 360 cm^3/min. Cinq capteurs TDR Teros 12 (Campbell Scientific) sont installés à différentes profondeurs (Tableau 7) de la colonne pour suivre l'évolution de la teneur en eau volumique, et transmettent leurs données en continu à une centrale d'acquisition CR350 (Campbell Scientific) à un pas de temps de 30 secondes, assurant le suivi continu de la teneur en eau. L'effluent collecté en sortie de colonne est analysé en continu par un turbidimètre (Kobold Instruments) pour les essais MES, et par spectrophotométrie UV-Visible à 490 nm pour les essais de traçage avec la fluorescéine. Une grille de maille inférieure au diamètre des grains, placée en pied de colonne, empêche l'entraînement du sable.

Tableau 7 : Emplacement des capteurs de teneur en eau dans la colonne expérimentale

Capteur	**VW1**	**VW2**	**VW3**	**VW4**	**VW5**
Profondeur (cm)	-8,5	-14,5	-18,5	-23,5	-28,5

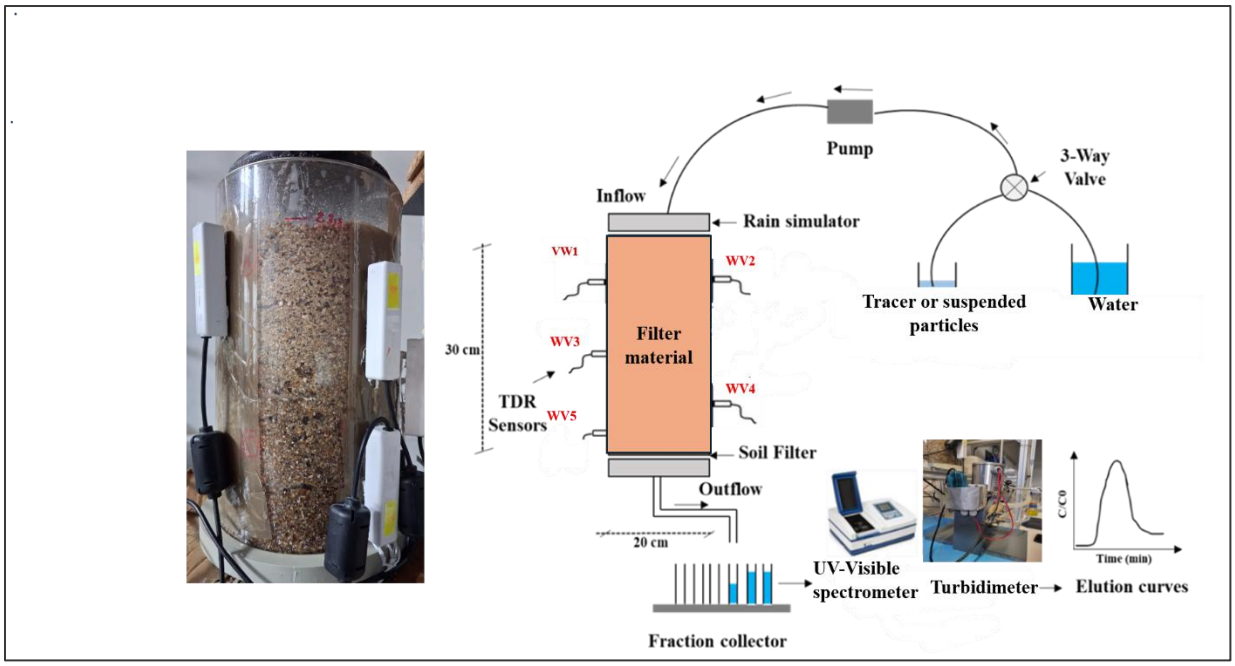


Figure 5 : Dispositif de filtration

III.2.2 Configurations expérimentales

Dans le cadre de cette étude, cinq (5) configurations (Figure 6) de filtre composite ont été définies et testées afin d'évaluer l'effet du nombre de nappes de géotextile sur les performances de filtration en conditions non saturées. Pour les configurations B et C, la position centrale du géotextile dans la colonne a été retenue comme position de référence (Tidjany Malam, 2025).

- **Configuration A** (sable seul) : la colonne (28,5 cm d'hauteur utile) est remplie uniquement de sable concassé qui constitue la configuration de référence ;
- **Configuration B** (sable + 1 NW) : une (1) nappe de géotextile non tissé de lin est positionnée au milieu (-16 cm) de la colonne (28,5 cm d'hauteur utile) ;
- **Configuration C** (sable + 2 NW) : deux (2) nappes de géotextile non tissé de lin positionnées respectivement au milieu (-16 cm) et en bas (-24 cm) de la colonne (28,5 cm d'hauteur utile) ;
- **Configuration D** (sable + 3 NW) : trois (3) nappes de géotextile non tissé de lin réparties respectivement en haut (-8 cm), au milieu (-16 cm) et en bas (-24 cm) ;
- **Configuration E** (sable + 6 NW) : six nappes de géotextile non tissé de lin réparties par paires (2) en haut (-8 cm), au milieu (-16 cm) et en bas (-24 cm).

REMARQUE :

Le choix de ces cinq configurations suit une logique progressive : **les configurations B, C et D** (1, 2 puis 3 nappes) permettent d'évaluer l'effet du nombre de nappes aux positions haute (-8cm), centrale (-16 cm) et basse (-24 cm).

La configuration E (6 NW) vise à pousser le dispositif à sa limite, afin d'évaluer si l'ajout de nappes supplémentaires continue d'améliorer la rétention ou entraîne au contraire une dégradation du comportement hydrodynamique (colmatage, perte de charge).

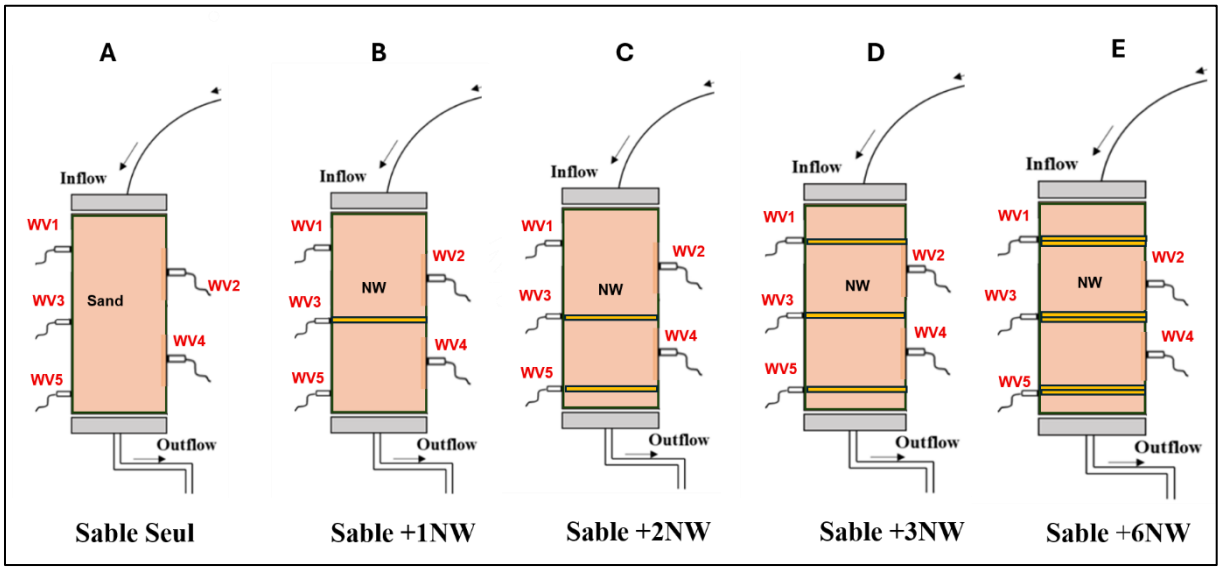


Figure 6 : Schéma des différentes configurations de filtre testées

III.2.3 Protocoles expérimentaux

III.2.3.1 Caractérisation hydrodynamique par traçage à la fluorescéine

Des essais de traçage par injection instantanée de 300 ml d'une solution de fluorescéine (sel de sodium, $C_{20}H_{10}Na_2O_5$) à 0,05 g/L de fluorescéine ont été réalisés sur les cinq configurations de la colonne afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques du milieu filtrant, notamment la vitesse d'écoulement réelle, le coefficient de dispersion et la dispersivité. Le débit est maintenu constant à 360 cm^3/min pendant tout l'essai.

Apres l'injection, on collecte toutes les 30 secondes à la sortie du filtre, les échantillons. Ces échantillons sont ensuite mesurés par spectrophotométrie UV-Visible à 490 nm qui donne les résultats en absorbances. A l'aide d'un coefficient d'étalonnage de 0,02, déterminé au préalable, on convertit les absorbances en concentration (g/L). Chaque essai est repris trois (3) fois afin de s'assurer de la reproductibilité des résultats.

Les courbes de restitution ainsi obtenues, exprimées en concentration relative C/C_0 en fonction du temps, sont ensuite exploitées à l'aide du logiciel STANMOD, qui permet d'ajuster des modèles analytiques de transport de solutés aux données expérimentales afin d'en extraire les paramètres hydrodynamiques caractéristiques du milieu filtrant.

Le transport d'un soluté conservatif en milieu poreux est classiquement décrit par l'équation de convection-dispersion (CDE : Convection-Dispersion Equation), qui traduit simultanément le déplacement du soluté avec le flux d'eau (convection) et son étalement autour du front d'écoulement (dispersion hydrodynamique) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \times \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - V \times \frac{\partial C}{\partial X} \qquad (1)$$

où C (mg/L) est la concentration du soluté,

t (min) : le temps,

x (cm) : la distance parcourue,

v (cm/min) : la vitesse de pore

D (cm^2/min) : le coefficient de dispersion hydrodynamique.

La résolution de cette équation par le logiciel STANMOD permet d'optimiser les paramètres v et D par ajustement aux données expérimentales, en minimisant la somme des carrés des résidus (SSQ) entre les concentrations mesurées et simulées. La dispersivité α (cm), est ensuite déduite par la relation $\alpha = D/v$.

Lorsque le milieu poreux présente des hétérogénéités structurelles, le modèle CDE peut s'avérer insuffisant pour reproduire fidèlement les courbes de restitution, notamment leur traîne. Le

modèle MIM (Mobile-Immobile Model) est alors proposé comme alternative. Il divise le volume poreux en deux domaines : une zone d'eau mobile, dans laquelle le soluté est transporté par convection et dispersion, et une zone d'eau immobile, dans laquelle le soluté est temporairement piégé et échangé lentement avec la zone mobile. Deux paramètres supplémentaires caractérisent ce modèle : β, la fraction de porosité occupée par l'eau mobile, et ω (min^{-1}), le coefficient d'échange de masse entre les deux zones.

Pour cette étude, le modèle CDE a été retenu pour l'ajustement des courbes de restitution des cinq (5) configurations. Le modèle MIM, adapté aux milieux présentant des zones d'eau immobile marquées, n'a pas été nécessaire car les courbes obtenues présentent une forme symétrique, sans traîne significative.

III.2.3.2 Filtration des Particules Solides

Les concentrations en matières en suspension mesurées dans les eaux de ruissellement urbaines varient généralement entre 10 et 260 mg/L selon le type de surface et l'intensité du trafic (Gromaire et al., 2013). Dans notre étude, une concentration de kaolinite nettement plus élevée, égale à 2 g/L, a été utilisée afin de mettre le dispositif filtrant en difficulté au cours des essais de filtration des matières en suspension. En effet, des études antérieures ont montré qu'une concentration élevée de particules en suspension dans la solution injectée entraîne une diminution plus rapide de la perméabilité du milieu filtrant (Brown et al., 2002 ; Reddi et al., 2000 ; Moghadasi et al., 2004b ; Alem et al., 2015).

Ces essais de filtration des matières en suspension consistent à injecter en continu une suspension de kaolinite P300 à une concentration de 2 g/L, à un débit constant de 360 cm^3/min, jusqu'à atteindre 20 volumes de pores injectés. La turbidité de l'effluent est enregistrée en continu par le turbidimètre à flux continu préalablement étalonné, permettant de constituer les courbes de restitution (C/C_0 en fonction des VP).

Après chaque essai, on détermine la répartition spatiale des particules retenues. La colonne est divisée en 7 tranches horizontales de 4 cm d'épaisseur. Chaque tranche est prélevée, séchée à 105 °C pendant 24 h et pesée. Ensuite, elle est lavée à l'eau sur un tamis de 200 µm afin de libérer les fines piégées dans le sable. Le sable lavé est séché et pesé, la masse retenue dans la tranche étant obtenue par différence entre les pesées avant et après lavage. Un bilan massique global est dressé pour chaque essai selon la relation :

$$Masse\ injectée\ =\ Masse\ restituée\ +\ Masse\ retenue\ dans\ le\ milieu \qquad (2)$$

L'efficacité de filtration Eff à chaque instant t est calculée comme suit :

$$Eff = 100 \times \left(1 - \frac{C(t)}{C_0}\right) \qquad (3)$$

C(t) : La concentration de particules solides en sortie de la colonne à l'instant t

C_0 : la concentration initiale injectée

Le seuil de 90 % d'efficacité de filtration, fixé par la réglementation française (loi sur l'eau, décret du 22 décembre 1994), constitue la référence à partir de laquelle les performances des différentes configurations sont évaluées et comparées.

IV. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES

Le traitement des données consiste à rassembler, vérifier et exploiter l'ensemble des mesures recueillies au cours des essais. Les données de teneur en eau sont collectées au moyen du logiciel PC400, relié à la centrale d'acquisition CR350. Les autres grandeurs mesurées (turbidité, absorbance, débit et masses des fractions), ainsi que les données recueillies via PC400, sont ensuite traitées sous tableur Microsoft Excel.

Les courbes de restitution sont exprimées en concentration relative C/C_0 en fonction du nombre de volumes de pores injectés. Un volume de pores correspond au volume des vides de la colonne. Un bilan de masse est réalisé pour chaque essai afin de vérifier la conservation de la matière et d'estimer l'incertitude expérimentale.

Les courbes de traçage à la fluorescéine sont ajustées à l'aide du modèle CDE avec le logiciel STANMOD.

V. RESULTATS ET DISCUSSION

V.1. Teneur en eau et le débit d'écoulement

➢ Teneur en eau

La teneur en eau volumique (VW) représente la fraction du volume total du milieu poreux occupée par l'eau. Elle est mesurée en continu par les cinq capteurs TDR Teros 12 positionnés le long de la colonne et enregistrée par la centrale CR350. Son suivi (Figure 7 et 8) permet de vérifier que l'écoulement s'effectue bien en conditions non saturées et que le régime permanent est établi avant chaque injection, garantissant ainsi la validité et la reproductibilité des résultats. Cette mesure a été réalisée lors des essais de traçage à la fluorescéine ainsi que lors des essais de filtration de MES. Les Figures suivantes présentent l'évolution temporelle de la teneur en eau pour les cinq configurations testées.

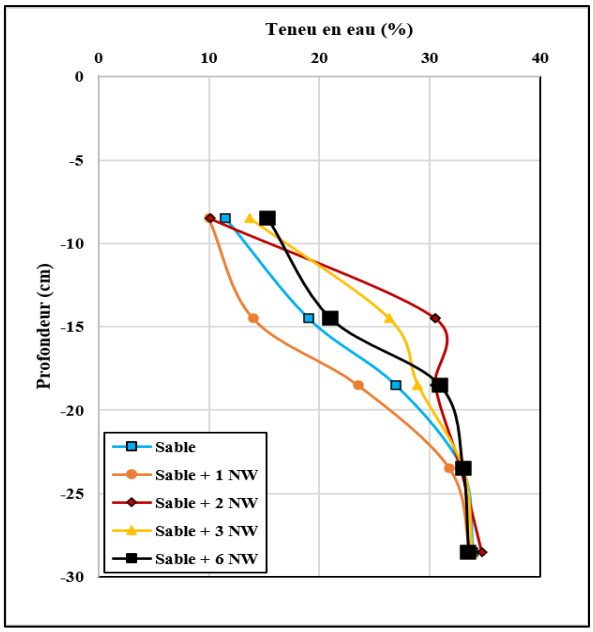


Figure 7 : Evolution de la teneur en eau à l'intérieur de la colonne pour les 5 configurations étudiées

On remarque que pour toutes les configurations la teneur en eau augmente en fonction de la profondeur.

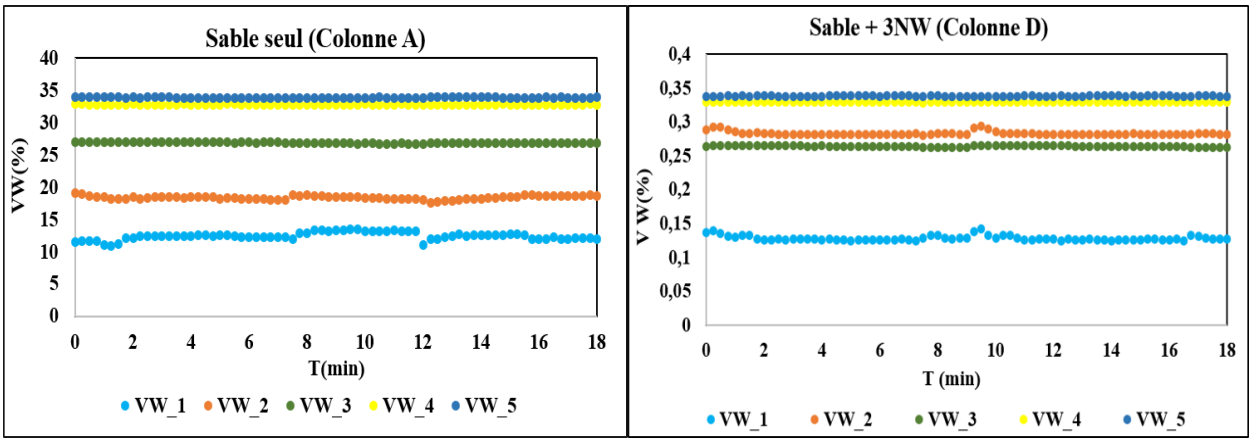


Figure 8 : Suivi de la teneur en eau volumique dans le cas du sable seul et sable + 3 nappes de géotextile de Lin

On observe que la teneur en eau reste constante pendant les essais.

Pour la configuration sable seul, la teneur en eau est de **12%** au niveau du capteur VW1 placé en haut (-8.5 cm) de la colonne ; **18 %** au niveau du capteur VW2 placé à -14.5 cm ; **27 %** pour le capteur VW3 placé à -18.5 cm ; **33%** pour le capteur VW4 positionné a -23.5 cm et enfin **34 %** au niveau du capteur VW5 placé en bas (-28,5 cm). Cela signifie que l'eau s'accumule naturellement dans les parties inférieures sous l'effet de la gravité, alors que les zones supérieures restent moins humides.

Lorsqu'on ajoute **trois (3) nappes de géotextile** dans la colonne (sable + 3NW), le profil de teneur en eau change. En effet, le géotextile se comporte comme une barrière qui ralentit le passage de l'eau. Cet effet est observé au niveau du capteur **VW1**, placé juste au-dessus de la première nappe de géotextile. On a la teneur en eau qui passe **12%** pour le **sable seul** a **14 %** pour le **sable +3NW**. Au niveau du capteur **VW2** on observe une teneur en eau de **18%** pour le **sable seul** et **28.9%** pour le **sable +3NW**.

Au niveau du capteur **VW3**, on observe **27%** pour le sable seul contre **26,5%** pour le **sable + 3NW**, soit une valeur quasiment inchangée. Les capteurs **VW4 et VW5**, situés plus en aval de la colonne, affichent des teneurs en eau identiques entre les deux configurations, respectivement **33% et 34%.** Cette stabilité aux positions VW3, VW4 et VW5 s'explique par le fait que les nappes de géotextile, positionnées dans la partie supérieure du dispositif, influencent principalement l'écoulement à proximité immédiate de leur emplacement (VW1 et VW2), sans modifier significativement le comportement hydrique dans les zones plus profondes de la colonne, où l'eau demeure principalement régie par la gravité.

➢ **Le Débit**

La figure 9 illustre l'évolution du débit au cours de l'essai ‘‘sable seul’’. Le débit mesuré en sortie de colonne reste stable et proche du débit imposé de 360 cm³/min. Cette stabilité, combinée aux profils de teneur en eau stables présentés précédemment (figure 8), confirme que le système a bien fonctionné en régime permanent durant toutes les expériences. Ces deux indicateurs garantissent que les conditions hydrauliques sont restées constantes et comparables entre les différentes configurations testées (sable +1NW, sable +2NW, Sable +3NW, Sable +6NW).

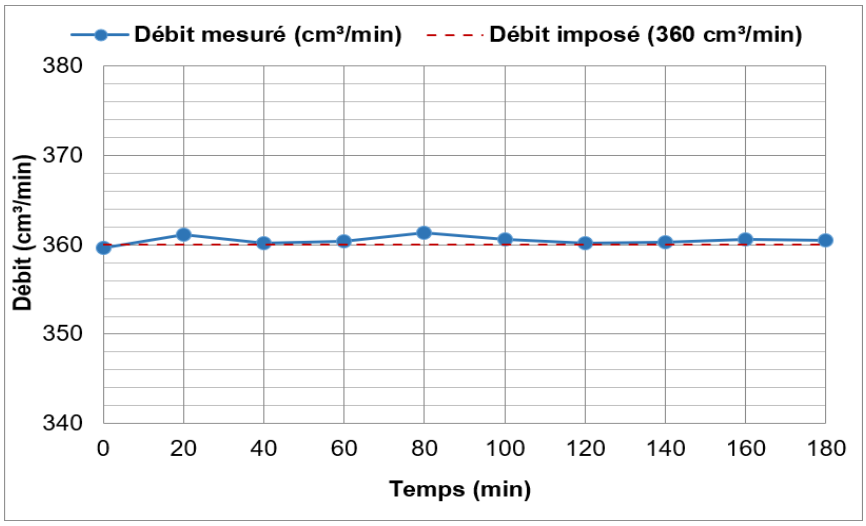


Figure 9 : Évolution du débit en fonction du temps au cours de l'essai sable seul

V.2. Caractérisation hydrodynamique du dispositif filtrant

V.2.1 Courbes de restitution de la fluorescéine

Des essais de traçage à la fluorescéine ont été réalisés sur l'ensemble des configurations étudiées **(sable seul, sable + 1 NW, sable + 2 NW, sable + 3 NW et sable + 6 NW)** afin de caractériser l'écoulement et de déterminer les principaux paramètres de transport, notamment le coefficient de dispersion, la dispersivité et la vitesse interstitielle d'écoulement. Pour chaque essai, un débit constant de **360 cm³/min** a été appliqué et une même quantité de traceur a été injectée, soit 300 mL d'une solution de fluorescéine à une concentration de **0,05 g/L**. Les courbes de restitution obtenues pour les différents essais sont présentées à la Figure 10.

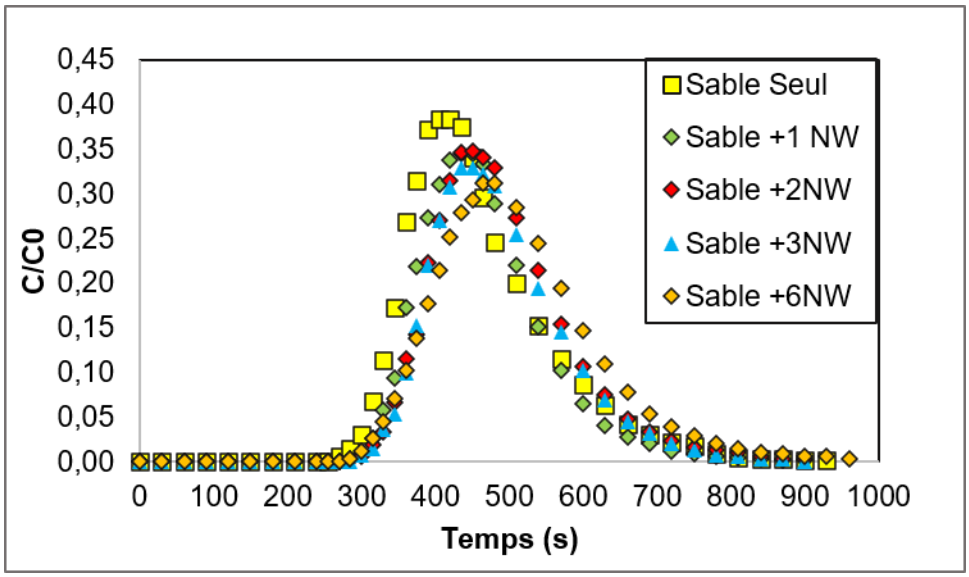


Figure 10 : Courbes de restitution de la fluorescéine réalisées sur les 05 configurations étudiées

Les courbes de restitution obtenues pour les différentes configurations présentent une forme en cloche symétrique. Avec la configuration sable seul, la fluorescéine est détectée à la sortie de colonne à partir de 4,25 min (255 secondes), avec un pic de concentration relative de C/C_0 = 0,384. Avec l'ajout de nappes de géotextiles le traceur est détecté en sortie à 5min (300 secondes) et pour la configuration sable + 6 NW, le pic est réduit à C/C_0 = 0,313.

Ce décalage progressif du pic avec l'augmentation du nombre de nappes indique que le traceur séjourne plus longtemps dans le milieu filtrant. Cela s'explique par le fait que :

Premièrement, le géotextile ralentit et régularise l'écoulement de l'eau dans la colonne : sans géotextile, l'eau emprunte des chemins préférentiels et traverse rapidement certaines zones du sable, tandis que le géotextile force une répartition plus uniforme du flux, ce qui augmente le temps que le traceur passe dans le filtre.

Deuxièmement, il est possible qu'une partie de la fluorescéine se fixe légèrement et temporairement sur les fibres de lin, comme cela peut arriver avec des matériaux cellulosiques ayant une certaine affinité de surface avec des molécules organiques. Cette fixation, même faible, retarderait la sortie du traceur et réduirait la hauteur du pic, avant que la fluorescéine ne se libère progressivement. La Figure 11 présente l'aspect visuel de ce traceur, dont la couleur verte permet un suivi visuel simple en complément des mesures spectrophotométriques.

Troisièmement, chaque nappe de géotextile ajoutant 5 mm d'épaisseur (Tableau 5), passer de 1 à 6 nappes allonge physiquement le trajet que le traceur doit parcourir à travers un matériau dense, ce qui peut aussi contribuer, de façon purement mécanique, au retard observé.



Figure 11 : La fluorescéine

V.2.2 Paramètres hydrodynamiques obtenus par modélisation STANMOD

L'ajustement des courbes de restitution expérimentales par le modèle CDE sous STANMOD (Figure 12) a permis d'extraire les paramètres de transport (Tableau 8) pour chaque configuration.

Tableau 8 : Paramètres hydrodynamiques obtenus par modélisation STANMOD

Configuration	α (cm)	vi (cm/s)	D (cm^2/s)	Réduction de D (%)	vD (cm/s)	α/L (%)	R^2 (%)
Sable seul	0,749	0,0494	0,037	0,0	0,0188	2,63	98
Sable +1 NW	0,709	0,0494	0,035	5,4	0,0188	2,49	98
Sable + 2 NW	0,648	0,0494	0,032	13,5	0,0188	2,27	99
Sable + 3 NW	0,628	0,0494	0,031	16,2	0,0188	2,20	99
Sable + 6 NW	0,607	0,0494	0,030	18,9	0,0188	2,13	99.7

La vitesse de Darcy (vD = 0,0188 cm/s) et la vitesse interstitielle (vi = 0,0494 cm/s) sont identiques pour toutes les configurations. Cela s'explique par le fait que l'ajout d'un ou plusieurs géotextiles ne modifient pas le régime de l'écoulement.

Par contre, on constate une diminution progressive coefficient de dispersion D (Figure 13). On passe de 0,037 cm^2/s pour le sable seul à 0,030 cm^2/s pour la configuration sable + 6NW, soit une réduction de 18,9 %.

La dispersivité α suit la même tendance, passant de 0,749 cm à 0,607 cm, avec un rapport α / L qui diminue de 2,63 % à 2,13 %. Cette réduction de la dispersion traduit une homogénéisation progressive de l'écoulement induite par les nappes de géotextile, qui limitent les chemins préférentiels et redistribuent le flux vers des pores moins conducteurs (Abbar et al., 2017a).

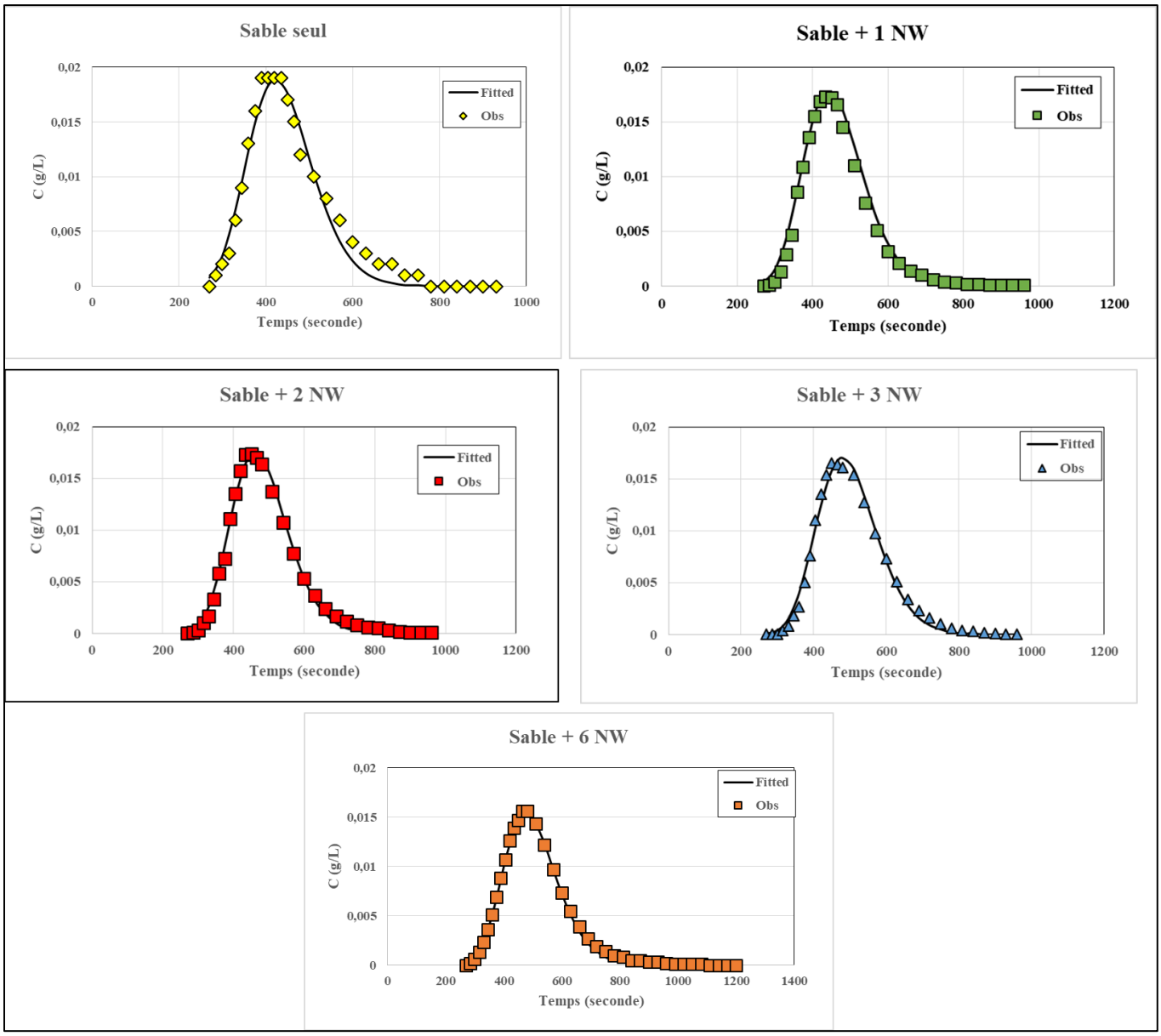


Figure 12 : Courbes d'ajustements des expériences d'élution avec le modèle CDE

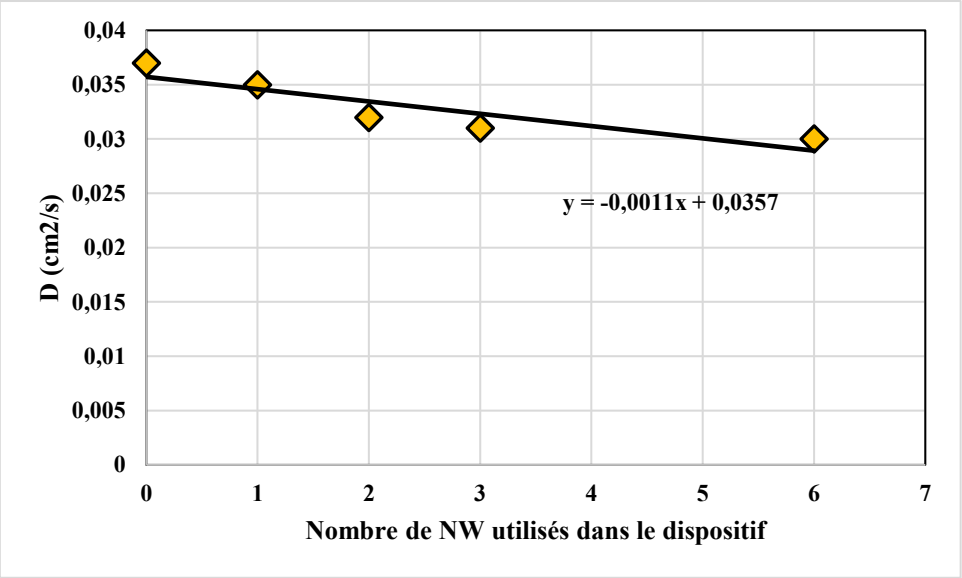


Figure 13 : Evolution du coefficient de dispersion hydrodynamique D (cm2/s) en fonction du nombre des nappes de géotextile utilisées dans le sable

Les essais de traçage ont mis en évidence une diminution progressive de la dispersivité avec l'augmentation du nombre de géotextiles de lin insérés dans la colonne de sable. La dispersivité passe de **0,75 cm** pour le sable seul à **0,61 cm** pour la configuration comprenant six (6) géotextiles, soit une réduction d'environ **19 %**. Cette évolution traduit une diminution de la dispersion mécanique au sein du milieu poreux. L'introduction des géotextiles de lin favorise une redistribution plus homogène de l'écoulement et limite la formation de chemins préférentiels dans le sable. Ces résultats montrent que le géotextile de lin joue un rôle positif dans l'amélioration des propriétés hydrodynamiques du milieu filtrant.

V.3. Filtration des matières en suspension (MES)

V.3.1 Restitution de la kaolinite

Cinq configurations de filtres ont été soumises aux essais de filtration : sable seul, sable + 1 NW, sable + 2 NW, sable + 3 NW et sable + 6 NW. La Figure 14 présente l'évolution de la concentration relative C/C_0 en fonction du nombre de volumes de pores injectés, où C désigne la concentration mesurée en sortie de colonne et C_0 la concentration de la suspension injectée. Un volume de pores représente le volume total des vides de la colonne, estimé à 3,30 L, soit un volume total injecté de 66 L par expérience, correspondant à 20 VP. Pour chaque configuration, un bilan de masse (Tableau 9) a été réalisé afin de quantifier la masse de particules retenues dans le milieu filtrant.

Tableau 9 : Bilan de masse (les valeurs du sable seul sont issues de Tidjany Malam, 2025)

Essais	**C_0 (g/l)**	**T_{inj}(min)**	**M_{inject}(g)**	**M_{restit}(g)**	**$M_{dépot}$(g)**	**Erreur (%)**	**$\tau_{restitut}$(%)**	**τ_{retent}(%)**
Sable Seul	2	180	139.3	16,56	122,70	7,3	11,88	88,12
Sable+1NW	2	180	132	2,38	129,02	0,45	1,81	98,19
Sable+2NW	2	180	132	0,87	130,48	0,49	0,66	99,34
Sable+3NW	2	180	132	0,77	130,99	0,18	0,59	99,41
Sable+6NW	2	180	132	0,10	131,90	0,45	0,08	99,92
Volume injecté pour chaque essai = 66L qui correspond à 20 volumes de pores (VP)								

M_{inject} : Masse injectée ;

M_{restit} : Masse restituée ;

$\tau_{restitut}$: Taux de restitution ;

τ_{retent} : Taux de rétention.

Les courbes de restitution de la kaolinite obtenues pour les cinq (5) configurations présentent un comportement commun, comme l'illustre la Figure 14 et 15. Le comportement ces courbes peut être décrit en trois (3) phases :

La première phase, appelée **phase de lit propre**, est observée au début de l'injection pour toutes les configurations. Elle se caractérise par un pic initial de C/C0 suivi d'une diminution rapide. Durant cette phase, le milieu poreux est encore propre et les particules les plus fines sont rapidement transportées vers la sortie avant d'être capturées. Au fur et à mesure que les sites de rétention se remplissent, les particules déposées bloquent progressivement les pores et retiennent les nouvelles particules entrant dans le milieu, ce qui explique la diminution rapide du pic C/C0.

La deuxième phase est une **phase de stabilisation** durant laquelle C/C0 reste faible et relativement constant. Ce comportement traduit un équilibre entre le dépôt et le transport des particules dans le milieu.

La troisième phase est une **phase de relargage**. Durant cette phase, on observe une augmentation progressivement de C/C0, traduisant une remobilisation des particules préalablement déposées sous l'effet de l'écoulement continu.

Le début de la phase de relargage dépend fortement du nombre de nappes de géotextile.

Avec la configuration sable seul, le relargage débute à partir de **5 VP** et passe à **7 VP** pour la configuration **sable + 1NW**.

Pour les configurations **sable + 2NW** et **sable + 3NW**, on observe qu'ils ont un comportement similaire. Le relargage pour les deux est constaté à partir de **12 VP**.

Avec la configuration **sable + 6NW**, aucun relargage n'a été observé sur les **20 VP** injectés.

Ces résultats montrent que l'ajout l'augmentation du nombre de nappes de géotextile retarde le début du relargage et prolonge la durée de vie du dispositif filtrant.

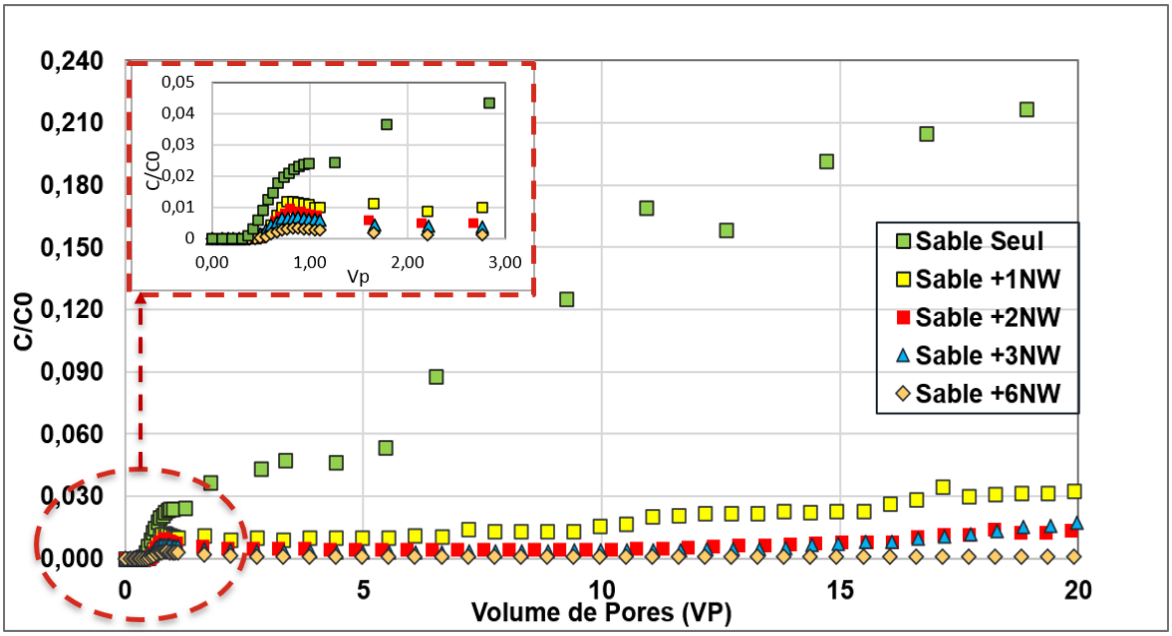


Figure 14 : Courbes de restitution de la kaolinite sur les 05 configurations étudiées

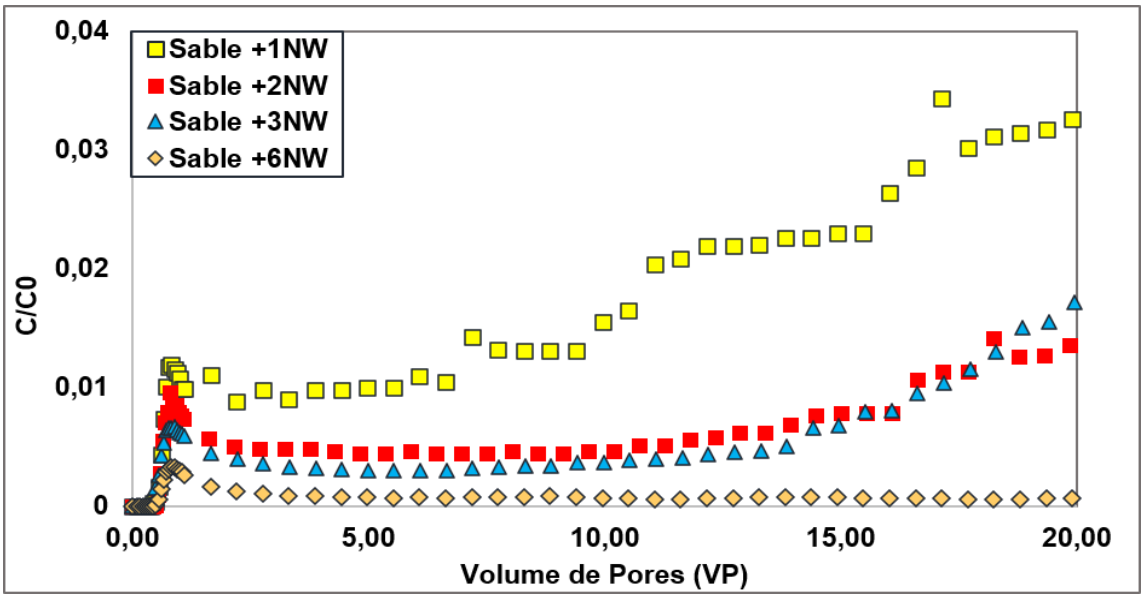


Figure 15 : Courbes de restitution de la kaolinite sur les 04 configurations avec géotextile

V.3.2 Performance de rétention du dispositif filtrant

L'efficacité de filtration est le rapport entre la masse de particules captée par le filtre et la masse totale de particules injectées durant l'essai. Une efficacité élevée traduit une bonne capacité du milieu à retenir les particules en suspension et une diminution progressive de l'efficacité de filtration indique la saturation des sites de rétention. La Figure 16 et 17 montrent l'évolution de cette efficacité en fonction du nombre de volumes de pores injectés pour les cinq (05) configurations étudiées (sable seul, sable + 1 NW, sable + 2 NW, sable + 3 NW et sable + 6 NW).

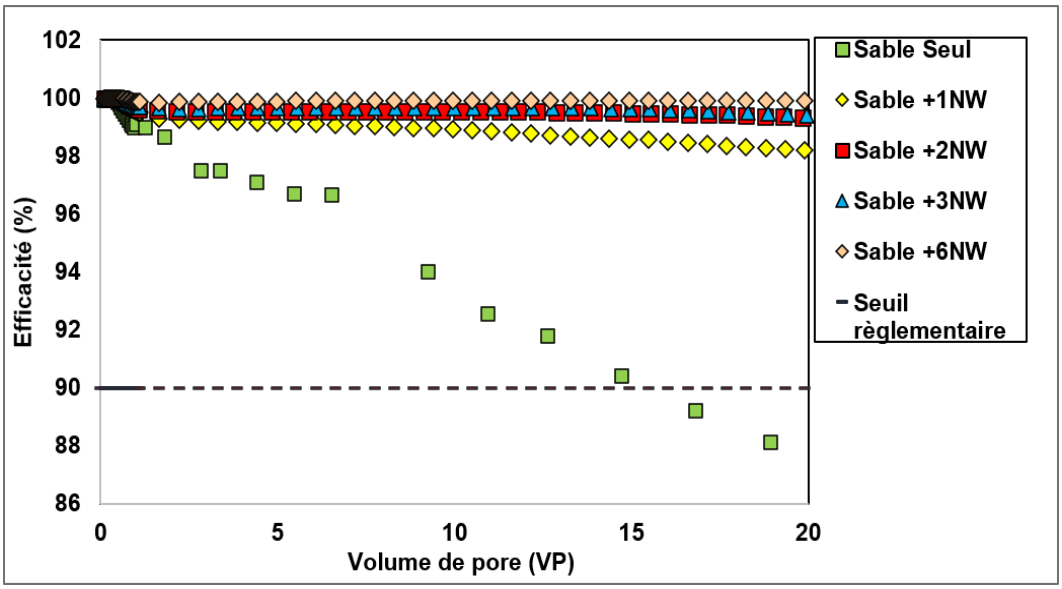


Figure 16 : Courbes d'efficacité de filtration des différentes configurations étudiées

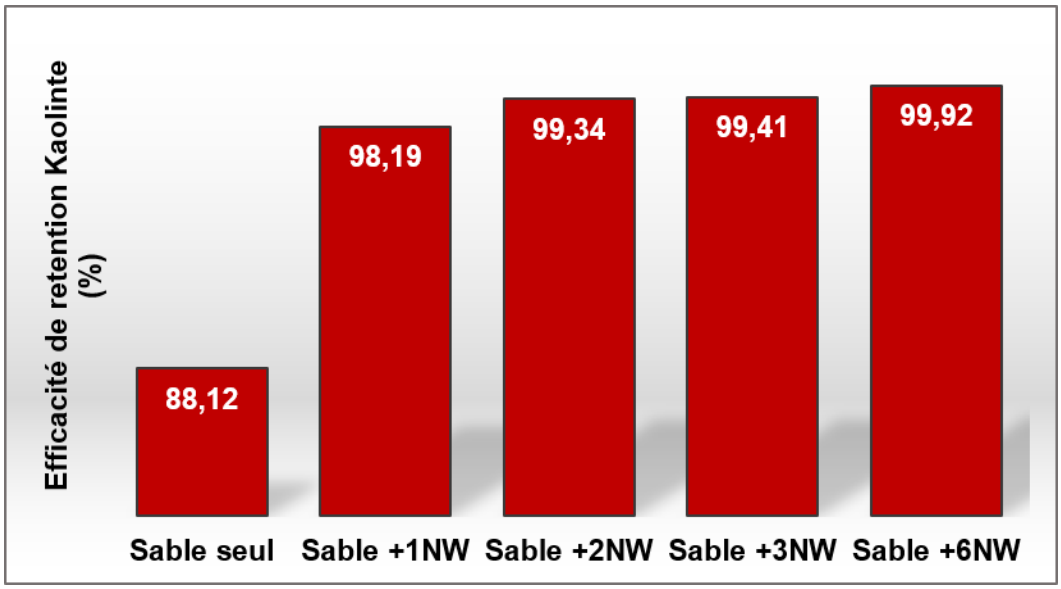


Figure 17 : Efficacité de Rétention globale de Kaolinite des différentes configurations

Pour un volume injecté de 66 L correspondant à 20 volumes de pores (VP), une masse de 132 g de kaolinite a été injectée dans chaque configuration à une concentration de 2 g/L et un débit de 360 cm³/min.

Le taux de restitution diminue fortement avec l'ajout de géotextile, de **11,88 %** pour le **sable seul** à **0,08 %** pour le **sable + 6NW** (Tableau 9). Le taux de rétention augmente donc avec le nombre de nappes : il est de **88,12 %** pour le sable seul, **98,19 %** pour le sable + 1NW, **99,34 %** pour le sable + 2NW, **99,41 %** pour le sable + 3NW et **99,92 %** pour le sable + 6NW.

Ainsi, le sable seul a une capacité de rétention de **88,12 %,** ce qui est en dessous du **seuil règlementaire de 90 %** requis pour les dispositifs de traitement des eaux pluviales (loi sur l'eau, décret du 22 décembre 1994). En revanche, avec l'ajout d'une seule nappe de géotextile, la rétention dépasse largement ce seuil pour atteindre près de **99,92 %** avec **six nappes**. Ce résultat montre l'importance déterminante du géotextile. Le sable seul ne permet pas d'atteindre l'exigence règlementaire alors que l'association du sable et du géotextile dépasse largement le seuil règlementaire. La Figure 18 illustre cette différence de comportement hydraulique entre les configurations. En l'absence de géotextile, l'écoulement emprunte des chemins préférentiels qui limitent la rétention des particules solides, tandis que l'ajout du géotextile homogénéise l'écoulement et améliore la rétention des particules.

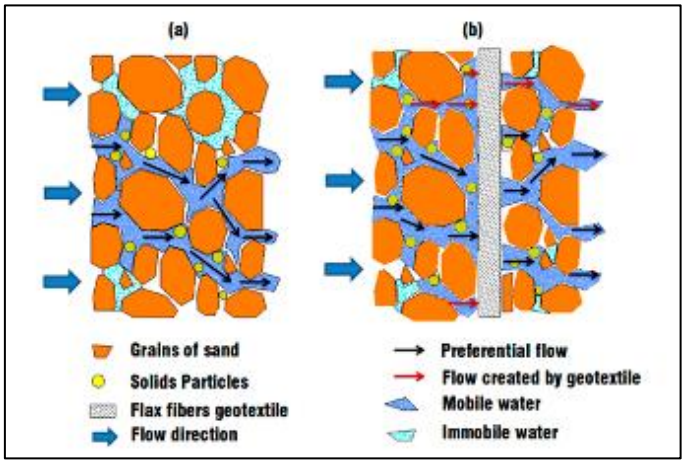


Figure 18 : (a) le sable sans géotextile, l'écoulement est préférentiel et la rétention des particules solides est incomplète ;(b) le sable avec un géotextile en fibres de lin, l'écoulement est homogénéisé (Abbar et al 2017a)

V.3.3 Profil de rétention des particules dans la colonne

Le Profil de rétention décrit la répartition spatiale des particules de kaolinite le long de la colonne et permet de localiser les zones de plus forte accumulation. Le dépôt est exprimé en dépôt spécifique σ, soit la masse de kaolinite retenue rapportée à la masse de sable sec de chaque tranche. Pour le sable seul, le dépôt décroît de la surface (en haut) vers le bas. Ce comportement du sable seul est déjà connu (Abbar, 2018 ; Tidjany Malam, 2025). Les profils sont donc présentés (Figure 19) pour les quatre configurations comportant du géotextile (sable + 1NW, sable + 2NW, sable+ 3NW et sable+ 6NW).

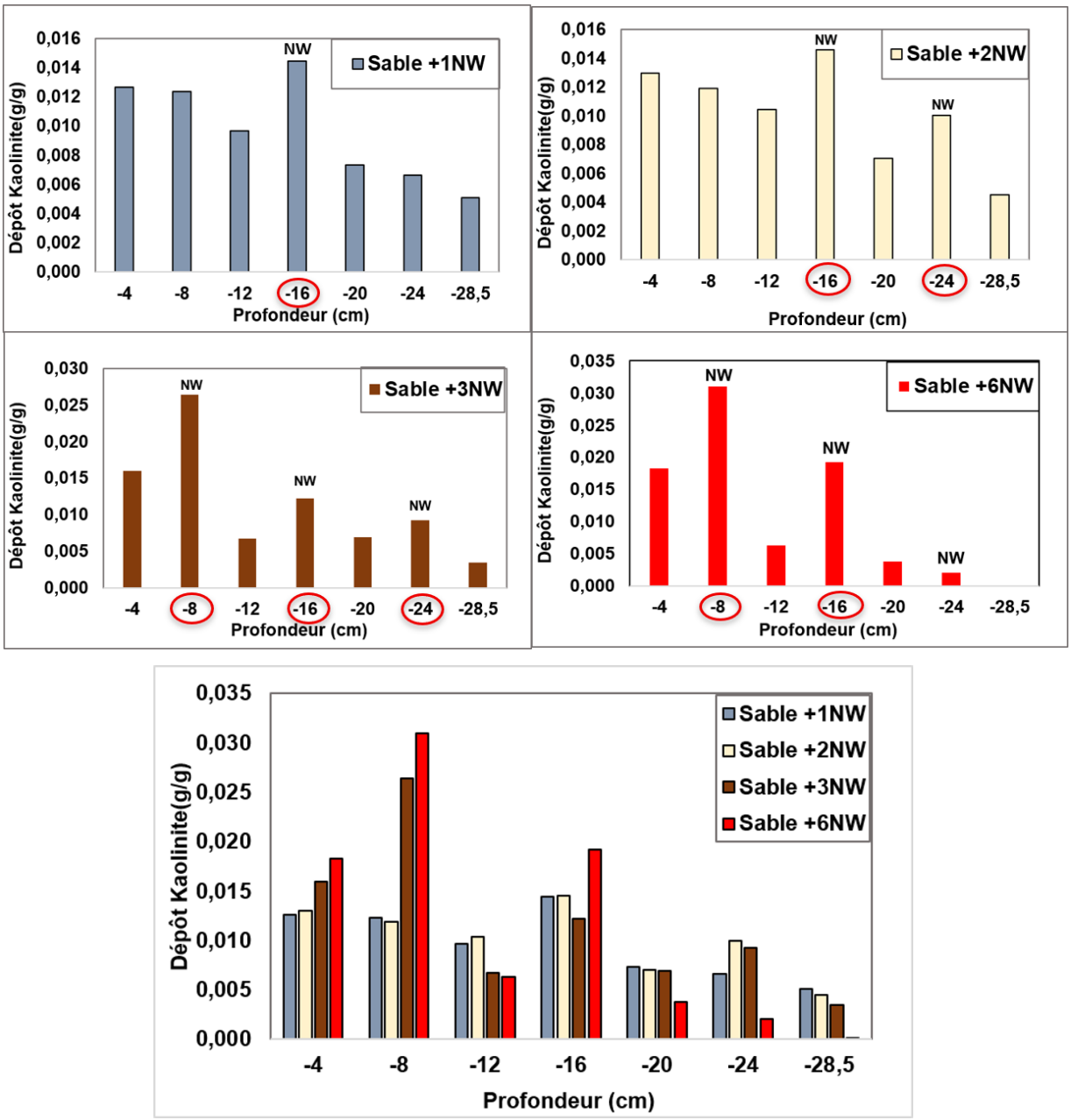


Figure 19 : Profils de dépôt spécifique de kaolinite le long de la colonne pour le Sable + géotextile après injection de 20 VP de kaolinite

Les profils montrent que, pour toutes les configurations avec géotextile, les zones de plus forte accumulation coïncident avec la position des nappes de géotextile.

Pour le **sable + 1NW**, le dépôt est maximal au niveau de la nappe, au milieu de la colonne (0,014 g/g à -16 cm), puis diminue vers le bas (0,005 g/g à -28,5 cm).

Pour le **sable + 2NW**, deux pics apparaissent, au milieu (0,015 g/g à -16 cm) et plus bas (0,01 g/g à -24 cm), à l'emplacement des deux nappes ; le dépôt reste faible en bas (0,004 g/g à -28,5 cm).

On observe que pour la configuration **sable + 3NW**, des pics de rétention qui correspondent à l'emplacement des 3 nappes de géotextile. En haut (0,026 g/g à -8 cm), Au milieu (0,012 g/g à -16 cm) et en bas (0,009 g/g à -24 cm).

On remarque que pour la configuration **sable + 6NW**, les dépôts de particules solides sont situés en haut, avec un pic maximal en haut (0,031 g/g à -8 cm) et un second pic au milieu (0,019 g/g à -16 cm) . En bas il n'y a presque pas de dépôt.

Ces différents profils de rétention de particules solides indiquent que la position et nombre des nappes de géotextile conditionnent la localisation du dépôt. En effet, plus le nombre de nappes de géotextile augmente, plus le dépôt se déplace vers le haut et plus les pics sont élevés (de **0,014 g/g** pour **une (01) nappe de géotextile** à **0,031 g/g** pour **six (06) nappes de géotextile**). On observe aussi qu'avec l'augmentation du nombre de géotextile les particules atteignent de moins en moins le fond de la colonne.

V.3.4 Dépôt de kaolinite sur le géotextile

La masse de kaolinite déposée directement sur les nappes de géotextile a été déterminée pour chaque configuration : elle est de **12,22 g** pour le **sable + 1NW**, **21,58 g** pour le **sable + 2NW**, **30,23 g** pour le **sable + 3NW** et **38,79 g** pour le **sable + 6NW**. Cette masse augmente donc avec le nombre de nappes géotextiles. Afin de quantifier la contribution du géotextile seul (Figure 20) à la rétention des particules solides, les masses ont été rapportées à la masse totale de kaolinite injectée (132 g), selon la relation suivante :

Rétention du géotextile (%) = (masse déposée sur le géotextile / masse injectée) × 100

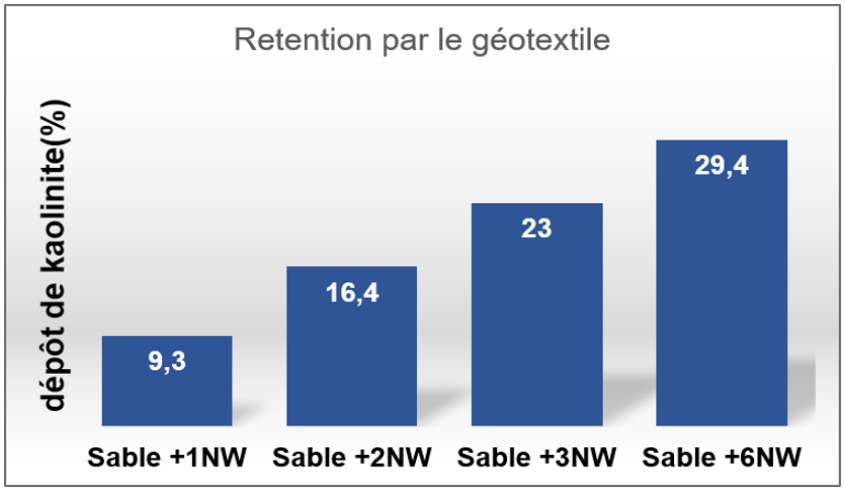


Figure 20 : Dépôt de kaolinite sur le géotextile

La rétention assurée par le géotextile de lin, augmente avec le nombre de nappes (Figure 20). Le géotextile assure la rétention d'environ 9 % de particules solides (kaolinite) pour la configuration sable + 1NW, 16 % pour la configuration sable + 2NW, 23 % pour la configuration sable + 3NW et 29 % pour la configuration sable + 6NW. Dans la configuration avec six (06) nappes, le géotextile retient donc à lui seul près de 29 % des particules injectées et le reste est bloqué par le sable.

Cette augmentation montre que le géotextile ne se contente pas d'homogénéiser l'écoulement, mais il fonctionne aussi comme un site de rétention à part entière. Plus les nappes de géotextiles sont nombreuses, plus elles offrent des surfaces de rétention supplémentaires. C'est ce qui explique l'amélioration progressive de la rétention globale du filtre et le retard du relargage des particules observés précédemment (Figure.15).

V.4. Colmatage du milieu filtrant

L'amélioration de la rétention des particules solides avec le nombre de nappes de géotextile ne peut se poursuivre indéfiniment. À partir d'un certain nombre de nappes, l'accumulation de particules solides sur les géotextiles finit par colmater les pores et réduire la perméabilité du milieu. Ce phénomène de colmatage n'a été observé que pour la configuration sable + six (6) nappes de géotextile de lin, à partir de 14 volumes de pores (VP) injectés ; aucune des autres configurations (sable seul, +1NW, +2NW, +3NW) n'a présenté de signe de colmatage similaire sur les 20 volumes de pores injectés. Ce colmatage s'est traduit par une diminution du débit de sortie et une accumulation visible (Figure 21) d'eau en surface de la colonne, tandis que l'eau continuait à sortir de la colonne. Cela signifie que la quantité d'eau entrant dans la colonne était devenue supérieure à celle qui en sortait.

Ce colmatage s'explique par la répartition inégale du dépôt de particules le long de la colonne. Sur les trois positions où les nappes sont doublées (-8 cm, -16 cm et -24 cm), la quasi-totalité des particules de kaolinite se dépose sur les géotextiles situés aux positions haute (-8 cm) et centrale (-16 cm), tandis que les nappes placées en bas de la colonne (-24 cm) n'en retiennent presque aucune. Cette accumulation concentrée aux deux premières positions crée une zone de forte résistance hydraulique en amont, jusqu'à ce que le milieu ne parvienne plus à évacuer le débit d'alimentation imposé, provoquant une remontée du niveau d'eau en surface.

Malgré ce phénomène, l'essai a été poursuivi jusqu'au terme prévu de 20 VP, sans interruption

ni intervention sur le dispositif, ce qui a permis de vérifier que le filtre continuait de fonctionner, bien qu'avec une capacité d'infiltration réduite.

Pour limiter ce risque de colmatage, la configuration à une seule nappe de géotextile (1NW), placée au milieu de la colonne, est retenue comme le meilleur choix. Avec un taux de rétention de 98,19 %, cette configuration dépasse déjà largement le seuil règlementaire de 90 %. Ajouter une deuxième ou une troisième nappe n'apporte qu'un gain minime (99,34 % et 99,41 %), pour un risque de colmatage plus élevé.



Figure 21 : Accumulation d'eau en surface à partir de 14 VP observée lors de l'essai Sable + 6NW

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Face aux limites des filtres à sable classiques, ce travail a évalué l'influence du nombre de nappes de géotextile non tissé de fibres de lin sur les performances de filtration des matières en suspension en conditions non saturées, et caractérisé le comportement hydrodynamique du dispositif à l'aide du logiciel STANMOD.

Les différents essais de traçage effectués sur les 05 configurations ont été correctement reproduits par le modèle CDE sous STANMOD, avec des coefficients de détermination R^2 compris entre 98 et 99,7 %, ce qui valide l'Hypothèse 1. Ces ajustements ont montré que l'ajout de nappes de géotextile réduit progressivement le coefficient de dispersion et la dispersivité, traduisant une homogénéisation croissante de l'écoulement et une réduction des chemins préférentiels à l'intérieur du milieu filtrant. Les différents essais de filtration de 20 volumes de pores (VP) de solution de kaolinite ont révélé que l'efficacité de filtration de la configuration avec le sable seul n'atteint pas la limite règlementaire (90%). Et toutes les configurations qui contiennent du géotextile dépassent le seuil règlementaire (90 %). Ce résultat valide l'Hypothèse 2. Mais la configuration avec sable + 6NW a présenté un risque de colmatage dès 14 VP injectés, ce qui constitue un point de vigilance pour le dimensionnement de dispositifs réels. La configuration avec une seule nappe, placée au centre de la colonne, apparaît donc comme le meilleur choix, car elle offre déjà un excellent niveau de rétention sans risque de colmatage à 20 VP.

Ces différents résultats obtenus confirment que l'optimisation du nombre de nappes de géotextile est un paramètre important pour améliorer les performances du filtre composite afin d'assurer une meilleure décontamination des eaux de ruissellement urbaines. Ce filtre composite fait à base de ressources locales et facile à mettre en œuvre constitue une solution efficace et durable.

En perspectives, il serait pertinent d'étendre ce travail à l'évaluation de la rétention en condition non saturée des polluants dissous, tels que les métaux lourds, les hydrocarbures et les pesticides. Le développement d'un modèle numérique sous HYDRUS, permettrait également de prendre en compte les variations climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

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

Abbar, B., Alem, A., Pantet, A., Marcotte, S., Ahfir, N.-D., & Duriatti, D. (2017a). Experimental investigation on removal of suspended particles from water using flax fibre geotextiles. *Environmental Technology, 38*(23), 2964-2978.

Abbar, B., Alem, A., Marcotte, S., Pantet, A., Ahfir, N.-D., Bizet, L., & Duriatti, D. (2017b). Experimental investigation on removal of heavy metals (Cu^{2+}, Pb^{2+}, and Zn^{2+}) from aqueous solution by flax fibres. *Process Safety and Environmental Protection, 109*, 639-647.

Alem, A., Elkawafi, A., Ahfir, N.-D., & Wang, H. (2013). Filtration of kaolinite particles in a saturated porous medium : Hydrodynamic effects. *Hydrogeology Journal, 21*, 573–586.

Berrouard, É. (2010). *Caractérisation de la décantabilité des eaux pluviales* [Rapport technique].

Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2008). Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite : A review. *Advances in Colloid and Interface Science, 140*(2), 114-131. https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.12.008

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

Bradford, S. A., & Torkzaban, S. (2008). Colloid transport and retention in unsaturated porous media : A review of interface-, collector-, and pore -scale processes and models. *Vadose Zone Journal, 7*(2), 667-681.

Browne, D., Deletic, A., Mudd, G. M., & Fletcher, T. D. (2008). A new saturated/unsaturated model for stormwater infiltration systems. *Hydrological Processes, 22*(25), 4838–4849. https://doi.org/10.1002/hyp.7100

Fardel, A. (2019). *Fonctionnement hydraulique et propriétés épuratoires de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales – cas des noues* [Thèse de doctorat, École centrale de Nantes].

Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., Dubois, P., Meffray, L., Partibane, C., Saad, M., & Gromaire, M.-C. (2018)**.** Field performance of two biofiltration systems treating micropollutants from road runoff. *Water Research, 145*, 562–578

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., Veiga, L., Grimaldi, M., & Aires, N. (2013). *Outils de bonne gestion des eaux*

de ruissellement en zones urbaines. Agence de l'eau Seine-Normandie.

IPCC. (2021). *Climate change 2021 : The physical science basis*. Cambridge University Press.

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.

Mazzarella, L., & D'Ayala, D. (2012). Natural fibers and geotextiles in civil engineering applications. In *Green Building Materials* (pp. 89–112). Springer.

Molnar, I. L., Pensini, E., Asad, M. A., Mitchell, C. A., Nitsche, L. C., Pyrak-Nolte, L. J., Miño, G. L., & Krol, M. M. (2019). Colloid transport in porous media : A review of classical mechanisms and emerging topics. *Transport in Porous Media, 130*, 129–156.

Sorrentino, G., Chellappah, K., & Biscontin, G. (2025). Understanding clogging mechanisms in filter media : An integration of laboratory findings and theoretical perspectives. *Separation and Purification Technology, 359*, 130602.

Tassin, B. (2012). Urban hydrology and stormwater management. In *Urban Water Management*. ENPC Press.

Tedoldi, D., Gromaire, M.-C., & Chebbo, G. (2020). *Infiltrer les eaux pluviales, c'est aussi maîtriser les flux polluants – État des connaissances et recommandations techniques pour la diffusion de solutions fondées sur la nature*. LEESU, École des Ponts ParisTech / Agence de l'eau Seine-Normandie.

Tidjany Malam, H. (2025). *Gestion des eaux pluviales et dépollution avec matériaux biosourcés* [Mémoire de master, 2iE / Université Le Havre Normandie].

Zgheib, S., Moilleron, R., & Chebbo, G. (2012). Priority pollutants in urban stormwater: Part 1 – Case of separate storm sewers. *Water Research, 46*(20), 6683–6692.

Zgheib, S. (2009). *Sources et flux des polluants prioritaires en milieu urbain* [Thèse de doctorat, Université Paris-Est].

ANNEXES

ANNEXE 1 : Injection 132 g et 66 L de Kaolinite sur Sable Seul. Source : Tidjany Malam (2025)

Temps (s)	VP	NTU	NTUfinal	C (g/l)	C/C0	mrestt	minj	Mdépo	efficacité
0	-	4,50	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60	0,11	4,50	0,00	0,000	0,000	0,000	0,700	0,700	100,000
120	0,21	4,50	0,00	0,000	0,000	0,000	1,400	1,400	100,000
180	0,32	4,60	0,10	0,000	0,000	0,000	1,750	1,750	99,998
210	0,37	6,20	1,70	0,002	0,001	0,000	2,100	2,100	99,986
240	0,42	11,20	6,70	0,006	0,003	0,001	2,450	2,449	99,945
270	0,47	17,30	12,80	0,012	0,006	0,003	2,800	2,797	99,880
300	0,53	24,60	20,10	0,018	0,009	0,007	3,150	3,143	99,793
330	0,58	32,00	27,50	0,025	0,012	0,011	3,500	3,489	99,690
360	0,63	37,30	32,80	0,030	0,015	0,016	3,850	3,834	99,584
390	0,68	43,80	39,30	0,035	0,018	0,022	4,200	4,178	99,471
420	0,74	48,00	43,50	0,039	0,020	0,029	4,550	4,521	99,361
450	0,79	51,00	46,50	0,042	0,021	0,036	4,900	4,864	99,257
480	0,84	53,50	49,00	0,044	0,022	0,044	5,250	5,206	99,160
510	0,89	55,90	51,40	0,046	0,023	0,052	5,600	5,548	99,068
540	0,95	57,00	52,50	0,047	0,024	0,060	5,950	5,890	98,984
570	1,00	57,80	53,30	0,048	0,024	0,069	7,700	7,631	99,106
720	1,26	58,80	54,30	0,049	0,024	0,112	11,200	11,088	99,003
1020	1,79	85,79	81,29	0,073	0,037	0,240	18,200	17,960	98,683
1620	2,84	101,00	96,50	0,087	0,043	0,544	21,700	21,156	97,495
1920	3,36	110,00	105,50	0,095	0,047	0,710	28,700	27,990	97,527
2520	4,41	107,00	102,50	0,092	0,046	1,033	35,700	34,667	97,107
3120	5,47	123,00	118,50	0,107	0,053	1,406	42,700	41,294	96,707
3720	6,52	200,00	195,50	0,176	0,088	2,022	60,900	58,878	96,680
5280	9,25	283,00	278,50	0,251	0,125	4,303	72,100	67,797	94,032
6240	10,93	380,00	375,50	0,338	0,169	6,195	83,300	77,105	92,563
7200	12,61	357,00	352,50	0,317	0,159	7,972	97,300	89,328	91,807
8400	14,71	430,00	425,50	0,383	0,191	10,652	111,300	100,648	90,429
9600	16,82	460,00	455,50	0,410	0,205	13,522	125,300	111,778	89,208
10800	18,92	486,00	481,50	0,433	0,217	16,556	139,300	122,744	88,115
12000	21,02	580,00	575,50	0,518	0,259	20,181	153,300	133,119	86,835

ANNEXE 2 : Injection 132 g et 66 L de Kaolinite sur Sable +1NW

T(min)	T(s)	V(ml)	VP	NTU	NTU final	C(g/L)	C/Co	M_rest	M_inj	M_depot	Efficacité
0	0	0	0,00	5,6	0	0	0	0	0	0	0
1	60	365	0,11	5,6	0	0	0	0	0,73	0,73	100
1,5	90	547,5	0,17	5,6	0	0	0	0	1,095	1,095	100
2	120	730	0,22	5,6	0	0	0	0	1,46	1,46	100
2,5	150	912,5	0,28	5,6	0	0	0	0	1,825	1,825	100
3	180	1095	0,33	5,6	0	0	0	0	2,19	2,19	100
3,5	210	1277,5	0,39	5,6	0	0	0	0	2,555	2,555	100
4	240	1460	0,44	6,1	0,5	0,00045	0,000225	8,21E-05	2,92	2,919918	99,99719
4,5	270	1642,5	0,50	6,4	0,8	0,00072	0,00036	0,000214	3,285	3,284786	99,9935
5	300	1825	0,55	9,2	3,6	0,00324	0,00162	0,000805	3,65	3,649195	99,97795
5,5	330	2007,5	0,61	15,2	9,6	0,00864	0,00432	0,002382	4,015	4,012618	99,94068
6	360	2190	0,66	22	16,4	0,01476	0,00738	0,005075	4,38	4,374925	99,88413
6,5	390	2372,5	0,72	27,9	22,3	0,02007	0,010035	0,008738	4,745	4,736262	99,81585
7	420	2555	0,77	31,7	26,1	0,02349	0,011745	0,013025	5,11	5,096975	99,74511
7,5	450	2737,5	0,83	32	26,4	0,02376	0,01188	0,017361	5,475	5,457639	99,6829
8	480	2920	0,88	31,3	25,7	0,02313	0,011565	0,021582	5,84	5,818418	99,63044
8,5	510	3102,5	0,94	30,5	24,9	0,02241	0,011205	0,025672	6,205	6,179328	99,58626
9	540	3285	1,00	29,4	23,8	0,02142	0,01071	0,029581	6,57	6,540419	99,54975
9,5	570	3467,5	1,05	27,6	22	0,0198	0,0099	0,033195	6,935	6,901805	99,52134
10	600	3650	1,11	27,6	22	0,0198	0,0099	0,036808	7,3	7,263192	99,49578
15	900	5475	1,66	30,1	24,5	0,02205	0,011025	0,07705	10,95	10,87295	99,29635
20	1200	7300	2,21	25,1	19,5	0,01755	0,008775	0,109078	14,6	14,49092	99,25289
25	1500	9125	2,77	27,3	21,7	0,01953	0,009765	0,144721	18,25	18,10528	99,20701
30	1800	10950	3,32	25,7	20,1	0,01809	0,009045	0,177735	21,9	21,72227	99,18843
35	2100	12775	3,87	27,4	21,8	0,01962	0,00981	0,213541	25,55	25,33646	99,16422
40	2400	14600	4,42	27,4	21,8	0,01962	0,00981	0,249348	29,2	28,95065	99,14607
45	2700	16425	4,98	27,8	22,2	0,01998	0,00999	0,285811	32,85	32,56419	99,12995
50	3000	18250	5,53	27,8	22,2	0,01998	0,00999	0,322275	36,5	36,17773	99,11706
55	3300	20075	6,08	30	24,4	0,02196	0,01098	0,362352	40,15	39,78765	99,0975
60	3600	21900	6,64	28,9	23,3	0,02097	0,010485	0,400622	43,8	43,39938	99,08534
65	3900	23725	7,19	37,3	31,7	0,02853	0,014265	0,452689	47,45	46,99731	99,04597
70	4200	25550	7,74	34,8	29,2	0,02628	0,01314	0,50065	51,1	50,59935	99,02025
75	4500	27375	8,30	34,7	29,1	0,02619	0,013095	0,548447	54,75	54,20155	98,99827
80	4800	29200	8,85	34,7	29,1	0,02619	0,013095	0,596244	58,4	57,80376	98,97903
85	5100	31025	9,40	34,7	29,1	0,02619	0,013095	0,644041	62,05	61,40596	98,96206
90	5400	32850	9,95	40,1	34,5	0,03105	0,015525	0,700707	65,7	64,99929	98,93348
95	5700	34675	10,51	42,1	36,5	0,03285	0,016425	0,760658	69,35	68,58934	98,90316
100	6000	36500	11,06	50,8	45,2	0,04068	0,02034	0,834899	73	72,1651	98,8563
105	6300	38325	11,61	51,8	46,2	0,04158	0,02079	0,910783	76,65	75,73922	98,81176
110	6600	40150	12,17	54,3	48,7	0,04383	0,021915	0,990772	80,3	79,30923	98,76616
115	6900	41975	12,72	54,3	48,7	0,04383	0,021915	1,070762	83,95	82,87924	98,72452
120	7200	43800	13,27	54,4	48,8	0,04392	0,02196	1,150916	87,6	86,44908	98,68617
125	7500	45625	13,83	55,8	50,2	0,04518	0,02259	1,23337	91,25	90,01663	98,64836
130	7800	47450	14,38	55,7	50,1	0,04509	0,022545	1,315659	94,9	93,58434	98,61364
135	8100	49275	14,93	56,6	51	0,0459	0,02295	1,399426	98,55	97,15057	98,57998
140	8400	51100	15,48	56,7	51,1	0,04599	0,022995	1,483358	102,2	100,7166	98,54857
145	8700	52925	16,04	64,2	58,6	0,05274	0,02637	1,579609	105,85	104,2704	98,50769
150	9000	54750	16,59	68,9	63,3	0,05697	0,028485	1,683579	109,5	107,8164	98,46249
155	9300	56575	17,14	81,9	76,3	0,06867	0,034335	1,808902	113,15	111,3411	98,40132
160	9600	58400	17,70	72,7	67,1	0,06039	0,030195	1,919113	116,8	114,8809	98,35692
165	9900	60225	18,25	74,8	69,2	0,06228	0,03114	2,032774	120,45	118,4172	98,31235
170	10200	62050	18,80	75,4	69,8	0,06282	0,03141	2,147421	124,1	121,9526	98,2696
175	10500	63875	19,36	76,1	70,5	0,06345	0,031725	2,263217	127,75	125,4868	98,2284
180	10800	65700	19,91	77,9	72,3	0,06507	0,032535	**2,38197**	**131,4**	**129,018**	**98,18724**

ANNEXE 3 : Injection 132 g et 66 L de Kaolinite sur Sable +2NW

T(min)	T(s)	V(ml)	VP	NTU	NTU final	C(g/L)	C/Co	M_rest	M_inj	M_depot	Efficacité
0	0	0	0,00	3,5	0	0	0	0	0	0	0,00
1	60	354	0,11	3,5	0	0	0	0,000	0,708	0,708	100,00
1,5	90	531	0,16	3,5	0	0	0	0,000	1,062	1,062	100,00
2	120	708	0,21	3,5	0	0	0	0,000	1,416	1,416	100,00
2,5	150	885	0,27	3,5	0	0	0	0,000	1,77	1,77	100,00
3	180	1062	0,32	3,5	0	0	0	0,000	2,124	2,124	100,00
3,5	210	1239	0,38	3,5	0	0	0	0,000	2,478	2,478	100,00
4	240	1416	0,43	3,5	0	0	0	0,000	2,832	2,832	100,00
4,5	270	1593	0,48	3,7	0,2	0,00018	9E-05	0,000	3,186	3,18596814	100,00
5	300	1770	0,54	5,6	2,1	0,00189	0,000945	0,000	3,54	3,53963361	99,99
5,5	330	1947	0,59	9,6	6,1	0,00549	0,002745	0,001	3,894	3,89266188	99,97
6	360	2124	0,64	15,7	12,2	0,01098	0,00549	0,003	4,248	4,24471842	99,92
6,5	390	2301	0,70	19,1	15,6	0,01404	0,00702	0,006	4,602	4,59623334	99,87
7	420	2478	0,75	21,1	17,6	0,01584	0,00792	0,009	4,956	4,94742966	99,83
7,5	450	2655	0,80	24,8	21,3	0,01917	0,009585	0,012	5,31	5,29803657	99,77
8	480	2832	0,86	22	18,5	0,01665	0,008325	0,015	5,664	5,64908952	99,74
8,5	510	3009	0,91	22,5	19	0,0171	0,00855	0,018	6,018	6,00006282	99,70
9	540	3186	0,97	21,2	17,7	0,01593	0,007965	0,021	6,372	6,35124321	99,67
9,5	570	3363	1,02	20,4	16,9	0,01521	0,007605	0,023	6,726	6,70255104	99,65
10	600	3540	1,07	19,9	16,4	0,01476	0,00738	0,026	7,08	7,05393852	99,63
15	900	5310	1,61	16,2	12,7	0,01143	0,005715	0,046	10,62	10,5737074	99,56
20	1200	7080	2,15	14,7	11,2	0,01008	0,00504	0,064	14,16	14,0958658	99,55
25	1500	8850	2,68	14,3	10,8	0,00972	0,00486	0,081	17,7	17,6186614	99,54
30	1800	10620	3,22	14,2	10,7	0,00963	0,004815	0,098	21,24	21,1416163	99,54
35	2100	12390	3,75	14,2	10,7	0,00963	0,004815	0,115	24,78	24,6645712	99,53
40	2400	14160	4,29	13,8	10,3	0,00927	0,004635	0,132	28,32	28,1881633	99,53
45	2700	15930	4,83	13,4	9,9	0,00891	0,004455	0,148	31,86	31,7123926	99,54
50	3000	17700	5,36	13,3	9,8	0,00882	0,00441	0,163	35,4	35,2367812	99,54
55	3300	19470	5,90	13,8	10,3	0,00927	0,004635	0,180	38,94	38,7603733	99,54
60	3600	21240	6,44	13,3	9,8	0,00882	0,00441	0,195	42,48	42,2847619	99,54
65	3900	23010	6,97	13,3	9,8	0,00882	0,00441	0,211	46,02	45,8091505	99,54
70	4200	24780	7,51	13,4	9,9	0,00891	0,004455	0,227	49,56	49,3333798	99,54
75	4500	26550	8,05	13,8	10,3	0,00927	0,004635	0,243	53,1	52,8569719	99,54
80	4800	28320	8,58	13,3	9,8	0,00882	0,00441	0,259	56,64	56,3813605	99,54
85	5100	30090	9,12	13,3	9,8	0,00882	0,00441	0,274	60,18	59,9057491	99,54
90	5400	31860	9,65	13,8	10,3	0,00927	0,004635	0,291	63,72	63,4293412	99,54
95	5700	33630	10,19	13,8	10,3	0,00927	0,004635	0,307	67,26	66,9529333	99,54
100	6000	35400	10,73	14,8	11,3	0,01017	0,005085	0,325	70,8	70,4749324	99,54
105	6300	37170	11,26	14,8	11,3	0,01017	0,005085	0,343	74,34	73,9969315	99,54
110	6600	38940	11,80	15,9	12,4	0,01116	0,00558	0,363	77,88	77,5171783	99,53
115	6900	40710	12,34	16,3	12,8	0,01152	0,00576	0,383	81,42	81,0367879	99,53
120	7200	42480	12,87	17,3	13,8	0,01242	0,00621	0,405	84,96	84,5548045	99,52
125	7500	44250	13,41	17,3	13,8	0,01242	0,00621	0,427	88,5	88,0728211	99,52
130	7800	46020	13,95	18,8	15,3	0,01377	0,006885	0,452	92,04	91,5884482	99,51
135	8100	47790	14,48	20,5	17	0,0153	0,00765	0,479	95,58	95,1013672	99,50
140	8400	49560	15,02	20,8	17,3	0,01557	0,007785	0,506	99,12	98,6138083	99,49
145	8700	51330	15,55	20,8	17,3	0,01557	0,007785	0,534	102,66	102,126249	99,48
150	9000	53100	16,09	20,9	17,4	0,01566	0,00783	0,561	106,2	105,638531	99,47
155	9300	54870	16,63	27,1	23,6	0,02124	0,01062	0,599	109,74	109,140936	99,45
160	9600	56640	17,16	28,6	25,1	0,02259	0,011295	0,639	113,28	112,640952	99,44
165	9900	58410	17,70	28,6	25,1	0,02259	0,011295	0,679	116,82	116,140968	99,42
170	10200	60180	18,24	34,9	31,4	0,02826	0,01413	0,729	120,36	119,630948	99,39
175	10500	61950	18,77	31,5	28	0,0252	0,0126	0,774	123,9	123,126344	99,38
180	10800	63720	19,31	31,7	28,2	0,02538	0,01269	0,819	127,44	**126,621**	99,36
185	11100	65490	19,85	33,7	30,2	0,02718	0,01359	0,867	**130,98**	**130,113**	99,34

ANNEXE 4 : Injection 132 g et 66 L de Kaolinite sur Sable +3NW

T(min)	T(s)	V(ml)	VP	NTU	NTU final	C(g/L)	C/Co	M_rest	M_inj	M_depot	Efficacité
0	0	0	0,00	3,7	0	0	0	0	0	0	0
1	60	366	0,11	3,7	0	0	0	0	0,732	0,732	100
1,5	90	549	0,17	3,7	0	0	0	0	1,098	1,098	100
2	120	732	0,22	3,7	0	0	0	0	1,464	1,464	100
2,5	150	915	0,28	3,7	0	0	0	0	1,83	1,83	100
3	180	1098	0,33	3,7	0	0	0	0	2,196	2,196	100
3,5	210	1281	0,39	4	0,3	0,00027	0,000135	4,94E-05	2,562	2,561951	99,99807
4	240	1464	0,44	4,3	0,6	0,00054	0,00027	0,000148	2,928	2,927852	99,99494
4,5	270	1647	0,50	7,1	3,4	0,00306	0,00153	0,000708	3,294	3,293292	99,9785
5	300	1830	0,55	9,4	5,7	0,00513	0,002565	0,001647	3,66	3,658353	99,955
5,5	330	2013	0,61	13,2	9,5	0,00855	0,004275	0,003212	4,026	4,022788	99,92023
6	360	2196	0,67	15,5	11,8	0,01062	0,00531	0,005155	4,392	4,386845	99,88263
6,5	390	2379	0,72	17,9	14,2	0,01278	0,00639	0,007494	4,758	4,750506	99,8425
7	420	2562	0,78	18,3	14,6	0,01314	0,00657	0,009898	5,124	5,114102	99,80682
7,5	450	2745	0,83	18,3	14,6	0,01314	0,00657	0,012303	5,49	5,477697	99,7759
8	480	2928	0,89	18,5	14,8	0,01332	0,00666	0,014741	5,856	5,841259	99,74828
8,5	510	3111	0,94	17,9	14,2	0,01278	0,00639	0,017079	6,222	6,204921	99,7255
9	540	3294	1,00	17,4	13,7	0,01233	0,006165	0,019336	6,588	6,568664	99,7065
9,5	570	3477	1,05	17,3	13,6	0,01224	0,00612	0,021576	6,954	6,932424	99,68974
10	600	3660	1,11	16,8	13,1	0,01179	0,005895	0,023733	7,32	7,296267	99,67578
15	900	5490	1,66	13,5	9,8	0,00882	0,00441	0,039874	10,98	10,94013	99,63685
20	1200	7320	2,22	12,4	8,7	0,00783	0,003915	0,054203	14,64	14,5858	99,62976
25	1500	9150	2,77	11,6	7,9	0,00711	0,003555	0,067214	18,3	18,23279	99,63271
30	1800	10980	3,33	10,9	7,2	0,00648	0,00324	0,079072	21,96	21,88093	99,63993
35	2100	12810	3,88	10,8	7,1	0,00639	0,003195	0,090766	25,62	25,52923	99,64572
40	2400	14640	4,44	10,6	6,9	0,00621	0,003105	0,10213	29,28	29,17787	99,65119
45	2700	16470	4,99	10,3	6,6	0,00594	0,00297	0,113001	32,94	32,827	99,65695
50	3000	18300	5,55	10,3	6,6	0,00594	0,00297	0,123871	36,6	36,47613	99,66156
55	3300	20130	6,10	10,3	6,6	0,00594	0,00297	0,134741	40,26	40,12526	99,66532
60	3600	21960	6,65	10,4	6,7	0,00603	0,003015	0,145776	43,92	43,77422	99,66809
65	3900	23790	7,21	10,7	7	0,0063	0,00315	0,157305	47,58	47,4227	99,66939
70	4200	25620	7,76	10,9	7,2	0,00648	0,00324	0,169163	51,24	51,07084	99,66986
75	4500	27450	8,32	11,2	7,5	0,00675	0,003375	0,181516	54,9	54,71848	99,66937
80	4800	29280	8,87	11,2	7,5	0,00675	0,003375	0,193868	58,56	58,36613	99,66894
85	5100	31110	9,43	11,8	8,1	0,00729	0,003645	0,207209	62,22	62,01279	99,66697
90	5400	32940	9,98	11,9	8,2	0,00738	0,00369	0,220714	65,88	65,65929	99,66498
95	5700	34770	10,54	12,2	8,5	0,00765	0,003825	0,234714	69,54	69,30529	99,66248
100	6000	36600	11,09	12,5	8,8	0,00792	0,00396	0,249208	73,2	72,95079	99,65955
105	6300	38430	11,65	12,7	9	0,0081	0,00405	0,264031	76,86	76,59597	99,65648
110	6600	40260	12,20	13,3	9,6	0,00864	0,00432	0,279842	80,52	80,24016	99,65246
115	6900	42090	12,75	13,7	10	0,009	0,0045	0,296312	84,18	83,88369	99,648
120	7200	43920	13,31	13,9	10,2	0,00918	0,00459	0,313111	87,84	87,52689	99,64354
125	7500	45750	13,86	14,8	11,1	0,00999	0,004995	0,331393	91,5	91,16861	99,63782
130	7800	47580	14,42	18,2	14,5	0,01305	0,006525	0,355274	95,16	94,80473	99,62666
135	8100	49410	14,97	18,8	15,1	0,01359	0,006795	0,380144	98,82	98,43986	99,61532
140	8400	51240	15,53	21,4	17,7	0,01593	0,007965	0,409296	102,48	102,0707	99,60061
145	8700	53070	16,08	21,5	17,8	0,01602	0,00801	0,438613	106,14	105,7014	99,58676
150	9000	54900	16,64	24,8	21,1	0,01899	0,009495	0,473364	109,8	109,3266	99,56889
155	9300	56730	17,19	26,8	23,1	0,02079	0,010395	0,51141	113,46	112,9486	99,54926
160	9600	58560	17,75	29,4	25,7	0,02313	0,011565	0,553738	117,12	116,5663	99,5272
165	9900	60390	18,30	32,6	28,9	0,02601	0,013005	0,601336	120,78	120,1787	99,50212
170	10200	62220	18,85	37,1	33,4	0,03006	0,01503	0,656346	124,44	123,7837	99,47256
175	10500	64050	19,41	38,2	34,5	0,03105	0,015525	0,713167	128,1	127,3868	99,44327
180	10800	65880	19,96	41,8	38,1	0,03429	0,017145	**0,775918**	**131,76**	**130,9841**	99,41111

ANNEXE 5 : Injection 132 g et 66 L de Kaolinite sur Sable +6NW

T(min)	T(s)	V(ml)	VP	NTU	NTU final	C(g/L)	C/Co	M_rest	M_inj	M_depot	Efficacité
0	0	0	0,00	4,5	0	0	0	0	0	0	0
1	60	365	0,11	4,5	0	0	0	0	0,73	0,73	100
1,5	90	547,5	0,17	4,5	0	0	0	0	1,095	1,095	100
2	120	730	0,22	4,5	0	0	0	0	1,46	1,46	100
2,5	150	912,5	0,28	4,5	0	0	0	0	1,825	1,825	100
3	180	1095	0,33	4,5	0	0	0	0	2,19	2,19	100
3,5	210	1277,5	0,39	4,5	0	0	0	0	2,555	2,555	100
4	240	1460	0,44	4,5	0	0	0	0	2,92	2,92	100
4,5	270	1642,5	0,50	4,7	0,2	0,00018	9E-05	3,29E-05	3,285	3,284967	99,999
5	300	1825	0,55	5,8	1,3	0,00117	0,000585	0,000246	3,65	3,649754	99,99325
5,5	330	2007,5	0,61	7,6	3,1	0,00279	0,001395	0,000756	4,015	4,014244	99,98118
6	360	2190	0,66	9,3	4,8	0,00432	0,00216	0,001544	4,38	4,378456	99,96475
6,5	390	2372,5	0,72	10,8	6,3	0,00567	0,002835	0,002579	4,745	4,742421	99,94565
7	420	2555	0,77	11,4	6,9	0,00621	0,003105	0,003712	5,11	5,106288	99,92736
7,5	450	2737,5	0,83	11,8	7,3	0,00657	0,003285	0,004911	5,475	5,470089	99,9103
8	480	2920	0,88	11,7	7,2	0,00648	0,00324	0,006094	5,84	5,833906	99,89566
8,5	510	3102,5	0,94	11,4	6,9	0,00621	0,003105	0,007227	6,205	6,197773	99,88353
9	540	3285	1,00	11,2	6,7	0,00603	0,003015	0,008327	6,57	6,561673	99,87325
9,5	570	3467,5	1,05	10,8	6,3	0,00567	0,002835	0,009362	6,935	6,925638	99,865
10	600	3650	1,11	10,3	5,8	0,00522	0,00261	0,010315	7,3	7,289685	99,8587
15	900	5475	1,66	8,2	3,7	0,00333	0,001665	0,016392	10,95	10,93361	99,8503
20	1200	7300	2,21	7,3	2,8	0,00252	0,00126	0,020991	14,6	14,57901	99,85623
25	1500	9125	2,77	6,8	2,3	0,00207	0,001035	0,024769	18,25	18,22523	99,86428
30	1800	10950	3,32	6,4	1,9	0,00171	0,000855	0,02789	21,9	21,87211	99,87265
35	2100	12775	3,87	6,3	1,8	0,00162	0,00081	0,030846	25,55	25,51915	99,87927
40	2400	14600	4,42	6,2	1,7	0,00153	0,000765	0,033638	29,2	29,16636	99,8848
45	2700	16425	4,98	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,036266	32,85	32,81373	99,8896
50	3000	18250	5,53	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,038566	36,5	36,46143	99,89434
55	3300	20075	6,08	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,041194	40,15	40,10881	99,8974
60	3600	21900	6,64	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,043493	43,8	43,75651	99,9007
65	3900	23725	7,19	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,046121	47,45	47,40388	99,9028
70	4200	25550	7,74	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,048749	51,1	51,05125	99,9046
75	4500	27375	8,30	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,051377	54,75	54,69862	99,90616
80	4800	29200	8,85	6,3	1,8	0,00162	0,00081	0,054334	58,4	58,34567	99,90696
85	5100	31025	9,40	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,056962	62,05	61,99304	99,9082
90	5400	32850	9,95	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,059261	65,7	65,64074	99,9098
95	5700	34675	10,51	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,061561	69,35	69,28844	99,91123
100	6000	36500	11,06	5,8	1,3	0,00117	0,000585	0,063696	73	72,9363	99,91275
105	6300	38325	11,61	5,8	1,3	0,00117	0,000585	0,065831	76,65	76,58417	99,91411
110	6600	40150	12,17	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,068131	80,3	80,23187	99,91515
115	6900	41975	12,72	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,07043	83,95	83,87957	99,9161
120	7200	43800	13,27	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,073058	87,6	87,52694	99,9166
125	7500	45625	13,83	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,075686	91,25	91,17431	99,91706
130	7800	47450	14,38	6,2	1,7	0,00153	0,000765	0,078479	94,9	94,82152	99,9173
135	8100	49275	14,93	6,1	1,6	0,00144	0,00072	0,081107	98,55	98,46889	99,9177
140	8400	51100	15,48	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,083406	102,2	102,1166	99,91839
145	8700	52925	16,04	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,085706	105,85	105,7643	99,91903
150	9000	54750	16,59	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,088005	109,5	109,412	99,91963
155	9300	56575	17,14	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,090305	113,15	113,0597	99,92019
160	9600	58400	17,70	5,8	1,3	0,00117	0,000585	0,09244	116,8	116,7076	99,92086
165	9900	60225	18,25	5,8	1,3	0,00117	0,000585	0,094575	120,45	120,3554	99,92148
170	10200	62050	18,80	5,8	1,3	0,00117	0,000585	0,09671	124,1	124,0033	99,92207
175	10500	63875	19,36	5,9	1,4	0,00126	0,00063	0,09901	127,75	127,651	99,9225
180	10800	65700	19,91	5,9	1,4	0,00126	0,00063	**0,101309**	**131,4**	**131,2987**	99,9229

ANNEXE 6 : Géotextile avant et après utilisation

(a) Géotextile avant utilisation



(b) Géotextile après utilisation



ANNEXE 7 : Etat des colonnes avant (a) et après (b) filtration pour les cinq configurations testées

