

Etude de filtration des eaux de ruissellement par la fibre de lin et du sable à l'échelle du laboratoire

Abbar Bouamama^{1*}, Alem Abdellah², Pantet Anne², Ahfir Nasre-Dine²

¹Université d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO UMR 7327, 1A rue de la Ferrollerie, 45071 Orléans, France

²Normandie Univ, UNIHAVRE, UMR 6294 CNRS, LOMC, Le Havre, France

*bouamama.abbar@cnrs-orleans.fr

RESUME : L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité épuratoire d'un dispositif de filtration des eaux de ruissellement composé de fibres de lin et de sable. Le choix de la fibre de lin est motivé par l'importante production du lin en Normandie (France). Deux types d'expériences ont été menées au laboratoire : (i) essais batch pour quantifier le potentiel d'adsorption des métaux lourds par des étoupes de fibres de lin, (ii) des essais en colonne de laboratoire pour caractériser l'influence des géotextiles de lin sur le transfert et la rétention des polluants solubles et particulaires dans un filtre de sable saturé, avec et sans géotextiles de lin. Les résultats obtenus montrent que les étoupes de lin sont des adsorbants efficaces pour l'élimination des ions métalliques dans l'eau. L'étude des isothermes d'adsorption a montré que l'adsorption des métaux lourds est favorable avec des capacités d'adsorption de 9,9 ; 10,7 et 8,4 mg g⁻¹ respectivement pour le cuivre, le plomb et le zinc. Les expériences de filtration sur colonne ont montré que l'efficacité de rétention des polluants solubles et particulaires du filtre est améliorée par la présence de géotextile de fibre de lin. Cependant, les essais de filtration sur colonne ont montré que les particules en suspension présentes dans les solutions injectées facilitent le transfert de polluants dans le milieu poreux et doivent être traitées comme des déchets à éliminer. Ces résultats peuvent être utilisés comme un bon indicateur pour l'utilisation de matériaux à base d'étoupes de fibre de lin pour la conception de systèmes de traitement des eaux de ruissellement pour l'élimination de polluants métalliques solubles ou liés aux particules en suspension.

Mots-clefs eaux de ruissellement, filtration, métaux lourds, particules en suspension, fibre de lin.

I. INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, en raison du changement climatique, l'intensité des pluies torrentielles a des effets destructeurs tels que glissements de terrain, inondations et érosion des sols. L'aménagement urbain qui crée de nombreuses surfaces imperméables (toits, voirie, parking, etc.) est associé à une augmentation du volume des eaux pluviales à gérer. Traditionnellement pour les villes, il existe deux types de systèmes de collecte des eaux de surface (i) les égouts unitaires qui évacuent à la fois les eaux pluviales et les eaux usées et (ii) des égouts séparés qui prennent en charge les eaux usées et les eaux pluviales dans des tuyaux séparés. Ensuite, les flux collectés sont transportés (par gravité ou relayés par des pompes) vers les stations d'épuration. Pour une meilleure gestion des eaux pluviales et pour éviter les inondations en milieu urbain, depuis de nombreuses années des techniques alternatives (chaussées perméables, noues, bassin de rétention...) ont été développées pour compléter les deux réseaux d'assainissement conventionnels. Ces techniques permettent la filtration des eaux de surface à la source et les eaux

épurées peuvent être stockées dans des bassins de rétention ou directement infiltrées dans le sous-sol. Les techniques alternatives ont également pour objectifs de réguler les débits et réduire les vitesses d'écoulement et les infiltrations d'eau dans le sol. Des études antérieures ont montré que ces techniques pourraient constituer des structures de décontamination en fonction de leurs fonctions et de leurs caractéristiques (Azzout et al., 1994, Legret et al., 1996 ; Colandini et al., 1995 ; Fuerhacker et al., 2011 ; Wei et al., 2015 ; Doig et al., 2007). Cependant, cette capacité de filtration peut entraîner dans le temps des conséquences indésirables pouvant affecter la durabilité de l'ouvrage. Plusieurs travaux ont observé que l'accumulation de polluants qui sont principalement adsorbés sur les particules solides dans le corps de la structure provoquent le phénomène de colmatage (Colandini et al., 1995 ; Winston et al., 2016). Les particules solides dans le ruissellement urbain sont de composition hétérogène car ils proviennent de nombreuses sources, telles que l'usure des pneus et des freins des véhicules, les lubrifiants et les traces d'huile, la dégradation des matériaux de surface et des toitures, les déjections animales, l'érosion des déchets et des sols, ainsi que les dépôts atmosphériques. La teneur en polluants tels que les métaux lourds dépend fortement de la circulation urbaine et de l'atmosphère industrielle. De nombreuses études ont rassemblé des données sur différents sites et mis en évidence la variabilité de la teneur en polluants dans les eaux de ruissellement. Les particules solides dans le ruissellement urbain sont en majorité très fines ($<100 \mu\text{m}$) (Chocat, 1997). Leurs propriétés sont liées à leur surface spécifique et leur surface est souvent chargée négativement, captant les cations des métaux lourds. Les métaux lourds sont présents dans les eaux de surfaces sous des formes solubles et attachés aux particules solides. Une grande partie des métaux lourds est associée aux particules fines. En effet, comme il a été démontré dans plusieurs études (Chocat, 1997 ; Pitt et al., 2005 ; Wong et al., 2008), de nombreux polluants associés au ruissellement, tels que les métaux lourds (Pb, Cu, Zn, etc.), les hydrocarbures totaux se lient avec des particules de sédiments. Pour éviter tout transfert ou relargage de pollution, les particules transportées doivent être traitées comme des déchets potentiellement toxiques. Une bonne pratique de la gestion des eaux pluviales est de traiter et de capturer la fraction de particules avant le stockage dans le système souterrain qui est plus difficile à restaurer. Dans ce contexte un prototype de dispositif de filtration des eaux de surfaces est prévu au nord du Havre en collaboration avec Le Havre Seine Métropole. Le dispositif consiste en une tranchée de faible dimension remplie de sable et de géotextile de lin. Le dispositif confectionné sous forme de kits est facile à extraire et à remplacer. Il permettra de récupérer, par rétention, l'essentiel des particules transportées par les eaux de ruissellement et de qualifier les capacités épuratrices de cette fibre naturelle. Les matériaux pourront être traités et le géotextile pollué détruit. Le choix du lin est lié à sa grande production dans la région de la Normandie et la recherche de nouveaux débouchés à ce produit. Hormis l'industrie du textile, l'utilisation du lin est de plus en plus développée dans de nombreuses applications industrielles et notamment dans le secteur du BTP. La région havraise est non seulement un des premiers sites SEVESO en France, à cause de sa forte industrialisation mais elle est aussi impactée par son agriculture intensive sur le plateau de Caux. Les eaux de ruissellement contribuent largement à augmenter ce transport sédimentaire. En cas de pollution, ces eaux doivent être traitées au plus vite. Avant de tester le dispositif à grande échelle, une étude a été réalisée sur un modèle réduit au laboratoire et dans des conditions contrôlées. Deux types d'expériences ont été menées : (i) des expériences d'adsorption pour étudier le potentiel épuratoire de la fibre de lin pour la rétention de métaux lourds, (ii) des expériences de transfert de particules solides et métaux lourds en colonnes de laboratoire remplies de sable-géotextiles de lin. Dans ce papier nous présentons la mise en place du dispositif de filtration, nous discutons par la suite de l'efficacité du dispositif pour la rétention des particules solides et des métaux lourds à l'échelle du laboratoire.

II. CONTEXTE ET MISE EN PLACE D'UN PROTOTYPE DE DISPOSITIF DE FILTRATION DES EAUX DE RUISSELLEMENT AU HAVRE

II.1. Qualité des eaux de ruissellement au Havre

Pour caractériser les eaux de surface de la ville du Havre, une campagne d'échantillonnage a été effectuée dans le cadre d'une étude préliminaire sur huit sites différents de la ville en temps de pluie en avril 2016 (Fig.1a). Les échantillons d'eau ont été conservés à une température de 4°C avant d'être analysés au laboratoire. Nous avons bien conscience de la faible représentativité de ces résultats d'autant plus que les surfaces ont été largement lavées pendant la période hivernale. Les principaux paramètres mesurés sont : le pH, la conductivité, la teneur en matières en suspension (MES), et la teneur en métaux lourds (As, Cu, Pb, Zn, et Cd). Les valeurs de pH ne montrent pas de variations notables avec un minimum de 6,40 et un maximum de 7,70. Les analyses des différents échantillons ont montré des valeurs de conductivité comprises entre 83 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 270 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Les faibles valeurs de la conductivité pourraient être attribuées aux précipitations qui ont entraîné un phénomène de dilution des eaux. Les teneurs en matière en suspension mesurées varient entre 87 et 1200 mg L^{-1} . Ces valeurs sont largement supérieures au seuil limite (35 mg L^{-1} (Pons et al., 2008)), elles doivent être éliminées avant que l'eau soit rejetée dans le milieu naturel. Les analyses chimiques des prélèvements par ICP ont montré que les eaux de surface du Havre contiennent des éléments traces métalliques (Cd, As, Pb, Cu, et Zn) à des teneurs variables (Fig. 1.b), avec des teneurs importantes pour le Zn, Cu, et Pb, et faibles pour Cd et As. La présence de ces polluants dans les eaux de ruissellement est liée au fort trafic en milieu urbain et aussi aux retombées atmosphériques due à l'intense activité industrielle au Havre. Cependant, toutes les concentrations enregistrées restent inférieures aux seuils limites pour un rejet direct dans le milieu naturel (Kara, 2011), toutefois l'effet cumulatif pourra à terme être nocif.

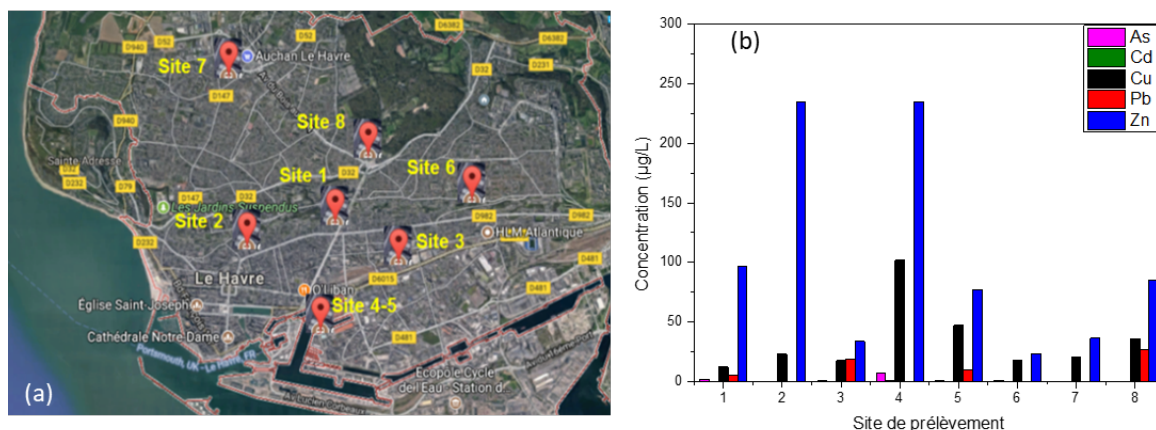


FIGURE 1. (a) positions des huit sites de prélèvements sur la carte de la ville du Havre, (b) teneurs en métaux lourds mesurées dans les eaux de ruissellement.

II.2. Mise en place d'un dispositif de filtration en amont d'une chaussée de parking au nord du Havre

A partir des connaissances sur les processus se développant dans les milieux humides naturels mais aussi des connaissances sur les milieux poreux filtrants utilisés dans le traitement des eaux, un dispositif simple, constitué de sable de la seine et de sous-produits (étoupe) à base de fibres de lin, a été pensé et dont la fonction est d'épurer les eaux de ruissellements en milieu urbain et péri-urbain avant leur rejet dans le milieu naturel. Le dispositif de filtration peut être intégré suivant

les besoins de traitement de ces eaux comme élément complémentaire aux solutions existantes (à l'amont des noues, des chaussées réservoirs, ou des bassins de rétention). Ainsi augmenter le nombre d'installations simples et renouvelables, fonctionnant sans énergie, permet de traiter les eaux quasiment à la source, réduisant les coûts de traitement dans les stations d'épuration « STEP ». Les eaux épurées pourront être plus facilement infiltrées et éviter ainsi leur passage par la STEP. Les coûts d'entretien des fossés et des noues ont également un impact économique, qui s'en verra réduit. L'usage de ce dispositif, permet aussi de réduire la vulnérabilité des ouvrages végétalisés (noue et bassin d'infiltration), nombreux dans la zone particulièrement industrialisée de l'agglomération havraise. Les matériaux pollués seront récupérés pour être traités.

Dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire LOMC, Le Havre Seine Métropole et l'entreprise Depestele (Normandie, France), un prototype à une échelle en vraie grandeur sera mis en place dans la ville Haute du Havre. Le dispositif sera installé en amont d'une chaussée de parking dans une nouvelle cité nommée « les bâtiments biosourcés » au nord de la ville du Havre (ZAC du Pressoir) (Fig.2). Le prototype sera introduit dans le système d'assainissement conçu sur la ville haute du Havre pour gérer le flux où le réseau d'assainissement est séparatif, où les eaux pluviales peuvent être traitées localement et infiltrées directement dans le sous-sol. Le dispositif est conçu pour filtrer les eaux ruisselées sur une surface bien maîtrisée de la chaussée du parking. Le dispositif ne nécessite aucune consommation d'énergie car l'écoulement est gravitaire. Il est composé d'une chambre de filtration (116 x 38 x 120 cm) équipée de deux regards de prélèvements, un en amont pour prélever les eaux brutes et l'autre en aval pour prélever les eaux épurées. Les eaux traitées par le dispositif seront canalisées vers une noue végétalisée située en aval (Fig.2).



FIGURE 2. (a) Site expérimental installé dans la ville Haute du Havre dans un parking, (b) schéma de principe de fonctionnement du dispositif de filtration des eaux.

Le site expérimental est actuellement non équipé et non fonctionnel, et la présente étude a été limitée à des expériences de laboratoire. Deux types d'expériences ont été menées sur un modèle réduit du dispositif : (i) des essais de sorption réalisés en mode statique (essais batch) pour l'étude de la capacité de rétention chimique des métaux par les fibres de lin et (b) des expérimentations en mode dynamique, avec un régime d'écoulement permanent, dans des colonnes pour tenir compte des paramètres hydrodynamiques et se rapprocher des conditions réelles d'utilisation des géotextiles dans un processus de filtration.

III. ETUDE DE LA CAPACITE DE FILTRATION DES EAUX DE SURFACE PAR LE DISPOSITIF DE LABORATOIRE

III.1. Etude de la capacité d'adsorption de métaux lourds par les fibres de lin

L'étude de l'efficacité de l'absorption des métaux par la biomasse au laboratoire est essentielle pour l'application industrielle de la biosorption car elle donne des informations sur le processus d'absorption nécessaire pour la conception des équipements de grande échelle. L'absorption de

métaux est habituellement mesurée par le paramètre « qe » qui indique les milligrammes de métal adsorbé par gramme de matériau biosorbant. Pour étudier la réactivité des fibres de lin vis-à-vis des métaux lourds (cuivre, plomb et du zinc) et déterminer leur capacité maximale d'adsorption, des essais batch ont été effectués. Les trois métaux lourds (cuivre, plomb et zinc) ont été choisis pour leur forte présence dans les eaux de ruissellement.

Le biosorbant utilisé était constitué d'étoupes de fibres de lin cultivé en Normandie (Fig.3). Ces étoupes ont été récupérées pendant le processus de peignage. La figure 3 montre que les étoupes contiennent principalement des fibres et presque pas de pailles. Les étoupes ont été lavées avec de l'eau distillée, séchées dans une étuve pendant 48 heures à 65 °C puis découpées en petits morceaux (2-5 mm). Les matériaux ont été conservés dans des bouteilles en verre fermées.



FIGURE 3. Photo des étoupes de fibres de lin,

Les essais batch ont été réalisés en suivant le mode opératoire explicité comme suit. Une quantité connue des étoupes a été mélangée avec 250 mL d'une solution de métaux lourds à une concentration définie et à un pH défini (le pH de la solution a été ajusté à la valeur souhaitée ajout soit d'une solution d'acide nitrique ou une solution d'hydroxyde de sodium). Le mélange a été agité à une vitesse de 150 cycles par minute en utilisant un agitateur horizontal. Ces étapes ont été effectuées à une température ambiante autour de 24 °C. Après un temps de contact défini, la solution de métaux lourds a été récupérée et filtrée en utilisant un filtre de nylon de 0,45 µm. Après acidification de la solution résultante avec de l'acide nitrique (6 mL) et de l'acide chlorhydrique (2 mL), les concentrations de Cu, Zn et Pb ont été déterminées par spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES). Le taux d'adsorption de métal lourd éliminé de la solution par adsorption a été calculé par l'équation suivante :

$$\% \text{ métal éliminé} = \frac{(C_i - C_e) \times 100}{C_i} \dots\dots\dots (1)$$

avec C_i la concentration initiale en métal lourd et C_e la concentration finale en métal lourd dans la solution liquide après équilibre.

Les modèles d'isothermes de Langmuir et Freundlich (Cf. fig. 5) ont été appliqués aux données expérimentales pour l'étude d'isothermes d'adsorption. L'étude a montré que le matériau "fibres de lin" est un adsorbant efficace pour l'élimination des ions plomb, cuivre et zinc des solutions aqueuses. Le processus d'adsorption est fonction du temps de contact (Fig. 4.a), du pH (Fig. 4.b), de la concentration de l'adsorbant (Fig. 4.c) et de l'adsorbat (Fig. 4.d). L'équilibre a été atteint en 60 min (Fig. 4.a). Au début du processus d'adsorption tous les sites d'adsorption sur la surface de l'adsorbant sont disponibles, le pourcentage d'adsorption augmente très rapidement. Avec l'augmentation du temps de contact, de plus en plus de sites sont occupés par les ions adsorbés réduisant ainsi le nombre de sites libres. Cela entraîne un ralentissement de l'accroissement du pourcentage de métal éliminé par adsorption. Cet accroissement finit par devenir quasi-insignifiant après un temps de contact de 60 min. Le pH optimal pour l'adsorption du plomb et

du cuivre varie de 4 à 6 et il est autour de 7 pour le zinc (Fig.4b). Selon Low et al., (1993), une faible sorption à un pH très faible pourrait être attribuée aux ions hydrogène qui entrent en compétition avec les ions métalliques pour des cations échangeables à la surface du biosorbant. En revanche, dans la gamme de pH de 2 à 4 une déprotonation de groupes carboxyliques sur la surface du sorbant se produit, ce qui permet une meilleure adsorption des métaux lorsque le pH augmente (Chang et al., 1997). Dans la gamme de pH de 4 à 6, on observe une légère augmentation, voire une stabilisation du taux d'élimination pour le cuivre et le plomb, qui pourrait s'expliquer par le fait que les sites d'adsorption ne sont plus affectés par le changement de pH. La figure 4c représente la variation du pourcentage d'élimination des trois ions métalliques dans la solution en fonction de la concentration de fibres de lin. Ces courbes montrent que l'adsorption des ions métalliques augmente avec la masse de l'adsorbant. La figure 4d présente les résultats expérimentaux des études des isothermes ($q_e = f(C_i)$) pour les trois métaux étudiés sont présentés. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation des concentrations d'ions Cu^{2+} , Pb^{2+} et Zn^{2+} de 10 à 50 $mg L^{-1}$ diminue le taux d'adsorption. A des concentrations plus faibles, le rapport sites d'adsorption disponibles sur concentration initiale d'ions métallique dans la solution est élevé et les ions métalliques présents dans le milieu d'adsorption sont adsorbés par des sites spécifiques. Cependant, lorsque la concentration initiale de métaux lourds augmente, le taux d'adsorption diminue et les sites spécifiques disponibles sont rapidement saturés (Fig. 4d).

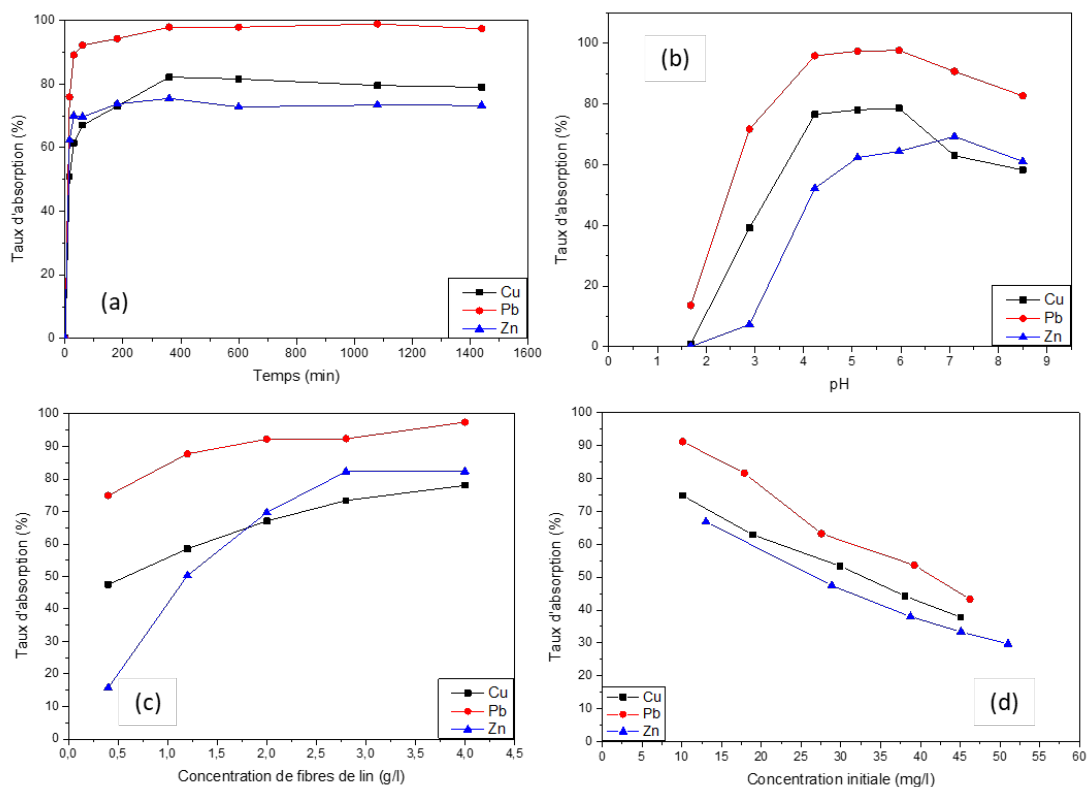


FIGURE 4. (a) Cinétique d'adsorption, (b) effet de pH, (c) effet de la masse de fibre et (d) effet la concentration initiale sur l'adsorption des métaux par les fibres de lin.

La distribution des ions métalliques entre la phase liquide et la phase solide a été décrite par les deux modèles isothermes de Langmuir et Freundlich (Fig.5). Les formes linéarisées des deux

modèles, les paramètres estimés avec les coefficients de corrélation (R^2) pour les deux modèles sont donnés dans le tableau 1. Il est clair d'après les valeurs calculées (R^2) que les isothermes d'adsorption pour les trois métaux étudiés sont mieux adaptées au modèle de Langmuir avec une capacité d'adsorption maximale de 9,9 ; 10,7 et 8,4 mg g⁻¹ respectivement pour le cuivre, le plomb et le zinc. Ces résultats montrent que les fibres de lin ont une bonne capacité d'adsorption. Cette capacité d'élimination des métaux de la solution aqueuse, peut être attribuée à l'échange de cations liés (Na⁺, Ca⁺² et Mg⁺² ...etc.) avec des ions métalliques. Plusieurs études ont révélé que l'échange d'ions est le mécanisme dominant dans les procédés de biosorption des métaux lourds par des matériaux naturels (lignocellulosiques) (Villaescusa et al. 2004 ; Fiol et al., 2006 ; Ngah et al., 2008 ; Chen et al., 2010). Le tableau 2 présente une comparaison de la capacité maximale d'adsorption des fibres de lin avec celles d'autres adsorbants étudiés par d'autres chercheurs. On remarque que la capacité maximale d'adsorption des fibres de lin pour l'élimination des ions de cuivre, de plomb et de zinc est plus élevée que celles des autres adsorbants. Ces résultats peuvent être utilisés comme un bon indicateur pour l'utilisation de matériaux à base d'étoupes de fibres de lin pour la conception de systèmes de traitement des eaux de ruissellement pour l'élimination du plomb, du cuivre et du zinc solubles où liés aux particules en suspension. En effet, ces fibres peuvent être facilement utilisées pour fabriquer des matériaux filtrants ayant à la fois des capacités de sorption et de rétention par filtration.

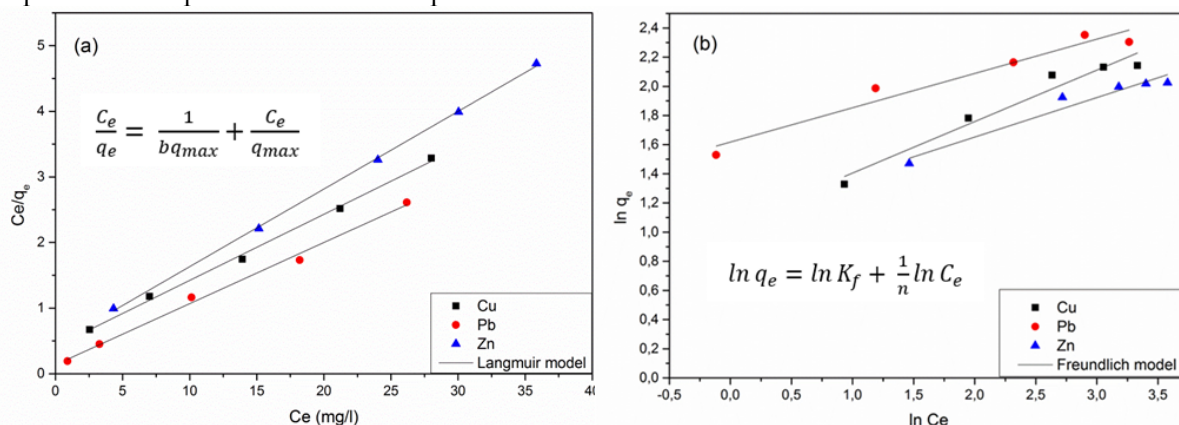


FIGURE 5. Isothermes de (a) Langmuir et (b) Freundlich pour l'adsorption des métaux lourds par les fibres de lin (avec q_e la quantité de l'adsorbant adsorbée sur 1g d'adsorbant à l'équilibre (mg g⁻¹), q_{max} la quantité nécessaire pour couvrir la surface entière avec une monocouche de substance adsorbée (mg g⁻¹), C_e la concentration de l'adsorbant en solution à l'équilibre (mg L⁻¹), b , K_f et n des constantes des modèles)

TABLEAU 1. Modèles isothermes et leurs constantes pour l'adsorption du cuivre, plomb et du zinc par les fibres de lin

	Modèle de Langmuir			Modèle de Freundlich			
	R^2	q_{max} (mg g ⁻¹)	b (L mg ⁻¹)	R^2	K_f (mg ^{1-1/n} L ^{1/n} g ⁻¹)	$1/n$	n
Cu	0,997	9,921	0,243	0,957	2,864	0,353	2,833
Pb	0,995	10,741	0,679	0,952	5,042	0,235	4,248
Zn	0,999	8,453	0,264	0,951	3,034	0,271	3,69

TABLEAU 2. Capacité maximale d'adsorption (q_{\max}) 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)	Références
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 et al., 2017b

III.2. Etude de capacité de rétention des particules solide et de métaux lourds par le composite sable-géotextile de lin

L'objectif de cette étude était d'évaluer expérimentalement l'influence de lits de géotextile de fibres de lin placés dans une colonne de sable sur le transfert des particules en suspension et des métaux lourds. L'étude a été réalisée sur des colonnes de laboratoire en conditions saturées et sous un écoulement permanent. Au cours des expériences, des prélèvements à la sortie de la colonne (dans les effluents) sont réalisés à des temps réguliers. Cet échantillonnage a été effectué pour déterminer la concentration en particules solides et en métaux lourds de l'effluent dans le temps. Une solution tri-métallique de nitrate de cuivre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), de nitrate de plomb ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) et de nitrate de zinc ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) avec des concentrations respectives de 2,1 mg/L, 2,36 mg/L et 3,23 mg/L a été utilisée. Des particules de kaolinite ont été également utilisées avec une concentration de 1g/L pour simuler les particules présentes dans les eaux de ruissellement. Le géotextile utilisé était un géotextile non tissé (NW) de fibres de lin développé en Normandie (France). Il se caractérise par une conductivité hydraulique ($3,75 \times 10^{-3}$ m/s) et une porosité importante (86,17%) (Abbar et al., 2017a). La concentration des métaux lourds dans l'effluent a été déterminée par les analyses ICP-OES, et la concentration des particules de kaolinite a été déterminée à partir de la mesure de la turbidité de l'effluent par un turbidimètre placé à la sortie de la colonne. Un étalonnage préalable turbidité mesurée-concentration en particules de kaolinite a été effectué. Les distributions spatiales de la rétention des particules et/ou des métaux lourds dans le milieu poreux sont obtenues en découpant, après chaque essai, l'échantillon cylindrique en dix tranches réparties comme indiqué sur la figure 6. L'efficacité du complexe sable-géotextiles est évaluée en mesurant la rétention des particules fines et des métaux lourds dissous et adsorbés aux particules en suspension par le filtre.

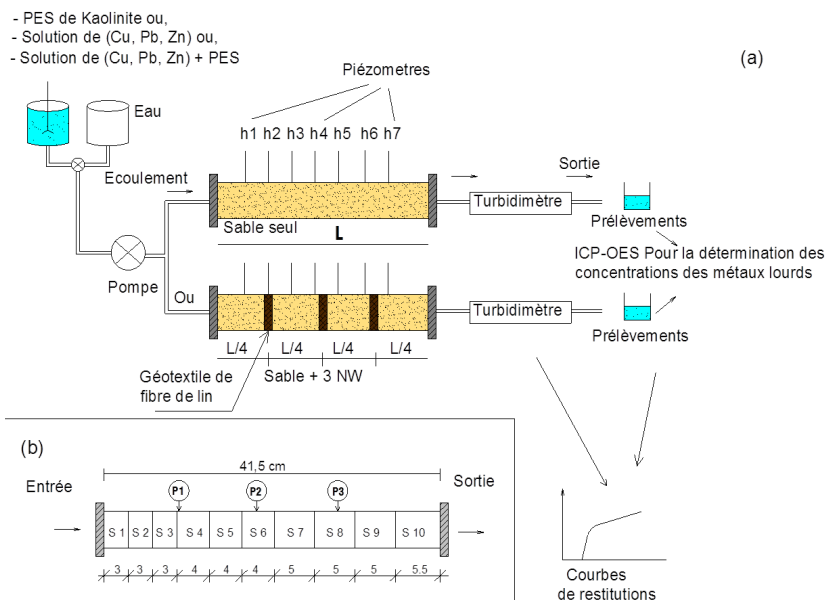


FIGURE 6. (a) Schéma de principe du dispositif expérimental de filtration, (b) principe de découpage de la colonne après l'essai pour la détermination des profils de rétention.

III.2.1 Efficacité de rétention de particules solides par le dispositif

Pour étudier l'influence du géotextile de fibres de lin sur le transport des particules en suspension dans le milieu filtrant, quatre configurations de filtre ont été étudiées : sable seul, sable avec une nappe de géotextile (sable + 1NW), sable avec deux nappes de géotextile (sable + 2NW), sable avec trois nappes de géotextile (sable + 3NW) (Fig. 6). Un volume de 30 L équivalent à 120 volumes de pores de solution de particules en suspension a été injecté à chaque essai (un volume de pore correspond au volume total des vides dans la colonne). A la fin de chaque expérience, le matériau contaminé (sable, particules déposées et géotextiles) remplissant la colonne a été extrait soigneusement de la colonne et divisé en dix sections. Chaque section (de sable + kaolinite) a été séchée à 105°C pendant au moins 24h et pesée puis lavée soigneusement en récupérant l'eau de lavage. Le sable propre a été ensuite séché et pesé. La différence de masses sèches du sable avant lavage (sable avec particules déposées) et sable propre après lavage donne la masse de particules déposées dans la section. Une valeur de la rétention pour chaque section a été ensuite calculée. Elle est définie comme le rapport entre le volume de particules retenues dans la section et le volume de cette section. La figure 7 présente les profils de dépôt des particules, en fin d'injection, pour les quatre configurations de filtre testées. Les géotextiles ont une influence sur la distribution du dépôt dans le milieu filtrant. Une augmentation significative de la masse de particules retenues dans les couches de sable situées en amont du géotextile, surtout dans la section du sol avoisinante, a été observée. A l'opposée une diminution de la rétention dans les couches de sable situées en aval a été observée. Il en résulte une discontinuité spatiale du profil de rétention comme il est montré dans la figure 7. À l'entrée de la colonne (section 1 : 0-3cm), la rétention est de 0,048 cm³/cm³ (correspondant à un abattement de 13,95%) pour la configuration (sable + 3NW) et environ 0,040 cm³/cm³ (correspondant à des abattements de 10,90 et 11,99%) pour les configurations (sable + 1NW) et (sable + 2NW) contre 0,034 cm³/cm³ (abattement de 8,6%) pour la configuration (sable seul) (Fig.7). L'abattement est défini comme le rapport entre la masse de particules déposée dans la section de filtre et la masse totale de particules injectée. À la sortie de la colonne (section 10 : 36-41,5 cm), la rétention est de 0,007 cm³/cm³ (correspondant à des abattements de 3,12 ; 2,59 et 2,66%) pour les trois configurations avec géotextiles (sable + 1NW),

(sable + 2NW) et (sable + 3NW) respectivement, contre 0,012 cm³/cm³ (abattement de 4,65%) pour la configuration (sable seul) (Fig.7). La présence des géotextiles améliore la rétention globale dans le milieu surtout dans les couches de sable situées en amont et protège les couches de sable en aval. Ce résultat a aussi été mis en évidence par Winiarski et al. (1999) et Lassabatère et al. (2004) dans des études sur les modifications du transfert de polluants par l'introduction de géotextiles dans un sol.

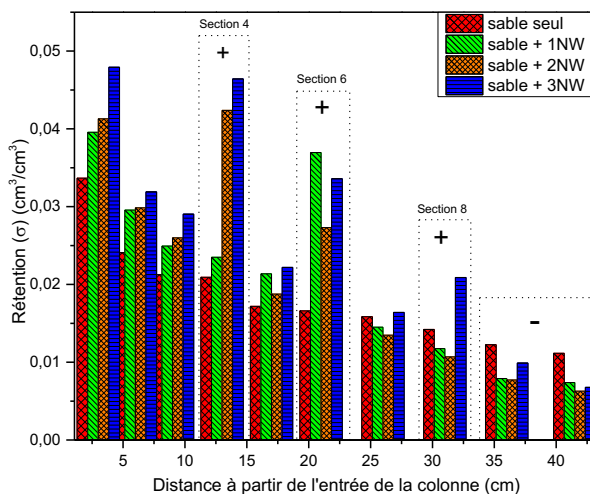


FIGURE 7. Profils de dépôt des particules de kaolinite pour les quatre configurations de filtre testées

III.2.2 Efficacité de rétention de métaux lourds solubles par le dispositif

Pour étudier l'influence du géotextile de fibre de lin sur le transport et la rétention des métaux lourds à travers le dispositif, deux configurations de filtre ont été étudiées : sable seul, et sable avec trois nappes de géotextile (sable + 3NW). Le tableau 3 présente les pourcentages de métaux lourds retenus dans chacun des trois géotextiles de la configuration (sable + 3 NW). Une rétention non négligeable de métaux a été observée dans les géotextiles (16,0% (Cu) ; 6,0% (Pb) et 8,0% (Zn)). Le géotextile placé en amont contribue pour une part importante dans la rétention des métaux (6,78% (Cu) ; 3,57% (Pb) et 4,05% (Zn)). Les contributions à la rétention des deux autres géotextiles sont plus faibles et pratiquement équivalentes. Cette rétention est attribuée à la réactivité de fibres de lin vis-à-vis de ces métaux.

TABLEAU 3. Abattement en (%) des métaux lourds (Cu, Pb et Zn) dans les géotextiles

	Cu	Pb	Zn
Géotextile placé en amont	6,7	3,5	4,0
Géotextile central	4,7	1,3	2,3
Géotextile placé en aval	4,6	1,2	1,7
Abattement total	16,0	6,0	8,0

La figure 8 montre les profils de rétention des métaux lourds (Cu, Pb et Zn) le long du milieu poreux, pour les deux configurations étudiées (sable seul) et (sable + 3NW). Les trois métaux présentent des comportements différents. La rétention du cuivre dans le milieu (sable seul), semble homogène et uniforme sur toute la profondeur de la colonne avec une valeur moyenne autour de 0,055 mg/g. La rétention du zinc est non uniforme et semble augmenter avec

la profondeur. La rétention est beaucoup plus importante en sortie de colonne (0,075 mg/g) qu'en entrée (0,03 mg/g). Il est possible que ce comportement du cuivre et du zinc soit dû à l'effet de compétition sur les sites de surfaces entre les trois métaux. L'affinité du plomb vis-à-vis de notre sable étant la plus forte, celui-ci se fixe prioritairement dès l'entrée de la colonne sur les sites de rétention disponibles obligeant les deux autres métaux (Cu et Zn) à migrer plus en profondeur dans le milieu avant d'être retenus. La forte mobilité du zinc, déjà montré par des études antérieures, justifie encore le profil de rétention de ce métal. Dans notre sable concassé, le plomb se fixe prioritairement sur les particules siliceuses par rapport au cuivre et au zinc. Si on peut s'interroger sur l'origine de la rétention des trois métaux par le sable, elle peut être due à la porosité des éléments du cortex des silex et à la présence de carbonates, avec un pourcentage massique de l'ordre de 5 %, qui peuvent interagir et incorporer des cations métalliques dans leur maille cristalline. Toutefois ce point mérite d'être approfondi. Une grande quantité de plomb est retenue en entrée de colonne.

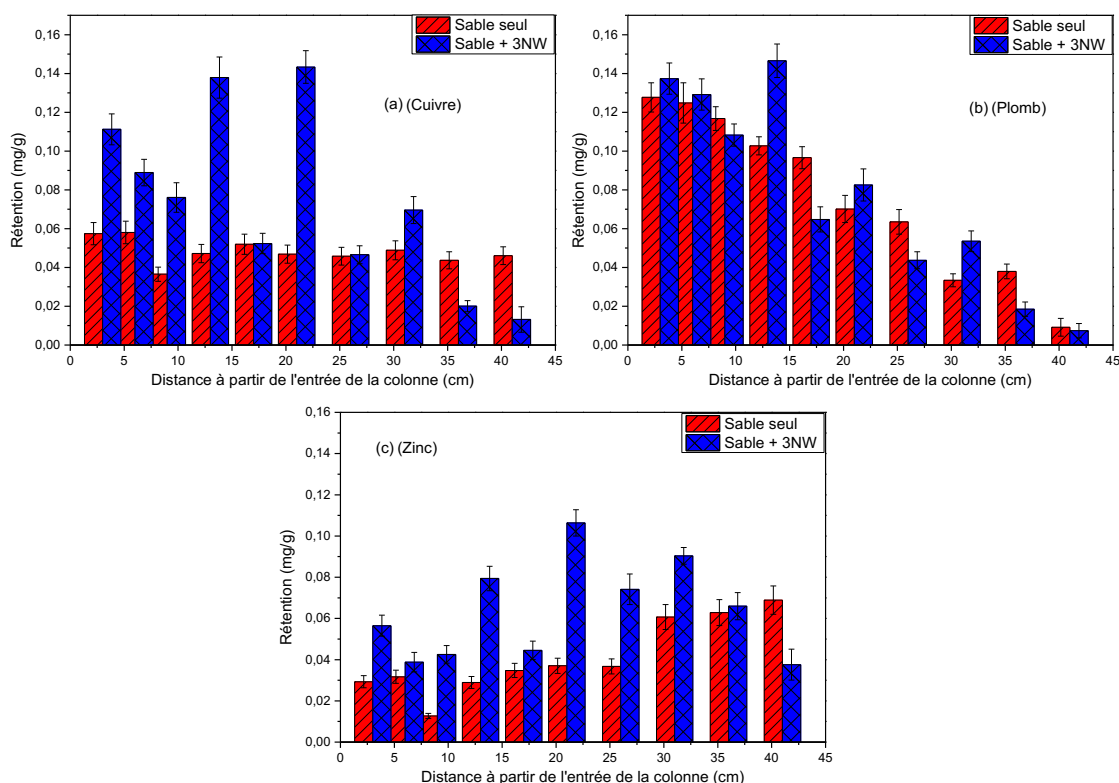


FIGURE 8. Profils de rétention des métaux lourds (Cu, Pb et Zn) dans le sable seul et le sable + 3NW.

III.2.3. Efficacité de rétention de métaux lourds solubles et attachés au PES par le dispositif

Pour étudier l'influence de géotextile de lin sur le transport et la rétention des particules de kaolinite et des métaux lourds, deux configurations de filtre ont été étudiées (sable seul, sable avec trois nappes de géotextile (sable + 3NW)). Pendant la préparation de la solution d'injection, le taux d'adsorption des métaux par les particules de kaolinite a été déterminé à partir d'essais batch. Des prélèvements à différents temps de contact (0,33 ; 0,5 ; 1,5 ; 2,50 ; 7 ; 18 et 24 heures) ont été effectués afin de déterminer le temps d'équilibre. Les concentrations finales de la fraction soluble du cuivre, plomb et zinc ont été déterminées pour chaque temps de contact. Ceci nous a

permis de suivre la cinétique d'adsorption pour chaque métal et de déterminer le temps d'équilibre d'adsorption. Pour les trois ions métalliques, on peut considérer, que l'équilibre est atteint après un temps de contact autours de 90 minutes. Les taux d'adsorption à l'équilibre sont de l'ordre de 53%, 65%, et 25% pour le cuivre, le plomb et le zinc respectivement. Ces taux sont très élevés surtout pour le cuivre et le plomb. Le temps très rapide pour atteindre l'équilibre et les taux d'adsorption élevés est attribué aux grandes surfaces spécifiques des particules de kaolinite et à leurs grandes capacités d'échange cationique. Ces caractéristiques spécifiques des particules argileuses leurs permettent de retenir une importante quantité d'ions métalliques comme il a été montré dans plusieurs études antérieures (Lassabatere 2004). L'ordre d'affinité $Pb > Cu > Zn$ pour les particules argileuses à lui aussi été observé par d'autres chercheurs (Farrah et Pickering, 1977). La figure 9 présente les profils de rétention des métaux lourds (Cu, Pb et Zn) et des particules retenues le long du milieu poreux, pour les deux configurations du filtre (sable seul et (sable + 3NW), après l'injection de la solution métallique avec les particules en suspension. L'injection des particules en suspension avec les métaux lourds dans le milieu granulaire avec trois nappes de géotextiles de lin, se traduit par une chute importante de l'efficacité de rétention des métaux lourds par le milieu. La rétention du zinc peut être justifiée par sa faible réactivité vis-à-vis des particules en suspension dans la solution (taux d'adsorption de 25%), contrairement aux deux autres métaux (taux d'adsorption de 53% (Cu) et 65% (Pb)) (Fig. 9). Une grande quantité de plomb et de cuivre a été transportée sous la forme attachée aux particules en suspension jusqu'à la sortie du milieu poreux. Les profils de rétention du cuivre et du plomb le long des deux filtres présentent une bonne similitude avec les profils de dépôts des particules en suspension. Ce résultat est évident dans la mesure où ces deux métaux sont présents en grande partie sous forme particulaire. Pour le zinc, qui est moins adsorbé sur les particules en suspension, cette similarité n'existe pas.

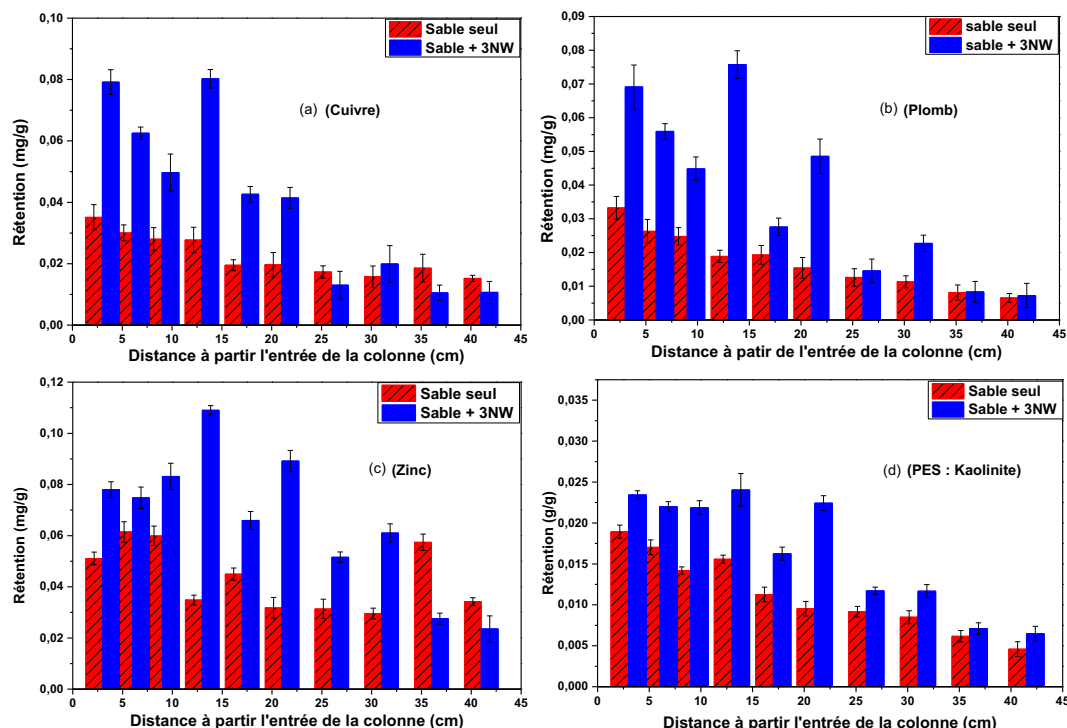


FIGURE 9. Profils de rétention des métaux lourds (a) cuivre, (b) plomb, (c) zinc et (d) particules en suspension dans les milieux (sable seul) et (sable + 3 NW)

CONCLUSION

La présente étude montre que le lin est un adsorbant efficace pour l'élimination des ions plomb, cuivre et zinc des solutions aqueuses. Les isothermes d'adsorption ont montré que l'adsorption des ions métalliques étudiés par les fibres de lin est favorable avec une capacité d'adsorption maximale de 9,9 ; 10,7 et 8,4 mg g⁻¹ respectivement pour le cuivre, le plomb et le zinc. L'influence du géotextile en fibre de lin sur le transfert de métaux lourds solubles ou liés aux particules a été également étudiée dans des expériences en laboratoire. Le géotextile contribue à la rétention des métaux lourds solubles ou liés aux particules en suspension. L'efficacité de rétention du sable concassé est améliorée par la présence de géotextile. L'utilisation de plusieurs disques de géotextile en fibre de lin améliore non seulement la rétention globale du dispositif, mais augmente également sa durée de vie. Le géotextile en fibre de lin a une grande influence sur le transfert et la rétention des métaux lourds solubles ou liés aux particules en suspension et peut être utilisé comme un outil efficace pour améliorer les performances des dispositifs de filtration des eaux de ruissellement. Ces résultats peuvent être utilisés comme un bon indicateur pour l'utilisation de matériaux à de fibre de lin pour la conception de systèmes de traitement des eaux de ruissellement pour l'élimination du plomb, du cuivre et du zinc solubles ou liés aux particules en suspension. En effet, ces fibres peuvent être facilement façonnées pour fabriquer également des matériaux filtrants ayant à la fois des capacités de sorption et de rétention par filtration.

REFERENCES

- Azzout Y, Barraud S, Cres FN, et al. *Technique alternative en assainissement pluvial*. Paris: Lavoisier Tec et doc; 1994. French.
- Legret M, Colandini V, Le Marc C. Effects of a porous pavement with reservoir structure on the quality of runoff water and soil. *Sci Total Environ*. 1996 ;189 :335–340.
- Colandini M, Legret M, Brosseaud Y, et al. Metallic pollution in clogging materials of urban porous pavements. *Water Sci Technol*. 1995 ; 32(1) : 57–62.
- Fuerhacker M, Haile TM, Monai B, et al. Performance of a filtration system equipped with filter media for parking lot runoff treatment. *Desalination*. 2011;275(1):118–125.
- Wei J, Aimin S, Jingjing X, et al. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *Constr Build Mater*. 2015; 100 :102–110.
- Doig P, Van Poppelen P, Baldwin SA. Treatment of log yard runoff using a recirculating sand filtration process. *Environ Technol*. 2007;28(7):807–817. doi:10.1080/095933328086 18842
- Winston RJ, Al-Rubaei AM, Blecken GT, et al. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – the effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. *J Environ Manage*. 2016 ; 169:132–144.
- Chocat B. *Encyclopédie d'hydrologie urbaine [encyclopedia of urban hydrology]*. Paris: Lavoisier;1997. French.
- Pitt R, Williamson D, Voorhees J. Review of historical street dust and dirt accumulation and washoff data. In *Effective modeling of urban systems, monograph 13, from the international stormwater and water quality management modeling conference; 2005; Ontario, Canada*.
- Wong THF. *Australia runoff quality: a guide to water sensitive urban design*. Melbourne: Engineers Australia; 2006.

- Pons MN, Belhani M, Bourgois J, et al. Analyse du cycle de vie- epuration des eaux usées urbaines, techniques De l'ingénieur [life cycle analysis treatment of urban wastewater] France: Techniques for engineer; 2008. French.
- 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*. DOI: 10.1080/09593330.2017.1284270.
- Abbar, B., Alem, A., Marcotte, S., Pantet, A., Ahfir, N. D., Bizet, L., & Duriatti, D. (2017b). Experimental investigation on removal of heavy metals (Cu²⁺, Pb²⁺, and Zn²⁺) from aqueous solution by flax fibres. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 639-647.
- Akin D.E., Foulk J., Dodd R.B., McAlister D.D. (2001) Enzyme-retting of flax and characterization of processed fibers *Journal of Biotechnology*, 89, 193-203
- Aydin, H., Buluta, Y., Yerlikayab, C., 2008. Removal of copper (II) from aqueous solution by adsorption onto low-cost adsorbents. *J Environ Manage.* 87, 37–45.
- Baley, C, et al, Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre-polyester resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006. 37(10): p. 1626-1637.
- Chong, H.L.H., Chia, P.S., Ahmad, M.N., 2013. The adsorption of heavy metal by Bornean oil palm shell and its potential application as constructed wetland media. *BioresourTechnol.* 130, 181–186.
- Kara Khaled, M. (2011). Etude d'un dispositif de dépollution des eaux pluviales en amont des réseaux d'assainissement : expérimentations et modélisation (Doctoral dissertation, Lille 1).
- Lassabatere, Laurent. Modification du transfert de trois métaux lourds (Zn, Pb et Cd) dans un sol issu d'un dépôt fluvio-glaciaire carbonaté par l'introduction de géotextiles. 2002. Thèse de doctorat. Villeurbanne, INSA.
- Lassabatere L, Winiarski T, Galvez Cloutier R. Retention of three heavy metals (Zn, Pb, and Cd) in a calcareous soil controlled by the modification of flow with geotextiles. *J Environ Sci Technol.* 2004; 38: 4215-4221.
- Lassabatere L, Spadini L, Delolme C, et al. 2007. Concomitant Zn-Cd and Pb retention in a carbonated fluvio-glacial deposit under both static and dynamic conditions. *JChemosphere.*
- Mohanty, A.K., M. Misra, and G. Hinrichsen, Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2000. 276- 277: p. 1-24.
- Ofomaja, A.E., Naidoo, E.B., Modise, S.J., 2009. Removal of copper (II) from aqueous solution by pine and base modified pine cone powder as biosorbent, *J. Hazard. Mater.* 168, 909–917.
- Padillai, Y., JIM YE H T.-C., CONKLIN M.H. The effect of water content on solute transport in unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 1999, vol. 35, n°11, pp. 3303-3313.
- Pehlivan E, Altun T, Cetin S, Bhanger MI. Lead sorption by waste biomass of hazelnut and almond shell. *J Hazard Mater.* 2009a; 167:1203–2128.
- Pehlivan, E., Altun, T., Parlayici, S., 2009b. Utilization of barley straws as biosorbents for Cu²⁺ and Pb²⁺ ions. *J Hazard Mater.* 164, 982–986.
- Shukla, S.R., Pai, R.S., 2005. Adsorption of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) on modified jute fibres. *BioresourTechnol.* 96, 1430–1438.
- Shukla, S.R., Pai, R.S., Shendarkar, A.D., 2006. Adsorption of Ni (II), Zn (II) and Fe(II) on modified coir fibres. *Sep Purif Technol.* 47, 141–147.
- Yavuz, O., Altunkaynak, Y., Güzel, F., 2003. Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite, *Water Res.* 37, 948–952.