

DÉVELOPPEMENT D'UN GÉOSYNTHÉTIQUE DE DRAINAGE POUR LA CAPTATION DE MÉTAUX LOURDS DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE

DEVELOPMENT OF A DRAINAGE GEOSYNTHETIC FOR THE CAPTURE OF HEAVY METAL FROM DREDGING SEDIMENT

Mathilde RIOT¹, Bernard MARTEL², Maryse BACQUET²

¹ AFITEX, Champhol, France

² Université de Lille 1 – UMET, Villeneuve d'Ascq, France

RÉSUMÉ – Les sédiments de dragage contiennent des éléments polluants comme des métaux lourds qu'il est nécessaire d'extraire pour ne plus les considérer comme déchets mis en sites spécialisés. Le projet décrit dans cet article propose le développement de géosynthétiques drainant et fonctionnalisés permettant de retenir les métaux lourds. Il a permis d'une part de mettre au point le procédé de captation des métaux lourds par la fonctionnalisation de textiles et d'autre part d'associer ces textiles dans un géocomposite de drainage adapté à l'application. Une planche d'essai a ensuite été mise en place pour vérifier la fonctionnalisation du produit en conditions réelles.

Mots-clés : Géocomposite fonctionnalisé, drainage, métaux, sédiments, remédiation.

ABSTRACT – Sediments contain pollutants such as heavy metals which are necessary to extract in order to no longer consider them as waste. The project described in this paper proposes the development of drainage and functionalized geosynthetics to retain heavy metals. It allowed on the one hand to develop the process of capture of heavy metals by the textile functionalized and secondly to associate these textiles in a drainage geocomposite adapted to the application. A test site was then set up to verify the functionalization of the product in real conditions.

Keywords: Functionalized geocomposite, drainage, metals, sediments, depollution.

1. Introduction

Afin d'éviter l'envasement des ports et des canaux et maintenir une profondeur adéquate pour la circulation des bateaux, des opérations de dragage sont régulièrement effectuées le long des côtes françaises et sur l'ensemble des canaux navigables de France. Ces sédiments contiennent des éléments polluants comme des métaux lourds. Si la teneur en métaux lourds de ces sédiments est trop importante, ce qui représente environ 5% des sédiments dragués à l'heure actuelle en France, ils sont considérés comme des déchets et sont stockés en sites spécialisés.

Cette procédure, peu durable, soulève le problème de la gestion des espaces de stockage dédiés aux sédiments pollués. Dans un contexte politique et environnemental donnant la priorité au recyclage et à la réduction des quantités de déchets stockés, le projet DEPOLTEX propose le développement de géosynthétiques drainant et fonctionnalisés permettant de retenir les métaux lourds présents dans les sédiments marins et fluviaux. Cette étape de dépollution permettra le reclassement des sédiments dragués et une valorisation en tant que matière première dans le secteur du bâtiment et travaux publics notamment. Ce projet a permis, d'une part, de mettre au point le procédé de captation des métaux lourds par la fonctionnalisation de textiles et, d'autre part, d'associer ces textiles dans un géocomposite de drainage adapté à l'application. Une planche d'essai a ensuite été mise en place pour vérifier la fonctionnalisation du produit en conditions réelles.

Différents partenaires ont été impliqués à différentes étapes du projet. Les analyses préliminaires des sédiments du port de Dunkerque, effectuées par Mines Douai (GCE) et IDRA Environnement, ont permis de déterminer les polluants présents au-delà des seuils réglementaires. Une étude sur la structure et la composition des géotextiles ainsi que leurs propriétés (résistance mécanique, porosité) a été menée conjointement par l'ENSAIT de Roubaix et l'IFTH de Tourcoing. La caractérisation, la modélisation et la simulation numérique des phénomènes de filtration mécanique des différents textiles ont été réalisées par Mines Douai (TPCIM). Trois équipes de recherche du laboratoire UMET et de l'ENSAIT ont travaillé sur la fonctionnalisation de textiles fournis par les entreprises PGI SAS France et DYLCO. L'entreprise AFITEX a élaboré le système de filtration et de drainage en mettant au point un

géocomposite DRAINTUBE® composé de drains associés à des géotextiles et des fils fonctionnalisés. Enfin, l'alvéole dédiée aux essais à l'échelle pilote a été mise à disposition par Baudalet Environnement.

Le présent article présente le développement du géocomposite de drainage fonctionnalisé, la mise en place et les principaux résultats de l'essai in situ.

2. Objectif du projet

L'objectif du projet est de réaliser un procédé de dépollution des sédiments marins et fluviaux dragués puis stockés dans des bassins avant d'être évacués en installation de stockage de déchet spécialisés. Ce procédé de dépollution a été réalisé à l'aide d'un géocomposite de drainage. Ce géocomposite, dit « fonctionnalisé » c'est-à-dire auquel une fonction spécifique a été ajoutée, permet ainsi de capter les métaux lourds ciblés dans les sédiments. Les sédiments contiennent une grande quantité d'eau qui peut être utilisée comme vecteur de transport des métaux lors d'un procédé de dépollution. Il a été ainsi envisagé de filtrer le lixiviat des sédiments de dragage à travers un matériau capable de retenir les métaux lourds. Les géotextiles sont des matériaux adéquats car ils sont poreux et permettent ainsi la circulation de l'eau. Combiner un géotextile à une âme drainante au sein d'un géocomposite permet également de récupérer cette eau pour l'analyser et la traiter par la suite. Dans le cadre de ce projet, les géotextiles retenus sont des non-tissés aiguilletés à base de polypropylène et de polyester, qui peuvent avoir la propriété de piéger les métaux lourds, à partir d'un traitement chimique. Des molécules naturelles, ou biomolécules, ont donc été greffés à la surface des fibres afin de permettre au géotextile de retenir les métaux lourds présents dans les lixiviats des sédiments. Le procédé d'ennoblissement a d'abord été optimisé en laboratoire sur des échantillons de format A4, dont la capacité à retenir les métaux lourds a ensuite été étudiée à partir de solutions synthétiques. Le procédé été appliqué à grande échelle sur une rame industrielle pour l'élaboration de géocomposite de drainage destiné à être posé au fond d'une alvéole de test grandeur nature destinée au stockage des sédiments (Fig.1).



Figure 1. Alvéole de test en grandeur réelle avec le géocomposite et les sédiments de dragage (Source : Baudalet Environnement).

3. Description du géocomposite de drainage développé

Le géocomposite de drainage développé pour ce projet doit tenir compte de plusieurs critères. Il doit filtrer de manière adaptée les lixiviats des sédiments de dragage, résister à des contraintes mécaniques importantes et posséder des caractéristiques adaptées à une fonctionnalisation pour retenir les métaux lourds. Le géocomposite de drainage à mini-drain utilisé pour ce projet répond à la demande du projet.

Il est composé à 100% de polypropylène, qui est un matériau inerte, stable chimiquement et qui ne se dégrade pas, permettant ainsi sa réutilisation. Les géotextiles qui entrent dans la composition de ce géocomposite sont non-tissés aiguilletés, ce qui confère au filtre une ouverture de filtration contrôlée. L'âme drainante du géocomposite est composée de mini-drains en polypropylène régulièrement perforés selon 2 axes alternés à 90° de diamètre intérieur de 20 mm (Fig.2).

Ces mini-drains, qui possèdent une résistance à l'écrasement allant jusqu'à 1200 kPa (Saunier et al., 2010), permettent de drainer les lixiviats même sous une forte contrainte de plusieurs mètres de colonne de sédiments. Une contrainte de 1200 kPa représente environ 120 m de colonne de sédiment. Dans le

projet étudié ici, la colonne de sédiment atteint 6 m au maximum. Les mini-drains permettent de plus d'insérer la corde fonctionnalisée qui récupèrera une partie des métaux lourds issus des lixiviats drainés.

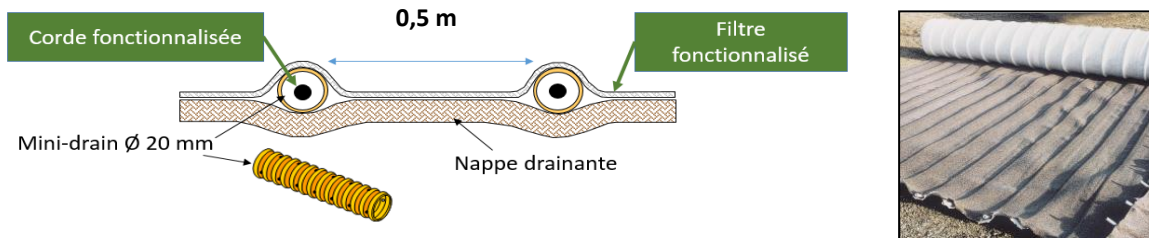


Figure 2. Schéma du géocomposite de drainage fonctionnalisé.

3.1. Fonctionnalisation du filtre et de la corde

Le processus de fonctionnalisation se résume par les étapes suivantes : le géotextile non-tissé (150 g/m²) et la corde en polyester ont subi une étape de foulardage/exprimage dans un bain contenant une dextrine (hydrolysate d'amidon) et de l'acide citrique jouant le rôle d'agent réticulant. Une thermofixation provoquant une réaction de polymérisation conduit à l'enrobage des filaments par un polymère porteur de fonctions acide carboxylique. Ces fonctions chimiques apportent au géotextile une capacité d'échange ionique qui leur permet de retenir les métaux lourds contenus dans les lixiviats issus des sédiments. L'étude menée en laboratoire a montré que le géotextile peut retenir jusqu'à 110 mg de Pb²⁺ par gramme de textile, soit 12 g par m² de géotextile. Les valeurs atteintes pour les cations Cd²⁺, Cu²⁺, et Zn²⁺ étaient respectivement de 9 - 5,7 et 4,8 g/m² (Degoutin et al., 2015). Le procédé de fonctionnalisation optimisé a été appliqué sur une rame industrielle sur un rouleau de 2 m x 100 m. La corde (500 m) a été traitée sur une rame pilote. Ces éléments ont ensuite été assemblés pour former le géocomposite de drainage qui a ensuite été mis en place au fond d'une alvéole de stockage de sédiments.

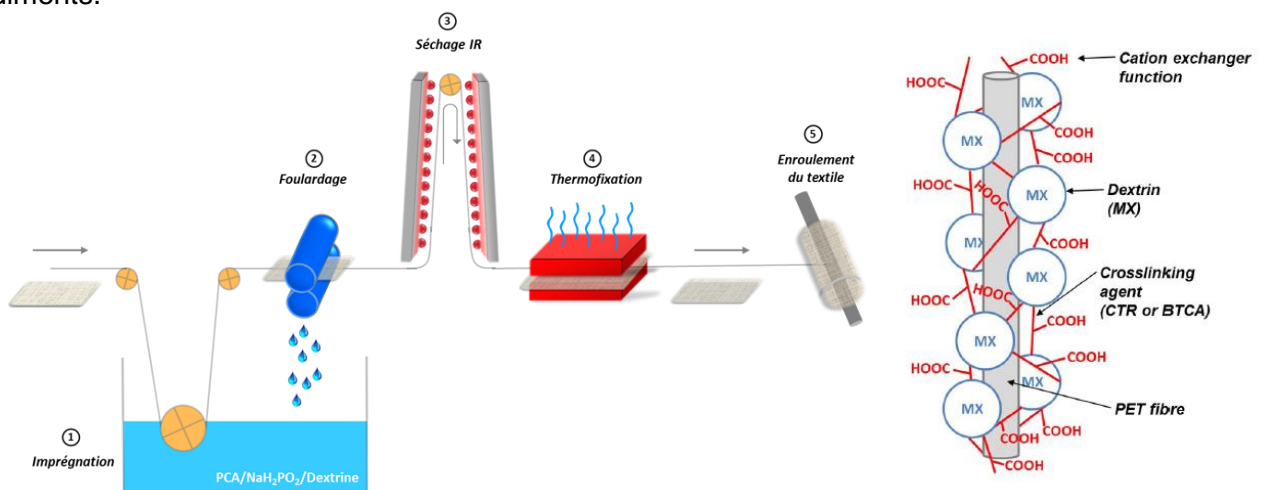


Figure 3 : a) procédé de traitement du géotextile et de la corde, b) représentation du polymère échangeur d'ions (MX = maltodextrine ; CTR = acide citrique) enrobant la fibre textile.

3.2. Association des différents éléments fonctionnalisés pour former le géocomposite de drainage

Le géocomposite de drainage composé d'un filtre, de mini-drains et d'une nappe drainante est assemblé par aiguilletage. C'est un procédé d'association par voie sèche qui permet au géocomposite final de conserver les propriétés hydrauliques et mécaniques de chaque nappe. Il était en effet important de conserver des caractéristiques hydrauliques et notamment d'ouverture de filtration de l'ordre de 90 µm pour assurer le passage et la filtration des lixiviats. L'insertion de la corde à l'intérieur des mini-drains est réalisée avec un passe-fil. Les nappes produites faisant 7 m de longueur, l'insertion des cordes a été réalisée manuellement pour cet essai. Des améliorations du procédé industriel sont envisagées pour une production à plus grande échelle.

3.3. Principe de drainage et de filtration du géocomposite

Le géocomposite de drainage et de filtration, développé avec le filtre et la corde fonctionnalisés, permet de récupérer le lixiviat qui a d'abord traversé le filtre et qui se retrouve ensuite dans la nappe drainante. Le lixiviat est ensuite drainée de la nappe vers les mini-drains, perpendiculairement à ces derniers (Fig.4). Il est ensuite évacué par les mini-drains. La distance maximale que parcourt le lixiviat dans la nappe drainante est alors la demi-distance entre les mini-drains. Dans le cadre de ce projet, l'espacement entre les mini-drains étant de 0,5 m, la distance maximale parcourue par le lixiviat dans la nappe drainante est de 0,25 m.

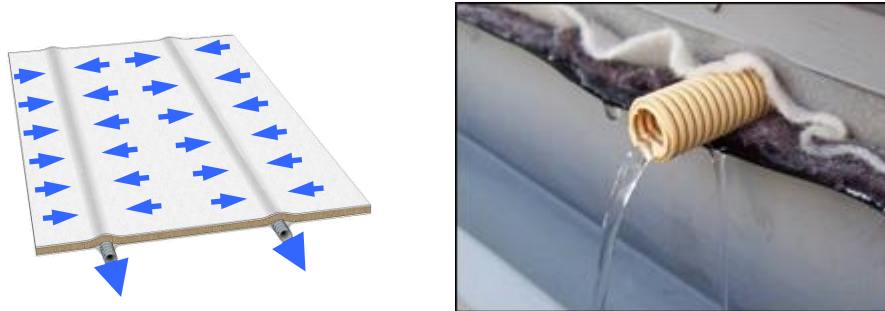


Figure 4. Principe de fonctionnement hydraulique du géocomposite de drainage.

Par ailleurs, l'insertion de la corde fonctionnalisée à l'intérieur des mini-drains garantit que le lixiviat passe par deux étapes de captation : lors du passage à travers le filtre d'une part et lors de l'évacuation par les mini-drains d'autre part. Cet élément sera intéressant à considérer au niveau des résultats, afin d'identifier quel matériau est le plus susceptible de capter les métaux lourds. Le filtre étant un élément « fixe » du géocomposite, la corde étant un élément « mobile » et pouvant être retirée par une des extrémités du bassin et remplacée en cas de saturation en cours d'exploitation par une corde neuve en stock à l'autre extrémité du bassin.

4. Plan expérimental

4.1. Définition de la planche d'essai

4.1.1. Description de la planche d'essai

L'alvéole test amenée à recevoir le géocomposite de drainage et les sédiments de dragage possède les dimensions présentées sur la figure 5.

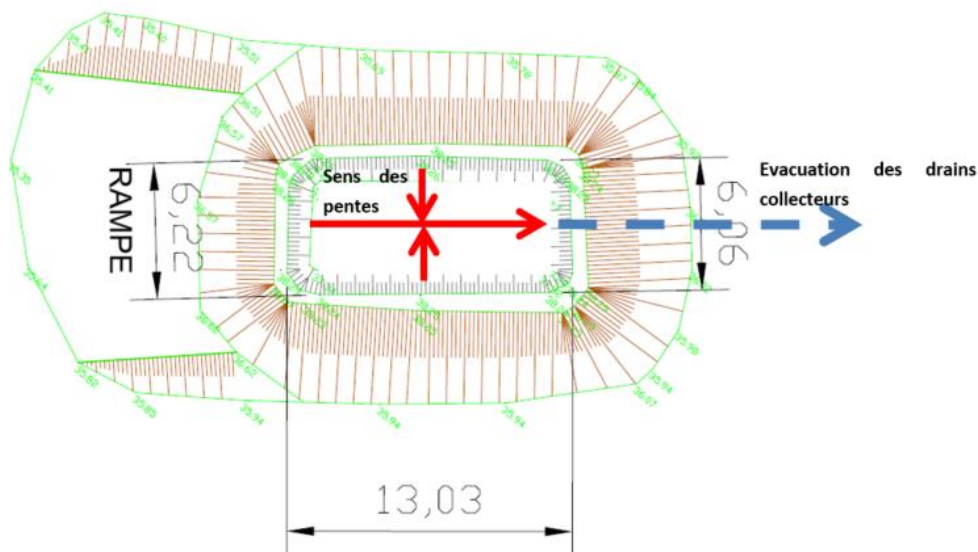


Figure 5. Plan de principe de l'alvéole de test.

Un fond de sable est mis en place pour rectifier la pente du fond de l'alvéole et obtenir une évacuation gravitaire des lixiviats. La présence du sable n'influe en rien dans le processus testé car il est disposé sous l'étanchéité. Le terrassement du bassin avec une pente d'environ 4 % aurait évité la mise en place du sable. L'évacuation des drains collecteurs est placée au fond de la cellule et se compose de quatre drains pleins PVC de 60 mm de diamètre qui passent sous le talus en point bas du bassin. À la sortie de ces drains, une vanne est disposée et quatre conteneurs de récupération sont mis à disposition pour les prélèvements.

4.1.2. Répartition des zones de test

Le géocomposite de drainage est disposé sur l'ensemble de l'alvéole directement sur la géomembrane. La figure 6 décrit la succession des matériaux qui composent l'alvéole. La géomembrane est en PVC. Une couche de protection intermédiaire est disposée entre le géocomposite et les sédiments. Dans le cas de ce projet, c'est du sable qui joue le rôle de protection du géocomposite pour éviter une éventuelle détérioration lors de la mise en place des sédiments. La mise en place de cette couche est optionnelle et si la mise en œuvre des sédiments se fait sans déplacer le géocomposite, elle n'est pas nécessaire.

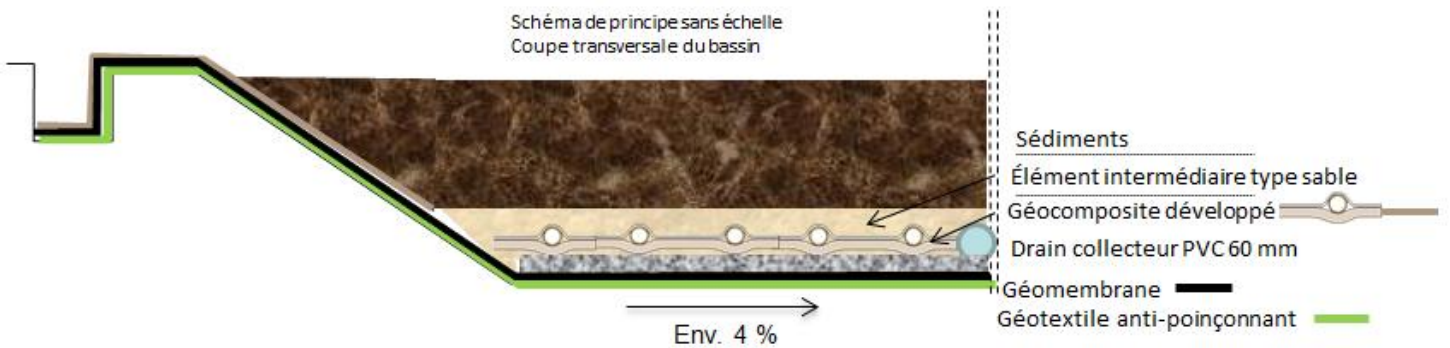


Figure 6. Plan de principe de l'alvéole de test.

L'alvéole test est divisée en quatre zones : A, B, C et D. Chaque zone permet de tester une configuration différente de géocomposite de drainage (Fig. 7).

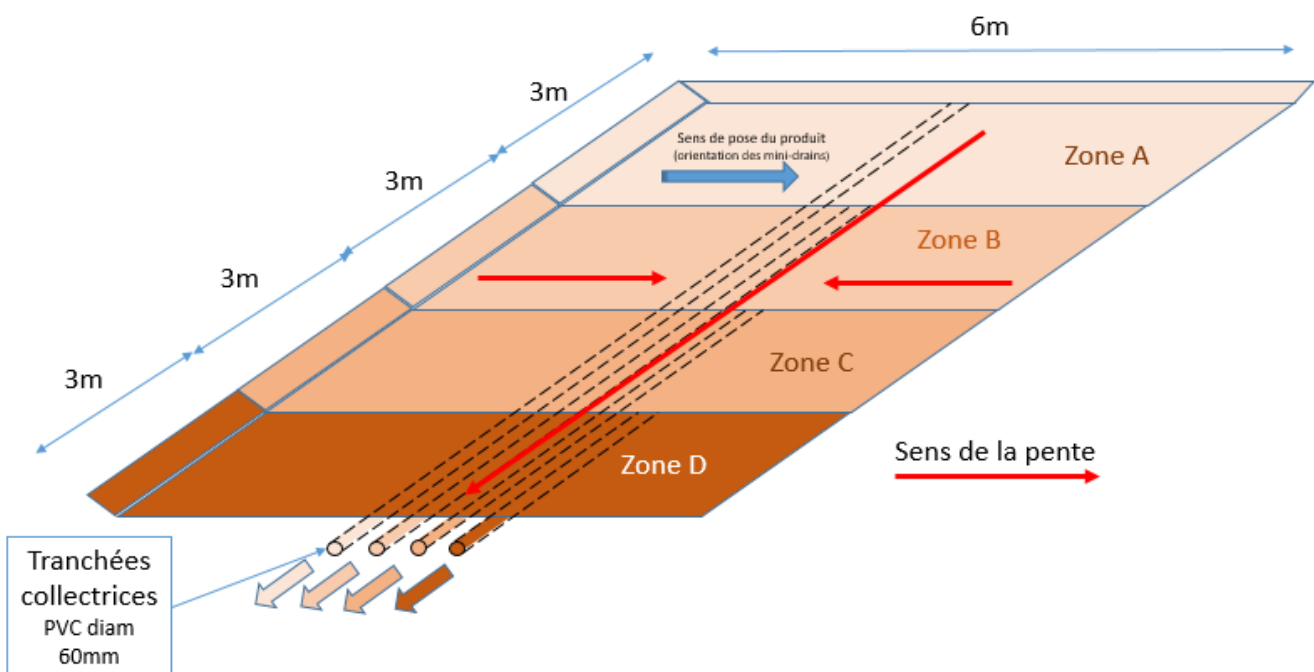


Figure 7. Configuration de l'alvéole test et emplacement des drains collecteurs.

Les différentes configurations du géocomposite de drainage mis en place au sein de l'alvéole sont présentées en figure 8.

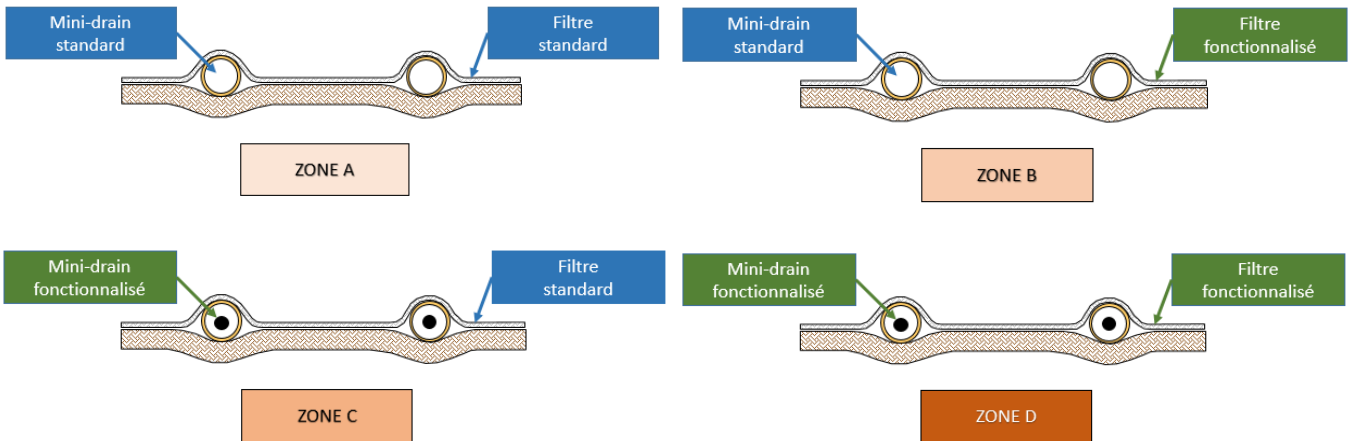


Figure 8. Configuration des quatre géocomposites de drainage.

4.1.3. Mise en œuvre des géocomposites de drainage dans l'alvéole

Les rouleaux de géocomposite drainant sont déroulés dans la largeur de l'alvéole, sur la géomembrane disposée au fond. Les joints longitudinaux sont réalisés par simple recouvrement sur une largeur de 5 à 10 cm minimum. Pour éviter tous déplacements (vent, remblai, etc.), le recouvrement est fixé par points à chaud (air chaud ou flamme). L'espacement entre ces points est de 2 m au maximum.

Le géocomposite est ancré en tête de talus sur les extrémités extérieures et raccordé au drain collecteur correspondant à sa zone au milieu de l'alvéole. La connexion du géocomposite de drainage au drain collecteur se fait par l'intermédiaire des mini-drains qui se raccordent directement par clip avec le Quick Connect Système (Fig.9). Le mini-drain est connecté en point bas du drain collecteur pour assurer la bonne évacuation du lixiviat (Fig.10).

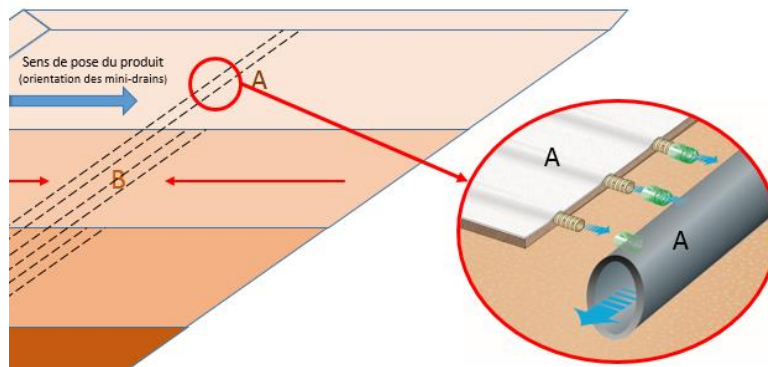


Figure 9. Raccordement de la zone A au drain collecteur plein A.

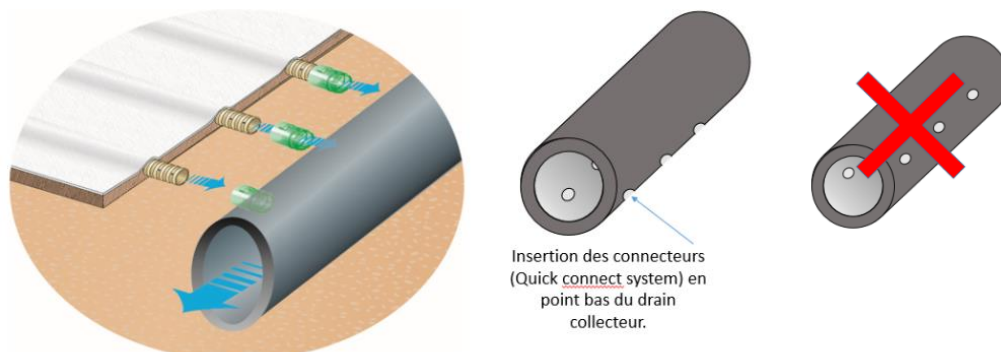


Figure 10. Emplacement des connexions sur le drain collecteur.

L'élément intermédiaire de type sableux est ensuite disposé sur 20 à 30 cm avant la mise en place des sédiments.

5. Protocole de prélèvements

5.1. Paramètres analysés

L'objectif étant la dépollution des sédiments (et indirectement l'élimination des polluants contenus dans les lixiviats), il convenait de réaliser des analyses sur sédiment brut et sur lixiviats à deux reprises : une première fois avant l'expérimentation et une deuxième fois à la fin de l'expérimentation sur les quatre zones différenciées de l'alvéole, ce qui a permis de comparer les quatre situations et aider à analyser le rendement épuratoire du filtre et des différentes configurations de l'alvéole.

Les paramètres qui ont ensuite été analysés sur le sédiment et dans les lixiviats concernent les huit métaux lourds réglementés dans l'arrêté du 9 août 2006 portant sur les opérations de dragage et d'immersion (Arsenic, Cadmium, Chrome, Cuivre, Mercure, Nickel, Plomb, Zinc) sur sédiments bruts. A cela s'ajoute les paramètres de l'arrêté du 28 octobre 2010 et de la Directive Européenne du 19 décembre 2002, avec notamment le Carbone Organique Total (COT) et les HydroCarbures Totaux (HCT) pour les sédiments bruts et un certain nombre de métaux sur les lixiviats (arsenic, baryum, cadmium, cuivre, mercure) (Tresca, 2014).

5.2. Protocole des prélèvements d'échantillons de géocomposite durant la phase d'essai

5.2.1. Prélèvement des fils fonctionnalisés

Afin de faciliter le prélèvement du fil présent dans les mini-drains, le produit sera composé de huit mini-drains avec fils fonctionnalisés (Fig. 11) : Deux mini-drains sont spécialement dédiés au prélèvement de fils pour analyse, les six autres mini-drains ont été analysés à l'échéance du projet.

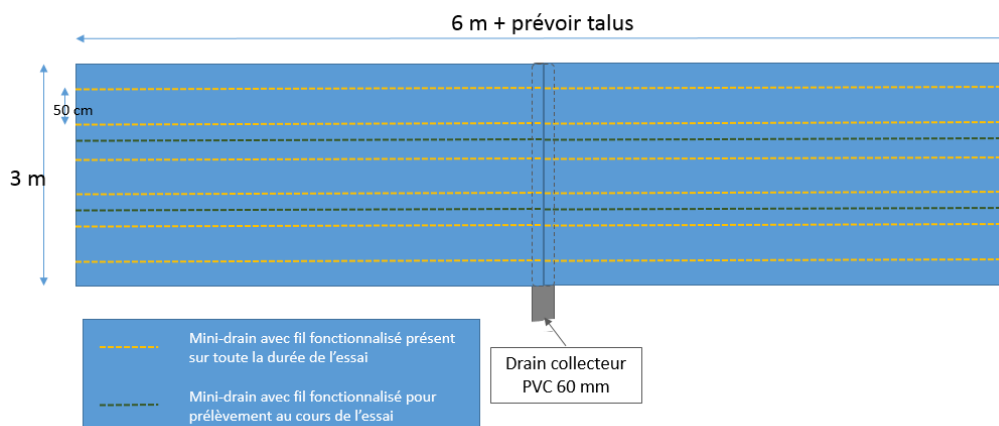


Figure 11. Schéma de l'emplacement des mini-drains sur une bande de géocomposite.

5.2.2. Prélèvement des filtres fonctionnalisés

Afin de faciliter le prélèvement des filtres fonctionnalisés au cours de l'essai et d'éviter un décaissement des sédiments, des échantillons sont posés entre le produit drainant et les sédiments. Ces échantillons sont reliés à une corde, permettant de les tirer hors de la cellule pour évaluer leur captation en métaux lourds (Fig. 12 et 13).

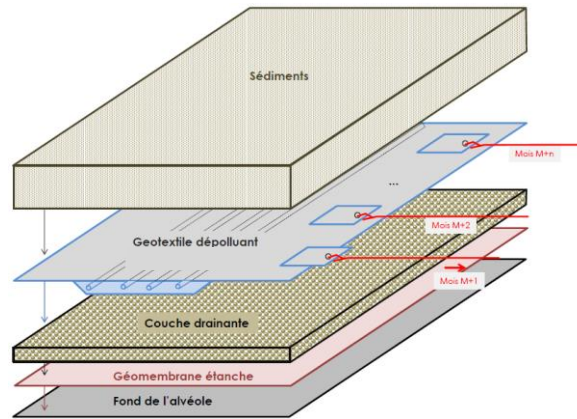


Figure 12. Schéma de l'étagement des différents éléments dans l'alvéole.

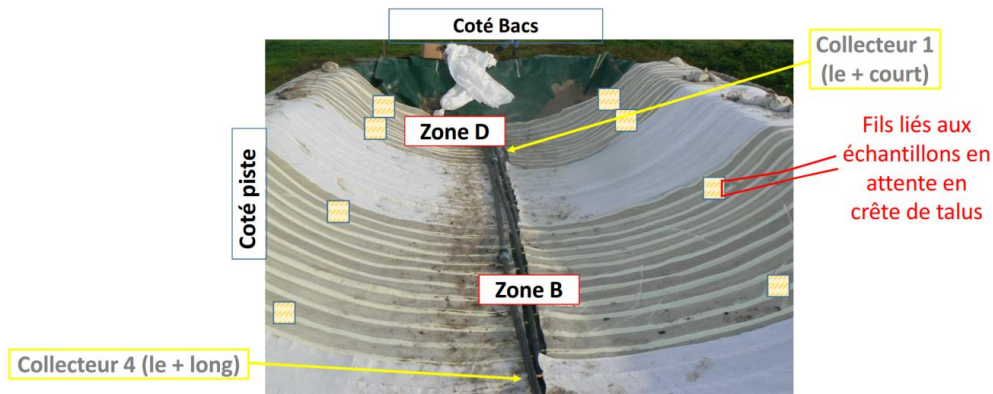


Figure 13. Disposition réelle des échantillons dans l'alvéole.

6. Principaux résultats et discussion

Les sédiments ont été mis en place dans la cellule le 9 janvier 2015. À l'issue de six mois d'expérimentation, l'ensemble des prélèvements a été réalisé et de nombreux éléments ont été apportés aux différents interlocuteurs du projet qui avaient des finalités précises et différentes pour chacun. En ce qui concerne le fonctionnement de la captation du géocomposite de drainage fonctionnalisé, plusieurs éléments ont été identifiés. Les autres résultats ne seront pas détaillés ici.

L'analyse initiale des sédiments a montré un taux de pollution en métaux lourds assez faible par rapport à ce qui est habituellement caractérisé. Les résultats de captation sont donc en conséquence plus faibles qu'espéré. Les sédiments sont cependant riches en zinc.

L'analyse finale des sédiments indique qu'il y a encore un grand nombre de métaux lourds bloqués dans ces derniers. En ce qui concerne les résultats sur les principaux métaux captés par chaque élément fonctionnalisé du géocomposite, les figures 14, 15 et 16 nous apportent des résultats pertinents.

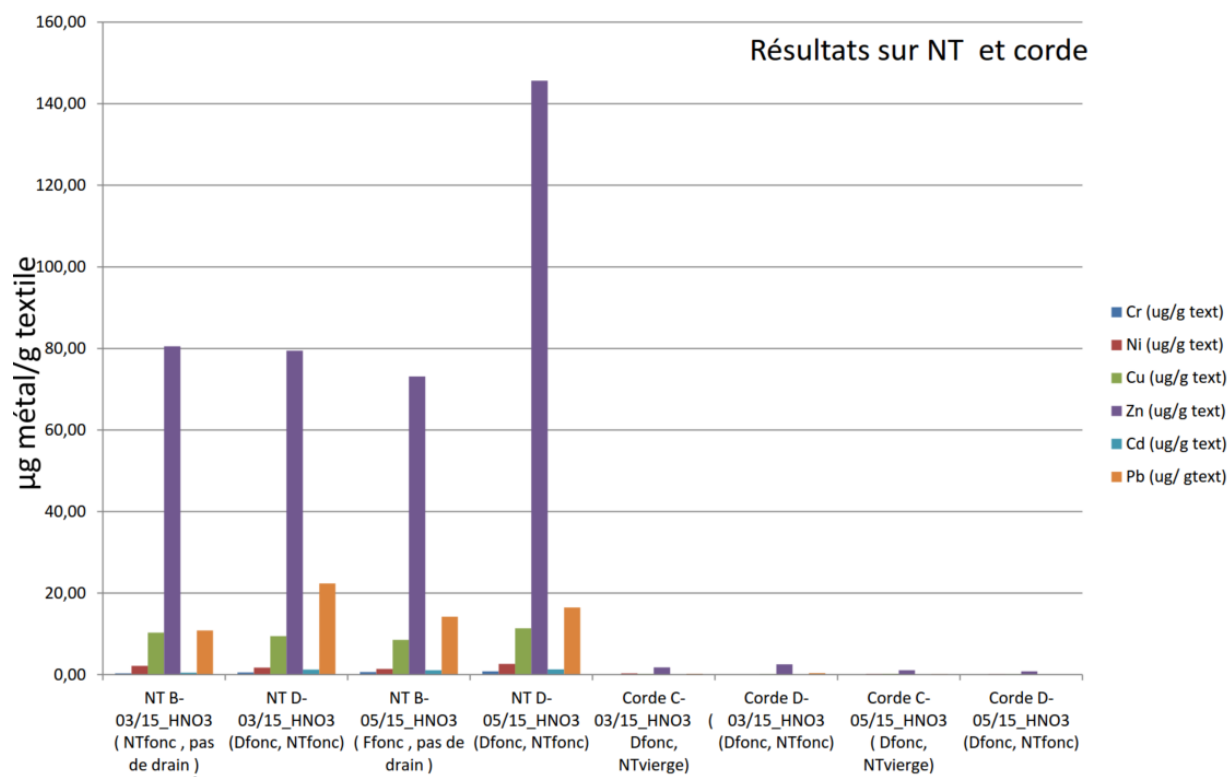


Figure 14. Analyse des métaux lourds sur les filtres (NT) et les cordes de chaque zone de test à l'issue de prélèvements en mars (03/15) et mai (05/15).

La figure 14 indique les capacités d'absorption en différents métaux, exprimés en masse/g de textile. On constate que le métal qui a été le plus capté est le zinc (Zn^{2+}), suivi du plomb (Pb^{2+}) et du cuivre (Cu). Les autres métaux sont présents en quantités négligeables. La présence très importante du zinc par rapport aux autres métaux est en cohérence avec sa forte concentration dans les sédiments. Le plomb et le cuivre arrivent en seconde position car la nature du cation utilisé dans la fonctionnalisation absorbe bien le plomb et le cuivre. Enfin, les métaux captés sont essentiellement des cations, conséquence du caractère « échange cationique » des fonctionnalisations des supports.

Si l'on compare le potentiel en capacité d'absorption, traduite par la Capacité d'Echange Ionique (CEI) entre le filtre (NT) et la corde, on obtient les résultats suivants : $CEI_{[Filtre]} = \text{env. } 0,65 \text{ meq/g}$. Avec un poids surfacique de 250 à 280 g/m^2 , $CEI_{[Filtre]} = 172 \text{ meq/m}^2$. Et dans le cas de la corde : $CEI_{[Corde]} = \text{env. } 0,14 \text{ meq/g}$. Avec un poids surfacique de 30cm de corde de 9g, soit 30 g/m linéaire, $CEI_{[Corde]} = 4,2 \text{ meq/m}$. Si l'on se rapporte au poids, le filtre a un potentiel d'adsorption 4,6 fois plus important que la corde.

La figure 15 présente les résultats d'absorption en métaux lourds sur les filtres uniquement équipés de mini-drains ou non. Comme sur la figure précédente, les concentrations en métaux sont dans l'ordre suivant : Zn (80-40 $\mu\text{g/g}$) >>> Pb (10-20 $\mu\text{g/g}$) > Cu (8-11 $\mu\text{g/g}$) >>>> autres Ni, Cr, Cd (< 3 $\mu\text{g/g}$).

Si l'on essaye d'identifier une influence de la corde et du filtre, on constate que la Zone B, qui possède un filtre fonctionnalisé et pas de corde (NTfonc, Drain non fonc), ne présente pas d'évolution de captation entre les deux prélèvements. Pour la zone D, avec filtre et corde fonctionnalisés (Drain fonc, NTfonc), une augmentation significative est notée pour le zinc uniquement entre les deux prélèvements. Pour les autres métaux lourds, les résultats sont les mêmes pour les zones B et D : la fonctionnalisation du drain par une corde n'a pas d'influence sur la capacité d'absorption du filtre.

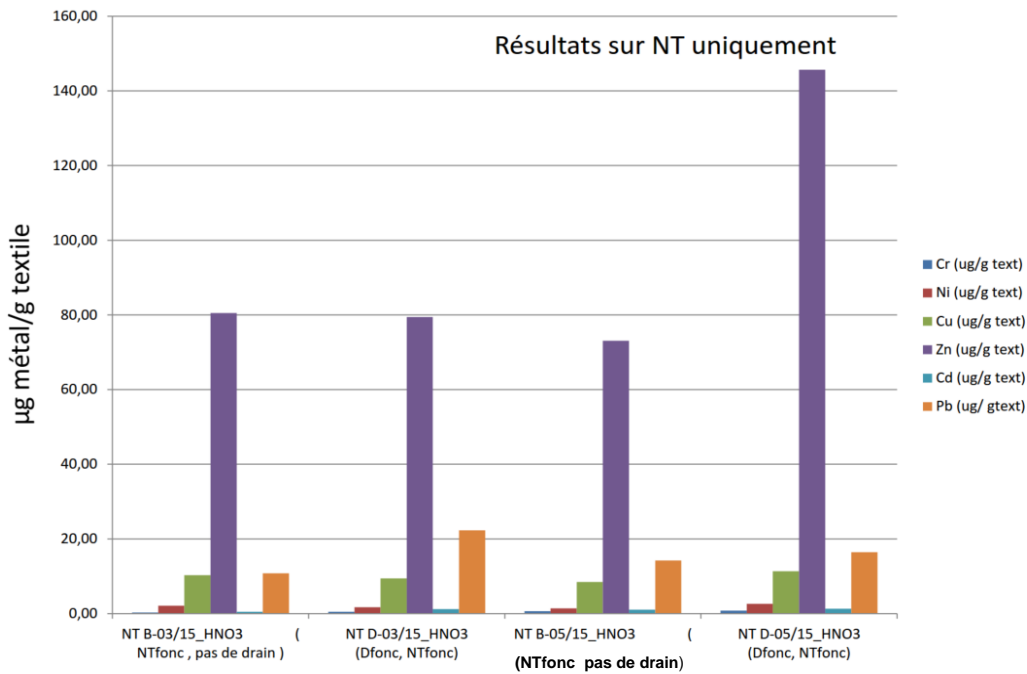


Figure 15. Analyse des métaux lourds sur les filtres (NT) de chaque zone de test à l'issu de prélèvements en mars (03/15) et mai (05/15).

Pour compléter l'analyse, Il aurait été intéressant d'avoir un témoin filtre non fonctionnalisé de la zone C à prélever également durant l'expérimentation.

La figure 16 présente les résultats d'absorption en métaux lourds sur les cordes. Comme pour les filtres, sur la figure précédente, les concentrations en métaux sont dans l'ordre suivant : Zn (1,7-2,5µg/g) >>> Ni, Pb, Cu (0,1-0,3µg/g) >>>> Cr (< 0,01µg/g).

Si l'on essaye d'identifier une influence de la fonctionnalisation du filtre sur la capacité d'absorption des métaux par la corde, il s'avère que les deux semblent indépendants. Sur la zone C, corde fonctionnalisée et filtre initial (Dfonc, NTvierge), une diminution du zinc adsorbé est révélée entre le premier et le deuxième prélèvement. Seul le cuivre augmente un peu. Pour le secteur D (Dfonc, NTfonc), la diminution est significative pour le zinc et le plomb entre les deux prélèvements. Il faudrait ainsi en déduire que les cordes relâchent les métaux lourds captés alors que ces dernières sont loin d'être à saturation. Ce phénomène n'a pas été identifié en essai laboratoire et nous n'avons pas trouvé d'explication cohérente à ce résultat.

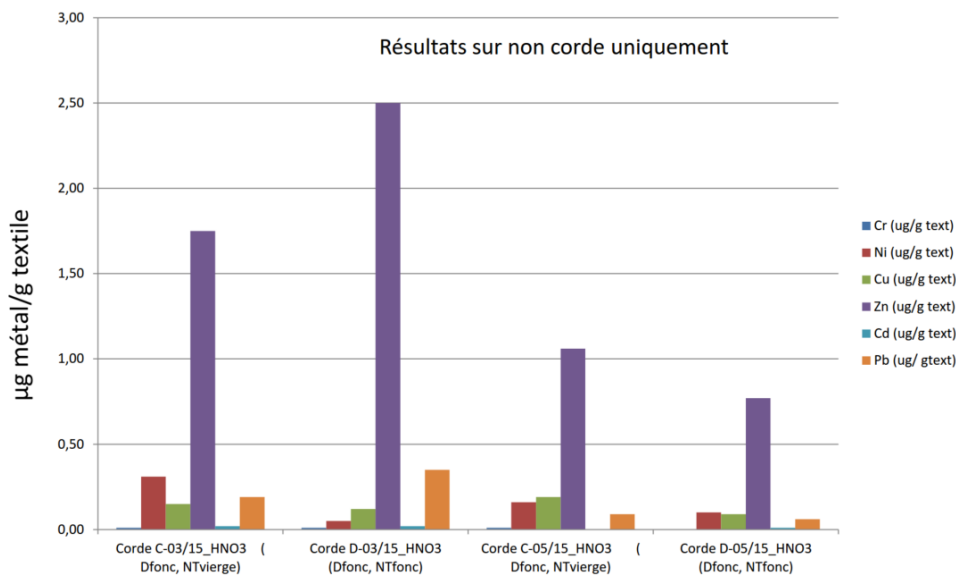


Figure 16. Zoom sur l'analyse des métaux lourds sur les cordes de chaque zone de test à l'issu de prélèvements en mars (03/15) et mai (05/15).

7. Conclusion

En conclusion, le but de ce projet était de développer un procédé de dépollution des sédiments de dragage à partir de géotextiles et cordes fonctionnalisés pour capter les métaux lourds, associé à un géocomposite de drainage pour récupérer l'eau dépolluée. Le procédé de fonctionnalisation des filtres et de la corde, mis au point en laboratoire, consiste à immobiliser à la surface du filtre des fonctions échange cationique par un procédé de polymérisation à partir de précurseurs économiquement et écologiquement intéressants. Testé sur une alvéole à échelle réelle, le géocomposite drainant ainsi fonctionnalisé joue son rôle de capteur de métaux lourds. Cependant, si l'on se rapporte à la surface développée par le filtre et la corde, le filtre possède une capacité de dépollution bien supérieure à celle de la corde, qui contribue à 20% au processus de dépollution. La corde joue ainsi le rôle d'indicateur de pollution par les métaux pour faire un suivi de l'alvéole mais ne contribue pas réellement à dépolluer les sédiments.

Ce procédé de dépollution ne permet donc de capter qu'une partie des métaux lourds contenus dans les sédiments, la partie retenue par les sédiments n'étant pas mobile, ce procédé ne pourra pas en récupérer les métaux lourds. Il serait donc judicieux de coupler ce procédé à un dispositif complémentaire dynamique capable d'extraire l'eau liée aux particules de sédiments, comme l'électro-osmose. Enfin, les résultats présentés concernent exclusivement les quantités de métaux lourds retrouvés sur les géosynthétiques. Il aurait été intéressant de savoir quelle proportion de ces métaux transportés par l'eau sont piégés en traversant le géosynthétique mais la corrélation entre les analyses dans l'eau et sur les géosynthétiques n'a pas donné de résultat exploitable.

Nous tenons à remercier tous les partenaires de ce projet, ainsi que les partenaires financiers pour leur soutien : FEDER (Fonds Européen de Développement Régional), région Nord-Pas-de-Calais, et FUI (Fonds Unique Interministériel).

8. Références bibliographiques

- Degoutin S., Saffre C., Ruffin D., Bacquet M., Martel B. (2015). Metallic pollutant removal in leachates extracted from sediment by geotextiles based on crosslinked bio-sourced polymers. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 28, n° 1, p. 43-48.
- Saunier P., Ragen W., Blond E. (2010). Assessment of the resistance of DRAINTUBE drainage geocomposites to high compressive loads. *9 ICG, Brazil*. Vol.3 – p1131.
- Tresca A. (2014). Pré-Protocole d'essai, projet DEPOLTEX, Blaringheim, 19 pages.

