

Nouveau matériau utilisable en chaussée perméable et épuratoire dans les zones urbaines : estimation des caractéristiques hydrodynamiques

New material for permeable and purificating pavement in the urban areas: estimation of hydrodynamic characteristics

Y. Bentarzi*, A. Ghenaim*, A. Terfous*, A. Wanko**, F. Hlawka*, J.B.Poulet*

*LGeCo Laboratoire de Génie de la Conception
INSA de Strasbourg.
24, boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg, France
(younes.bentarzi@insa-strasbourg.fr)

**Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg
2, rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France (awanko@engees.u-strasbg.fr)

RÉSUMÉ

Le but de ce travail consiste à estimer les caractéristiques hydrodynamiques d'un nouveau matériau à utiliser dans des chaussées drainantes et épuratoires dans les zones urbaines. Ce matériau est un mélange du béton concassé, qui est l'ossature de la structure et du compost destiné à la rétention puis au traitement biologique des polluants. Des essais de traçage sont effectués sur cinq échantillons du matériau, le béton concassé vierge et quatre mélanges avec compost (3%, 5%, 7% et jusqu'à 10% du volume total du matériau). Les paramètres mesurés lors du traçage sont le temps de séjour moyen au sein du matériau (t_s), la dispersion statistique de la distribution des temps de séjour (σ), la porosité efficace (n_c), la vitesse d'infiltration moyenne (V_m) et le nombre de Peclet de colonne (P_e). Ces paramètres jouent un rôle prépondérant dans le transport des polluants dans les sols.

ABSTRACT

The purpose of the present study is to evaluate the hydrodynamic characteristics of a new material for a permeable and purification pavement in the urban areas. The material is a mix of crushed concrete which provides the skeleton of the drainage structure, and the compost bound to the biological treatment. Many tracing experiences were conducted by an alimentation on a permanent and continued regime. The tests were conducted on five samples of the material, the crushed pure concrete and the four compost mixtures (3%, 5%, 7% and until 10% of the total volume of the material). The measured parameters during the tracing tests were the mean residence time in the material (t_s), the statistical dispersion (σ), the effective porosity (n_c), the average infiltration velocity (V_m) and the Peclet number (P_e). These parameters play a predominant role in the transport of the pollutants through the soils.

MOTS CLÉS

Pollution, béton concassé, compost, caractéristiques hydrodynamiques, temps de séjour

1. INTRODUCTION

Les techniques classiques développées depuis le XIX^{ème} siècle pour la gestion des eaux pluviales dans les zones urbaines sont remises en cause par le développement et l'accroissement des surfaces urbanisées. Pour respecter l'environnement et mieux préserver les ressources, la recherche de nouvelles solutions est aujourd'hui une problématique permanente pour les collectivités locales. Aux problèmes soulevés par la gestion des eaux pluviales, il n'existe pas de solution universelle car les problèmes diffèrent d'une ville à l'autre en fonction des spécificités locales (topographie, degré d'urbanisation, réseaux et ouvrages d'épuration, type et fragilité du milieu naturel, etc...). Cependant, trois types d'actions s'offrent pour la maîtrise des eaux pluviales (Cartel- eau, 2001). Tout d'abord, la mise en place d'un réseau séparatif ou par un surdimensionnement du réseau unitaire pour pouvoir recueillir les eaux pluviales lors des fortes précipitations. Une seconde solution est apportée par le stockage des eaux pluviales pour réduire la charge des stations d'épuration. La troisième action réside dans les techniques alternatives ou compensatoires (Vigneron. et al, 1998). La particularité des techniques alternatives, est de gérer les eaux pluviales en amont, c'est-à-dire, au niveau de la parcelle ou le plus près possible contrairement aux techniques classiques.

L'origine des polluants liés aux eaux pluviales contenus dans les RUTP (Rejets Urbain Par Temps de Pluie) sont multiples : lessivage des dépôts de temps sec et les retombées sèches accumulées sur les bassins versants (Chocat et al, 1997). De 1996 à 2000, de nombreuses publications ont cherché à les identifier, il s'agit essentiellement d'eaux de ruissellement provenant de chaussées autoroutières ou urbaines (Legret. et al, 2001). Ces polluants proviennent du trafic automobile qui diffère d'une agglomération à une autre, notamment par sa densité. Les polluants routiers sont alors quantifiés par rapport à la zone de la densité du trafic automobile. Figurent en première place les métaux lourds émis par les métaux utilisés pour la construction des routes et des automobiles (Pagatto et al, 1999) et les hydrocarbures émis par les véhicules (Herman et al, 1994).

Des techniques alternatives ont été développées, notamment les chaussées à structures réservoirs, non seulement pour diminuer les surfaces étanches des zones urbanisées, mais aussi pour piéger les polluants liés aux eaux pluviales à la source. Des études comparatives ont été menées, pour l'évaluation de la rétention des polluants, entre les chaussées classiques et les chaussées à structure réservoirs. Elles ont montré d'une façon notable que les chaussées à structures réservoirs diminuent les flux de la pollution dans les eaux pluviales (Pagatto et al, 2000. J.D. Balades et al, 1994. J.Ranchet et al, 1995). Des recherches ont montrées que les chaussées perméables jouent un rôle d'un bioréacteur in situ, en dégradant les micropolluants, notamment les hydrocarbures (Pratt et al, 1999. Coupe et al, 2003)

La conception des chaussées perméables varie considérablement. En général un système typique de chaussées perméables est constitué, de la base vers la surface, d'un géotextile, d'une couche de fondation (pierre concassé, gravats grossiers), d'une couche d'assise (sable) et d'une couche de surface poreuse (grille de pavé en béton, béton poreux, pavé autobloquant, enrobé bitumineux poreux ... etc.) (Miklas Scholz et al, 2006 ; Eban Zachary et al, 2007). De nombreuses recherches ont été menées sur ce type de chaussées pour évaluer la capacité de réduction des eaux de ruissellement et la rétention des polluants véhiculés par ces eaux (Eban Zachary et al 2007, Thomas B. Boving et al 2008, Benjamin O. Brattebo et al 2003). Notre recherche a pour objectif de concevoir un nouveau matériau issu des déchets inertes du BTP en vue de l'utiliser en chaussée perméable et épuratoire dans les zones à faible trafic (parking). Ces types de déchets sont utilisés pour des remblais du terrassement routiers (couche de forme) (Plaindoux Daniel et al 2007). Le matériau est un mélange de béton concassé (l'ossature de la structure drainante), et du compost destiné à accroître la rétention des polluants et de favoriser le traitement biologique. Le mélange béton concassé et compost doit se faire sans nuire à la capacité portante du matériau. Cette dernière a été testée antérieurement, et les résultats obtenus ont montré son bon comportement mécanique (Y.Bentarzi et al, 2007).

2. Méthodologie expérimentale

Le présent travail a pour objectif d'estimer la capacité de rétention et donc le pouvoir épuratoire de ce matériau avec différentes proportions du mélange, le béton concassé vierge et les quatre mélanges avec compost (3%, 5%, 7% et jusqu'à 10% du volume total du matériau). Un dispositif expérimental a été conçu pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du matériau, et la rétention, par le matériau, des polluants liés aux eaux pluviales, notamment les hydrocarbures type huile minérale.

L'approche expérimentale adoptée pour cette étude consiste à une analyse des moments statistiques des distributions issues des différents traçages expérimentaux au sein d'une colonne bilan de population (l'eau et les polluants) dans la colonne. Elle permet d'évaluer des paramètres clés de la distribution dans le temps des différentes grandeurs hydrodynamiques du matériau (Danckwerts et al, 1953).

Des expériences de traçage ont été menées par une alimentation en régime permanent et continu dans un milieu partiellement saturé. Le traçage a été réalisé à l'aide d'un traceur conservatif (NaCl), la masse est entièrement récupérée en fin d'expérience. La technique d'injection utilisée, définie par (Bischoff et al, 1966), consiste à introduire une quantité de traceur pendant un instant très bref en tête de la colonne : c'est l'injection impulsion ou impulsion de Dirac. La concentration initiale (avant l'injection) du Na Cl est de 0,042 g/L.

2.1 Description du dispositif expérimental

Une colonne de percolation a été équipée de capteurs d'humidité, de température, d'un manomètre et d'un conductimètre. Les dimensions de la colonne ont été choisies par rapport à l'épaisseur de la chaussée envisageable à mettre en œuvre pour un projet d'un pilote expérimental in situ (Ferreira, 2006), et le diamètre a été défini par le VER (Volume Élémentaire Représentatif).

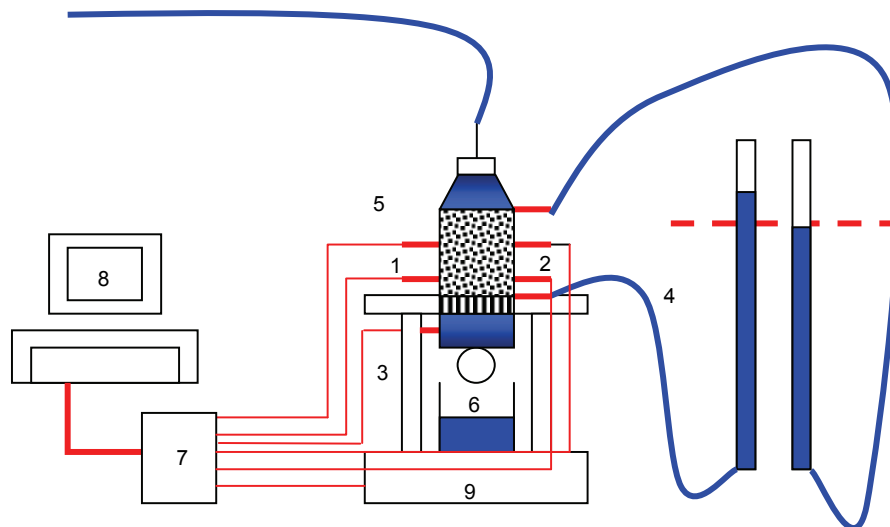


Figure 1 : schéma du dispositif expérimental, 1 : capteurs de température, 2 : Capteurs d'humidité, 3 : conductimètre, 4 : manomètre, 5 : l'alimentation, 6 : évacuation, 7 : centrale d'acquisition, 8 : ordinateur, 9 : balance

L'épaisseur du matériau est $L = 40$ cm ce qui correspond à l'épaisseur d'une chaussée. Le compost utilisé est composé d'écorces de taille variant de 1 mm à 1 cm.

Le diamètre de la colonne : $D = 40$ cm

$$D_{VER} = 30 d_{50} \quad [1]$$

Après étalonnage, les capteurs de température et d'humidité sont placés à 10 cm et 30cm de l'épaisseur du matériau, la balance pour mesurer la variation de la masse de la colonne et le manomètre est placé aux extrémités de l'épaisseur du matériau, afin de mesurer le gradient de

pression. Le conductimètre est mis au niveau de l'évacuation, pour mesurer les concentrations du traceur à la sortie de la colonne.

2.2 Expériences effectuées

Des mesures sont effectuées pour déterminer la conductivité hydraulique K (m^2/s), la perméabilité intrinsèque k (m^2) et le nombre de Reynolds dans un milieu saturé avec une charge hydraulique constante des cinq échantillons. Le nombre de Reynolds a été calculé dans le but de vérifier la validité de la loi de Darcy.

$$Q = -K_{sat} A_{colonne} \left(\frac{\Delta H}{L_{colonne}} \right) \quad [2]$$

Avec : Q (m^3/s) : Débit d'alimentation
 K_{sat} (m/s) : Conductivité hydraulique à saturation
 $A_{colonne}$ (m^2) : Séction de la colonne
 $\Delta H/L_{colonne}$: Gradient de pression

$$k = \frac{K_{sat} \nu}{g} \quad [3]$$

Avec : k (m^2) : Perméabilité intrinsèque
 ν (m^2/s) : Viscosité cinématique
 g (m^2/s) : l'accélération de la gravité

$$R_e = \frac{V_{eff} d_p}{\nu} \leq 10 \quad [4]$$

Avec : R_e : Nombre de Reynolds
 V_{eff} (m/s) : Vitesse effective
 d_p (mm) : rayon moyen des pores

Les essais de traçage ont été effectués en régime permanent, c'est-à-dire, le débit d'entrée et le débit de sortie dans la colonne sont égaux. Le débit imposé est de 0,057 L/s, correspond à une pluie à forte précipitation (événement orageux), d'une intensité de 200 mm/h et d'une vitesse effective : $V_{eff} = 4,7 \cdot 10^{-04}$ m/s. Les courbes de percées obtenues, représentent la distribution des temps de séjour, c'est la réponse impulsionnelle $E(t)$ en fonction du temps.

$$E(t) = \frac{Q \cdot C(t)}{\int_0^{\infty} Q \cdot C(t) \cdot dt} \quad [5]$$

A partir des distributions $E(t)$, on calcule le moment d'ordre 1 ou le temps de séjour moyen (t_s) de l'eau infiltrée dans le matériau, le moment d'ordre 2 ou la dispersion statistique (σ), la vitesse d'infiltration moyenne (V_m), la porosité efficace (n_e) et le nombre de Peclet (P_e) qui est le rapport entre la convection et la dispersion au sein du milieu poreux.

$$t_s = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt \quad [6]$$

$$\sigma = \sqrt{\int_0^{\infty} (t - t_s)^2 \cdot E(t) \cdot dt} \quad [7]$$

$$V_m = \frac{L}{t_s} \quad \text{Avec } L : \text{Épaisseur du matériau} \quad [8]$$

$$V_{eff} = \frac{Q}{S_{colonne}} \quad [9]$$

$$n_c = \frac{V_{eff}}{V_m} \quad [10]$$

$$P_e = L * \frac{V_m}{D_L} \quad \text{Avec } D_L : \text{Coefficient de dispersion longitudinale} \quad [11]$$

Tous ces paramètres qui interagissent dans le transport des polluants dans le matériau ont été mesurés pour les cinq échantillons.

3. Résultats et discussion

Le béton concassé utilisé provient de l'entreprise du BTP EUROVIA. Il est constitué des granulats de 0 à 20 mm, comme le montre la figure ci-dessous.

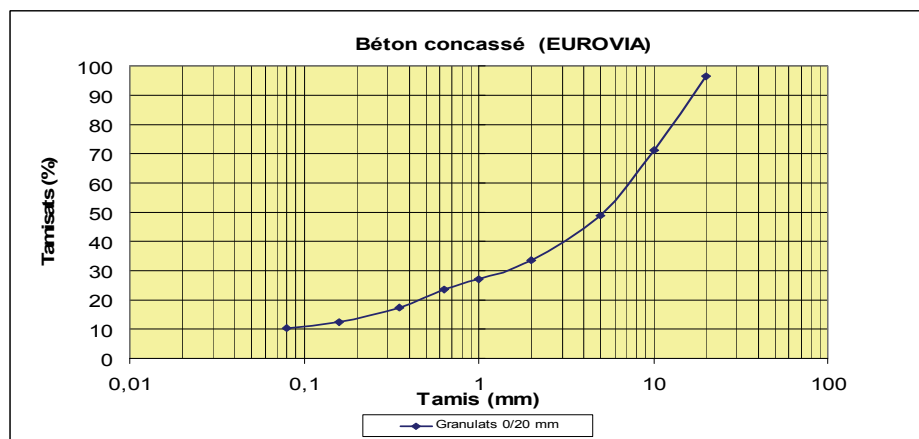


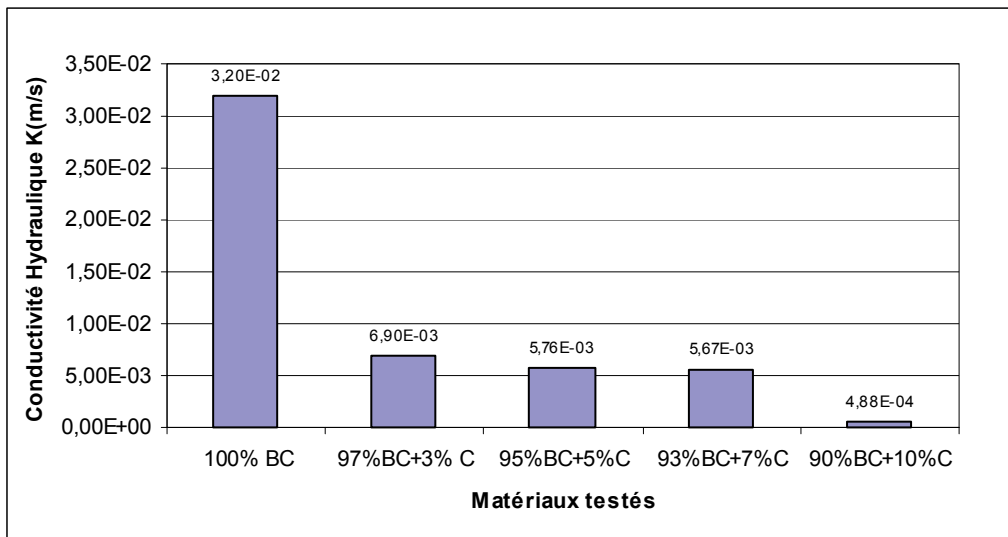
Figure 2 : Courbe granulométrique du béton concassé

La courbe granulométrique est étalée, ce qui explique que le matériau est hétérogène. Le coefficient d'uniformité (C_u) est calculé à partir de la courbe, et qui confirme que le matériau est très hétérogène.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Matériau homogène } C_u < 3 \quad [12]$$

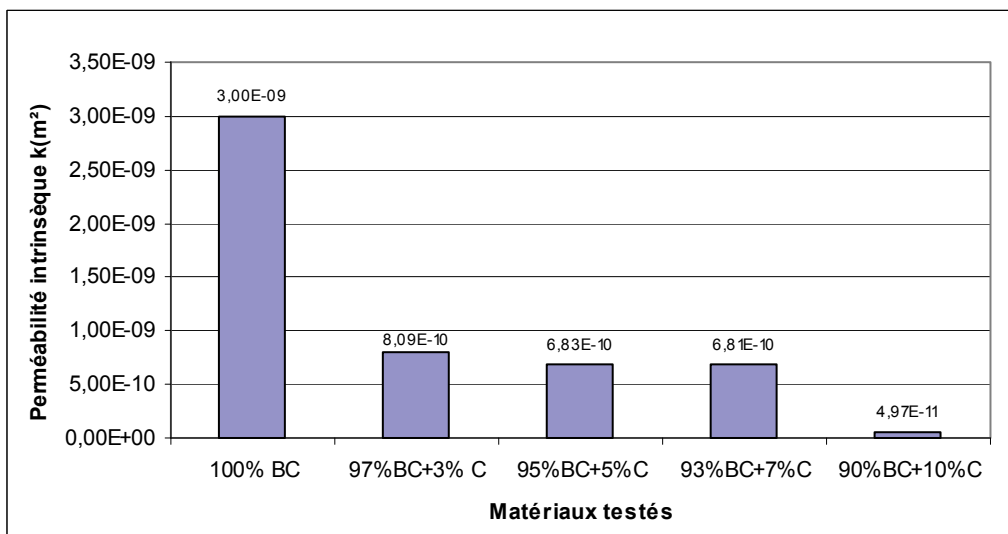
$$C_u \text{ Béton concassé} = 93,75 \quad C_u \text{ Béton concassé} \gg 3$$

Les premiers résultats, de la conductivité hydraulique, de la perméabilité intrinsèque et du nombre de Reynolds pour la validité de la loi de Darcy sont regroupés dans les figures ci-dessous.



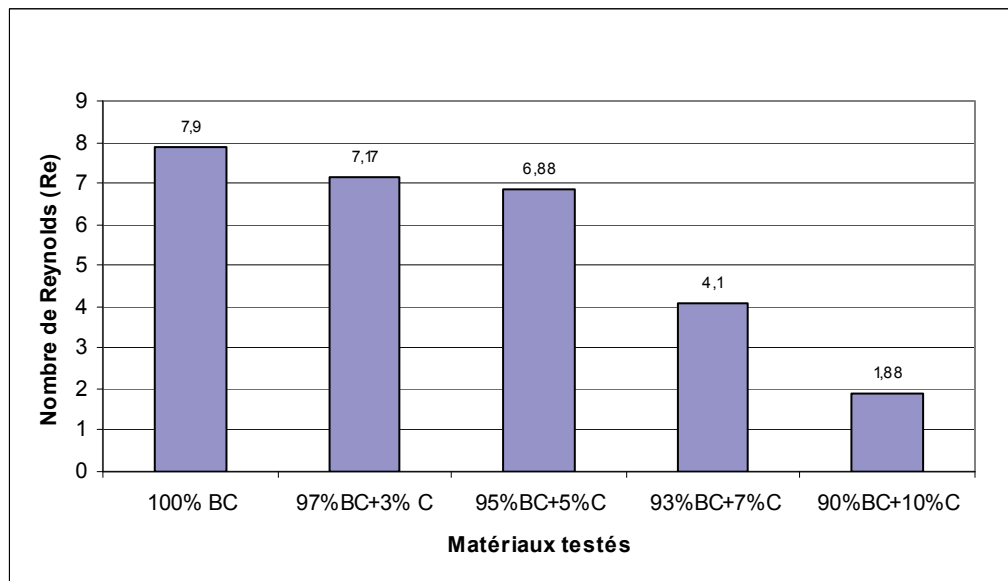
BC : Béton concassé, C : Compost

Figure 3 : Conductivité hydraulique de chaque échantillon



BC : Béton concassé, C : Compost

Figure 4 : Perméabilité intrinsèque de chaque échantillon

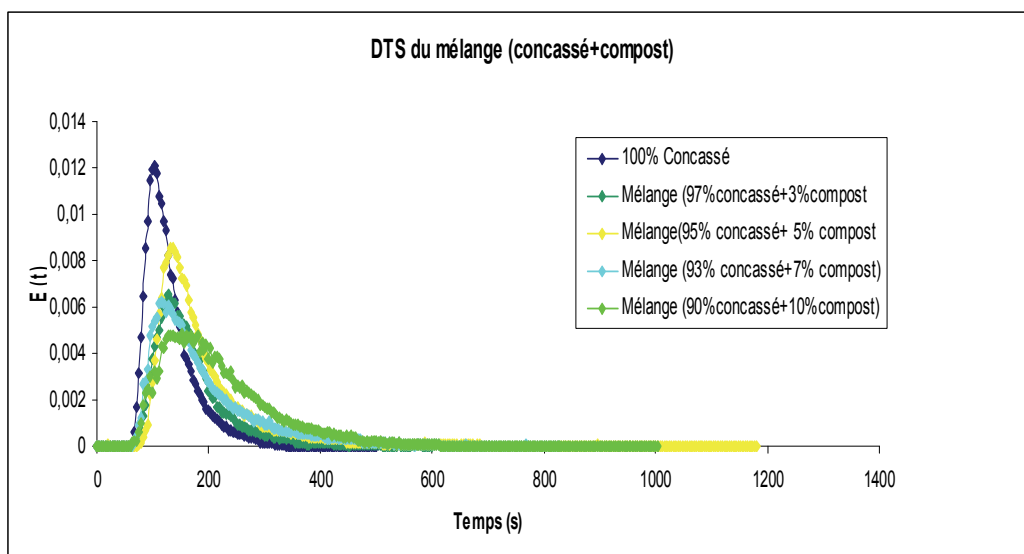


BC : Béton concassé, C : Compost

Figure 5 : Nombre de Reynolds de chaque échantillon

Les résultats montrent que le béton concassé vierge présente une très bonne perméabilité. Sa conductivité hydraulique est de l'ordre de 10^{-2} . L'ajout du compost change d'une façon significative la conductivité hydraulique. En comparant avec le béton concassé vierge et le mélange (97% concassé + 3% compost), la conductivité hydraulique a diminué de l'ordre de 10. La perméabilité du mélange (90% concassé + 10% compost) demeure bonne et utilisable pour le drainage urbain. Le nombre de Reynolds est inférieur à 10, donc pour les cinq échantillons testés, on est dans la validité de la loi de Darcy.

La distribution des temps de séjour des particules d'eau dans chaque échantillon est représentée dans la figure ci-dessous.



Figures 6 : Distribution de temps de séjour de chaque échantillon testé

La figure 6 montre un aplatissement et un étalement de la courbe à chaque rajout du compost. En effet, l'ajout successif du compost induit une augmentation des forces de capillarité au sein du milieu, et par conséquent une rétention hydrique qui croît avec le pourcentage de compost. Cette augmentation de volume par rétention hydrique favorise la dilution du traceur et de fait une diminution du pic de concentration en sortie et un rallongement des temps de séjour. Le compost a donc une très grande influence sur le comportement hydrodynamique du matériau et par suite sur le transport des polluants véhiculés par l'écoulement. Des paramètres hydrodynamiques qui agissent sur le transport des polluants ont été déduits de ces courbes de distribution des temps de séjour (DTS), et sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Matériaux testés	t_s (s)	σ (s)	V_m (m/s)	n_c (%)	P_e
100% Béton concassé	112,49	45,67	4.10^{-3}	11,00	77,00
97%Béton concassé+3% Compost	120,01	78,58	$3,7.10^{-3}$	12,80	76.28
95% Béton concassé+5%Compost	160,53	96,90	$2,8.10^{-3}$	17,00	76,19
93%Béton concassé+7%Compost	187,52	99,08	$2,3.10^{-3}$	20,60	76.03
90%Béton concassé+10%compost	198,59	117,77	$2,0.10^{-3}$	22,00	75.86

Tableau 1 : Paramètres hydrodynamiques des différents échantillons du matériau

Le tableau 1 montre que le temps de séjour moyen (t_s), ainsi que la dispersion statistique (σ), augmentent respectivement de 76% et 158% pour un ajout de compost de 10%, cela induit un retard dans la migration des polluants au sein du matériau. On constate aussi que la vitesse d'infiltration moyenne ou la vitesse des pores (V_m) diminue de moitié, contrairement à la porosité efficace (n_c) qui double. Comparativement au béton, le compost est un matériau meuble qui présente une intraporosité efficace non négligeable qui accroît de façon significative la porosité globale, ce qui a entre autres effets, l'augmentation des temps de séjour moyen et des dispersions statistiques. Le nombre de Peclet est le ratio du terme de convection par rapport à celui de dispersion. Il indique la nature de l'écoulement. Si le Peclet est supérieur à 1, l'écoulement est convectif (convection dominante). Et s'il est inférieure à 1, l'écoulement est dispersif (dispersion dominante). Dans notre cas le nombre de Peclet est largement supérieur à 1 ($P_e = 77$, pour le béton concassé vierge), ce qui implique qu'on est dans un écoulement convectif. Avec l'ajout du compost, on constate aussi que le nombre de Peclet diminue, mais d'une manière non significative, contrairement au temps de séjour moyen et la dispersion statistique qui augmentent significativement.

4. Conclusion

Le but de ce travail est de concevoir un matériau utilisable pour des chaussées drainantes et auto épuratoires dans les zones urbaines. Ce matériau est constitué du béton concassé, l'ossature de la structure drainante, et du compost destiné au traitement biologique. Des essais ont permis d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques du matériau avec différentes proportions du mélange, le béton concassé vierge et les quatre mélanges avec compost (3%, 5%, 7% et jusqu'à 10% du volume total du matériau).

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout du compost diminue d'une façon significative la perméabilité du matériau, en comparant avec le béton concassé vierge et le mélange (97% concassé + 3% compost).

Les essais de traçage ont permis de définir les paramètres liés au transport des polluants au sein du matériau et l'influence du compost sur le comportement hydrodynamique. Le temps de séjour moyen (t_s), ainsi que la dispersion statistique (σ), augmentent avec l'ajout du compost respectivement, de 122,49 à 198,59 secondes et de 45,65 à 117,77 secondes, et cela induit un retard dans la migration des polluants au sein du matériau. Ce travail sera suivi par une étude de l'infiltration des polluants type l'huile minérale (l'huile du moteur) au sein du matériau, afin d'évaluer sa capacité de rétention et caractériser les lixiviats.

BIBLIOGRAPHIE

- Balades, J.D., Bourgogne, P., Madeic, H., Teniere, C. (1994). *Evaluation de l'abattement des flux de pollution transitant dans un type de solution compensatoire « LES CHAUSSEES - RESERVOIRS » LA HOUILLE BLANCHE.*
- Benjamin, O.B., Derek, B.B. (2003). *Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems.* Water Research. 37, 4369-4376.
- Benarzi, Y., Terfous, A., Hlawka, F., Ghenaim, A., Ferreira, P., Caillaud, E., Poule, J.B. (2007) *Déchets inertes du BTP : vers un nouveau matériau anti-ruissellement et dépolluant.* 25^{ème} rencontre de l'AUGC, Bordeaux.
- Bischoff, K.B., Mc Cracken, E.A. (1966). *Tracer tests in flow systems.* Ind. Eng. Chem, Vol. 58, NO.7, pp. 18-31.
- Cartel- eau. *La maîtrise des eaux pluviales : Quelles solutions techniques.* Mise à jour : décembre 2001, <http://www.cartel'eau.org/guide/m004.htm>.
- Chocat, B., Bertrand-Krajewski, J.L., Barraud, S. (1997) *Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie.* Doc. W 6 800.
- Coupe, S.J., Smith, H.G., Newman, A.P., Puehmeier, T. (2003). *Biodegradation and microbial diversity within permeable pavements.* European Journal of Protistology, 39(4):495–8.
- Danckwerts, P.V. (1953). *Continuous flow systems. Distribution of residence times.* Chem. Eng.Sci.2: 1-13. P.V.
- Eban, Z.B., William, F.H., David, A.B. (2007). *Evaluation of four permeable pavement sites in eastern north California for runoff reduction and water quality impacts.* Irrig. And Drain.Engrg. Volume 133, Issue6, pp.583-592.
- Hahn, H.H., Rudiger, P. (1994). *The contribution of parked vehicle emissions to the pollution of urban runoff.* The science of total environment 146/147 525-533.
- Legret, M., Raimbault, G., Boisson, J.C. (2001). *Pollution et impact d'eaux de ruissellement de chaussées - 1er partie : pollution des eaux et des sols liée au ruissellement sur chaussées en rase campagne,* LCPC, ISSN 1160-9761.
- Miklas, S., Piotr, G. (2007). *Review of permeable pavement.* Building and Environment, 42, 3830-3836
- Pagatto, C. (1999) *Étude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et hydrocarbure en domaine routier.* Thèse de doctorat, université de Poitiers, 252p.
- Pagatto, C., Legret, M., Le Cloirec, P. (2000). *Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of the highway runoff water according to the type pavement.* Wat. Res. Vol. 34, No. 18, pp. 4446±4454.
- Plaindoux, D., Gratessolle, F., Meunier. (2007). *Yves aéroport de Paris-Orly rénovation de la piste 4.* Coden Travaj, ISSN 0041-1906, pp. 47-52.
- Pratt CJ, Newman AP, Bond PC. (1999). *Mineral oil biodegradation within a permeable pavement: long-term observations.* Water Science and Technology; 39(2):109–30.
- Pratt CJ. (1999). *Use of permeable, reservoir pavement construction for dtormwater treatment and storage foe re-use.* Water Science and Technology, pp.145-151
- Ranchet, J., Penaud, F., Le Grand, R., Constant, A., Obry, P., Soudieu, B. (1995) *Comparaison d'une chaussée pavée et d'une chaussée drainante du point de vue de leur comportement hydraulique et de leur impact sur la dépollution des eaux de pluie.* NOVATECH95, 635-639.
- Thomas, B.B., Mark, H.S., Janelle, A., Brian, B. (2008). *Potential for localized groundwater contamination in a porous pavement parking lot setting in Rhode Island.* Environ Geol, pp. 571-582.
- Vignerou, S. (1998). *Technique alternative aux réseaux d'assainissement pluviale élément-clé pour la mise en œuvre.* Collection du Certu.