



HAL
open science

Hydrodynamic characteristics of peat columns

Thierry Gosset, Daniel R. Thévenot, L. Zilliox

► **To cite this version:**

Thierry Gosset, Daniel R. Thévenot, L. Zilliox. Hydrodynamic characteristics of peat columns. Tribune du CEBEDEAU , 1987, 40 (527), pp.47 - 58. hal-01179662

HAL Id: hal-01179662

<https://hal.science/hal-01179662v1>

Submitted on 23 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractéristiques hydrodynamiques de tourbe en colonne

Hydrodynamic characteristics of peat columns

T. GOSSET ⁽¹⁾, D. R. THÉVENOT ⁽²⁾ et L. ZILLIOX ⁽³⁾

RÉSUMÉ

Les performances des procédés de traitement d'eaux usées utilisant des lits ou colonnes de tourbe peuvent être limitées par les propriétés hydrodynamiques du matériau utilisé.

Des expériences de circulation ascendante d'eau dans des colonnes de tourbe de 1,50 m de longueur et de 20 cm de diamètre ont permis de déterminer des conductivités hydrauliques (coefficient de Darcy) K égales, selon le remplissage, à 0,14-0,88 cm/s pour la tourbe brune eutrophe d'Heurteauville et à 0,011-0,093 cm/s pour la tourbe blonde oligotrophe Floratorf. Pour ces 2 types de tourbe, le volume de pore V_p est voisin de 32.000 cm³ par colonne, ce qui correspond à une porosité cinématique comprise entre 74 et 87 %.

L'analyse mathématique des profils de concentration en sortie de colonnes, lorsqu'un échelon de KCl 10 mM est introduit, nous a permis de mesurer des coefficients de dispersion D : ils sont compris entre 0,23 et 0,31 cm²/s pour la tourbe brune et entre 0,10 et 0,21 cm²/s pour la tourbe blonde. La comparaison des profils de concentration obtenus lors du passage de KCl et lors de son élution à l'eau montre que les interactions KCl-tourbe sont principalement diffusionnelles et que ce réactif peut être valablement utilisé comme traceur hydrodynamique. Enfin, si l'on considère que la diffusion est contrôlée par un régime de dispersion cinématique pure, les coefficients de dispersion intrinsèque α' sont compris entre 7 et 30 cm.

MOTS CLÉS

Tourbe - Hydrodynamique - Milieu poreux - Porosité - Perméabilité - Conductivité - Dispersité.

SUMMARY

Water treatment processes which use peat bed or columns may be limited by hydrodynamic properties of this material.

Ascending water experiments, using 1,5 m high and 20 cm diameter columns, allowed us to determine hydraulic conductivity (Darcy coefficient) K : it ranges between 0.14 and 0.88 cmls for eutrophic Heurteauville peat and between 0.011 and 0.093 cmls for oligotrophic Floratorf peat, depending upon column filling conditions. For both peat types pore volume V_p is near to 32,000 cm³, corresponding to a 74-87 % kinematic porosity.

Mathematical analysis of concentration profiles at column outputs, when 10 mM KCl plug injection were performed, gave dispersion coefficient D ranging between 0.23 and 0.31 cm²/s for eutrophic peat and between 0.10 and 0.21 cm²/s for oligotrophic peat. Comparison of concentration profiles when KCl is introduced or rinsed by water shows that interactions between KCl and peat is mainly diffusional and that KCl may be used as hydrodynamic tracer. If diffusion is supposed to be under purely kinetic dispersion regime, intrinsic dispersion coefficients α' range between 7 and 30 cm.

KEY-WORDS

Peat - Hydrodynamic - Porous media - Porosity - Permeability - Conductivity - Dispersivity.

⁽¹⁾ Bureau Veritas, Direction Régionale Ile de France, 21-23, Grande Allée du 12 février 1934, F-77186 Noisiel (France).

⁽²⁾ Laboratoire de Bioélectrochimie et Analyse du Milieu (L.A.B.A.M.), U.F.R. de Sciences et de Technologies, Université Paris-Val de Marne, Avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex (France). Auteur à qui toute correspondance doit être envoyée.

⁽³⁾ Institut de Mécanique des Fluides, U.A. C.N.R.S., 854, Université Louis Pasteur, 2 rue Boussingault, 67083 Strasbourg Cedex (France).

1. INTRODUCTION

Des lits ou colonnes de tourbe sont fréquemment utilisés en assainissement urbain (Silvio 1972, Mc Kay 1980, Attal Gosset & Thévenot 1987) ou industriel (Coupal & Lalancette 1976, Gosset Trancart & Thévenot 1986, Gosset 1986). Le dimensionnement de telles installations nécessite une bonne connaissance des caractéristiques hydrodynamiques de la tourbe utilisée et en particulier de sa conductivité hydraulique et

de sa porosité cinématique. En effet tous ces procédés d'épuration utilisent des circulations d'effluents à travers des lits ou des colonnes de 10 à 150 cm d'épaisseur : les pertes de charge à travers ces couches de tourbe et les temps de contact de l'effluent avec le matériau sont directement liés à ces 2 paramètres. Quelque soit le processus physicochimique (filtration, adsorption, échange d'ions) ou biologique (biodégradation sur biomasse fixée) utilisé au cours de ces épurations d'eau usée (d'Olier 1984), l'adaptation d'essais en pots à des procédés en continu utilise la conductivité hydraulique et la porosité cinématique ou le volume de pore V_p du matériau utilisé. La détermination de ces paramètres présente donc un grand intérêt bien qu'elle n'ait donné lieu qu'à un nombre limité de travaux (Poots 1976, 1978, 1980; d'Olier 1984).

Ce document présente les résultats obtenus avec 4 pilotes préindustriels de 1,50 m de longueur et 20 cm de diamètre remplis de 2 types de tourbe : en effet, afin de tenir compte des différences de propriétés de ce matériau naturel liées à son gisement d'origine (Puustjärvi & Robertson 1975), nous avons comparé les caractéristiques hydrodynamiques de tourbe brune eutrophe dite «tourbe d'Heurteauville» et de tourbe blonde oligotrophe «Floratorf». Les grandes quantités de tourbe utilisées dans les colonnes (env. 40 l) ainsi que le souci d'obtenir un protocole de remplissage le plus simple possible, nous ont conduits à ne faire subir à la tourbe aucun prétraitement. En fait, les résultats obtenus en pots (Gosset Trancart & Thévenot, 1984, 1986) ont démontré que la granulométrie de la tourbe n'a que peu d'influence sur son pouvoir de fixation de cations métalliques par complexation ou échange d'ions. De plus, Given (1975), Poots (1980) et Attal & Thévenot (1984) ont trouvé que le séchage nécessaire à un tamisage rigoureux joue un rôle négatif sur les capacités de rétention de colorants ou de cations métalliques par des tourbes d'origine différente.

Deux types d'essais ont été réalisés sur ces pilotes :

- détermination des conductivités hydrauliques K (coefficient de Darcy) des quatre colonnes en flux ascendant d'eau de ville,
- détermination des porosités cinématiques et des coefficients de dispersion D par mesure du volume de pore V_p en utilisant, comme traceur hydrodynamique, des échelons de concentration de KCl avec divers débits et modes d'alimentation des colonnes.

2. DÉFINITION DE PARAMÈTRES CARACTÉRISANT UN MILIEU POREUX

La configuration réelle de la géométrie et de l'écoulement au sein d'un sol, ou plus généralement d'un milieu poreux, est trop compliquée pour être décrite

dans ses détails microscopiques, car la vitesse du fluide varie considérablement d'un point à l'autre et tout du long d'un même parcours. Pour cette raison, l'écoulement dans les milieux poreux est décrit en terme de vecteur vitesse d'écoulement macroscopique, qui représente la moyenne globale des vitesses microscopiques dans le volume total du sol. L'élément de sol est donc traité comme un milieu uniforme et comme si l'écoulement était réparti sur toute la section (espace, solide et liquide inclus). L'expérience entraîne donc l'introduction d'une nouvelle échelle de volume, «le Volume Élémentaire Représentatif» (V.E.R.). Le V.E.R. est intermédiaire entre l'échelle locale et l'échelle du pore. C'est le plus petit volume de mélange polyphasique (solide + liquide) dans lequel les définitions et les mesures de propriétés du milieu poreux sont possibles.

La loi de Darcy décrit l'équation du mouvement d'un fluide à l'échelle du V.E.R. où les singularités du niveau granulométrique (échelle des pores) ne sont plus prises en compte. Sous la forme :

$$Q = K \cdot S \cdot i \quad (1)$$

elle définit une vitesse apparente v de filtration ou débit unitaire ou encore vitesse de Darcy :

$$v = Q/S = K \cdot i \quad (2)$$

où : Q = débit total de filtration (L^3/T), S = section apparente de filtration (L^2), K = conductivité hydraulique ou coefficient de Darcy, appelée encore conductivité hydraulique (L/T), i = gradient hydraulique (dh/dx), v = vitesse apparente de filtration ou débit unitaire (L/T).

Trois hypothèses sont généralement admises pour que cette loi de Darcy soit vérifiée :

- a) l'écoulement doit être suffisamment lent, le nombre de Reynolds R_e devant être inférieur à 1

$$R_e = v \cdot d \cdot \rho / \mu \quad (3)$$

où : d = dimension caractéristique du milieu (L), ρ = masse volumique du fluide (M/L^3), μ = viscosité dynamique du fluide ($M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$).

- b) uniformité, continuité et isotropie du milieu,
- c) unicité du fluide.

Le milieu poreux peut alors être caractérisé par trois paramètres : la conductivité hydraulique, la dispersivité et la porosité.

2.1. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est influencée par la nature du sol ou du milieu : elle varie de 10^{-3} - 10^{-2} cm/s dans un sol sableux à 10^{-7} - 10^{-4} cm/s dans un sol argileux (Hillel 1974). Elle dépend non seulement de la porosité totale mais aussi de la dimension des pores conducteurs.

La conductivité hydraulique K ne varie pas seulement avec les propriétés du milieu solide, elle dépend aussi des caractéristiques du fluide. On introduit ainsi la perméabilité intrinsèque k liée à K par la relation :

$$K = \frac{k}{\mu} \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

où g est l'accélération de la pesanteur, ρ et μ étant respectivement la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide. K et k peuvent être aisément déterminés en mesurant simultanément le débit total Q et le gradient hydraulique i , rapport de la perte de charge hydraulique dh à travers une épaisseur définie dx de sol et de cette épaisseur : $i = dh/dx$ (figure 4). Il est cependant nécessaire de saturer le milieu avec le fluide, ici l'eau, et de faire circuler le fluide de façon ascendante.

2.2. Dispersivité

Ce coefficient est déterminé en utilisant un traceur hydrodynamique. On définit ainsi une substance miscible à l'eau sans en modifier les caractéristiques physiques et non interactive avec la matrice solide. Le transport d'un échelon de concentration de traceur d'un point d'injection au point de mesure permet d'accéder au coefficient de dispersion D . Ce paramètre est déterminé à partir de la courbe de restitution donnant la répartition des concentrations en traceur dans le temps au point de mesure (Fried & Combarous 1971, Martaud 1983).

Dans un modèle physique unidimensionnel, l'équation macroscopique de la dispersion hydrodynamique s'écrit :

$$C/C_0 = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \frac{x - u \cdot t}{2 \sqrt{D \cdot t}} + \exp \frac{u \cdot x}{D} \cdot \operatorname{erfc} \frac{x + u \cdot t}{2 \sqrt{D \cdot t}} \right\} \quad (5)$$

où : x = abscisse de tout point d'une section droite (L); u = vitesse moyenne de pore (L/T); t = temps (T); D = coefficient de dispersion hydrodynamique (L^2/T).

Quand on peut négliger le deuxième terme, la solution approchée s'écrit :

$$C/C_0 = 1 - \frac{1}{(2 \cdot \pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{\frac{x - u \cdot t}{\sqrt{2 \cdot D \cdot t}}} \exp \left\{ - \frac{y^2}{2} \right\} \cdot dy \quad (6)$$

Quand t est fixé et x est la distance au point d'injection, le rapport C/C_0 se déduit de la fonction de répartition d'une loi normale de moyenne ut et d'écart type $\sigma = (2 \cdot D \cdot t)^{1/2}$ (figure 1).

On remarquera qu'avec l'augmentation de trajet x , la valeur de σ augmente mais moins rapidement que x : la zone de mélange (effet dispersif) perd de sa signification relative vis-à-vis du déplacement convectif au fur et à mesure que la distance x croît.

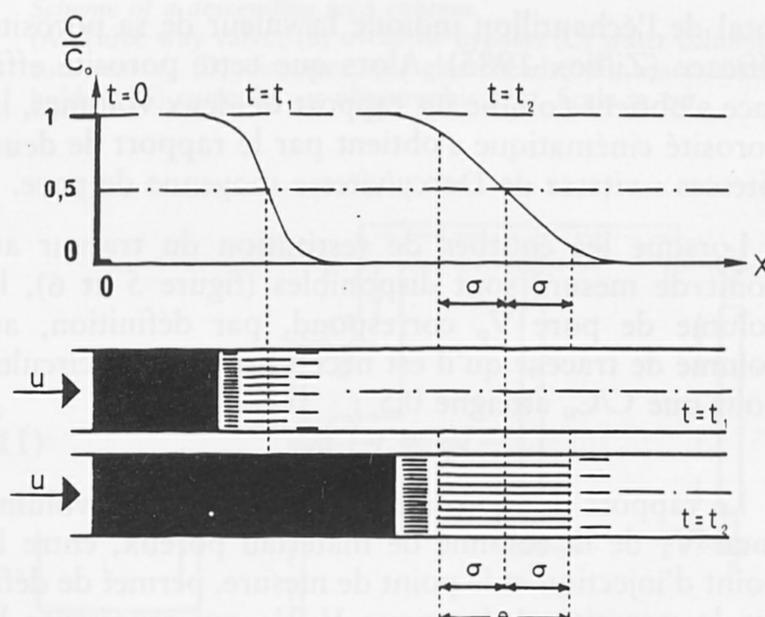


FIG. 1. Courbes de déplacement unidirectionnel d'un traceur dans un milieu poreux homogène.
Unidirectional flow of a tracer through an homogeneous porous column.

Une propriété de la loi normale permet d'écrire :

$$2 \cdot \sigma = (x_{0,16} - x_{0,84}) \quad (7)$$

où $x_{0,16}$ et $x_{0,84}$ sont les distances au point d'injection pour lesquelles C/C_0 vaut respectivement 0,16 et 0,84.

Mais dans la plupart des expériences, l'abscisse l du point de mesure est fixée à l'épaisseur du lit ou la longueur de la colonne, et le temps t devient la variable. C/C_0 vaut 0,5 quand $t = t_{0,5}$ et la vitesse réelle moyenne de pore u peut être obtenue par la relation :

$$u = l/t_{0,5} \quad (8)$$

Si l'on définit $e = 2 \cdot \sigma$ pour largeur de la zone de mélange, le coefficient de dispersion s'obtient par $D = e^2/8 t$, on peut alors écrire grâce à la loi normale, en définissant $t_{0,16}$ et $t_{0,84}$ comme $x_{0,16}$ et $x_{0,84}$:

$$e = 2 \cdot \sigma = \frac{l - u \cdot t_{0,16}}{(2 \cdot D \cdot t_{0,16})^{1/2}} - \frac{l - u \cdot t_{0,84}}{(2 \cdot D \cdot t_{0,84})^{1/2}} \quad (9)$$

On peut donc calculer D :

$$D = \frac{1}{8} \left\{ \frac{l - u \cdot t_{0,16}}{(t_{0,16})^{1/2}} - \frac{l - u \cdot t_{0,84}}{(t_{0,84})^{1/2}} \right\}^2 \quad (10)$$

Ce coefficient D est fréquemment relié à la vitesse u moyenne de pore par la relation $D = \alpha' \cdot u$ où α' est appelé coefficient de dispersion intrinsèque. Les travaux de Pfannkuch (1963) montrent que cette solution reste valable si la distance moyenne du parcours ($x_{0,5}$ correspondant à $C/C_0 = 0,5$) est nettement supérieure, par un facteur multiplicatif 5 à 10, à la largeur e de la zone de mélange.

2.3. Porosité

Lors d'essais sur échantillons de milieu poreux, le volume d'eau libre (gravitaire) rapporté au volume

total de l'échantillon indique la valeur de sa porosité efficace (Zilliox 1985). Alors que cette porosité efficace s'obtient comme un rapport de deux volumes, la porosité cinématique s'obtient par le rapport de deux vitesses : vitesse de Darcy/vitesse moyenne de pore.

Lorsque les courbes de restitution du traceur au point de mesure sont disponibles (figure 5 et 6), le volume de pore V_p correspond, par définition, au volume de traceur qu'il est nécessaire de faire circuler pour que C/C_0 atteigne 0,5 :

$$V_p = v \cdot t_{0,5} \quad (11)$$

Le rapport de ce volume V_p de pore et du volume total V_T de la colonne de matériau poreux, entre le point d'injection et le point de mesure, permet de définir la porosité cinématique V_p/V_T qui représente la porosité apparente du matériau vis à vis du fluide étudié.

2.4. Cas particulier de la tourbe

Peu de renseignements sont disponibles sur la détermination des paramètres caractérisant ce milieu poreux. Les tourbes, suivant leur origine, ont une capacité de rétention d'eau égale à environ quatre à dix fois leur poids sec. Pour les tourbes brunes, cette capacité est limitée par un tassement des composants de la tourbe (André 1981). Seuls, Bear (1972), Poots (1980) et d'Olier (1984) ont déterminé des conductivités hydrauliques avec des modes opératoires différents.

Grâce à la méthode de Porchet, d'Olier (1984) a trouvé une conductivité hydraulique K de 3,7 cm/s, ceci pour de la tourbe brune d'Heurteville. Cette méthode consiste à réaliser un trou cylindrique de surface latérale connue, dans la tourbe dont la saturation est contrôlée à l'aide d'un tensiomètre. Ce trou est alors rempli, et on mesure le temps nécessaire à l'écoulement de l'eau entre deux hauteurs.

Poots, quant à lui, a déterminé K en utilisant des colonnes de 5 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur. La tourbe utilisée pour le remplissage de ses pilotes était de la tourbe de sphaigne d'Irlande du Nord. Elle avait été préalablement séchée, broyée puis criblée en trois granulométries : 250-355, 355-500 et 710-1.000 microns. Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues sont comprises entre 0,72 et 1,28 cm/s selon la granulométrie employée. D'autre part, Poots cite une étude de J. Bear (1972) qui a mesuré une conductivité hydraulique comprise entre 10^{-4} et 10^{-2} cm/s.

Pour déterminer la porosité de la tourbe, diverses techniques peuvent être employées. L'utilisation de porosimètres à gaz ou à mercure nécessitent de travailler avec de faibles quantités d'un échantillon sec et homogène. Si ces conditions opératoires ont l'avantage

d'être reproductibles, elles modifient par contre la morphologie de l'échantillon. Poots (1980) a mesuré avec un porosimètre à mercure une porosité variant de 0,6 à 1,25 cm³/g pour de la tourbe irlandaise. Il nous a semblé plus intéressant de mesurer les porosités cinématiques car elles sont plus directement en relation avec la nature des procédés d'assainissement utilisant des lits ou colonnes de tourbe.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Caractéristiques techniques des pilotes

Les quatre colonnes utilisées pour cette étude ont été réalisées en P.V.C. d'une épaisseur de 0,6 cm (figure 2). Deux modèles de colonnes ont été construits et remplis de tourbe à 2 reprises : deux colonnes pour un type d'alimentation descendante H (28,5 à 29,5 kg de poids frais, soit 4,4 à 5,9 kg de poids sec, de tourbe brune) et I (10,4 à 17,0 kg de poids frais, soit 5,9 à 8,5 kg de poids sec, de tourbe blonde) et deux autres pour une alimentation ascendante J (29,3 à 29,5 kg de poids frais, soit 4,4 à 6,0 kg de poids sec, de tourbe brune) et K (10,3 à 17,5 kg de poids frais, soit 5,8 à 8,7 kg de poids sec, de tourbe blonde). Les 2 charges de tourbe utilisées pour remplir ces colonnes n'ont subi aucun prétraitement, ni tamisage ni séchage : les poids frais précédemment cités correspondent donc aux quantités de tourbe utilisées lors de ces 2 remplissages; les poids secs ont été calculés en mesurant la teneur en eau d'un échantillon de ces tourbes au moment du remplissage des colonnes. La seule différence entre ces deux types de colonnes est que les colonnes en flux descendant possèdent un déversoir à leur partie supérieure afin de maintenir une hauteur d'eau constante en tête de colonne (figure 2). Pour les quatre colonnes, le volume de tourbe utilisé est égal à 41.600 cm³. Des billes de verre de 4 mm de diamètre remplissent entièrement les extrémités de chaque colonne, afin d'obtenir une meilleure diffusion de la solution en entrée de colonne et de réduire le volume mort modifiant la concentration de l'effluent de sortie : le volume utile total de chaque colonne est donc de 47.600 cm³.

Les quatre colonnes font partie d'un pilote semi-industriel comprenant deux cuves et deux circuits d'alimentation destinés à l'alimentation principale et à une alimentation à contre-courant (figure 3). Quatre pompes péristaltiques Gilson type HP 4F assurent la distribution de la solution par l'intermédiaire d'un réseau constitué de tuyaux Exacanal. Des vannes trois voies fixées aux extrémités des colonnes permettent de sélectionner le mode d'alimentation.

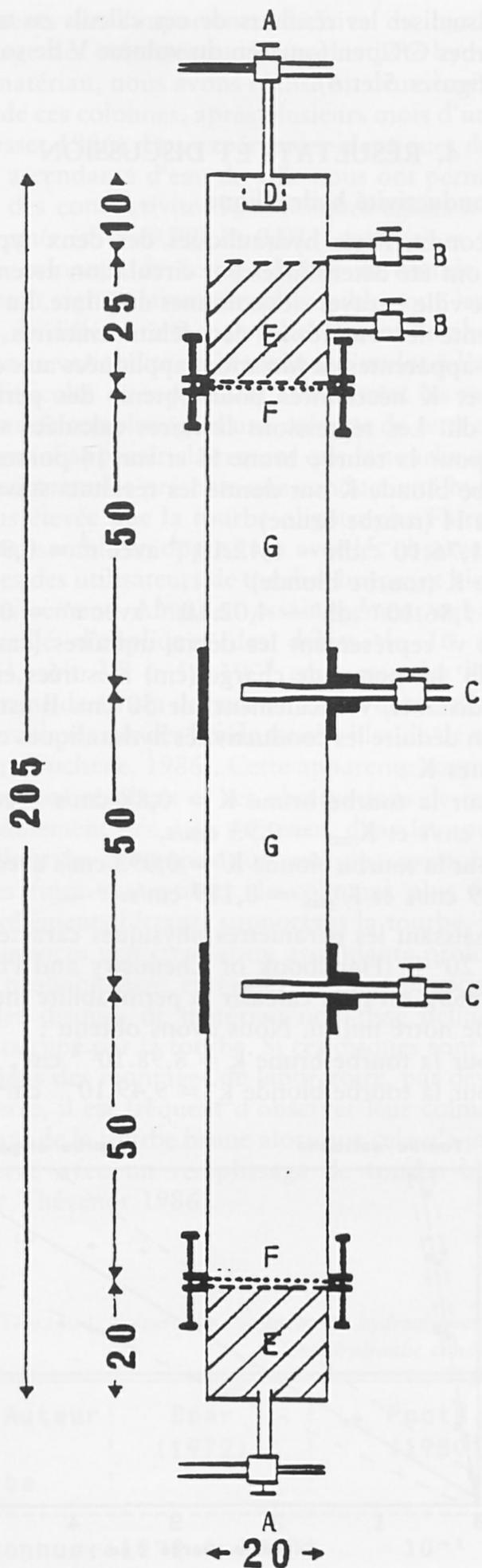


FIG. 2. Schéma d'une colonne à flux descendant. Vannes trois voies (A); déversoir (B); capteur de pression (C); diffuseur (D); billes de verre (E); grille et toile non tissée (F); tourbe blonde ou brune (G); échelle en cm.

Scheme of a descending feed column.

(A) Three way valve; (B) overflow bypass; (C) water column pressure sensor; (D) disperser; (E) glass beads; (F) coarse filter and holder; (G) eutrophic or oligotrophic peat. Scale in cm.

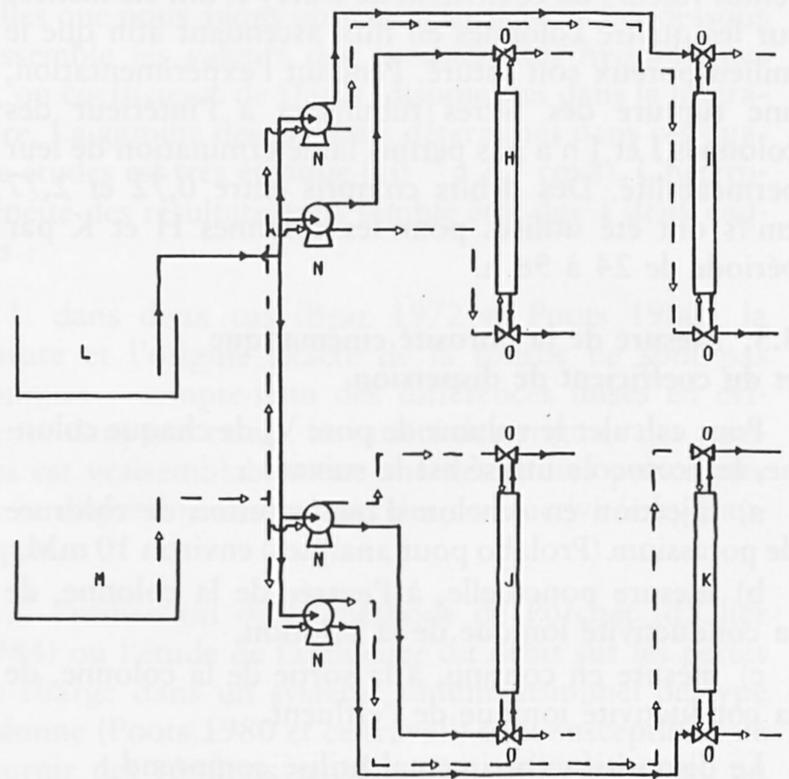


FIG. 3. Schéma de fonctionnement du pilote.

Colonne de tourbe brune avec alimentation descendante (H); colonne de tourbe blonde avec alimentation descendante (I); colonne de tourbe brune avec alimentation ascendante (J); colonne de tourbe blonde avec alimentation ascendante (K); cuve d'alimentation (290 l) (L); cuve d'alimentation à contre-courant (290 l) (M); pompe péristaltique (N); vannes trois voies (O).

— : alimentation normale,
- - - : alimentation à contre-courant.

Scheme of pilot plant.

(H) Eutrophic peat column using descending feed; (I) oligotrophic peat column using descending feed; (J) eutrophic peat column using ascending feed; (K) oligotrophic peat column using ascending feed; (L) feedstock reservoir (290 l); (M) flushing reservoir (290 l); (N) peristaltic pump; (O) 3 way valve.

— : normal feed,
- - - : reverse flow feed.

3.2. Mesure de la conductivité hydraulique

Les capteurs de pression utilisés par notre étude sont réalisés avec des tubes de P.V.C. transparent de 0,8 cm de diamètre interne. Deux capteurs sont logés à l'intérieur de chaque colonne, 50 cm les séparant l'un de l'autre (figure 2). Chacun d'entre eux est recouvert d'un filtre tubulaire Whatman (porosité 2 microns) pour éviter que la tourbe ne pénètre dans ces tubes. Les pertes de charge sont mesurées par la différence de hauteur d'eau entre les deux tuyaux fixés côte à côte sur chaque colonne. Les mesures ont été précédées par une période de mise en eau de 10 jours en flux

ascendant à faible débit ($0,55 \text{ cm}^3/\text{s}$) : cette précaution a été prise afin d'homogénéiser la tourbe et de chasser les bulles d'air.

Les expériences effectuées pour déterminer les différentes valeurs du coefficient de Darcy K ont été menées sur les quatre colonnes en flux ascendant afin que le milieu poreux soit saturé. Pendant l'expérimentation, une rupture des filtres tubulaires à l'intérieur des colonnes I et J n'a pas permis la détermination de leur perméabilité. Des débits compris entre $0,72$ et $2,77 \text{ cm}^3/\text{s}$ ont été utilisés pour les colonnes H et K par période de 24 à 96 h.

3.3. Mesure de la porosité cinématique et du coefficient de dispersion

Pour calculer le volume de pore V_p de chaque colonne, le protocole utilisé est le suivant :

- injection en échelon d'une solution de chlorure de potassium (Prolabo pour analyses) environ 10 mM ,
- mesure ponctuelle, à l'entrée de la colonne, de la conductivité ionique de la solution,
- mesure en continu, à la sortie de la colonne, de la conductivité ionique de l'effluent.

Le dispositif expérimental utilisé comprend :

- un résistivimètre Solea Tacussel type CD60 et un conductimètre Solea Tacussel type CD-6NG,
- des cellules de mesure de conductimétrie, à circulation, Solea Tacussel type CM 09.88G,
- des enregistreurs graphiques Sefram type Graphispot et Solea Tacussel type EPL-2 asservis à des tiroirs potentiométriques TV11 GD, pour suivre en continu les variations de conductivité ionique à la sortie des colonnes.

Les expériences ont été menées simultanément sur quatre colonnes H, I, J et K, alimentées en flux ascendant puis sur deux colonnes H et I en mode descendant, afin de déterminer l'influence du mode d'alimentation sur la porosité utile de chaque colonne. Après avoir observé la courbe de réponse de chaque colonne à une injection en échelon d'une solution de chlorure de potassium 10 mM , de l'eau du robinet est injectée en tête de colonne avec le même débit et la même direction d'alimentation.

Pour les courbes d'injection en échelon de KCl , C_0 représente la concentration en entrée de KCl alors que pour les courbes de lessivage à l'eau, C_0 est la dernière concentration de KCl mesurée en sortie de colonne avant le début du rinçage.

Les solutions de KCl utilisées pour ces essais ont toujours été préparées avec de l'eau du robinet. Grâce à l'étalonnage des cellules, les données lues au résistivimètre sont transformées en concentration après correction de la conductivité de l'eau du robinet. On peut

alors visualiser les résultats de ces calculs en traçant les courbes C/C_0 en fonction du volume V de solution traité (figures 5 et 6).

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Conductivité hydraulique

Les conductivités hydrauliques des deux types de tourbe ont été déterminées par circulation ascendante d'eau de ville à travers les colonnes du pilote. La figure 4 présente les variations des débits unitaires v , ou vitesses apparentes de filtration, appliquées aux colonnes H et K nécessaires pour obtenir des pertes de charge dh . Les régressions linéaires calculées sur 15 points pour la tourbe brune H et sur 14 points pour la tourbe blonde K ont donné les résultats suivants :

colonne H (tourbe brune)
 $v = 1,76 \cdot 10^{-2} \cdot dh - 1,42 \cdot 10^{-4}$ avec $r^2 = 0,932$

colonne K (tourbe blonde)
 $v' = 1,86 \cdot 10^{-3} \cdot dh' - 4,02 \cdot 10^{-4}$ avec $r^2 = 0,761$
 où v et v' représentent les débits unitaires (cm/s), et dh et dh' les pertes de charge (cm) mesurées entre 2 points distants, verticalement, de 50 cm . Il est donc aisé d'en déduire les conductivités hydrauliques correspondantes K :

- pour la tourbe brune $K = 0,88 \text{ cm/s}$ avec $K_{\min} = 0,83 \text{ cm/s}$ et $K_{\max} = 0,93 \text{ cm/s}$,
- pour la tourbe blonde $K' = 0,093 \text{ cm/s}$ avec $K'_{\min} = 0,069 \text{ cm/s}$ et $K'_{\max} = 0,119 \text{ cm/s}$.

Connaissant les paramètres physiques caractérisant l'eau à 20° C (Handbook of Chemistry and Physics, 1967-1968), on peut calculer la perméabilité intrinsèque k de notre milieu. Nous avons obtenu :

- pour la tourbe brune $k = 8,98 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$,
- pour la tourbe blonde $k' = 9,49 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2$.

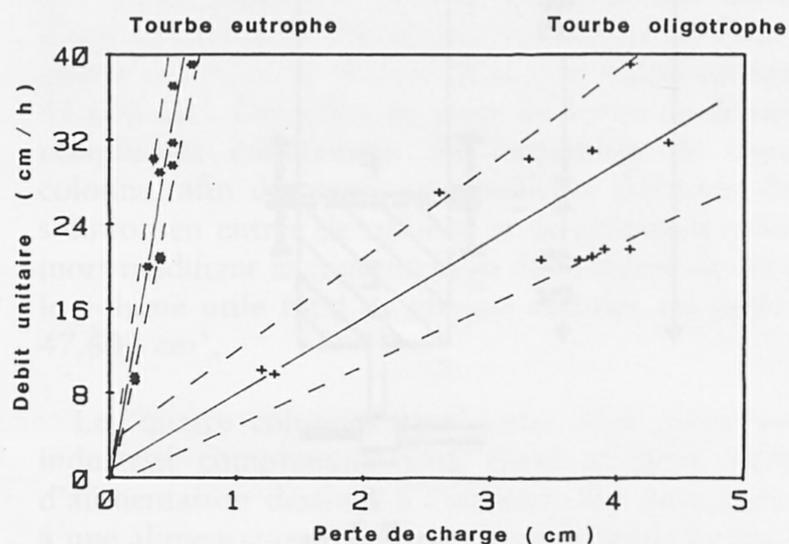


FIG. 4. Influence du débit unitaire v (cmls) sur les pertes de charge dh (cm d'eau) mesurées entre deux points distants de 50 cm . Tourbe blonde (+) et brune (*) contenue dans les colonnes K et H. Influence of specific water flow rate v (cmls) over pressure drop dh (water cm) measured between 2 sampling ports 50 cm apart. (+) oligotrophic and (*) eutrophic peat filling columns K and H.

Conscients de l'importance décisive du mode de remplissage des colonnes sur la conductivité hydraulique du matériau, nous avons réalisé un deuxième remplissage de ces colonnes, après plusieurs mois d'utilisation (Gosset 1986). Des expériences identiques de circulation ascendante d'eau de ville nous ont permis de mesurer des conductivités hydrauliques égales à $0,14 \pm 0,02$ cm/s ($r^2 = 0,99$) et $0,011$ cm/s ($r^2 = 0,92$) pour les colonnes de tourbe brune et blonde. Ces valeurs sont significativement plus faibles que les précédentes, la différence étant probablement attribuable à la fois à la variabilité de la tourbe, d'un lot à l'autre, et à la difficulté de reproduire exactement les mêmes conditions de remplissage d'une colonne de cette taille. Néanmoins il apparaît clairement que la tourbe eutrophe d'Heurteville présente une conductivité hydraulique plus élevée que la tourbe oligotrophe Floratorf. Ce résultat semble en opposition avec les observations fréquentes des utilisateurs de tourbes brunes et blondes en assainissement. Ainsi, en assainissement urbain il est conseillé d'appliquer des débits de 10 à 15 l.m⁻².h⁻¹, soit $2,8$ à $4,2 \cdot 10^{-4}$ cm/s, sur des lits de tourbe brune de 40 cm de hauteur et des débits environ 2 fois plus élevés sur des lits de tourbe blonde de même épaisseur (Duchene, 1986). Cette apparente contradiction entre nos résultats et ces observations de terrain est probablement liée à la présence, dans les tourbes brunes dont la décomposition est plus avancée, de particules fines susceptibles de colmater plus facilement les éléments filtrants supportant la tourbe. Dans nos expériences une circulation ascendante prolongée d'eau a probablement entraîné ces fines particules à travers les disques de matériau non tissé délimitant l'espace occupé par la tourbe. Si ces disques sont remplacés, dans des montages de laboratoire, par des frittes de verre, il est fréquent d'observer leur colmatage en utilisant de la tourbe brune alors que cela n'a jamais été observé avec un remplissage de tourbe blonde (Chen & Thévenot 1986).

Ces résultats montrent que la conductivité hydraulique de la tourbe brune est apparemment supérieure à celle de la tourbe blonde et que la dispersion des résultats est bien plus faible pour la tourbe brune. Les courbes tracées par Poots (1980) sont semblables à celles que nous avons obtenues. Le tableau I ci-dessous rassemble les valeurs des conductivités hydrauliques K, ou coefficients de Darcy, disponibles dans la littérature. La gamme des résultats déterminés dans ces quatre études est très étendue (10^{-4} à 3,7 cm/s). L'hétérogénéité des résultats nous semble être due à deux causes :

1. dans deux cas (Bear 1972 et Poots 1980), la nature et l'origine exacte de la tourbe ne sont pas connues : compte-tenu des différences mises en évidence dans nos essais, la variété des origines des tourbes est vraisemblablement une des causes principales de la dispersion des valeurs des conductivités hydrauliques,

2. l'utilisation de la méthode de Porchet (d'Olier 1984) ou l'étude de l'influence du débit sur les pertes de charge dans un système unidimensionnel de type colonne (Poots 1980 et ce travail) sont susceptibles de fournir des résultats sensiblement différents avec un même milieu poreux : la méthode utilisée est elle aussi très importante dans ces mesures de cinétiques hétérogènes.

Lorsque le protocole expérimental et la méthode de mesure sont identiques, c'est à dire dans le cas de Poots (1980) et de ce travail, des résultats comparables ont été obtenus : Poots a mesuré des conductivités hydrauliques K proches de 0,1 cm/s pour un débit appliqué de $1,33$ cm³/s alors que nous avons mesuré des valeurs de K comprises entre 0,12 à 0,93 cm/s pour la tourbe brune et entre 0,011 à 0,119 cm/s pour la tourbe blonde soumises à des débits compris entre 0,71 et 2,76 cm³/s.

TABLEAU I. Valeurs des conductivités hydrauliques ou coefficients de Darcy K (cmls) obtenues pour différentes tourbes.
Peat hydraulic conductivities or Darcy coefficients K (cmls)

Auteur	Bear	Poots	d'Olier	cette étude	
	(1972)	(1980)	(1984)	1 ^{er} rempl.	2 ^{ème} rempl.
Tourbe					
inconnue	10^{-4} à 10^{-2}	10^{-1}			
brune			3,7	0,88	0,14
blonde				0,093	0,011

Nous pouvons donc en conclure qu'il est difficile de comparer, avec précision, les diverses conductivités hydrauliques de la tourbe publiées à ce jour et que les résultats ne sont comparables que si la nature de la tourbe et le remplissage des colonnes sont bien identiques et surtout si le protocole expérimental est similaire. Néanmoins un ordre de grandeur a été mesuré pour K avec des tourbes eutrophes et oligotrophes disponibles commercialement et ces valeurs sont comparables avec celles précédemment publiées.

4.2. Volume de pore et dispersion hydrodynamique

Les essais ont été réalisés pour trois débits différents compris entre 0,55 et 4,16 cm³/s. L'influence du débit appliqué ne devrait pas ou peu modifier le volume de pore, mais les références bibliographiques étant quasi-inexistantes sur ce sujet nous ne pouvions négliger aucun paramètre susceptible d'interférer avec nos résultats. Les seuls résultats obtenus par Poots (1976) montrent en effet une influence très importante du débit sur la fixation d'un colorant acide.

Les figures 5 et 6 présentent les courbes de restitution en sortie des colonnes de tourbe brune et blonde après une injection en échelon de KCl 10 mM et son déplacement par l'eau du robinet. Ces résultats permettent de conclure qu'une augmentation de débit de 0,5 à 2,91 cm³/s n'influence pas la forme des courbes $C/C_0 = f(\text{volume traité } V)$. La comparaison des figures 5 et 6 montre aussi que le sens de circulation des solutions n'a apparemment qu'une faible influence sur la forme des courbes de réponse.

Ces courbes ont été analysées afin d'en déduire tout d'abord le volume de pore V_p correspondant à $C/C_0 = 0,5$. Les résultats ainsi obtenus sont regroupés dans

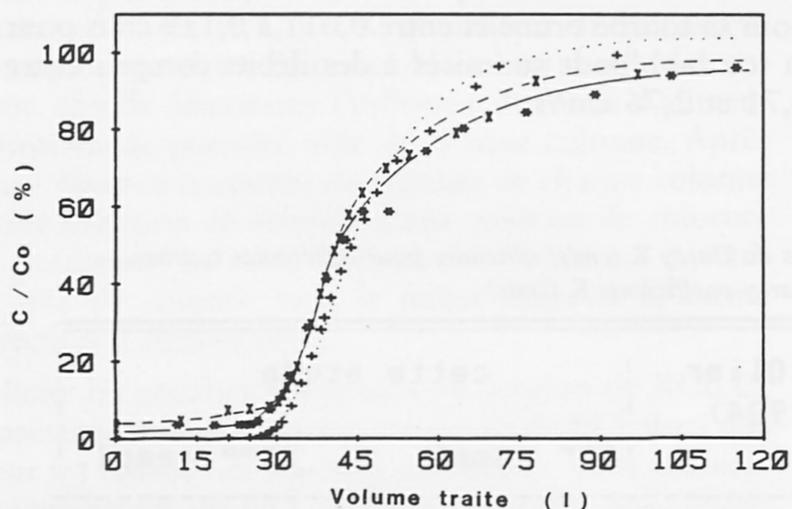


FIG. 5. Courbes de restitution à la sortie de la colonne K de tourbe blonde (flux ascendant) à une injection en échelon de KCl 10 mM circulant à un débit de 0,72 (— x —), 2,03 (... + ...) et 3,86 cm³/s (— * —).

Output concentrations at oligotrophic peat column K (ascending feed) after a plug injection of 10 mM KCl solutions at (— x —) 0.72, (... + ...) 2.03 and (— * —) 3.86 cm³/s flow rates.

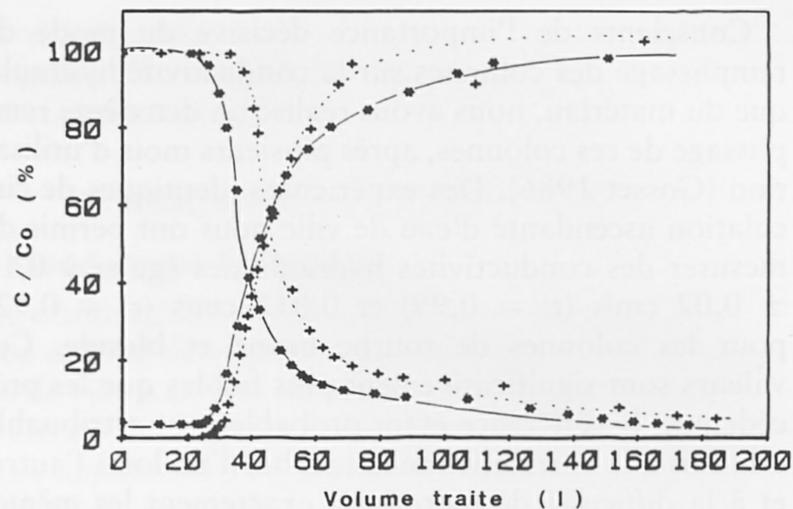


FIG. 6. Courbes de restitution à la sortie de la colonne I de tourbe blonde (flux descendant) à une injection en échelon de KCl 10 mM circulant à un débit 2,27 (... + ...) et 4,16 cm³/s (— * —) et courbe de lessivage à l'eau du robinet circulant à un débit 2,5 (... + ...) et 4,16 cm³/s (— * —).

Output concentrations at oligotrophic peat column I (descending feed) after a plug injection of 10 mM KCl solutions at 2.27 (... + ...) and (— * —) 4.16 cm³/s flow rate and subsequent flushing with tap water at (... + ...) 2.5 and (— * —) 4.16 cm³/s flow rates.

le tableau II pour les différentes conditions opératoires utilisées. Avec une alimentation ascendante, l'injection en échelon d'une solution de KCl donne un volume de pore V_p compris entre 29.200 et 34.500 cm³ pour la tourbe brune, et de 28.200 à 36.100 cm³ pour la tourbe blonde. Le volume moyen des colonnes, pour n'importe quelle tourbe, est proche de 32.000 cm³. Avec ce mode d'alimentation, la valeur de V_p obtenue avec le passage de KCl est généralement supérieure à 2.000 à 6.000 cm³ à celle déterminée lors du lessivage des colonnes à l'eau du robinet. Les pourcentages de vide ou porosités cinématiques des colonnes alimentées en flux ascendant (70 à 83 %) démontrent que ce mode de distribution de l'effluent sature plus efficacement les deux types de tourbe que l'alimentation descendante (54 à 67 %). Ce résultat n'est pas surprenant et montre que le milieu n'est probablement saturé d'eau qu'en circulation ascendante.

Outre le volume de pore V_p , l'analyse des courbes $C/C_0 = f(\text{volume traité } V)$, peut conduire à déterminer le coefficient de dispersion D si la fonction de répartition suit une loi normale (paragraphe 3.3.). Les réponses à une injection en échelon de KCl 10 mM ainsi qu'aux rinçages à l'eau du robinet sont des courbes sigmoïdales dont la partie au-delà du point d'inflexion est généralement plus étendue que celle antérieure à ce point. Cette asymétrie a donc été quantifiée à l'aide de 2 coefficients utilisés pour caractériser statistiquement les courbes présentant un maximum ou un point d'inflexion. Ces calculs conduisent pour ces 2 paramètres (coefficient d'asymétrie et coefficient d'aplatissement) à des valeurs beaucoup plus élevées au rinçage à

TABLEAU II. Volumes de pore V_p et porosités cinématiques des quatre colonnes et des deux types d'alimentation, après une injection en échelon de KCl 10 mM et lessivage à l'eau. Volume total utile : 41.600 cm³
Void volume V_p and kinematic porosity of all 4 columns and 2 flow configurations after a plug injection of 10 mM KCl and subsequent flushing with tap water. Total column volume including glass beads void volume : 41,600 cm³

Débits moyens (cm ³ / s)	Volume de pore V_p en alimentation ascendante (cm ³)							
	tourbe brune				tourbe blonde			
	colonne H		colonne J		colonne I		colonne K	
	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O
0,65 ± 0,03	34000	27300	35600	35200	40000	---	34000	31300
1,74 ± 0,21	34800	---	26000	25200	33200	28600	38000	39200
3,22 ± 0,40	34800	31300	31200	27300	30800	27900	36400	29900
Moyenne	34500	29300	30900	29200	34700	28200	36100	33500
Porosité cinémat.%	83	70	74	70	83	68	87	80
	Volume de pore V_p en alimentation descendante (cm ³)							
0,86 ± 0,23	28200	32000			30700	23400		
1,74 ± 0,21	22600	18700			26100	29400		
3,22 ± 0,40	22000	16600			26600	24000		
Moyenne	24300	22400			27800	25600		
Porosité cinémat.%	58	54			67	62		

l'eau que lors de l'injection de KCl (tableau III). Les coefficients d'assymétrie étant significativement différents de 0 lors du rinçage à l'eau, il est probable qu'une faible partie du traceur KCl interagisse avec le milieu poreux avec des réactions d'échange d'ion. Connaissant les propriétés de la tourbe vis-à-vis des cations alcalins, alcalino-terreux et métalliques (Attal *et al.* 1987, Gosset *et al.* 1986) ou des colorants (Poots *et al.* 1976, 1978), il nous a semblé impossible de trouver un traceur hydrodynamique idéal n'ayant aucune interaction avec la tourbe. Cette assymétrie plus marquée lors du rinçage à l'eau que lors du passage du traceur implique que les calculs des paramètres caractérisant la diffusion sont plus justifiés lorsqu'ils sont réalisés sur les courbes de restitution après une percolation de KCl.

Les valeurs ainsi obtenues pour D lors de la percolation de KCl à des débits compris entre 2,66 et 3,77 cm³/s sont les suivantes :

- 0,27 ± 0,043 cm²/s pour la tourbe brune en alimentation ascendante,

- 0,017 ± 0,038 cm²/s pour la tourbe blonde en alimentation ascendante,

- 0,25 cm²/s pour la tourbe brune en alimentation descendante,

- 0,10 cm²/s pour la tourbe blonde en alimentation descendante.

Connaissant D, les propriétés de la loi normale nous permettent de calculer la largeur e de la zone de mélange : e atteint des valeurs comprises entre 123 et 177 cm qui sont parfois supérieures à la longueur utile de colonne (150 cm). Ceci signifie donc que, dans ces colonnes remplies de tourbe, l'on ne vérifie pas les hypothèses d'un régime de dispersion cinématique pure (Pfannkuch 1963) et qu'il n'est plus correct d'utiliser l'équation 10 pour calculer D. Pour que cette hypothèse soit vérifiée il faudrait utiliser des colonnes de 9 à 18 m de longueur, ce qui paraît difficile à réaliser. Les valeurs précédemment calculées pour D doivent donc être considérées comme des ordres de grandeur des coefficients de dispersion des 2 types de tourbe.

TABLEAU III. Coefficients d'asymétrie, d'aplatissement et de dispersion calculés avec une seule vitesse de filtration comprise entre 0,96 et $1.38 \cdot 10^{-2}$ cmls pour les deux types d'alimentation

Assymetry and flatening coefficients and dispersion coefficient calculated for output concentration curves after plug injection of 10 mM KCl and subsequent flushing with tap water flow rates ranging between 0.96 and 1.38×10^{-2} cmls with both flow configurations

		Alimentation ascendante							
		tourbe brune				tourbe blonde			
		colonne H		colonne J		colonne I		colonne K	
		KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O	KCl	H ₂ O
nb. de points		21	16	13	14	14	13	19	21
coef. d'assymétrie		0,84	2,15	-0,1	1,7	-0,2	0,4	1,38	2,75
coef. d'applatiss.		2,52	8,50	1,74	6,93	2,2	5,58	4,26	10,1
$t_{0,16}$ (s)		8340	19680	7260	20340	8760	18000	9300	14880
$t_{0,50}$ (s)		11640	10260	12420	11280	13920	12720	11040	10080
$t_{0,84}$ (s)		19800	6540	21480	5400	18060	9000	20700	6660
u (10^{-2} cm/s)		1,26	1,25	1,06	1,05	1,05	0,95	1,38	1,28
D (cm ² /s)		0,228	0,375	0,315	0,492	0,136	0,116	0,211	0,205
$\alpha' = D/u$ (cm)		18	30	29,7	46,8	12,9	12,2	15,2	16
		Alimentation descendante							
nb. de points		21	25			18	20		
coef. d'assymétrie		1,27	2,44			1,26	4,73		
coef. d'applatiss.		4,22	8,32			3,30	33,4		
$t_{0,16}$ (s)		6000	12000			6060	9600		
$t_{0,50}$ (s)		9060	9960			8160	7560		
$t_{0,84}$ (s)		14760	2790			10260	6060		
u (10^{-2} cm/s)		1,2	1,01			1,5	1,5		
D (cm ² /s)		0,251	0,753			0,103	0,031		
$\alpha' = D/u$ (cm)		20,9	7,45			6,8	5,4		

Le calcul du coefficient de dispersion D , et de la vitesse réelle moyenne de pore u devrait nous permettre d'accéder à la valeur du coefficient de dispersion intrinsèque α' de notre milieu ou dispersivité. En alimentation ascendante, on constate que la dispersivité de la tourbe blonde est plus petite et plus homogène (13 à 15 cm) que celle de la tourbe brune (18 à 30 cm). Le type d'alimentation influence apparemment peu α' pour les deux tourbes : les dispersivités décroissent légèrement quand on passe d'une alimentation ascendante à une alimentation descendante.

5. CONCLUSION

Peu de travaux de recherche ayant été jusqu'à présent consacrés à la caractérisation hydrodynamique de ce matériau, pourtant couramment utilisé en agriculture et assainissement, c'est-à-dire la tourbe, il nous a semblé utile de mesurer la conductivité hydraulique K , la porosité cinématique et le coefficient de dispersion D de tourbes eutrophes et oligotrophes disponibles commercialement. Pour éviter les difficultés liées à la grande hétérogénéité de ce matériau lorsqu'il n'est pas soumis à un broyage et/ou tamisage préalable, nous avons construit et utilisé des pilotes préindustriels de 41,6 l de volume interne remplis de 10 à 30 kg de tourbe (poids frais). Malgré la quantité importante de tourbe utilisée et la longueur (150 cm) de ces colonnes, nous avons été confrontés à deux difficultés :

1. avec ce matériau naturel très facilement compressible et de masse volumique très variable selon les conditions de récolte et de conservation (en supposant le gisement homogène, ce que nous n'avons pu contrôler) les conditions de remplissage de colonnes ne sont pas facilement reproductibles et les conductivités hydrauliques mesurées ont significativement varié d'un remplissage à l'autre : 0,88 à 0,14 cm/s pour la tourbe brune eutrophe, 0,093 à 0,011 cm/s pour la tourbe blonde oligotrophe;

2. avec ce matériau naturel très hétérogène, la largeur des zones de mélange, lors d'utilisation de KCl comme traceur hydrodynamique, atteint parfois 177 cm et dépasse donc la longueur des colonnes; les valeurs des coefficients de dispersion D et des coefficients de dispersion intrinsèques α' sont donc probablement approximatives puisqu'il est alors abusif d'utiliser la solution approchée de l'équation de la dispersion; Klotz et Moser (1980) ont étudié le rôle de l'hétérogénéité d'un milieu poreux et l'hypothèse d'un régime de dispersion cinématique contrôlant la diffusion pour calculer un coefficient de dispersion apparent.

Ces remarques ou limitations étant prises en considération, plusieurs résultats nous semblent présenter un intérêt général pour les utilisateurs de tourbe en agriculture et surtout en assainissement industriel et urbain :

- 1) les tourbes brunes eutrophes présentent, contrairement aux observations fréquemment faites par les utilisateurs de ce matériau, des conductivités hydrauliques K significativement supérieures à celles des tourbes blondes oligotrophes (0,14-0,88 au lieu de 0,011-0,093 cm/s); ce résultat a été obtenu avec des densités de remplissage respectivement égales à 100-140 g/l de matière sèche pour la tourbe brune et 140-210 g/l de matière sèche pour la tourbe blonde, les remplissages étant réalisés avec de la tourbe brute on séchée ni tamisée; ces densités de remplissages sont légèrement plus faibles que les masses volumiques apparentes M.V.A. de ces mêmes matériaux (dans leur état de commercialisation), déterminées en utilisant la Norme A.F.N.O.R. NF U 44-176, soit 190 et 250 g/l respectivement pour la tourbe brune et blonde (Attal *et al.* 1987);

- 2) les porosités cinématiques mesurées en faisant percoler du KCl 10 mM comme traceur hydrodynamique, ne diffèrent pas significativement d'un type de tourbe à l'autre et sont comprises entre 74 et 87 % en circulation ascendante et 58 à 67 % en circulation descendante;

- 3) les coefficients de dispersion D estimés par percolation de KCl sont légèrement plus élevés pour la tourbe brune eutrophe (0,23 à 0,31 cm²/s) que pour la tourbe blonde oligotrophe (0,10 à 0,21 cm²/s) et légèrement plus élevés en alimentation ascendante que descendante; les coefficients de dispersion intrinsèques correspondant sont compris entre 7 et 30 cm;

- 4) les expériences de dispersion hydrodynamique ont mis en évidence que l'interaction entre KCl 10 mM et la tourbe reste faible et que ce réactif peut être valablement utilisé comme traceur hydrodynamique : ce problème était difficile à résoudre compte-tenu des propriétés d'adsorption, d'échange d'ions et de complexation de ce milieu.

L'ensemble des résultats obtenus lors de cette étude devrait orienter le fonctionnement et le dimensionnement hydraulique des lits et colonnes de tourbe utilisés en assainissement industriel ou urbain et conduire à des études semblables sur les sites de traitement et avec les tourbes utilisées sur ces sites.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Université Paris-Val de Marne (programmes de recherche prioritaires) et le C.R.E.A.T.E. de l'Agence Financière de Bassin Seine-

Normandie (marché 88 4021) pour l'aide financière qui nous a été spécifiquement accordée pour réaliser ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRE J.P. (1981) — Structures morphologiques des tourbes en relation avec leurs propriétés physiques, *P.H.M. Revue horticole*, **221**, 19-21.
- ATTAL A. et THEVENOT D.R. (1984) — Caractérisation physico-chimique des tourbes utilisées en station d'épuration, Etude C.R.E.A.T.E. Colombes et L.A.B.A.M., Université Paris-Val de Marne, Créteil.
- ATTAL A., GOSSET T. et THEVENOT D.R. (1987) — Caractérisation physicochimique de tourbe utilisée en épuration urbaine, *Trib. Cebedeau*, **523-524** (40), 35-45.
- BEAR J. (1972) — Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier, New York.
- CHEN X.-H. et THEVENOT D.R. (1986) — Résultats non publiés.
- COUPAL B. et LALANCETTE J.M. (1976) — The treatment of waste with peat moss. *Water Res.*, **10**, 1071-1076.
- d'OLIER Y. (1984) — L'épuration par la tourbe : tentatives d'explication des phénomènes, Mémoire E.N.I.T.R.T.S., Strasbourg et C.R.E.A.T.E., Colombes.
- DUCHENE Ph. (1986) — C.E.M.A.G.R.E.F., Paris, communication personnelle.
- FRIED J.J. and COMBARNOUS M.A. (1971) — Dispersion in porous media, *Advances in hydrosience*, Academic Press, New-York, vol. 7, 169-282.
- GIVEN P.H. (1975) — Environmental organic chemistry of bogs, marshes and swamps. *Environmental Chemistry*, **1**, 55-80.
- GOSSET T., TRANCART J.L. et THEVENOT D.R. (1984) — Preliminary report on kinetics of batch metal complexation by peat moss, communication à la Second Intern. Conference on Humic Substances, *I.H.S.S.*, p. 214-219, Brimingham (G.B.).
- GOSSET T., TRANCART J.L. and THEVENOT D.R. (1986) — Batch metal removal by peat : kinetics and thermodynamics, *Water Res.*, **20**, 21-26.
- GOSSET T. (1986) — Fixation et récupération de cations métalliques par percolation sur colonnes de tourbe. Thèse de Doctorat de l'Université Paris-Val de Marne, 128 p.
- Handbook of Chemistry and Physics (1967-1968). The Chemical Rubber Co, Cleveland, Ohio.
- HILLEL D. (1974) — L'eau et le sol, éd. Vander, Bruxelles.
- KLOTZ D. und MOSER H. (1980) — Modelluntersuchungen zur longitudinalen und transversalen hydrodynamischen Dispersion von Tracerlösungen in porösen Medien, *G.S.F., Bericht R.*, **237**, Institut für Radiohydrometrie, München (R.F.A.).
- MARTAUD M. (1983) — Etude de la contamination des eaux souterraines par des composés solubles de l'élément mercure. Diplôme de Docteur-Ingénieur, Université Louis Pasteur, Institut de Mécanique des Fluides, Strasbourg.
- MCKAY (1980) — Peat : and adsorbant/filtration medium for wastewater treatment, *Water services*, **84** (1012), 357-359.
- PFANNKUCH H.O. (1963) — Contribution à l'étude des déplacements des fluides miscibles dans un milieu poreux, *I.F.P., Annales des Combustibles Liquides*, **18** (2), 54 p.
- POOTS V.J.P., MCKAY G. et HEALY J. (1976) — The removal acid dye from effluent using natural adsorbents-1, *Water Res.* **10** (2), 1061-1066.
- POOTS V.J.P., MCKAY G. et HEALY J. (1978) — Basic dye adsorption on peat, *Scien. Proc., Roy. Dub. Soc., Series A*, **6** (6), 61-76.
- POOTS V.J.P. (1980) — Flow characteristics and parameters relating to the use of peat and wood as cheap adsorbent materials for wastewater purification, *Scien. Proc., Roy. Dub. Soc., Series A*, **6** (15), 409-440.
- PUUSTJÄRVI V. et ROBERTSON R.A. (1975) — Physical and chemical properties of peat in agriculture, Academic Press, London.
- SILVIO O.E.J. (1972) — Some experiments on purification of waste waters from slaughterhouses with sphagnum peat, *Chemistry and Physics*, **4**, 311-318.
- ZILLOX L. (1985) — Theoretical background hydrogeology and practice of groundwater protection zones. Ed. G. Mattes (D), S.S.D. Foster et A.C. Skinner (G.B.). *I.A.H.*, **6**, 87-109.