

Caractérisation hydrodynamique de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères utilisés en construction routière

D. FRANÇOIS
J. AUZIEAU
G. RAIMBAULT

Laboratoire central
des ponts et chaussées
Centre de Nantes
Route de Bouaye
BP 4129
44321 Bouguenais Cedex
denis.francois@lcpc.fr
jocelyne.auzieau@lcpc.fr
georges.raimbault@lcpc.fr

Résumé

Les propriétés hydrodynamiques des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM), bien que déterminantes pour la durabilité mécanique et l'écocompatibilité des ouvrages routiers construits avec ces matériaux, sont encore mal connues. Une étude de caractérisation de deux matériaux représentatifs des deux principaux modes de production des MIOM en France a été conduite. La perméabilité des MIOM, compactés selon les spécifications utilisées en construction routière, a été mesurée et comparée aux rares références existantes. Les courbes de rétention d'eau de ces MIOM ($s = f(w)$; $s = f(\theta)$), à deux âges, ont été établies. Elles s'apparentent à celle d'un limon. Les MIOM semblent présenter des propriétés drainantes et des teneurs en eau volumiques d'au moins 20 % dans les conditions hydriques courantes des ouvrages routiers des régions tempérées.

Mots-clés : conductivité hydraulique, construction routière, densité, mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, propriétés hydrodynamiques, limon, sable, rétention d'eau, succion, teneur en eau.

Hydrodynamic characterization of municipal solid waste incinerator bottom ashes used in road construction

Abstract

Municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash hydrodynamic properties, although decisive for the durability and the eco-compatibility of road structures built with this material, are still badly known. A characterisation study of two materials representative of the two main MSWI bottom ash production processes in France has been carried out. The permeability of MSWI bottom ash, compacted according to the specifications used in road construction, has been measured and compared to the scarce existing references. Water retention curves of these materials ($s = f(w)$; $s = f(\theta)$), at two ages, have been plotted. They resemble to a silt one. MSWI bottom ash seems to have draining properties and volume water contents of at least 20 % under common hydric conditions of road structures in temperate regions.

Key words : hydraulic conductivity, road construction, density, municipal solid waste incinerator bottom ash, hydrodynamic properties, silt, sand, water retention, suction, water content.

NDLE : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} novembre 2003

Introduction

La politique de préservation des ressources naturelles conduit à optimiser le recours aux matériaux de substitution dans le domaine de la construction routière (terrassements, chaussées). Optimiser signifie utiliser le plus largement possible ces matériaux tout en restant garant de la durabilité des ouvrages et de leur éco-compatibilité, tant à long terme qu'à court terme.

Or, les revêtements routiers ne sont pas imperméables aux eaux de pluie (Van Ganse, 1978; Raimbault et Silvestre, 1990) et l'état hydrique des matériaux de substitution placés dans les ouvrages routiers, les vitesses de percolation à travers les couches des chaussées, vont déterminer les réactions chimiques et les flux de matière à partir de ces couches. Il est donc important de connaître les caractéristiques hydrodynamiques de ces matériaux pour apprécier la signification des paramètres des essais de caractérisation environnementale (lixiviation, percolation), voire pour en développer de nouveaux, plus représentatifs des conditions réelles. Ces facteurs peuvent aussi avoir des effets sur les propriétés mécaniques des matériaux et sur leur évolution. Enfin, leur meilleure connaissance permet d'envisager la modélisation mathématique du comportement des matériaux de substitution en scénarios d'utilisation routière.

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) sont des matériaux particulièrement réactifs (Bodéan et al., 2001) dont les teneurs en métaux lourds (cadmium, cuivre, plomb, zinc, chrome, mercure, nickel) peuvent être importantes (Chandler et al., 1997) et pour partie solubilisées par les eaux d'infiltration dans les chaussées. Aussi, bien que la circulaire 94-IV-1 du ministère de l'Environnement recommande d'une façon générale de limiter les contacts des MIOM avec les eaux, la connaissance des propriétés hydrodynamiques de ces matériaux n'en est pas moins nécessaire. Or peu de données ont été rassemblées à ce jour sur ce sujet (Hartlen et Elander, 1986; Geoteknisk Institut, 1992; Radenberg, 1994). L'objectif de ce travail a été de mesurer la perméabilité de MIOM compactés en éprouvette selon des références utilisées en construction routière, et d'établir la relation succion-teneur en eau (dite courbe de rétention d'eau) de ces matériaux.

Matériel et méthodes

2.1

Origine des matériaux

Le type de bassin de production des ordures ménagères et leur mode d'incinération – les deux étant liés par la capacité d'incinération des fours d'incinération (en tonne/heure) – sont susceptibles d'avoir une influence sur les propriétés des mâchefers (Chandler et al., 1997). Aussi, deux matériaux, représentatifs des deux principaux types de production en France, ont-ils été choisis pour cette étude. Ces deux mâchefers sont valorisables selon les critères définis par la circulaire 94-IV-1 (classe V) et couramment utilisés en construction routière. Les caractéristiques réglementaires de ces deux matériaux sont présentées dans le tableau I.

Le premier matériau est représentatif des mâchefers produits en zone urbaine dans des fours à grilles de grande capacité. Il provient de l'usine d'incinération d'Ivry-sur-Seine (2 fours de 50 tonnes/heure) en région parisienne. Les mâchefers étudiés ont été produits en février 1998.

Le second matériau est représentatif des mâchefers produits en zone rurale, dans des fours oscillants, de plus faible capacité. Il provient de l'usine d'incinération des Rosiers d'Égletons (1 four de 5,3 tonnes/heure) dans le département de la Corrèze. Les mâchefers étudiés ont été produits en janvier 1998.

La maturation des stocks de mâchefers modifiant leurs propriétés physico-chimiques, pour en apprécier les effets éventuels sur les propriétés hydrodynamiques, les deux matériaux choisis ont fait l'objet d'une première caractérisation hydrodynamique après quelques mois, puis d'une seconde après un an et demi de vieillissement en tas à l'extérieur. Pour chaque phase de caractérisation les mâchefers ont été compactés dans des conditions analogues à celles pratiquées en application routière.

TABEAU I Caractéristiques réglementaires des deux mâchefers.
Regulation characteristics of bottom ashes.

Paramètres	Unité	MIOM		Seuils pour valorisation
		Ivry	Égletons	
Taux d'imbrûlés	%	0,7	0,8	< 5
Lixiviation (NF X 31-210)				
Fraction soluble	%	4,8	1,0	< 5
Mercure	mg/kg	< 0,02	< 0,017	< 0,2
Plomb	mg/kg	4,8	0,2	< 10
Cadmium	mg/kg	< 0,15	< 0,017	< 1
Arsenic	mg/kg	< 0,15	< 0,17	< 2
Chrome VI	mg/kg	0,6	< 0,086	< 1,5
Sulfates	mg/kg	7 170	2 288	< 10 000
Carbone organique total	mg/kg	900	64	< 1 500

Préparation des échantillons pour essais

Les distributions granulométriques des deux MIOM étudiés sont présentées dans la figure 1. Les courbes sont très proches. L'analyse granulométrique a été réalisée selon le protocole de la norme NF P 18-560 à l'exception de la phase de lavage. Contrairement aux granulats naturels, les mâchefers sont un mélange de composés variés (verre, métaux, imbrûlés, cendres), pour partie indépendants, mais aussi pour une part importante, faiblement liés entre eux. Le lavage des MIOM jusqu'à l'obtention d'eaux de lavage claires (comme préconisé par la norme) conduit à la désagrégation du matériau qui n'est plus alors représentatif de celui qui est mis en œuvre. Pour cette raison il a été décidé de ne pas laver les MIOM avant tamisage. Les classes « graviers » (fraction 2-20 mm), et « sables grossiers » (0,2-2 mm) (Soltner, 1981), sont semblables quantitativement (Tableau II). Pour le matériau d'Ivry, la classe « graviers » représente 67 % de la masse, la classe « sables grossiers » représente 21,7 %, et l'inférieur à 200 μm , 9,3 %. Pour le matériau d'Égletons, les valeurs sont respectivement 64 %, 25,8 % et 8,2 %. Toutefois, les courbes montrent une répartition sensiblement différente des éléments à l'intérieur de la classe des « graviers », ces derniers apparaissant plus fins dans les MIOM des Rosiers d'Égletons que dans ceux d'Ivry-sur-Seine. Dans le cadre d'une étude antérieure

(non publiée), l'absence d'évolution granulométrique des mâchefers en cours de maturation a été observée. Dans le cadre de cette étude l'analyse granulométrique des MIOM n'a donc pas été répétée sur les matériaux vieilliss.

Afin de mettre les mâchefers dans des conditions de compacité analogues à celles pouvant être recherchées sur chantier routier, ceux-ci ont été compactés suivant la norme NF P 98-230-1, au compacteur d'éprouvettes par vibrocompression (VCEC – matériel LPC) dans des moules cylindriques en PVC ($\phi = 16 \text{ cm}$; $h = 32 \text{ cm}$) fendus sur toute leur hauteur. La vibrocompression a été préférée à la compression statique, plus énergique, mais susceptible de modifier fortement la granulométrie des échantillons. L'hypothèse a été faite de considérer ces mâchefers comme utilisés en couche de fondation. Les conditions de confection suivantes ont donc été choisies pour les éprouvettes :

- teneur en eau pondérale : 2 % inférieure à la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié (norme NF P 94-078) ;
- compactage de qualité q2 : 97 % de la densité à l'optimum Proctor modifié (OPM).

Les références de compactage ont été déterminées en mai 1998. Elles sont présentées dans le tableau III. La première série d'éprouvettes a été préparée en mai 1998 (matériau jeune), la seconde en août 1999 (matériau mûr). L'homogénéité du compactage des éprouvettes a été vérifiée par auscultation de leur masse volu-

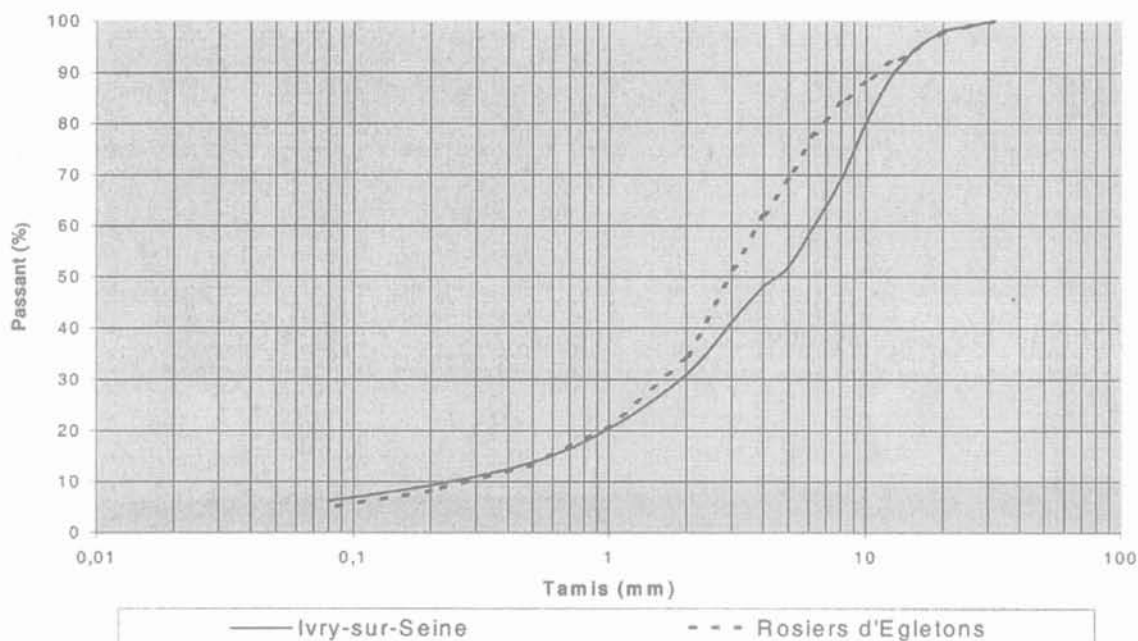


FIG. 1 Distribution granulométrique des MIOM.
MSWI bottom ash particle size distribution.

TABLEAU II Analyse granulométrique des deux mâchefers.
Particle size distribution of both bottom ashes.

Tamais	31,5	25	20	16	14	12,5	10	8	6,3	5	4	3,15	2	1	0,5	0,2	0,08
Classes	Cailloux			Graviers										Sables g.			
Ivry Passant (%)	100	99	98	95	92	89	80	69	60	52	48	42	31	20,4	13,8	9,3	6,2
Égletons Passant (%)	100	99	98	95	93	92	88	84	78	69	62	52	34	21	13,3	8,2	4,9

TABEAU III Références de compactage (OPM) des deux mâchefers.
Compaction references (MPO) of both bottom ashes.

Matériau	Densité sèche	Teneur en eau – W_{OPM} (%)
Ivry	1,79	12,5
Égletons	1,62	19,0

mique au banc gamma vertical (GVL – matériel LPC). En effet, pour pouvoir comparer les perméabilités aux deux âges, pour un matériau donné, le respect d'une densité constante entre les éprouvettes confectionnées au jeune âge et après vieillissement, était requis. Cette exigence a bien été respectée : les densités sèches, contrôlées au banc gamma, diffèrent de moins de 2 % entre les éprouvettes d'un même matériau. Les valeurs mesurées aux deux âges pour les deux mâchefers sont données dans le tableau IV. On constate que les densités obtenues sont plus proches de 90 % de l'OPM que de 97 %. Cet écart est dû aux difficultés de compactage des mâchefers en vibrocompression. Toutefois il n'empêche pas les comparaisons entre éprouvettes. A titre de comparaison, les taux de compactage mesurés sur des mâchefers extraits de deux chaussées anciennes en France étaient d'environ 90 et 97 % (François *et al.*, 2000). Afin de limiter leur évolution physico-chimique avant essai, les éprouvettes ont été conservées à 4 °C.

TABEAU IV Densité sèche réelle des éprouvettes.
Samples actual dry density.

Matériau	Ivry		Égletons	
	jeune	mûri	jeune	mûri
Age (mois)	6	19	9	18
Densité sèche réelle	1,61	1,64	1,45	1,43

2.3

Détermination de la perméabilité

La perméabilité (ou conductivité hydraulique à saturation, k_s) exprime le rapport entre la vitesse de filtration – ou débit unitaire – (en m/s) et le gradient hydraulique. C'est un paramètre fondamental pour déterminer les scénarios d'utilisation des matériaux. Dans certains pays, il est pris en compte dans le dimensionnement des chaussées, par exemple en Autriche pour assurer la drainabilité des couches de base non liées (FVS, 1997).

Des essais préliminaires ont montré des chemine-ments préférentiels le long des parois des moules en PVC. La fente longitudinale des moules permet d'en extraire les éprouvettes pour enduire l'intérieur des moules de paraffine. Les éprouvettes peuvent ensuite être replacées dans les moules, la paraffine prévenant les écoulements préférentiels. Un joint en silicone est réalisé à la base des moules pour assurer l'étanchéité avec l'embase (Fig. 2).

Lors de la saturation en eau de l'éprouvette, pour permettre l'évacuation de l'air contenu dans les pores du matériau, l'échantillon est saturé lentement de bas en haut (en 3 jours). Ensuite, une charge hydraulique constante (10 cm) lui est appliquée et le débit de sortie en bas d'éprouvette est mesuré.

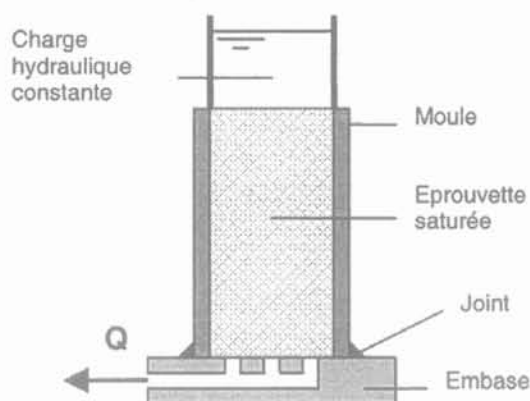


FIG. 2 Dispositif de mesure de la perméabilité.
Permeability measurement device.

Les perméabilités mesurées seront comparées aux références existant pour les mâchefers (perméabilités mesurées en laboratoire), et à des ordres de grandeur pour des sols naturels (Bonneau et Souchier, 1979 ; Soltner, 1981 ; Hillel, 1988).

2.4

Détermination des courbes de rétention d'eau

L'état hydrique d'un matériau peut être défini par sa teneur en eau pondérale (w) ou volumique (θ) et par son potentiel matriciel (ψ_m). La valeur absolue de ce dernier, exprimée en hauteur d'eau, est égale à la succion (s) de l'eau interstitielle ($\psi_m = -s$). La succion, équivalente à une pression négative, se mesure en kPa. Pour un matériau donné, cette succion augmente lorsque le matériau se dessèche. Pour un matériau donné, à compacité donnée, succion et teneur en eau sont reliées par une courbe dite de rétention d'eau. On passe de w à θ grâce à la densité sèche du matériau ($\theta = \gamma_d \times w$).

La relation s/θ (ou s/w) présente un phénomène d'hystérésis, la courbe de drainage (D) d'un matériau donné étant différente de sa courbe d'humidification (H). Ce phénomène d'hystérésis peut être expliqué par l'effet dit « de la bouteille d'encre » (Hillel, 1988) : le potentiel de vidange (ψ_D) d'un pore est inversement proportionnel au diamètre d'entrée (r) de ce pore ; son potentiel de réhydratation (ψ_H) dépend du diamètre (R) du pore ($\psi_H = f(1/R)$). A une teneur en eau donnée, la succion correspondante de la courbe de drainage est supérieure à celle de la courbe d'humidification. Le phénomène d'hystérésis est plus prononcé dans les matériaux à structure grossière ($r \ll R$).

La détermination de la courbe de rétention nécessite la découpe de l'éprouvette et de son moule PVC en tranches de 3 cm. Les tranches sont découpées à sec sur des éprouvettes préalablement saturées, selon la technique indiquée plus haut, et congelées. La congélation sert à prévenir la détérioration du matériau pendant la découpe et permet d'obtenir des surfaces de tranche suffisamment lisses pour assurer un bon contact entre le matériau et les plaques de céramique poreuse de la chambre de pression (Fig. 3). On réalise une congélation rapide des éprouvettes pour empêcher la formation de gros cristaux de glace risquant de détruire le matériau.

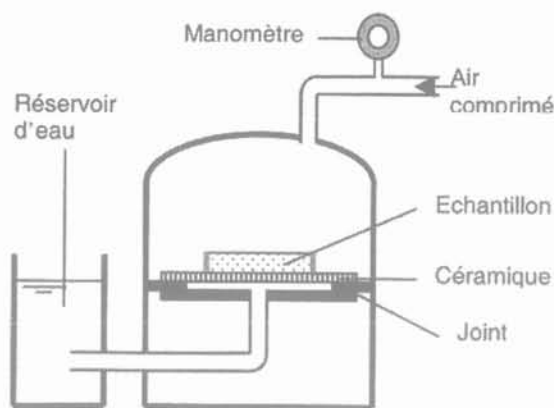


FIG. 3 Principe de l'essai en chambre de pression.
Pressure chamber test principle.

Dans la chambre de pression, les tranches revenues à température ambiante, sont placées sur une plaque en céramique perméable à l'eau et imperméable à l'air (pression d'entrée d'air = 300 kPa). On applique une pression d'air dans la chambre, avec laquelle la teneur en eau du matériau se met à l'équilibre. La pression maximale appliquée, de 100 kPa, couvre largement la gamme des pressions généralement rencontrées dans les corps de chaussées en région tempérée (Silvestre, 1986 ; Raimbault, 1986). Pour une pression donnée, lorsque la teneur en eau atteint un équilibre, la pression imposée est égale en valeur absolue à la succion du matériau à cette teneur en eau. Pour chaque pression appliquée dans la chambre, la teneur en eau d'équilibre atteinte par l'échantillon est mesurée.

A partir d'échantillons saturés, on réalise dans un premier temps la courbe de drainage en appliquant des pressions croissantes, et dans un second temps la courbe d'humidification avec des pressions décroissantes.

A chaque palier de pression, le temps d'atteinte de l'équilibre est de deux jours et demi. La chambre peut recevoir deux échantillons à la fois. Chaque point des courbes (une douzaine par courbe) est la moyenne de quatre mesures.

Les courbes de rétention mesurées seront comparées à celles de matériaux naturels (sable et limon).

3

Résultats et interprétation

Pour les mâchefers d'Ivry-sur-Seine, la première phase d'essai a été conduite en août 1998 (matériau jeune), la seconde en septembre 1999 (matériau mûri).

TABLEAU VII Références de perméabilité.
Permeability references.

Références		k_s (m/s)
Sols naturels	Sol sableux (Hillel, 1988)	$10^{-5} - 10^{-4}$
	Sol limoneux (Bonneau et Souchier, 1979)	$10^{-6} - 10^{-5}$
	Sol argileux (Hillel, 1988)	$10^{-9} - 10^{-6}$
MIOM	Allemagne (Radenberg, 1994)	1,8 à $4,9 \cdot 10^{-7}$ *
	Danemark (Geoteknisk Institut, 1992)	3,5 à $4,5 \cdot 10^{-6}$
	Suède (Hartlen et Elander, 1986)	$2 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-5} **

* Pour des masses volumiques sèches de 1,60 à 1,71 g/cm³.

** Mesuré à la densité maximale (Hartlen et Elander, 1986).

Pour les mâchefers des Rosiers d'Égletons, ces deux phases ont eu lieu respectivement en octobre 1998 et juillet 1999.

3.1

Perméabilité

La perméabilité des éprouvettes de MIOM étudiées va de $1,8 \cdot 10^{-5}$ à $3,3 \cdot 10^{-4}$ m/s (Tableau V). Il n'y a pas de différence notable entre les perméabilités des deux mâchefers. La perméabilité ne semble pas non plus varier significativement avec le mûrissement des matériaux. La perméabilité du mâchefer d'Ivry mûri est légèrement plus forte. A l'observation des éprouvettes, il semblerait que la teneur en morceaux de verre grossiers de ce matériau, plus importante que dans l'éprouvette de matériau jeune, puisse en être la cause.

TABLEAU V Perméabilité des mâchefers.
Bottom ash permeability.

Matériau	k_s (m/s)	Écart-type (m/s)
Ivry jeune	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$0,16 \cdot 10^{-5}$
Ivry mûri	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$
Égletons jeune	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$0,66 \cdot 10^{-5}$
Égletons mûri	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$0,09 \cdot 10^{-5}$

Ces résultats peuvent être comparés à différentes références. D'après ces valeurs, les mâchefers s'apparentent à des sols « assez perméables » à « perméables » (Tableau VI) et à des sols naturels sableux (Tableau VII).

Les résultats obtenus sont comparables à ceux donnés par l'institut géotechnique danois (Geoteknisk Institut, 1992) car une différence d'un seul ordre de grandeur peut être considérée comme minime lorsqu'on prend en compte le faible taux de compactage (90 %).

TABLEAU VI Échelles de perméabilité
(d'après Soltner, 1981).
Permeability scale (from Soltner, 1981).

Sols	k_s (m/s)
Imperméables	10^{-7}
Peu perméables	10^{-6}
Assez perméables	10^{-5}
Perméables	10^{-4}
Très perméables	10^{-3}

des échantillons étudiés. Un léger accroissement du taux de compactage peut avoir un effet important sur la perméabilité (Croney *et al.*, 1958).

3.2

Courbes de rétention d'eau

3.2.1

Rétention en fonction de la teneur en eau pondérale (w)

Les courbes de rétention (D et H) des deux mâchefers, aux deux âges (jeune – J ; mûri – M), ainsi que les courbes de rétention d'un sable et d'un limon sont présentées dans la figure 4.

Ces courbes montrent que les propriétés des MIOM se rapprochent plus de celles du limon que du sable, en particulier dans le cas du matériau des Rosiers d'Égletons.

Le tracé révèle aussi que pour les deux mâchefers, avec le vieillissement, les courbes de rétention se déplacent vers des teneurs en eau plus fortes. Pour une succion donnée, la teneur en eau est ainsi de 1 à 3 % supérieure pour le matériau mûri dans la zone des fortes succions (partie verticale des courbes), mais la différence est bien supérieure aux faibles succions, lorsqu'on se trouve plus proche de la saturation. Avec le vieillissement, les MIOM semblent retenir davantage l'eau. Les MIOM ne subissant pas d'évolution granulométrique entre deux âges (cf. préparation des échantillons), ceci peut donc être imputable à leur évolution physico-chimique. Par contre, la forme générale des courbes de succion ne semble pas évoluer.

Le matériau d'Ivry-sur-Seine, qui est le plus dense des deux et celui qui, à pression donnée, retient le moins d'eau, est celui qui présente la plus faible évolution entre les deux âges.

Le glissement de la courbe des mâchefers des Rosiers d'Égletons mûris est tel, que le matériau apparaît plus hydrophile que le limon.

La teneur en eau à l'optimum Proctor Modifié (w_{OPM}) a été mesurée pour confectionner les éprouvettes (Tableau III). Pour le matériau d'Ivry-sur-Seine, cette

teneur en eau ($w_{OPM} = 12,5\%$) se situe en limite inférieure des teneurs en eau mesurées sur ce matériau durant les essais de succion, c'est-à-dire qu'elle correspond aux fortes forces de succion (Fig. 4). Au contraire, pour le matériau des Rosiers d'Égletons, cette teneur en eau ($w_{OPM} = 19,0\%$) est proche du centre de la gamme des teneurs en eau mesurées sur ce matériau (15 à 26 %) et correspond à des tensions inférieures à 15 kPa (150 cm d'eau).

Ce genre de considérations peut avoir des conséquences sur le comportement à court terme des MIOM après leur mise en œuvre. Les matériaux sont généralement mis en œuvre à une teneur en eau de $w_{OPM} - 2\%$. S'il est mis en œuvre à une teneur en eau correspondant à une tension interstitielle élevée par rapport à son environnement proche (sol sous-jacent, autres couches de la chaussée), le matériau va avoir tendance à équilibrer son potentiel avec son environnement, donc à augmenter sa teneur en eau. Ceci se fera à partir des couches environnantes ou grâce à l'infiltration à l'occasion des premiers événements pluvieux. Or les propriétés de portance des MIOM sont très sensibles aux variations de teneur en eau (François *et al.*, 2000). Après leur mise en œuvre, la portance des couches de MIOM pourrait donc varier à court terme sous l'effet de ce rééquilibrage des potentiels hydriques.

3.2.2

Rétention en fonction de la teneur en eau volumique (θ)

La densité sèche des deux mâchefers étant connue (Tableau IV), les courbes de rétention en fonction de la teneur en eau volumique peuvent en être déduites (Fig. 5).

La représentation des courbes de rétention en fonction de la teneur en eau volumique confirme le rapprochement entre les MIOM et le limon. Elle aboutit à une moins grande dispersion des caractéristiques que l'expression précédente. Le rapprochement des courbes est tel que les caractéristiques des matériaux « Ivry mûri » et « Égletons jeune » sont similaires.

Pour les deux matériaux on observe encore le déplacement des courbes avec le vieillissement (1 à 3 % aux fortes succions, et plus aux pressions faibles).

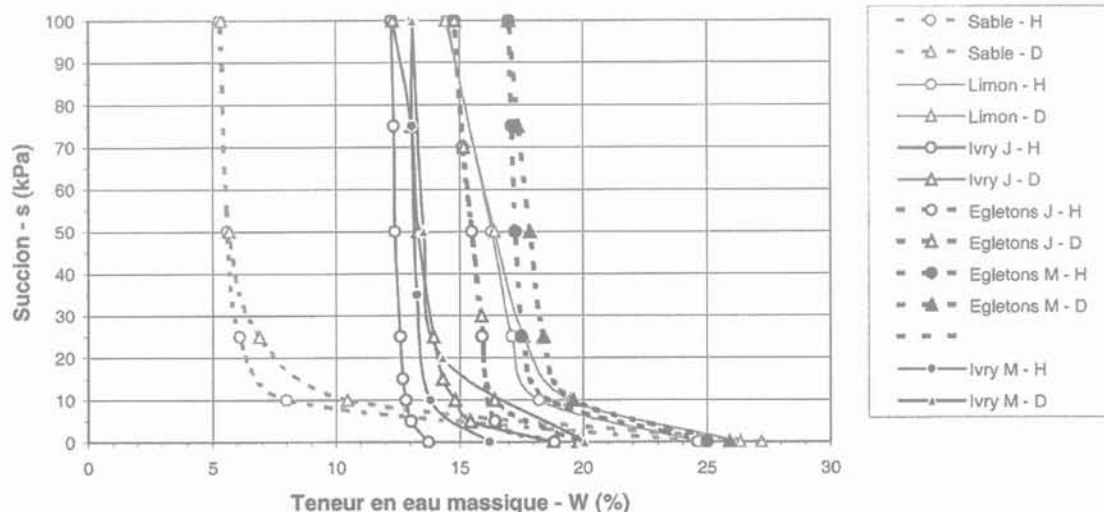


FIG. 4 Courbes de rétention selon la teneur en eau pondérale.
Retention curves as a function of the weight water content.

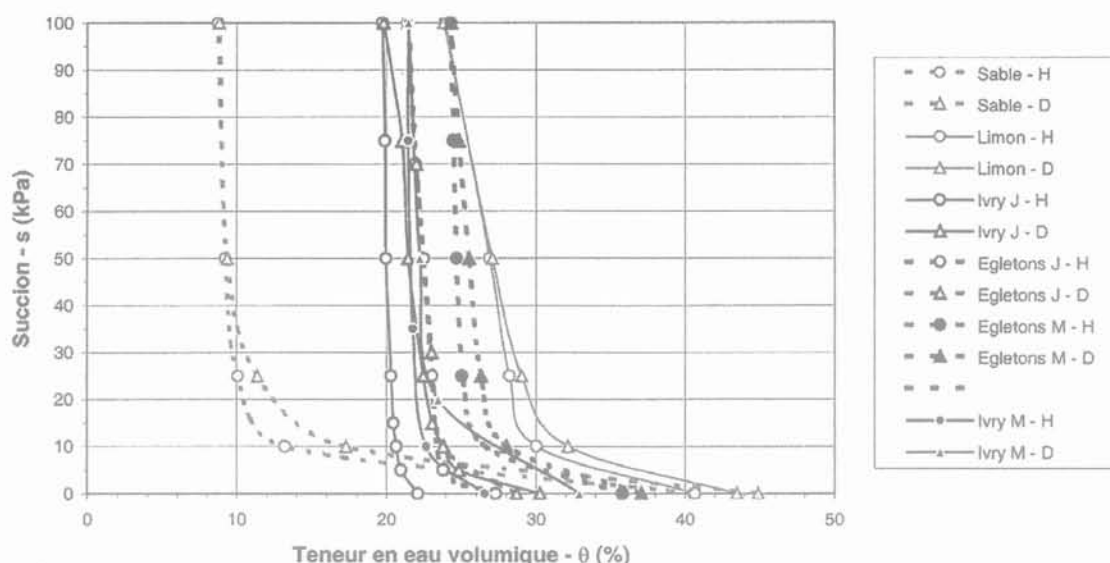


FIG. 5 Courbes de rétention selon la teneur en eau volumique.
Retention curves as a function of the volume water content.

La densité sèche réelle de chaque matériau est connue (Tableau IV), ainsi que la teneur en eau à l'OPM des matériaux « Ivry jeune » et « Éggletons jeune » (Tableau III). Si l'on calcule la teneur en eau volumique de ces derniers matériaux à l'OPM (θ_{OPM}), on peut observer sa situation par rapport à leurs courbes de succion. Pour « Ivry jeune », θ_{OPM} vaut 20 % ($12,5 \% \times 1,61$), ce qui correspond aux fortes succions et faibles teneurs en eau du matériau. Pour « Éggletons jeune », θ_{OPM} vaut 27,5 % ($19,0 \% \times 1,45$), ce qui correspond à des pressions plus faibles, inférieures à 15 kPa.

La teneur en eau résiduelle (notée θ_r) est la teneur en eau du matériau en dessous de laquelle il est difficile de descendre. On peut l'évaluer en soumettant le matériau à une pression de 1 600 kPa ($pF = 4,2$) (Soltner, 1981 ; Bädger, 2000). Le dispositif utilisé dans cette étude ne permettait pas d'atteindre une telle pression. Toutefois, la forte pente des courbes de succion, dès 30 kPa (300 cm d'eau), permet d'exprimer une valeur tendant vers la teneur en eau résiduelle, que l'on appellera teneur en eau « difficilement échangeable » (θ_{100}). Cette approximation se justifie aussi par le fait que hors conditions extrêmes (périodes de gel, périodes très sèches ou zones arides), les forces de succion dans un corps de chaussée restent dans la gamme de pression appliquée ici (Silvestre, 1986 ; Raimbault, 1986). Les teneurs en eau de saturation (θ_s) des différents matériaux ainsi que θ_{100} sont présentées dans le tableau VIII.

TABLEAU VIII Teneur en eau résiduelle et en eau « difficilement échangeable » des mâchefers.
Bottom ash residual water content and « hard to exchange » water content.

Matériau	θ_s (%)	θ_{100} (%)
Ivry jeune	30	20
Ivry mûri	29	21
Éggletons jeune	33	21
Éggletons-mûri	37	24

On voit que les teneurs en eau des MIOM peuvent atteindre le tiers de leur volume. Les teneurs en eau « difficilement échangeable » des MIOM sont d'environ 20 %.

La teneur en eau résiduelle dépend de la granulométrie des matériaux (Hillel, 1988) et de leur densité sèche. Plus un matériau est fin, plus sa teneur en eau résiduelle sera grande. Plus un matériau sera compacté, plus sa teneur en eau résiduelle sera grande (Croney *et al.*, 1958). Les deux mâchefers étudiés avaient des distributions granulométriques proches (Fig. 1). Leurs taux de compactage étaient voisins.

Grâce aux mesures de teneur en eau pondérale et de masse volumique sèche, réalisées en place sur des MIOM extraits de deux chaussées (François *et al.*, 2000), leurs teneurs en eau volumiques réelles ont pu être estimées. Elles vont de 14,8 à 20,4 % dans un cas, et de 24,2 à 27,6 % dans l'autre. Dans le premier cas le MIOM avait un taux de compactage de 90 %, dans le second de 97 %. Le premier matériau s'apparentait à une grave non traitée 0/31,5 mm, le second à une GNT 0/20 mm (AFNOR, 1995). Selon les caractéristiques des MIOM et leurs conditions de mise en œuvre, leurs teneurs en eau pourront donc fortement varier.

4

Conclusion

Cette étude visait à compléter le peu d'éléments rassemblés jusqu'à ce jour sur les caractéristiques hydrodynamiques des mâchefers, ces dernières étant déterminantes pour la durabilité physique et l'éco-compatibilité des ouvrages routiers.

Les coefficients de perméabilité mesurés sur les mâchefers étudiés correspondent à un sol naturel sableux. Les MIOM, compactés selon des références rencontrées dans des cas réels, apparaissent comme « assez perméables » à « perméables ». Par ailleurs, ces mêmes matériaux présentent des courbes de rétention d'eau s'approchant beaucoup plus de celle d'un limon que de celle d'un sable. La courbe de rétention des

mâchefers des Rosiers d'Égletons est la plus proche de celle du limon. Ils diffèrent des MIOM d'Ivry par une fraction « graviers » moins grossière. La compréhension de l'influence de la granulométrie des mâchefers sur leurs propriétés hydrodynamiques est à approfondir, de même que celle de leur taux de compactage. Des essais identiques, sur des MIOM compactés à des taux supérieurs, plus proches de l'optimum Proctor, seraient nécessaires.

Néanmoins, les mâchefers compactés apparaissent comme des matériaux aux propriétés drainantes au travers desquels l'eau peut s'infiltrer assez facilement. En outre, il semblerait qu'aux faibles tensions interstitielles généralement rencontrées dans les corps de chaussées (moins de 10 kPa de succion), ils puissent renfermer une relativement forte teneur en eau (plus de 20 % en volume).

Les deux mâchefers étudiés montrent une tendance à retenir davantage d'eau en vieillissant. Le glissement de la courbe de rétention d'eau vers des teneurs en eau plus forte a été observé pour les deux matériaux. L'explication de ce phénomène est peut-être à rechercher dans l'évolution physico-chimique des mâchefers.

Cette évolution, notamment minéralogique, pouvant se poursuivre à l'intérieur même des structures routières, et les particules les plus fines pouvant être amenées à migrer sous l'effet de l'infiltration, une évolution des propriétés hydrodynamiques des MIOM en place pourrait s'ensuivre. Afin de mieux représenter les conditions de succion susceptibles d'apparaître dans les ouvrages routiers en région tempérée, des études complémentaires seraient nécessaires, plus spécifiquement dans une gamme de succion inférieure à 10 kPa (1 m d'eau). Pour l'appréciation des effets du gel, des succions de plusieurs mètres seraient nécessaires. Par rapport à ce risque particulier, les bonnes propriétés drainantes des MIOM apparaissent intéressantes.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été cofinancée par la Commission européenne (DG VII) dans le cadre du projet Alt-Mat (programme Transport). Les auteurs remercient le conseil général de la Corrèze et la société Ypréma pour leur collaboration.

Bibliographie

- Bädger N. – « Zum Einfluss der Porositätsmerkmale von Stadt und Industrieböden auf die Stoffkonzentration von Sickerwasser – dargestellt am Beispiel von bauschutt-, aschen-, schlacken- und schlammhaltigen Böden ». *Essener Ökologische Schriften*, Band 14, Westarp Wissenschaften, 2000.
- Bodénan F., Piantone P., Chatelet-Snidaro L. – « Phases minérales de basse température et processus de maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ». *Colloque MIOM 2001*, Orléans, 2001, p. 139-145.
- Bonneau M., Souchier B. – *Pédologie*. Vol. 2 « Constituants et propriétés du sol », Masson, 1979.
- Chandler A.J., Eighmy T.T., Hartlen J., Hjelm O., Kosson D.S., Sawell S.E., Van der Sloot H.A., Vehlouw J. – « Municipal solid waste incinerator residues ». The International Working Group (IAWG), *Studies in Environmental Science*, 67, Elsevier, 1997.
- Croney D., Coleman J.D., Black W.P.M. – « Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance ». Symposium Water and its conduction in soils. *Highway Research Board Special Report*, 40, 1958, p. 226-252.
- François D., Legret M., Demare D., Fraquet P., Berga P. – « Comportement mécanique et environnemental de deux chaussées anciennes réalisées avec des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 227, 2000, p. 15-30.
- FVS – RVS 8S.05.11, *Technische Vertragsbedingungen, Oberbauarbeiten (ohne Deckenarbeiten), Tragschichten*. Ungebundene Tragschichten, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, 1997.
- Geoteknisk Institut. – *Laboratorieundersøgelse, Hvidovre Avedøreværket*. Sag 160 04776, Rapport 1, 1992.
- Hartlen J., Elander P. – *Restprodukter från avfallsförbränning, Kemiska och fysikaliska egenskaper*. Swedish Geotechnical Institute, SGI Varia 172, 1986.
- Hillel D. – *L'eau et le sol, Principes et processus physiques*. Academia, 1988.
- Radenberg M. – *Entwicklung und gegebenenfalls Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften von MV-Asche*. Schriftenreihe des Institutes für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, 1994.
- Raimbault G. – « Cycles annuels d'humidité dans une chaussée souple et son support ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 145, 1986, p. 79-84.
- Raimbault G., Silvestre P. – « Analyse des variations de l'état hydrique dans les chaussées ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 167, 1990, p. 77-84.
- Silvestre P. – « Drainage routier, rôle de l'environnement hydrique ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 145, 1986, p. 69-78.
- Soltner D. – *Les bases de la production végétale*. Tome 1 « Le sol », Sciences et techniques agricoles, 1981.
- Van Ganse R. – « Les infiltrations dans les chaussées : évaluations prévisionnelles ». *Symposium on road drainage*, Berne, 1978, p. 175-192.