

# Comportement mécanique et environnemental de deux chaussées anciennes réalisées avec des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

**Denis FRANÇOIS**  
Chargé de recherche  
Section Pollution des eaux  
Division Eau

**Michel LEGRET**  
Directeur de recherche  
Chef de la section Pollution des eaux  
Division Eau

**Dominique DEMARE**  
Technicien supérieur  
Section Pollution des eaux  
Division Eau  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées  
Centre de Nantes

**Pierre FRAQUET**  
Chargé d'études Géologie-Terrassements  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

**Pierre BERGA**  
Chargé d'études Hydrologie urbaine  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux

## RÉSUMÉ

L'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) en construction routière est devenue une question importante dans la politique des déchets comme dans celle des granulats en France. Cependant des interrogations demeurent quant aux propriétés réelles des MIOM, notamment à long terme. L'utilisation des MIOM en construction routière n'est réglementée en France que depuis 1994 mais ils ont été utilisés bien avant cette date. L'inspection d'ouvrages anciens est une façon d'aborder l'étude du comportement à long terme des MIOM. Deux sites de plus de vingt ans ont été sélectionnés et un protocole de conduite d'inspection de chaussées a été défini afin de caractériser l'état actuel des matériaux et leurs propriétés mécaniques et environnementales. Les deux matériaux étudiés montrent un comportement mécanique très satisfaisant mais révèlent aussi leur hétérogénéité et leur grande sensibilité aux variations de teneur en eau. Les sols sous-jacents aux chaussées ne sont pas pollués par les MIOM. L'influence des MIOM sur le sol au contact immédiat se manifeste par l'accroissement de l'alcalinité et de la conductivité électrique (du fait des sulfates essentiellement). La faible alcalinité des MIOM anciens limite fortement la mobilité des métaux lourds qu'ils contiennent.

**MOTS CLÉS :** 15-52-61-35 - Pollution - Résidu industriel - Sol de fondation - Eau - Analyse chimique - Ménages - Combustion - Comportement - Mécanique - Long terme - Contrôle - Chaussées (corps de).

## Contexte et objectifs de l'étude

Le contexte réglementaire de la gestion des déchets en France fait de l'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) en construction routière une question importante aujourd'hui. Cependant, diverses interrogations demeurent, relatives tant aux propriétés mécaniques de ces matériaux dans les structures routières qu'à leurs effets sur l'environnement.

L'utilisation des MIOM en construction routière n'est réglementée en France que depuis 1994 (circulaire 94-IV-1 du ministère de l'Environnement). Depuis cette date, quelques ouvrages expérimentaux ont été réalisés afin de suivre leur comportement en place, mais ils sont trop récents pour permettre d'apprécier le comportement à long terme des MIOM (Silvestre et Rampignon, 1995 ; Marchal, 1995). Les extrapolations qu'ils permettent ne sont pas suffisantes à elles seules pour donner des garanties sur le comportement futur, ou pour préconiser des conditions d'emploi pour des MIOM de diverses origines.

Or, dans des régions où l'approvisionnement en granulats naturels et la saturation des décharges ont pu engendrer des difficultés depuis plusieurs années (ou parfois dans des circonstances plus occasionnelles), les MIOM ont pu être utilisés en construction routière bien avant 1994 (ADEME, 1993). L'observation

de l'état d'ouvrages anciens peut alors être précieuse pour comprendre l'évolution en place de ce matériau. L'inspection de chaussées en service depuis plusieurs années est une voie d'étude du comportement à long terme des MIOM, complémentaire de l'approche expérimentale en laboratoire, en lysimètre ou sur site pilote.

Dans l'état actuel des connaissances, l'objectif d'une telle étude a des limites qu'il faut garder à l'esprit. Il est d'établir une première référence sur l'état dans lequel les MIOM peuvent se trouver, ainsi que leur proche environnement, après plusieurs années de service dans des structures routières. Il ne s'agit pas d'essayer de reconstituer leur évolution car cela supposerait de connaître leur état initial. Or, par le passé, la caractérisation initiale des MIOM n'était pas obligatoire.

Avant 1991 (arrêté ministériel du 25 janvier 1991), les cendres volantes n'étaient pas séparées des mâchefers et ces matériaux étaient mis en œuvre sans préparation ni prescription technique particulière. En termes de comportement environnemental et mécanique, les conditions d'utilisation des matériaux anciens peuvent donc être considérées comme pénalisantes par rapport aux dispositions prises aujourd'hui (SETRA, 1997). Grâce aux inspections de chaussées anciennes, nous pouvons observer, en conditions réelles, ce que peuvent être les performances mécaniques et l'impact environnemental à long terme des MIOM, avec des conditions initiales *a priori* défavorables.

La nature différente des matériaux utilisés il y a vingt ans par rapport à ceux produits aujourd'hui ne doit pas être considérée comme une limite aux conclusions de cette étude. Les méthodes de collecte sélective des ordures ménagères et les méthodes d'incinération évoluent constamment, les matériaux qui seront produits dans dix ans seront certainement différents de ceux étudiés aujourd'hui. Il faut intégrer cette évolution de l'objet d'étude dans la méthode de recherche sur les MIOM.

## Les sites d'étude

Comme ils n'étaient pas considérés comme des matériaux fondamentalement différents des autres et parce qu'il n'y avait pas d'obligation de déclaration à leur utilisation, les expériences passées d'utilisation de MIOM en construction routière sont restées méconnues. Cette étude a donc commencé par une enquête auprès des collectivités locales et des usines d'incinération afin de retrouver des traces d'utilisation ancienne des MIOM en construction routière. Différents critères ont servi à sélectionner les sites d'inspection.

➤ Les mâchefers d'incinération des ordures ménagères sont un mélange de matériaux conduisant à des réactions chimiques qui peuvent leur conférer des propriétés physiques et chimiques variables. Notre objectif étant de comprendre le comportement du matériau lui-même, nous avons exclu les structures faites de mâchefers mélangés à des liants. Nous savons par ailleurs que par le passé la préparation des mâchefers avant utilisation était très sommaire.

➤ Afin d'observer l'état des MIOM là où ils subissent les plus importantes contraintes mécaniques, le choix concernant le type de structure s'est orienté vers les chaussées et les parkings (couche de forme ou de fondation) plutôt que les remblais. Une utilisation significative de l'ouvrage était aussi un critère de sélection, comme l'absence de géomembrane entre la structure routière et le sol sous-jacent, un des objectifs de l'étude étant d'observer l'impact sur ce dernier.

➤ La préférence dans le choix des sites s'est tournée vers les plus anciens possibles afin de bénéficier de la plus longue période possible de vieillissement en place. Cette remontée dans le passé a été limitée par la disparition de la mémoire des conditions de réalisation des chantiers, mais aussi de l'existence même des ouvrages, car peu de traces écrites ont été gardées de ces constructions anciennes.

➤ Toute la partie ouest de la France a été prospectée pour retrouver des ouvrages (Bretagne, Pays-de-Loire, Poitou-Charentes, Aquitaine). Le contexte climatique de cette zone se caractérise par des précipitations relativement abondantes régulièrement réparties sur l'année. Les données météorologiques, comme la durée des pluies, sont des caractéristiques importantes à prendre en compte car elles conditionnent l'état hydrique des chaussées (Raimbault et Silvestre, 1990) et l'on connaît grâce aux chantiers la sensibilité à l'eau des MIOM.

Deux sites ont été retenus. Le premier se trouve à La Teste (Gironde) sur le bassin d'Arcachon, le second sur la commune du Mans (Sarthe).

Le premier site est la voie d'accès à l'usine d'incinération du District Sud Bassin (fig. 1). Les mâchefers y ont été mis en œuvre en couche de fondation en 1976 en tant que grave non traitée (GNT). La chaussée forme un anneau de 320 m de long et de 7 m de large. Elle est utilisée par trente à quarante poids lourds chaque jour. Le secteur est plat. Le sol naturel est constitué de sable. D'après les documents de construction, la couche de MIOM était supposée de 40 cm d'épaisseur. La structure avait été revêtue d'une couche de béton bitumineux en 1995. L'inspection de la chaussée a été réalisée en avril 1998.



Fig. 1 - Vue de l'usine d'incinération de La Teste et de la chaussée inspectée.

Le second site est une chaussée urbaine (fig. 2). Les mâchefers ont été utilisés en couche de fondation en 1978 en tant que GNT. La route présente un profil longitudinal concave (pendant la construction, l'eau était abondante dans la partie basse). La chaussée, gérée par la Communauté Urbaine du Mans, mesure 430 m de long et 10 m de large. Elle supporte un trafic de 12 000 véhicules par jour et une ligne d'autobus. Le transit de poids lourds est interdit dans ce secteur. Le sol naturel est limoneux. La couche de MIOM était supposée d'environ 30 cm d'épaisseur. La chaussée a reçu une couche d'enrobé bitumineux en 1997. L'inspection a eu lieu en mai 1998.



Fig. 2 - Vue de la chaussée inspectée du Mans.

## Inspection

### La méthode d'inspection

L'inspection du site commence par une appréciation visuelle de l'état de surface de la chaussée afin d'identifier d'éventuelles dégradations révélatrices de désordres plus profonds (LCPC, 1997a). Ensuite, une mesure de la déflexion sur toute la chaussée est réalisée (LCPC, 1997b ; AFNOR, 1995). Elle permet de mesurer la performance globale de la structure. Révélant d'éventuelles singularités dans le corps de la chaussée, elle aide aussi à choisir les emplacements des tranchées d'inspection interne.

L'inspection interne commence par la réalisation d'une tranchée dans la chaussée (dimensions au sol : 1,20 m x 1,70 m) jusqu'au toit de la couche de mâchefers. La taille de la tranchée permet d'y descendre un gammadensimètre à pointe à profondeur variable (LCPC, 1985). Compte tenu des fortes incertitudes sur l'épaisseur réelle des couches de mâchefers découvertes, le matériau a été extrait par couche de 20 cm. Les mesures de densité ont été ainsi répétées jusqu'au sol sous-jacent (fig. 3). À chaque mesure de densité (deux par niveau), un échantillon de matériau est prélevé pour la mesure de la teneur en eau.

Le volume de mâchefer extrait a servi à constituer un échantillon d'environ 300 kg pour les essais de laboratoire. Des notes sont prises sur l'aspect du matériau sur



Fig. 3. - Mesure de la densité en place au gammadensimètre.



Fig. 4. - Échantillonnage du sol sous-jacent à la tarière.

les parois de la tranchée. Le sol sous-jacent est échantillonné à différentes profondeurs à l'aide d'une tarière (fig. 4). Afin d'apprécier plus justement l'impact des mâchefers, des échantillons sont aussi prélevés dans le sol naturel avoisinant jusqu'à une profondeur au moins équivalente à celle atteinte sous la tranchée.

## Résultats des inspections

### Inspection externe

L'inspection visuelle n'a révélé aucun désordre dans la structure des chaussées. Dans les deux cas, la couche de revêtement, récente, ne montrait pas de dégradation. Et dans chaque cas, les revêtements avaient été refaits, non pas pour remédier à des problèmes de structure, mais simplement à cause de leur usure superficielle. Le tableau I présente les résultats des mesures de déflexion.

TABLEAU I  
Résultats des mesures de déflexion

Déflexion en 100 <sup>ème</sup> de mm					
Site	Voie	Roue	Nombre de mesures	Moyenne	Écart-type
La Teste	Intérieure	Axe	77	60	19
		Rive	79	66	26
	Extérieure	Axe	65	90	28
		Rive	65	67	20
Le Mans	Gauche	Axe	124	29	12
		Rive	124	48	23
	Droite	Axe	124	44	16
		Rive	124	47	24

Avec une valeur moyenne d'environ 70/100 mm et des pics à 140/100 mm pour La Teste, et une valeur moyenne de 40/100 mm et des pics à 100/100 mm pour Le Mans, de plus dans chaque cas après des épisodes pluvieux de quelques jours, ces résultats doivent être considérés comme tout à fait corrects pour des structures souples. Au Mans, l'épaisseur des revêtements bitumineux (15 cm) peut jouer un rôle important dans ce bon comportement global.

### Inspection interne

Grâce au déflectogramme, des secteurs représentatifs de la performance moyenne de la chaussée ont pu être repérés pour pratiquer les tranchées d'inspection. Il a fallu toutefois prendre en compte les passages des différents réseaux dans le choix des emplacements de tranchées d'inspection.

À La Teste, la première tranchée a été réalisée dans la partie de la chaussée supportant un trafic dans les deux sens (tranchée 1). Comme la couche de MIOM n'y était pas aussi épaisse que prévu, une seconde tranchée a été réalisée (tranchée 2). La déflexion à cet endroit était d'environ 100/100 millimètres.

Pour le site du Mans, les tranchées ont été réalisées dans les parties hautes de la route. À l'emplacement de la première (tranchée 1), dans la partie sud, la déflexion était d'environ 50/100 mm. Comme les mâchefers y étaient fortement mélangés à de l'argile et des galets, une seconde tranchée a été réalisée dans la partie nord de la route (tranchée 2). À cet endroit, la déflexion était d'environ 60/100 mm. Non représentatif, le matériau de la tranchée 1 du Mans n'a pas été caractérisé sur le plan mécanique.

Pour les mesures de densité en place, dans chaque tranchée, deux mesures au gammadensimètre à chaque niveau dégagé ont été effectuées, une du côté de l'axe

TABLEAU II  
Densités en place et teneurs en eau

Site	Tranchée	Couche	Côté Axe	Côté Rive	
La Teste	1	12-32 cm	Point A	Point B	
		Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	1,72	1,98	
		Teneur en eau (%)	9,8	10,3	
	2	14-26 cm	Point A	Point B	
			Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	1,61	1,64
			Teneur en eau (%)	9,2	9,0
		47-69 cm	Point C	-	
			Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	1,45	-
			Teneur en eau (%)	12,9	-
Le Mans	1	35-57 cm	Point A	Point B	
		Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	1,73	1,78	
		Teneur en eau (%)	14,0	15,5	

de la chaussée (notée A, C), une du côté de la rive de la chaussée (notée B).

Le calcul de la densité en place est lié à la teneur totale en éléments majeurs. L'interprétation de la valeur de la densité en place est aussi liée à la teneur en eau, mesurée en laboratoire (AFNOR, 1998). Les résultats finaux concernant les densités (densité sèche) et les teneurs en eau sont donnés dans le tableau II. La dispersion des valeurs de densité pour le site de La Teste est révélatrice des conditions initiales de compactage.

À La Teste comme au Mans, l'assise de MIOM, bien que compacte, se défaisait aisément au pic. Les parois des tranchées ont permis des observations.

Dans les tranchées de La Teste, les mâchefers étaient de couleur sombre, avec de fines passées blanches et beiges. Les mâchefers contenaient du verre (surtout dans les fractions supérieures à 20 mm), mais peu de ferraille. La couche de mâchefers était compacte, très dure par endroits. Il n'y avait aucune odeur. Quelques rares cristallisations blanches étaient visibles.

Dans la première tranchée du Mans, la couche de MIOM n'avait pas un aspect courant. Il s'agissait d'un matériau sableux noir à gris foncé, identifié comme du mâchefer grâce aux nombreux débris de verre. Le matériau de la seconde tranchée, à la répartition bien délimitée, était lui un mâchefer « pur », sombre et compact, avec des débris de verre, mais relativement peu de ferraille. Il n'avait aucune odeur.

Enfin, les profils réels de chaque chaussée ont été révélés par les excavations. Présentés dans la figure 5, on voit qu'ils peuvent être différents d'une tranchée à une autre pour un même site.

Le sol sous-jacent a été échantillonné jusqu'à 112 cm et 145 cm respectivement pour les tranchées 1 et 2 de La Teste. Il a été échantillonné jusqu'à 120 cm pour les deux tranchées du Mans.

## Les essais de caractérisation en laboratoire

### Caractérisation des mâchefers extraits

#### Analyse granulométrique

Ces essais ont été réalisés selon la norme NF P 18-560 (AFNOR, 1992). Les résultats sont présentés sur les figures 6 et 7.

Pour les tranchées 1 et 2 de La Teste, la distribution granulométrique des mâchefers correspond à la courbe enveloppe d'une grave non traitée 0/31,5 mm (AFNOR, 1995) (fig. 6). Mis à part un criblage grossier immédiatement après l'incinération, il y a vingt ans, les mâchefers n'ont subi aucune préparation avant leur utilisation. Le fer n'était pas retiré.

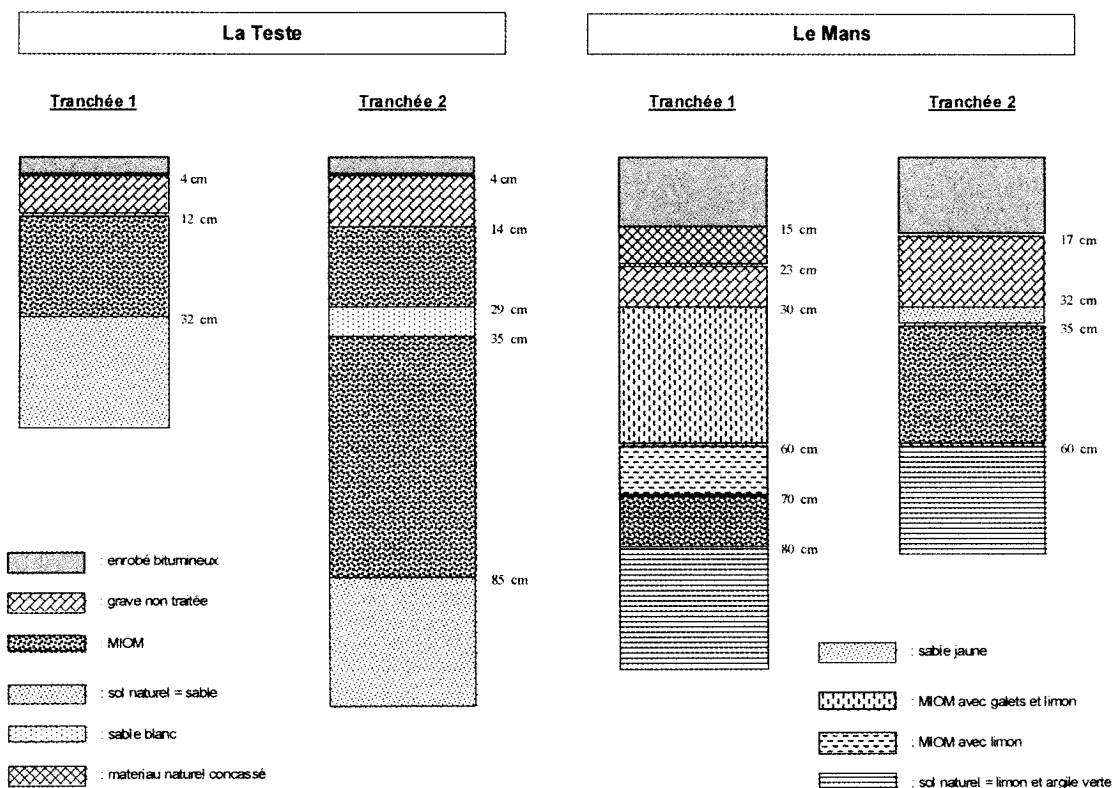


Fig. 5 - Profils verticaux des structures de chaussées.

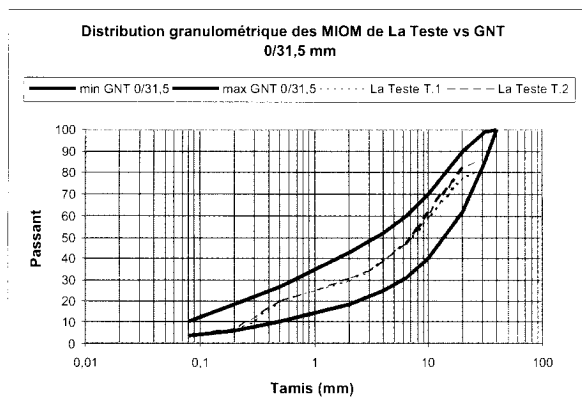


Fig. 6 - Analyse granulométrique des MIOM de La Teste.

La distribution granulométrique du matériau extrait de la tranchée 2 du Mans correspond à la courbe enveloppe d'une grave non traitée 0/20 mm (AFNOR, 1995). Elle présente seulement un léger excès de particules fines (fig. 7). Il y a 20 ans, le matériau du Mans n'a subi qu'un criblage grossier lui aussi. Le fer n'en étant pas extrait, durant le chantier, les ouvriers ont seulement retiré les plus gros morceaux.

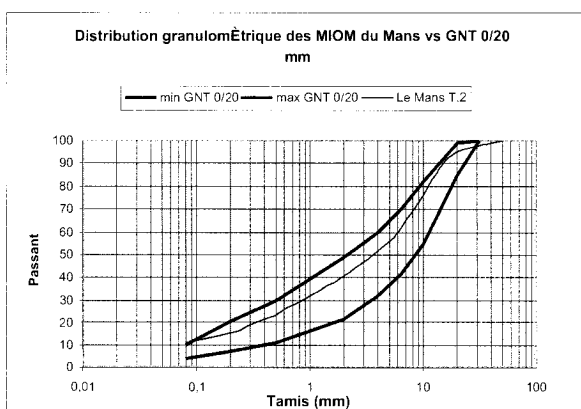


Fig. 7 - Analyse granulométrique des MIOM du Mans.

### Essai Proctor modifié

Dans chaque site, les MIOM étaient en position de couche de fondation, raison pour laquelle l'essai Proctor modifié a été choisi (AFNOR, 1998). Conformément à la norme, seule la fraction 0/20 mm du matériau a été utilisée. Ensuite, pour chaque moule de l'essai Proctor, un essai CBR immédiat a été réalisé (AFNOR, 1998). La densité en place peut être comparée à la densité à l'OPM et donne le taux de compactage. Les résultats pour les deux sites sont donnés dans le tableau III.

- La masse volumique à l'OPM de l'échantillon extrait de la tranchée 2 de **La Teste** entre dans la fourchette de valeurs (1,69 à 1,90 t/m<sup>3</sup>) fournie par le SETRA dans sa note d'information sur l'utilisation des MIOM en construction routière (SETRA, 1997). Ces fourchettes ne sont qu'indicatives, basées sur diverses observations. Le résultat pour l'échantillon de la tranchée 1 est légèrement supérieur.

Les teneurs en eau à l'OPM sont conformes à la fourchette donnée par la note du SETRA (9 à 17 %).

Le chiffre de 101 % de compactage (La Teste, tranchée 1, point B) peut s'expliquer à la fois par les conditions initiales de compactage, et par l'incertitude sur la mesure. La valeur de 78 % (La Teste, tranchée 2, point C) peut s'expliquer par une erreur de mesure, le gammadensimètre ayant pu prendre en compte quelques centimètres du sable sous-jacent.

TABLEAU III  
Résultats de l'essai Proctor modifié

		Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	Taux de compactage (%)	Teneur en eau - ω (%)
<b>La Teste - Tranchée 1</b>				
Référence	OPM	1,95	-	11,5
En place	Point A	1,72	88	9,8
En place	Point B	1,98	101	10,3
<b>La Teste - Tranchée 2</b>				
Référence	OPM	1,85	-	13,3
En place	Point A	1,61	87	9,2
En place	Point B	1,64	88	9,0
En place	Point C	1,45	78	12,9
<b>Le Mans - Tranchée 2</b>				
Référence	OPM	1,80	-	14,7
En place	Point A	1,73	96	14,0
En place	Point B	1,78	99	15,5

Les deux courbes donnant les densités en fonction de la teneur en eau montrent de très grosses différences pour deux échantillons sensés représenter le même matériau (fig. 8). Les courbes granulométriques des deux échantillons étant similaires, ces différences attestent de l'hétérogénéité du matériau.

La dispersion générale des densités en place, comme leurs valeurs généralement médiocres, peut être expliquée notamment par le compactage sommaire qui a été réalisé initialement.

On constate que les teneurs en eau en place sont toujours inférieures à la référence Proctor et que la différence peut être de plus de 4 %. Le sol sous-jacent est particulièrement drainant.

- Pour le matériau **du Mans**, tant pour la teneur en eau que pour la densité sèche, la référence Proctor est conforme aux fourchettes données par le SETRA.

Les taux de compactage sont meilleurs que dans le premier site. Contrairement à La Teste, le matériel de compactage utilisé au Mans était tout à fait traditionnel.

Les teneurs en eau s'éloignent moins de la référence Proctor qu'à La Teste. Ceci peut s'expliquer par la plus grande imperméabilité du sol du Mans.

### Essai CBR immédiat

Les résultats des essais sont présentés dans la figure 8.

- Pour le site de La Teste, seul l'échantillon de la tranchée 2 rentre dans la fourchette donnée par le SETRA (30 à 120 pour l'indice CBR immédiat). Le résultat sur la tranchée 1 est meilleur.

Avec un indice CBR immédiat supérieur à 60 à l'OPM, ce matériau peut être considéré comme très stable, même dans le domaine des assises de chaussées.

Il est communément admis dans ce domaine qu'en dessous d'un indice CBR immédiat de 25, le matériau devient très difficile à compacter en phase de chantier.

L'échantillon de la tranchée 1 descend à cette valeur pour une teneur en eau équivalente à  $\omega_{OPM} + 2,9 \%$ . L'échantillon de la tranchée 2 atteint cette valeur pour une teneur en eau équivalente à  $\omega_{OPM} + 1,5 \%$  seulement.

Dans le domaine des travaux de terrassement, pour présenter une bonne portance durant le chantier, l'indice CBR immédiat doit être supérieur à 10.

L'échantillon de la tranchée 2 atteint cette valeur pour une teneur en eau équivalente à  $\omega_{OPM} + 2,3 \%$  seulement.

Avec seulement un léger excès d'eau par rapport à la référence Proctor modifié (+ 2 à 3 %), le mâchefer de La Teste peut donc perdre complètement ses très bonnes propriétés de portance.

Les matériaux pour assises de chaussées sont généralement mis en œuvre avec une teneur en eau 1 % en dessous de  $\omega_{OPM}$  afin d'obtenir une meilleure portance à court terme pour la conduite du chantier. Dans ces con-

ditions d'humidité (10,5 %), l'échantillon de la tranchée 1 atteint sa capacité de portance maximum (160). L'échantillon de la tranchée 2 montre aussi une certaine progression.

- L'indice CBR immédiat du matériau du Mans à l'OPM est proche de la limite supérieure donnée par le SETRA. Ce matériau peut être considéré comme très stable à l'OPM. L'indice décroît jusqu'à 25 pour une teneur en eau correspondant à  $\omega_{OPM} + 1,8 \%$  seulement. Il chute à 10 pour une teneur en eau de  $\omega_{OPM} + 2,5 \%$ .

La sensibilité à l'eau des propriétés de portance du matériau du Mans est très grande (fig. 8). Avec un excès d'eau de 2 à 3 % par rapport à la référence Proctor, il perd complètement son bon comportement. Ce risque d'instabilité durant le compactage, à cause d'un léger excès d'eau par rapport à  $\omega_{OPM}$ , est souvent rapporté par ceux qui ont eu à mettre en œuvre des mâchefers.

Enfin, le matériau du Mans aurait un comportement différent de celui de La Teste en cas de mise en œuvre à une teneur en eau 1 % inférieure à  $\omega_{OPM}$ , son indice CBR immédiat décroîtrait jusqu'à 90 environ.

### Essais de lixiviation

Ces essais ont été conduits selon la norme NF X 31-210. Dans le cas des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, la circulaire 94-IV-1 du ministère de l'Environnement indique que trois lixiviations successives (3 x 16 h) doivent être effectuées.

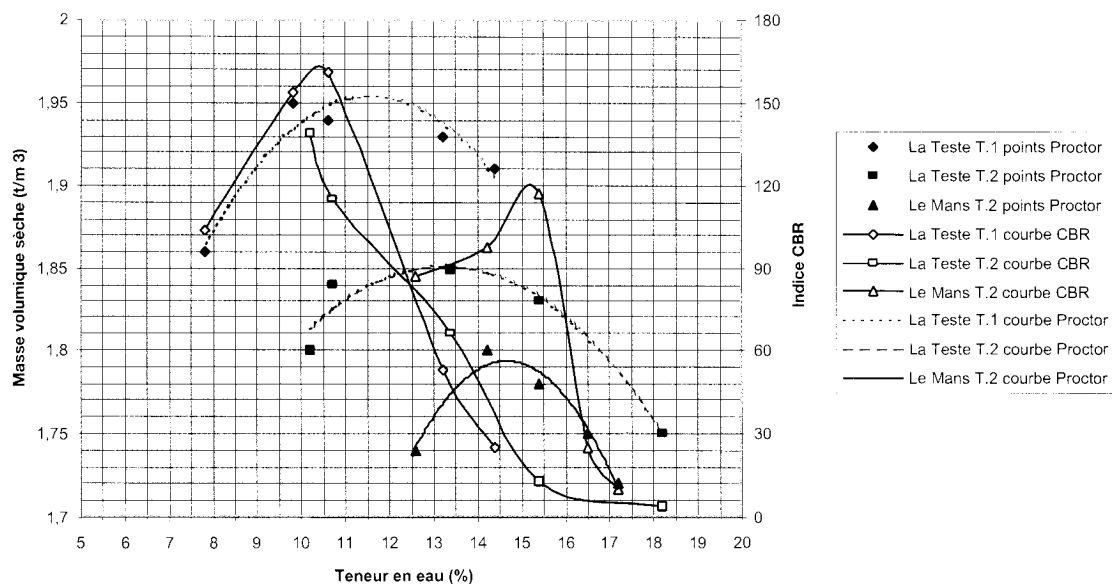


Fig. 8 - Évolution de la masse volumique et de l'indice CBR immédiat avec la teneur en eau.

Les paramètres mesurés sur les lixiviats étaient : aluminium, cadmium, cuivre, fer, manganèse, nickel, plomb, zinc, les chlorures, les sulfates, la conductivité, le résidu sec, la perte au feu, la fraction soluble.

L'analyse chimique des MIOM a été réalisée après les avoir broyés à 4 mm. Les analyses ont été conduites selon les méthodes normalisées (AFNOR, 1997). Les teneurs en éléments traces (cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc) et les teneurs en fer, manganèse et aluminium, ont été mesurées par spectrométrie d'émission atomique (ICP) ou par spectrométrie d'absorption atomique après calcination à 450 °C et dissolution du résidu dans un mélange d'acides fluorhydrique et perchlorique. Les chlorures et les sulfates ont été dosés par chromatographie ionique.

Pour apprécier le risque environnemental représenté par ces matériaux anciens et pour le comparer aux conditions d'emploi requises aujourd'hui, ces lixiviats, pour les paramètres figurant dans la circulaire 94-IV-1, ont été comparés aux seuils réglementaires. Ces paramètres et seuils pour l'utilisation des MIOM en construction routière (classe V) sont rappelés dans le tableau IV.

Le carbone organique total, le mercure et l'arsenic n'ont pas été dosés ; l'expérience montre qu'en général leurs concentrations sont basses et qu'ils ne sont ni limitants, ni discriminants, dans l'utilisation des MIOM en construction routière.

Les résultats des tests de lixiviation pour les deux sites sont présentés dans le tableau V.

• Pour le site de **La Teste**, l'essai de lixiviation a été réalisé sur trois échantillons : un pour la tranchée 1

TABLEAU IV  
Paramètres et seuils réglementaires pour l'utilisation des MIOM en construction routière

Paramètres	Seuils de la classe V
Perte au feu	< 5%
Fraction soluble	< 5%
Hg	< 0,2 mg/kg
Pb	< 10 mg/kg
Cd	< 1 mg/kg
As	< 2 mg/kg
Cr VI	< 1,5 mg/kg
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	< 10 000 mg/kg
Carbone Organique Total	< 1 500 mg/kg

(couche 12 à 32 cm, notée T.1), deux pour la tranchée 2, car à La Teste l'inspection de chaussée a révélé une petite couche de sable (6 cm d'épaisseur) entre deux niveaux de MIOM. Le deuxième échantillon est représentatif de la couche de mâchefers située au-dessus de la petite couche de sable (couche de 14 à 29 cm, notée T.2 sup.). Le troisième échantillon est représentatif de la couche 35 à 85 cm de la deuxième tranchée (notée T.2 inf.).

• Pour **Le Mans**, l'essai a été réalisé sur deux échantillons, un pour chaque tranchée, car au fond de la première tranchée, du mâchefer « pur » a tout de même pu être prélevé. Le premier échantillon du Mans est donc représentatif de la première tranchée (couche 70 à 80 cm, notée T.1). Le second échantillon est représentatif de la deuxième tranchée, couche 35 à 60 cm (noté T.2).

TABLEAU V  
Résultats des essais de lixiviation

Paramètres	La Teste T.1	La Teste T.2 sup.	La Teste T.2 inf.	Le Mans T.1	Le Mans T.2
Perte au feu (%)	2,9	2,7	4,8	4,7	5,0
Fraction soluble (%)	0,4	0,3	0,3	1	1
Pb (mg/kg)	3	1,2	0,9	0,05	0,1
Cd (mg/kg)	< 0,006	< 0,005	0,005	0,05	0,05
Cr (mg/kg)	0,09	0,16	0,12	< 0,03	< 0,03
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	994	423	219	6175	6181
pH moyen	9,0	9,5	8,9	8,2	8,3
Al (mg/kg)	17	15	13	< 6	< 6
Cu (mg/kg)	1,2	0,8	0,6	0,7	1,1
Fe (mg/kg)	21	10	6	0,65	2,5
Mn (mg/kg)	1,0	< 0,33	< 0,31	12,8	7,7
Ni (mg/kg)	< 0,18	< 0,15	< 0,18	< 0,05	0,52
Zn (mg/kg)	4,5	2,0	3,3	3,6	3,8
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	79	38	35	107	36,8
Conductivité (µs/cm)	167	120	111	418	418



- Pour les six paramètres figurant dans la circulaire 94-IV-1, le **matériau de La Teste** se trouve toujours en dessous des limites fixées pour la classe V. La fraction soluble est très faible. Le chrome total qui a été dosé à la place du chrome VI est inférieur à la limite indiquée pour ce dernier. La faible alcalinité de ces mâchefer, comparée à celle des MIOM de fraîche production, influence fortement la solubilité des métaux. C'est ainsi que la solubilité de l'aluminium et du fer, par exemple, apparaît beaucoup plus faible au Mans qu'à La Teste.

- Pour le **matériau du Mans**, à l'exception de la Perte au feu pour la tranchée 2, qui est égale à la valeur seuil, les teneurs pour les paramètres figurant dans la circulaire 94-IV-1 sont toutes inférieures aux limites fixées pour la classe V. Le chrome total est inférieur au seuil fixé pour le chrome VI. Les sulfates présentent des valeurs sensiblement plus fortes qu'à La Teste.

Le matériau du Mans semble relarguer plus que celui de La Teste (fraction soluble), principalement à cause des sulfates (environ 6 g/kg). Mais, dans l'ensemble, la fraction soluble de ce matériau demeure très faible. Le matériau de La Teste tend à libérer plutôt du plomb, et celui du Mans plutôt du cadmium. On note que la conductivité moyenne est remarquablement constante entre les deux échantillons du Mans.

#### Teneurs totales et fractions lixiviées

Les teneurs totales ont été mesurées afin d'apprécier la solubilité réelle des deux matériaux. Parmi les éléments dosés figurent ceux mesurés dans l'essai de lixiviation (aluminium, cadmium, chrome, cuivre, fer, manganèse, nickel, plomb, zinc). Pour chaque échan-

tilon de mâchefer, la proportion extraite durant l'essai de lixiviation, par rapport à la teneur totale, a permis d'apprécier la fraction lixiviée.

D'autres éléments comme le silicium, le calcium, le potassium, le magnésium et le sodium ont aussi été mesurés, afin de calculer précisément la densité en place, et pour avoir des éléments de comparaison avec les concentrations en ces éléments dans le sol sous-jacent.

Pour chaque échantillon, la teneur totale (TT) et la fraction lixiviée (FL en %) sont données dans le tableau VI.

- Sur les trois échantillons de **La Teste**, les éléments les plus abondants sont nettement, par ordre décroissant, le silicium, le calcium, le fer, le sodium et l'aluminium (de plus de 100 à 10 g/kg), puis le magnésium, le potassium, le zinc, le plomb et le manganèse (10 à 1 g/kg).

Dans l'ensemble, la fraction solubilisée est faible. Elle est supérieure à 1 % sur les trois échantillons uniquement pour le cadmium. Le cuivre est lixivié au-delà de 1 % seulement dans les échantillons T.1 et T.2 sup. La plus forte solubilité est celle du plomb (2,9 %) dans la tranchée 1. Le zinc aussi est plus lixivié dans cette tranchée (2 %).

- Sur les deux échantillons **du Mans**, les éléments les plus abondants sont, par ordre décroissant, le silicium, le calcium, le fer, le sodium et l'aluminium (de plus de 100 à 10 g/kg), puis le magnésium, le potassium, le zinc et le manganèse (10 à 1 g/kg).

Dans l'ensemble, la solubilité de ce mâchefer est très faible. Comme à La Teste, le cadmium est relargué de tous les échantillons à plus de 1 %, mais il y a plus de

TABLEAU VI  
Teneurs totales (TT) et fractions lixiviées (FL)

Éléments	La Teste T.1		La Teste T.2 sup.		La Teste T.2 inf.		Le Mans T.1.		Le Mans T.2	
	TT mg/kg	FL %	TT mg/kg	FL %	TT mg/kg	FL %	TT mg/kg	FL %	TT mg/kg	FL %
Al	17 539	0,97	23 796	0,63	23 526	0,55	27 374	< 0,3	20 975	< 0,3
Cd	2	2,5	2,2	1,8	4,3	1,1	40,3	1,2	15,9	3,1
Cr	170	0,53	302	0,52	215	0,56	362	0,08	403	0,07
Cu	549	2,1	592	1,3	1 238	0,48	1 585	0,44	940	1,1
Fe	45 888	0,45	52 317	0,19	76 210	0,08	46 568	0,01	35 218	0,07
Mn	1 077	0,92	1 267	0,23	1 379	0,21	1 328	9,6	1 055	7,3
Ni	44	< 4,1	54	< 2,7	67	< 2,7	106	0,37	85	6,1
Pb	1 013	2,9	1 246	0,96	1 341	0,67	1 359	0,04	881	0,1
Zn	2 261	2,0	2 304	0,86	4 120	0,80	3 671	0,98	2 881	1,3
Si	284 700	-	241 300	-	262 330	-	299 000	-	291 000	-
Ca	92 198	-	96 368	-	105 323	-	59 776	-	69 745	-
K	6 317	-	5 954	-	5 605	-	7 102	-	6 532	-
Mg	6 625	-	7 527	-	5 991	-	8 511	-	9 514	-
Na	29 651	-	41 961	-	33 580	-	32 656	-	44 479	-

cadmium dans les MIOM du Mans que dans ceux de La Teste. Le plus fort taux de lixiviation est celui du manganèse (9,6 à 7,3 ‰). Le nickel est relargué à plus de 1 ‰ de l'échantillon de la tranchée 2 (6,1 ‰), comme le cuivre et le zinc. La solubilité du plomb est beaucoup plus faible dans les échantillons du Mans que dans ceux de La Teste.

La relativement faible solubilité de l'aluminium et du plomb, en particulier, peut s'expliquer par le pH relativement bas des mâchefers. À des pH compris entre 8,2 et 9,5, la solubilité de ces deux éléments est à son minimum, elle augmente rapidement dès que le pH est supérieur à 10 (Charlot, 1969). Le pH peut aussi expliquer le comportement inverse du cadmium et du manganèse. La plus grande solubilité du plomb à La Teste et du cadmium au Mans peut être expliquée par la différence de pH entre les mâchefers (de 8,9 à 9,5 à La Teste, et 8,3 au maximum au Mans).

## Caractérisation des sols

Il n'existe pas en France de norme générale permettant d'apprécier l'état de pollution d'un sol. Par contre, depuis 1994, les Pays-Bas ont établi des seuils fixant, pour un sol standard et pour divers éléments chimiques, un niveau de concentration « de base » et un niveau « d'intervention ». Pour un sol donné, les valeurs d'intervention doivent être corrigées en fonction de la granulométrie du sol et de sa teneur en matière organique. Selon ce système, un sol peut être considéré comme sérieusement pollué si la teneur en un élément donné dépasse le « seuil d'intervention ». Même s'ils n'ont en France qu'une valeur indicative, ces seuils sont fréquemment utilisés comme référence (Spierenburg et Demanze, 1995). Grâce à cette méthode, il a été possible de calculer les valeurs limites d'intervention (VLI) pour différents éléments, à chaque niveau du sol sous-jacent, et de les comparer aux concentrations mesurées (CM) en cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc.

La bonne interprétation de ces résultats demande de les comparer aussi avec les teneurs dans le sol avoisinant (sol témoin). Pour les sols témoins, le calcul des valeurs limites d'intervention a permis de vérifier qu'il s'agissait de références valables.

Les analyses chimiques sur les sols ont été conduites sur les particules inférieures à 2 mm après tamisage sur un tamis en nylon. Les analyses ont été conduites selon les méthodes normalisées (AFNOR, 1996). Pour les particules inférieures à 500 µm, l'analyse granulométrique a été réalisée à l'aide d'un granulomètre à diffusion laser.

Enfin, pour interpréter les variations de concentration dans ces sols, il faut tenir compte de la variabilité ordinaire des concentrations dans les sols naturels. Le programme ASPITET de l'INRA a, pour neuf éléments, fourni des valeurs significatives de concentration pour des sols naturels de différentes textures en France

(Baize, 1997). Pour huit de ces éléments et pour les textures sableuse et limoneuse, les valeurs des 1<sup>er</sup> et 9<sup>e</sup> déciles sont données dans le tableau VII. Dans les tableaux suivants (VIIIa à Xb), les textures des différents niveaux, appréciées à partir de l'analyse granulométrique (Baize, 1997), seront spécifiées, et les concentrations mesurées (CM) auront un exposant – ou + selon qu'elles seront inférieures au 1<sup>er</sup> décile ou supérieures au 9<sup>e</sup> décile.

TABLEAU VII  
Concentrations ordinaires dans les horizons sableux et limoneux en France

Éléments	Texture sableuse		Texture limoneuse	
	1 <sup>er</sup> décile	9 <sup>e</sup> décile	1 <sup>er</sup> décile	9 <sup>e</sup> décile
Cd (mg/kg)	0,02	0,32	0,02	0,25
Cr (mg/kg)	10,3	21,9	21,9	55,4
Cu (mg/kg)	< 2	6,6	3,4	15,6
Ni (mg/kg)	< 2	9,8	6,4	25,3
Pb (mg/kg)	9,1	40,0	13,7	37,6
Zn (mg/kg)	7	34	21	75
Fe (mg/kg)	1 400	12 700	8 700	21 800
Mn (mg/kg)	< 10	298	110	886

### Essais sur le sol témoin

À La Teste, le sol témoin a été échantillonné à cinq niveaux, au Mans à six niveaux. Les résultats sont présentés dans les tableaux VIIIa et VIIIb.

- **Les caractéristiques du sol de La Teste** sont typiques des sols sableux de la région. Les teneurs en métaux lourds sont faibles avec cependant une légère augmentation au niveau supérieur en cadmium (0,1 mg/kg), cuivre (5,4 mg/kg), plomb (23 mg/kg) et zinc (28 mg/kg), qui pourrait être liée aux fumées de l'usine d'incinération. Quoi qu'il en soit, toutes les concentrations mesurées sont très en dessous des valeurs limites d'intervention calculées et dans la gamme ordinaire des sols sableux, voire inférieures.

- **Le pH du sol du Mans** est plus bas que celui de La Teste. Il augmente avec la profondeur, comme les teneurs en aluminium et fer.

Les teneurs naturelles en métaux lourds de ce sol sont plus élevées qu'à La Teste, particulièrement en ce qui concerne le chrome et le zinc. On note aussi un accroissement relatif en cuivre et en plomb dans les premiers 40 cm. Les concentrations en ces quatre éléments sont souvent supérieures au 9<sup>e</sup> décile des textures correspondantes, mais elles sont très inférieures aux valeurs limites d'intervention.

### Essais sur le sol sous-jacent

- **Dans la tranchée 1 du site de La Teste**, le sol a été échantillonné à six niveaux sous la couche de mâchefers. Les résultats sont présentés dans le tableau IXa.

TABLEAU VIIIa  
Caractéristiques du sol témoin de La Teste et valeurs limites d'intervention

Niveaux du sol naturel	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-95 cm	
	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CL	VLI	CM	VLI
pH	7,4		7,7		7,5		7,1		6,4	
Conductivité ( $\mu$ S/cm )	7,2		28		58		88		151	
Al (mg/kg)	8820		11 271		8 248		6 104		8 055	
Fe (mg/kg)	3 017		4 026		1 980		1 026		1 575	
Mn (mg/kg)	51		138		65		45		89	
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	10		8		10		63		71	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	6		4		6		26		40	
M.O. (%)	2,1		0,4		2,2		1,8		1,8	
< 2 $\mu$ m (%)	0,6		0,3		0,3		0,5		0,3	
Texture	sableuse		sableuse		sableuse		sableuse		sableuse	
Cd (mg/kg)	0,1	6,8	0,06	6,2	0,01	6,9	0,03	6,7	0,03	6,7
Cr (mg/kg)	6,2	194	8,2	190	3,6	192	2,5	194	3,1	192
Cu (mg/kg)	5,4	89	1,3	83	1,2	88	0,7	88	1,2	87
Ni (mg/kg)	2,1	63	1,4	60	< 0,5	62	< 0,5	63	< 0,5	62
Pb (mg/kg)	23	328	6,8	314	5,1	327	4,4	326	5,8	325
Zn (mg/kg)	218	157	7,8	137	5,5	151	2,9	153	2,7	149

TABLEAU VIIIb  
Caractéristiques du sol témoin du Mans et valeurs limites d'intervention

Niveaux du sol naturel	0-20 cm		20-40 cm		40-60 cm		60-80 cm		80-100 cm		100-120 cm	
	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI
pH	6,0		6,4		6,5		6,7		7,1		7,1	
Conductivité ( $\mu$ S/cm )	89		69		60		49		42		47	
Al (mg/kg)	18 387		20 461		18 626		29 635		50 904		48 746	
Fe (mg/kg)	18 407		17 449		15 823		26 340		47 601		46 975	
Mn (mg/kg)	276		273		238		218		59		66	
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	20		8		7		8		8		8	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	26		13		11		12		20		33	
M.O. (%)	5,4		3,8		2,4		2,9		3,8		3,6	
< 2 $\mu$ m (%)	3,2		4,3		6,8		11,3		11,1		13,8	
Texture	sableuse		sableuse		limoneuse		limoneuse		limoneuse		limoneuse	
Cd (mg/kg)	0,1	8	0,1	8	0,1	8	0,07	8	0,02	9	0,01	9
Cr (mg/kg)	35	215	33	222	30	241	51	276	88	275	82	295
Cu (mg/kg)	14,7	107	19,1	106	11,5	110	9,1	126	7,1	128	7,2	136
Ni (mg/kg)	8,4	79	8,5	86	7,3	101	12,7	128	19,1	127	18,3	143
Pb (mg/kg)	62	366	44	362	31	369	24	400	16	405	16	420
Zn (mg/kg)	45	228	40	244	29	292	36	394	45	393	45	451

Comme le sol témoin, le pH du sol sous-jacent à La Teste est neutre, avec une légère tendance à l'acidification dans les niveaux les plus profonds. Il semble influencé par le pH basique des MIOM dans les premiers centimètres.

La conductivité est forte, en particulier comparée au sol témoin. Ceci peut être dû aux fortes concentrations en chlorures, en particulier dans les niveaux les plus profonds, et en sulfates dans les niveaux supérieurs. L'alu-

TABLEAU IXa  
Caractéristiques du sol sous-jacent de La Teste (tranchée 1) et valeurs limites d'intervention

Niveaux du sol naturel	32-37 cm		37-42 cm		42-52 cm		52-72 cm		72-92 cm		92-112 cm	
pH	8,6		7,1		7,2		7,0		6,9		6,6	
Conductivité (µS/cm)	256		337		190		229		131		437	
Al (mg/kg)	7 014		8 547		10 729		16 850		15 518		11 775	
Fe (mg/kg)	3 073		2 503		3 518		7 477		6 126		4 159	
Mn (mg/kg)	80		62		51		55		72		41	
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	34		65		45		62		111		220	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	94		256		23		11		8		42	
M.O. (%)	1,6		6,2		3,7		5,8		4,2		2,0	
< 2 µm (%)	0,2		0,3		0,5		1,3		1,1		0,7	
Texture	sableuse		sableuse		sableuse		sableuse		sableuse		sableuse	
	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI
Cd (mg/kg)	0,1	6,7	0,1	8,1	0,04	7,4	0,03	8,1	0,06	7,6	0,01	6,8
Cr (mg/kg)	6,1 <sup>-</sup>	192	4,4 <sup>-</sup>	192	5,7 <sup>-</sup>	193	11	200	10 <sup>-</sup>	198	5,9 <sup>-</sup>	195
Cu (mg/kg)	17 <sup>+</sup>	87	2,4	99	1,1 <sup>-</sup>	93	2	102	1,4 <sup>-</sup>	96	1,3 <sup>-</sup>	89
Ni (mg/kg)	2,1	61	0,9 <sup>-</sup>	62	1 <sup>-</sup>	63	1,2 <sup>-</sup>	68	1,5 <sup>-</sup>	68	< 0,5 <sup>-</sup>	64
Pb (mg/kg)	55 <sup>+</sup>	323	8,7 <sup>-</sup>	352	7,4 <sup>-</sup>	338	8,5 <sup>-</sup>	356	7,7 <sup>-</sup>	345	5,7 <sup>-</sup>	328
Zn (mg/kg)	122 <sup>+</sup>	147	8,8	167	5,5 <sup>-</sup>	161	5,2 <sup>-</sup>	189	5,1 <sup>-</sup>	176	4,4 <sup>-</sup>	158

minium et le fer sont essentiellement concentrés entre 52 et 92 centimètres.

Le sol sous-jacent ne semble pas contaminé par les métaux lourds, même si le niveau directement en contact avec la couche de mâchefers, sur une épaisseur de 5 cm, présente un accroissement significatif des teneurs en cuivre, plomb et surtout en zinc. Les concentrations mesurées sont supérieures au 9<sup>e</sup> décile des horizons sableux, mais elles sont loin en dessous des seuils d'intervention pour ce type de sol.

Excepté en ce qui concerne le premier niveau, pour les éléments traces, les concentrations mesurées dans le sol de cette tranchée ne sont pas très différentes de celles mesurées dans le sol témoin.

• **Dans la tranchée 2 du site de La Teste**, le sol a été échantillonné à cinq niveaux sous la couche de mâchefers. La petite couche de sable (29-35 cm) intercalée dans la couche de MIOM a aussi été échantillonnée. Le niveau 105-125 cm a été malencontreusement mélangé à du mâchefer durant l'échantillonnage et ses résultats ne sont pas exploitables. Les résultats sont présentés dans le tableau IXb.

On note que le pH de la petite couche de sable est le même que celui de la couche de mâchefer située au-dessus (9,6). Par contre, la conductivité de cette couche ne semble pas influencée par la proximité des MIOM. Aluminium, fer et manganèse, sont abondants dans cette couche.

On remarque une augmentation significative en zinc, plomb et cuivre par rapport aux concentrations dans le

sol témoin. Certaines concentrations en cuivre et zinc sont supérieures au 9<sup>e</sup> décile des horizons sableux mais elles restent très inférieures aux valeurs limites d'intervention.

En ce qui concerne le sol sous-jacent (sous 85 cm), on remarque tout d'abord l'influence de la couche de mâchefer sur son pH. La couche la plus profonde de MIOM a un pH de 8,9. Le pH du sol est le même sur une épaisseur de 20 cm, ensuite il diminue et devient proche de la neutralité dans le niveau le plus profond.

La conductivité, plus faible que dans la tranchée 1, n'est pas très différente de celle du sol témoin. L'influence de la proximité de la couche de MIOM, sur les teneurs en aluminium et en fer n'est pas significative non plus.

Dans le premier niveau (85-90 cm), les concentrations en métaux lourds sont plus faibles que dans le premier niveau de la tranchée 1. La teneur en matière organique dans le sol de cette tranchée, est aussi bien plus faible que celle de la tranchée 1. À cet endroit, le sol n'a pas nécessairement la même propension à retenir les métaux lourds.

L'accroissement de concentration le plus marqué est celui en zinc, jusque dans les niveaux les plus profonds. Plomb et cuivre sont plus abondants que dans le sol témoin mais restent dans la gamme ordinaire des sols sableux naturels. Pour les autres éléments, on retrouve les concentrations du sol témoin. Les concentrations mesurées sont toujours bien en dessous des valeurs limites d'intervention.

TABLEAU IXb  
Caractéristiques du sol sous-jacent de La Teste (tranchée 2) et valeurs limites d'intervention

Niveaux du sol naturel	29-35 cm		85-90 cm		90-95 cm		95-105 cm		125-145 cm	
pH	9,6		8,9		8,9		9,0		7,4	
Conductivité (µS/cm)	84		83		69		103		98	
Al (mg/kg)	11 683		6 590		6 846		6 590		8 678	
Fe (mg/kg)	4 615		1 070 <sup>-</sup>		1 047 <sup>-</sup>		1 654		2 096	
Mn (mg/kg)	136		50		43		72		23	
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	2		8		9		13		23	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	6		16		15		35		151	
M.O. (%)	0,3		0,6		0,6		0,6		0,8	
< 2µ m (%)	0,03		0,5		0,6		0,3		0,2	
Texture	sableuse		sableuse		sableuse		sableuse		sableuse	
	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI
Cd (mg/kg)	0,07	6,2	0,05	6,4	0,02	6,4	0,1	6,3	0,02	6,4
Cr (mg/kg)	11	190	3,1 <sup>-</sup>	194	2,7 <sup>-</sup>	193	3,9 <sup>-</sup>	192	4 <sup>-</sup>	192
Cu (mg/kg)	11 <sup>+</sup>	82	2,1	85	1,5 <sup>-</sup>	84	5,5	84	4,5	84
Ni (mg/kg)	1,4 <sup>-</sup>	60	0,9 <sup>-</sup>	63	< 0,5 <sup>-</sup>	63	2,4	62	0,9 <sup>-</sup>	62
Pb (mg/kg)	19	314	13	318	6,7 <sup>-</sup>	318	29	317	12	318
Zn (mg/kg)	76 <sup>+</sup>	138	21	149	9,7	147	48 <sup>+</sup>	145	25 <sup>+</sup>	145

• Dans la **première tranchée du Mans**, la limite entre la couche de MIOM « pur » et le sol sous-jacent n'était pas nette, le sol n'apparaissant véritablement qu'à partir de 90 cm de profondeur. Les résultats sont présentés dans le tableau Xa.

Dans les niveaux limoneux (90 à 120 cm), le pH est de 7,5, supérieur à celui du sol avoisinant (6 à 7,1). Il est donc lui aussi influencé par le pH des MIOM qui était de 8,2 dans cette tranchée.

La conductivité est forte comparée à celle du sol témoin, mais aussi par rapport aux résultats observés à La Teste. Liées à la nature plus argileuse de ces niveaux, les teneurs en aluminium et fer sont très fortes, supérieures même à celles des mâchefers, mais similaires à celles du sol témoin (tableau VIIIb).

Le sol sous-jacent montre un enrichissement en chrome. Il est environ 1,5 fois supérieur à la concentration dans le sol témoin aux mêmes niveaux (en dessous de 60 cm). La teneur dépasse nettement le 9<sup>e</sup> décile mais demeure bien en dessous des seuils d'intervention. Le cas du cadmium est similaire mais limité à la couche 90-100 cm, et sa teneur est encore plus éloignée de la VLI. Les teneurs en cuivre, plomb, zinc et nickel représentent un doublement de la concentration par rapport au sol témoin, mais dépassent de peu le 9<sup>e</sup> décile. Ces teneurs sont toutes bien inférieures aux seuils d'intervention.

• Dans la **deuxième tranchée du Mans**, le sol a été échantillonné à quatre niveaux sous la couche de mâchefers. Les résultats sont présentés dans le tableau Xb.

TABLEAU Xa  
Caractéristiques du sol sous-jacent du Mans (tranchée 1) et valeurs limites d'intervention

Niveaux du sol naturel	90-100 cm		100-120 cm	
pH	7,5		7,4	
Conductivité (µS/cm)	238		164	
Al (mg/kg)	64 590		51 151	
Fe (mg/kg)	56 859 <sup>+</sup>		48100 <sup>+</sup>	
Mn (mg/kg)	91 <sup>-</sup>		91 <sup>-</sup>	
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	113		61	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	59		31	
M.O. (%)	5,1		4,3	
< 2 µm (%)	13		12,5	
Texture	limoneuse		limoneuse	
	CM	VLI	CM	VLI
Cd (mg/kg)	0,5 <sup>+</sup>	9	0,05	9
Cr (mg/kg)	121 <sup>+</sup>	289	105 <sup>+</sup>	285
Cu (mg/kg)	16,7 <sup>+</sup>	138	14,8	134
Ni (mg/kg)	27,3 <sup>+</sup>	138	22,1	135
Pb (mg/kg)	33	425	46 <sup>+</sup>	417
Zn (mg/kg)	82 <sup>+</sup>	440	59	426

En comparant le pH à celui des MIOM situés juste au-dessus (8,3), et à celui du sol avoisinant (6 à 7), on conclut ici aussi à l'influence des mâchefers sur le sol sous-

TABLEAU Xb  
Caractéristiques du sol sous-jacent du Mans (tranchée 2) et valeurs limites d'intervention

Niveaux du sol naturel	60-70 cm		70-80 cm		80-100 cm		100-120 cm	
	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI
pH	7,9		7,5		6,4		5,1	
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	227		119		103		133	
Al (mg/kg)	21 371		20 500		57 604		73 441	
Fe (mg/kg)	20 643 <sup>+</sup>		23 596 <sup>+</sup>		48 943 <sup>+</sup>		58 097 <sup>+</sup>	
Mn (mg/kg)	206		445 <sup>+</sup>		199		83 <sup>-</sup>	
Cl <sup>-</sup> (mg/kg)	16		22		11		64	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	265		53		429		59	
M.O. (%)	2,5		2,7		4,8		6,1	
< 2 $\mu\text{m}$ (%)	5,6		5,0		13,4		18,2	
Texture	sableuse		sableuse		limoneuse		limoneuse	
	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI	CM	VLI
Cd (mg/kg)	0,3	8	0,06	8	0,04	9	0,01 <sup>-</sup>	10
Cr (mg/kg)	43 <sup>+</sup>	233	38 <sup>+</sup>	228	95 <sup>+</sup>	292	132 <sup>+</sup>	328
Cu (mg/kg)	16,3 <sup>+</sup>	107	9,6 <sup>+</sup>	105	8,8	138	9,5	157
Ni (mg/kg)	8,1	94	8,7	90	29,6 <sup>+</sup>	140	37,9 <sup>+</sup>	169
Pb (mg/kg)	32	363	26	360	26	425	26	463
Zn (mg/kg)	52 <sup>+</sup>	269	50 <sup>+</sup>	255	87 <sup>+</sup>	447	108 <sup>+</sup>	555

jaçant sur une épaisseur de 20 cm. Le pH décroît avec la profondeur et devient acide.

Comme dans la tranchée 1, la conductivité est forte et peut être liée en particulier à la forte teneur en sulfates, immédiatement en dessous de la couche de mâchefers (60-70 cm), et au contact avec le niveau limoneux (80-100 cm).

Les teneurs en aluminium et fer sont très fortes ici aussi, en particulier dans les niveaux limoneux (80 à 120 cm). La concentration en aluminium peut largement dépasser la propre concentration des MIOM, mais elle reste similaire à celle du sol témoin aux mêmes niveaux. La teneur en manganèse est forte aussi dans les niveaux supérieurs mais décroît avec la profondeur.

Sur tout le profil, on note de fortes concentrations en chrome et zinc, qui dépassent toujours le 9<sup>e</sup> décile (nettement dans le niveau 100-120 cm), tout en restant bien en dessous des valeurs limites d'intervention. L'accroissement en nickel est fort dans les niveaux limoneux. Les concentrations en chrome, nickel et zinc sont nettement plus fortes dans les niveaux limoneux que dans les niveaux sableux. On n'observe pas ceci pour le cadmium, le cuivre et le plomb.

## Conclusion

Ces deux inspections de chaussées ont permis, pour la première fois, une approche de la durabilité mécanique (déflexion et densité en place) et de l'impact environ-

nemental (qualité des sols) de couches de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, mises en conditions réelles d'utilisation durant plus de vingt ans. Par ailleurs, des essais de laboratoire, mécaniques et environnementaux, ont permis de caractériser ces matériaux par rapport aux références actuelles. Une méthode d'étude spécifique a été conçue et testée pour conduire ces inspections.

Malgré leur âge, leur structure assez particulière découverte au moment des excavations, et leurs conditions de mise en œuvre, ces chaussées ont montré un bon comportement mécanique en tant que chaussées souples (déflexion). Les anciennes difficultés de mise en œuvre de ces matériaux, mentionnées par les opérateurs, sont révélées par la dispersion des mesures de densité en place.

Comme les MIOM produits aujourd'hui, les deux anciens mâchefers ont montré leur tendance à rentrer spontanément dans une courbe enveloppe standard de grave non traitée.

L'essai Proctor modifié a mis en évidence une grande variabilité pour ce qui est supposé être le même matériau (La Teste). Une telle dispersion peut s'expliquer, en particulier, par l'hétérogénéité du matériau liée aux caractéristiques variables des déchets incinérés.

Toutefois, pour ce qui est des propriétés de portance, pour un matériau donné, la dispersion ne semble pas être aussi grande (La Teste). De plus, à l'OPM, les deux matériaux étudiés présentent de très bonnes caractéristiques pour des graves non traitées, tant dans

le domaine des terrassements que dans le domaine des chaussées. Par contre, les deux matériaux ont montré une grande sensibilité de leurs propriétés de portance à la teneur en eau. Des variations de 1 % de la teneur en eau produisent des effets très importants et un excès d'eau de moins de 3 % par rapport à l'OPM peut les rendre totalement inutilisables.

Toutes ces observations sont cohérentes avec les commentaires généralement faits par les utilisateurs de MIOM.

Les deux vieux mâchefers étudiés répondent aux exigences réglementaires actuelles pour l'utilisation en construction routière. De plus, leur fraction soluble est faible comparée à celle de mâchefers de fraîche production (plomb, zinc), en particulier grâce à leur pH bien inférieur. Cet abaissement de pH comparé à celui de jeunes mâchefers peut expliquer un relargage sensiblement accru en cadmium.

La couche de MIOM semble influencer le sol sous-jacent dans les premiers centimètres (augmentation du pH du sol, augmentation de la conductivité, principalement due aux sulfates). On ne peut toutefois pas exclure un minimum de mélange au contact entre les deux couches à la construction. L'aluminium est généralement bien représenté dans le sol sous-jacent et montre une légère augmentation due à sa migration à partir de la couche de mâchefers, vraisemblablement dans les premiers temps, lorsque sa solubilité était supérieure.

Le sol, en particulier dans les niveaux ayant les teneurs les plus fortes en argile, semble avoir gardé des traces

de migrations de zinc, chrome, nickel et plomb à partir de la couche de MIOM. Le zinc et le chrome dépassent souvent le 9<sup>e</sup> décile des teneurs ordinaires des sols naturels. De ce constat, on peut faire l'hypothèse que ces métaux ont pu avoir une plus grande mobilité dans les premiers temps, et que leur dispersion a pu être plus grande dans le sol drainant de La Teste que dans celui du Mans. Toutefois, faute de données sur la qualité des eaux, à partir de ces deux seuls sites on ne peut en conclure d'avantage en termes de transfert de polluants. Quoi qu'il en soit, même là où les éléments chimiques ont été plus retenus, en particulier les éléments traces, leurs concentrations sont toujours très inférieures aux valeurs limites de pollution.

L'état actuel des chaussées et de leur environnement est dans l'ensemble satisfaisant. Les propriétés mécaniques répondent bien aux attentes des utilisateurs et il n'y a pas d'impact significatif sur le sol sous-jacent. Ces résultats mécaniques sont d'autant plus intéressants que l'on considère les conditions initiales de mise en œuvre. Les matériaux utilisés sur chaque site n'ont subi aucune préparation particulière. Ni le dimensionnement de la chaussée, ni la technique de mise en œuvre, n'étaient particulièrement adaptés à ce matériau hors norme.

Bien que les résultats observés à La Teste et au Mans nous donnent une idée cohérente et plutôt positive de ce qui peut advenir à long terme à partir de conditions initiales peu favorables, d'autres inspections de chaussées seront nécessaires pour tirer des conclusions définitives sur les conditions d'utilisation des mâchefers en construction routière.

---

**Remerciements.** Cette étude a été co-financée par la Commission Européenne (DG VII) dans le cadre du projet Alt-Mat (programme Transport). Les auteurs remercient les services techniques de la Communauté Urbaine du Mans et du District Sud Bassin d'Arcachon, ainsi que les laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées d'Angers et de Bordeaux pour leur aide lors de la réalisation de ce travail.

---

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

ADEME (1993), *Valorisation des déchets dans le bâtiment et les travaux publics*, Dossier 2142-9-003, juin, 119 pages.

AFNOR (1992), *Recueil de normes françaises, Granulats*, 361 pages.

AFNOR (1995), *Recueil de normes françaises, Chaussées, Vol. 1, Assises de chaussées et Vol. 4, Essais relatifs aux chaussées*, 554 pages et 567 pages.

AFNOR (1996), *Recueil de normes françaises, Qualité des sols*, 534 pages.

AFNOR (1997), *Recueil de normes françaises, Qualité de l'eau, Tomes 2 et 3, Méthodes d'analyse*, 328 pages et 372 pages.

AFNOR (1998), *Recueil de normes françaises, Géotechnique, Tome 1, Essais en laboratoire*, 535 pages.

BAIZE D. (1997), *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols* (France), INRA éditions, Paris, 409 pages.

CHARLOT G. (1969), *Les réactions chimiques en solution, l'analyse quantitative minérale*, Masson, Paris, 468 pages.

LCPC (1985), *Détermination des masses volumiques en place par gammadensimètre à pointe, Méthode d'essai LPC 8*, Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, 15 pages.

LCPC (1997a), *Relevé des dégradations de surface des chaussées, Méthode d'essai LPC 38-2*, Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, 47 pages.

LCPC (1997b), *Études routières – Déformabilité de surface des chaussées*, Exécution et exploitation des mesures,

Méthode d'essai LPC **39**, Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, 67 pages.

MARCHAL Th. (1995), Des MIOM pour le chantier de la déviation de Malzéville, *Revue générale des routes et Aéro-dromes*, **729**, mai, pp. 35-38.

RAIMBAULT G., SILVESTRE P. (1990), Analyse des variations de l'état hydrique dans les chaussées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **167**, pp. 23-30.

SETRA (1997), Note d'information, CD 103, *Utilisation des mâchefer d'incinération d'ordures ménagères en technique routière*, 6 pages.

SILVESTRE P., RAMPIGNON J.-P. (1995), Valorisation en structure routière du mâchefer d'incinération d'ordures ménagères de l'usine de Lyon-Sud, *TSM*, **5**, mai, pp. 427-430.

SPIERENBURG A., DEMANZE Ch. (1995), Pollution des sols, Comparaison-application de la liste néerlandaise, *Environnement et Techniques*, **146**, mai, pp. 79-81.