

# XXII<sup>e</sup> Congrès Mondial de la Route

## Proposition de Communication au TS1 - Comité C7/C8 – Innovation pour améliorer notre environnement

**Titre : Les techniques de valorisation routière des mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM).**

L'expérience d'une entreprise routière

**Auteur : Honoré GOACOLOU – Entreprise EUROVIA**

18, Place de l'Europe  
92565 Rueil Malmaison Cedex

Tel : 01 47 16 45 73

Fax : 01 47 49 19 70

E-mail : [hgoacolou@eurovia.com](mailto:hgoacolou@eurovia.com)

En France, la politique de gestion des déchets dans le cadre du développement durable génère des actions de recherche pour la valorisation des déchets. La route, grosse consommatrice de matériaux, offre des possibilités que les acteurs de la construction routière ont explorées.

Cette communication présente l'expérience d'une entreprise routière dans le domaine de la valorisation des MIOM. Après avoir présenté les enjeux de la valorisation des MIOM, le document abordera successivement :

- les caractéristiques géotechniques et environnementales des MIOM,
- leur pathologie au travers d'une expérience d'une dizaine d'années,
  - les voies pour une amélioration du matériau, tant au plan géotechnique qu'environnemental par des traitements aux liants hydrauliques ou bitumineux.

Enfin pour terminer, on présente une gamme de matériaux et leur domaine d'emploi, tous à base de MIOM. Il s'agit :

- de grave de mâchefer élaboré et calibré, destinée à être utilisée en remblai ou en sous couche de chaussée,
- de mâchefer traité aux liants hydrauliques destiné aux couches de forme et de fondation,
- de mâchefer traité à la mousse de bitume pour la réalisation de couche de base,
- enfin des bétons de mâchefers qui trouvent des applications spécifiques en comblement de tranchées d'assainissement ou d'élargissement de chaussées.

Ces produits, résultat d'un effort soutenu de recherche, illustrent les débouchés d'une filière de valorisation maîtrisée au plan technique et économique.

## 1. Introduction

Les mâchefers en technique routière étaient traditionnellement utilisés pour réaliser des pistes de chantier. Aujourd'hui, leur domaine d'emploi a bien évolué grâce à une préparation minimale, déferraillage et criblage, du mâchefer brut. La circulaire de mai 94 précise en effet que le mâchefer à faible fraction lixiviable peut être utilisé, sous certaines conditions, en remblai, en couche de forme et couches d'assise de chaussées. Outre l'aspect environnemental, abordé par la circulaire ministérielle citée supra, qui restreint leur usage, l'application stricte des critères géotechniques habituels réduit encore fortement leur domaine d'emploi. Ainsi une amélioration de la qualité des MIOM s'avère très souvent nécessaire. Cette amélioration peut donc être envisagée sous les deux aspects, environnemental et géotechnique. Dans le premier cas, il s'agit de réduire l'impact sur le milieu naturel et dans le second d'augmenter les performances mécaniques. L'amélioration de la qualité des MIOM permet un domaine d'emploi potentiel plus large et il en découle : (a) une meilleure valorisation du matériau en l'utilisant en couches d'assise de chaussée pour une gamme de trafics élargie, (b) une moindre consommation de granulats naturels nobles. Ainsi, les avantages attendus sont de deux ordres, la réduction de l'impact direct et indirect sur l'environnement et la réduction des coûts globaux de gestion des MIOM par une augmentation de la valeur ajoutée des produits ainsi élaborés.

## 2. Caractéristiques des mâchefers

### 2.1. Caractéristiques géotechniques

A titre d'exemple, une étude menée sur 8 sites d'élaboration de MIOM dont un à l'étranger a permis de caractériser le mâchefer à la sortie des installations de préparation. A travers les principaux paramètres géotechniques utilisés pour caractériser les matériaux il apparaît que les MIOM présentent des qualités moyennes inférieures à celle des matériaux traditionnels.

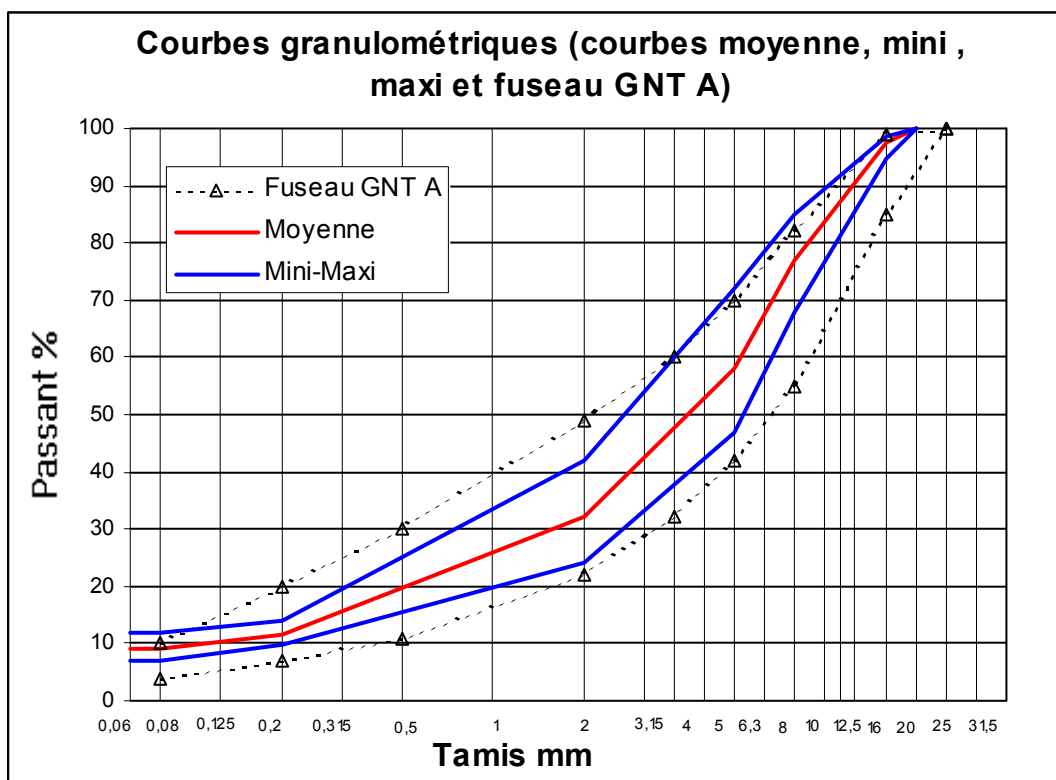
Le tableau 1 donne les valeurs moyennes et extrêmes mesurées sur des échantillons en provenance de ces 8 sites.

Paramètre	Masse Volumique	L.A.	M.D.E.	Equivalent Sable	V.B.S.
Moyenne	2,35	41	34	44	0,03
Mini	2,25	36	26	38	0,02
Maxi	2,46	49	39	49	0,05

**Tab. 1 - Caractéristiques géotechniques de mâchefers issus de 8 sites.**

La masse volumique réelle des MIOM est faible par rapport aux granulats naturels ce qui en fait un matériau plutôt léger. En terme de dureté, les essais Los Angeles (L.A.) et Micro Deval en présence d'Eau (M.D.E.) les classent en limite supérieure de la catégorie E<sup>1</sup> de la norme granulats (XP P 18 540 [1]). Malgré un Equivalent de Sable peu élevé, la Valeur au Bleu de méthylène d'un Sol (VBS) très faible est caractéristique d'un matériau exempt d'argile. Leurs courbes granulométriques montrent (figure 1) qu'il s'agit de graves 0/20 bien graduées dont le fuseau enveloppe entre dans le fuseau des Graves Non Traitées 0/20 de type A de la Norme NF P 98-129 [2]

<sup>1</sup> Les granulats sont classés par ordre décroissant de qualité de A à F. La classe E est caractérisée par : (L.A. < 45 ; M.D.E. < 45 ; L.A. + M.D.E. < 80).



**Fig. 1 - Courbes granulométriques des mâchefers**

Leurs caractéristiques à l'Optimum Proctor Modifié (Norme NF P 94 093 [3]), 12 % < teneur en eau < 16 % et  $1,75 \leq$  masse volumique apparente sèche < 1,90, en font des matériaux particuliers. Enfin, l'Indice Portant Immédiat,  $30 < IPI > 60$  caractérise un matériau relativement stable qui présente, néanmoins une sensibilité aux excès d'eau lors de sa mise en place. Leur utilisation potentielle, définie par le Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme [4] et par le Guide Technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France (MIOM) [5], montre que leur emploi est uniquement envisagé sous sa forme non traitée et que d'autre part leur domaine d'emploi est limité aux couches d'assise de chaussée à très faible trafic .

## 2.2. Caractéristiques environnementales

La valorisation des mâchefers en technique routière est subordonnée à la non-pollution du milieu naturel. Actuellement les critères environnementaux à respecter sont définis par la circulaire du ministère de l'environnement de mai 1994 qui donne une grille de classification des mâchefers en fonction des teneurs en éléments polluants contenus dans le mâchefer ou relargués au cours d'un essai de lixiviation]°(tableau 2).

	Unités	Mâchefers "V"	Mâchefers "M"	Mâchefers "S"
Taux d'imbrûlés <sup>1</sup>	%	< 5	< 5	> 6

<b>Fraction soluble<sup>2</sup></b>	%	< 5	< 10	> 10
<b>Hg lixiviable<sup>2</sup></b>	mg/kg	< 0,2	< 0,4	> 0,4
<b>Pb lixiviable<sup>2</sup></b>	mg/kg	< 10	< 50	> 50
<b>Cd lixiviable<sup>2</sup></b>	mg/kg	< 1	< 2	> 2
<b>As lixiviable<sup>2</sup></b>	mg/kg	< 2	< 4	> 4
<b>Cr<sup>6+</sup> lixiviable<sup>2</sup></b>	mg/kg	< 1,5	< 3	> 3
<b>SO<sup>2-</sup><sub>4</sub> lixiviable<sup>2</sup></b>	mg/kg	< 10 000	< 15 000	> 15 000
<b>COT lixiviable<sup>2</sup></b>	mg/kg	< 1 500	< 2 000	> 2 000

**Tab. 2 - Catégories de mâchefers en fonction de leur potentiel polluant selon la circulaire du 9 mai 1994 : (1) quantifié par calcination sur solide, (2) quantifié après lixiviation normée NF/X31-210 [6] sur la solution obtenue et ramené en poids par rapport au poids de solide initial.; V, valorisable; M, Maturable; S, Stockable.**

Aux termes de la circulaire, les mâchefers de catégorie S sont inutilisables et doivent être stockés en centre technique de classe II. A l'opposé, les mâchefers de catégorie V sont utilisables tel quels. La catégorie M intermédiaire peut être utilisée moyennant un traitement spécifique préalable permettant son classement en catégorie V. Ce traitement peut être une simple opération de maturation mais peut aussi comporter une stabilisation chimique selon divers procédés.

### **3. Les voies d'amélioration**

#### **3.1. Au plan géotechnique**

L'amélioration des caractéristiques géotechniques d'un matériau comme le mâchefer, aux caractéristiques de dureté et de résistance à l'attrition modestes, peut être envisagée de trois manières :

- Soit par un traitement avec un liant, en général hydraulique ou hydrocarboné. La forte augmentation de la cohésion du matériau ainsi lié permet de compenser en partie ou totalement l'insuffisance de certaines caractéristiques géotechniques.
- Soit par une correction granulaire par ajout de gravillons plus durs.
- Soit par la recherche d'une synergie avec un autre matériau voire un autre déchet. Ainsi, un ajout de MIOM aux "Graves de mer" sans fines pallie à l'insuffisance de fines et la grave à l'insuffisance de dureté des mâchefers. De même, un ajout à du sable fin traité aux liants hydrauliques permet une correction granulaire et confère au mélange une stabilité immédiate suffisante pour une mise en œuvre facilitée et permet un trafic de chantier sans altération du matériau.

#### **3.2. Au plan environnemental**

Deux voies sont en général considérées pour réduire le potentiel polluant des mâchefers, la voie physique et la voie chimique. La voie physique consiste à solidifier le mâchefer par ajout d'un liant. Cette méthode permet d'emprisonner les éléments polluants dans une matière solide à faible perméabilité par enrobage ou encapsulation. La voie chimique cherche à

stabiliser les éléments polluants en les immobilisant par des liaisons chimiques fortes dans des complexes non hydrolysables en milieu alcalin ou acide.

### **a. Traitement par un liant hydraulique**

Ce type de traitement permet de bénéficier des effets de la solidification et de la stabilisation chimique par piégeage des éléments polluants dans les différentes phases minérales formées (silicates, hydrates, carbonates...). Ce piégeage peut se faire selon plusieurs modes :

- par précipitation de phases minérales incorporant les éléments polluants,
- par adsorption sur les nouvelles surfaces créées,
- par échange d'ions localisés dans des sites privilégiés.

En pratique, le traitement avec un liant hydraulique permet de diviser par deux environ la concentration des principaux polluants dans les lixiviations. Un exemple est donné dans le tableau 3.

### **b. Traitement au bitume**

Le bitume a uniquement un effet physique d'enrobage et de densification du matériau qui limite sa perméabilité et donc la migration des polluants. Bien que relativement moins efficace que le traitement aux liants hydrauliques, cette technique permet aussi une réduction de la concentration des polluants dans les lixiviats (tab. 3).

Analyses	Unité	Traitement aux liants hydrauliques			Traitement à la mousse de bitume		
		Mâchefer Seul	Mâchefer traité	Atténuation	Mâchefer seul	Mâchefer traité	Atténuation
F. soluble	%	2,23	0,56	0,25	2,29	1,24	0,55
C.O.T	mg/kg	200	117	0,59	482	272	0,56
Sulfates	mg/kg	11810	1410	0,12	2077	1205	0,58
Cr(total)	mg/kg	0,15	0,15	-	0,27	0,15	0,55
Mercure	mg/kg	0,03	0,03	-	0,03	0,03	-
Plomb	mg/kg	0,03	0,03	-	0,03	0,03	-
Cadmium	Mg/kg	0,06	0,03	-	0,06	0,03	-
Arsenic	Mg/kg	0,03	0,03	-	0,03	0,03	-

**Tab. 3 - Incidence des traitements sur le relargage des polluants.**

## 4. Pathologie des mâchefers

L'utilisation de mâchefers en couches d'assise de chaussées sans précautions particulières peut conduire à des désordres spécifiques au mode de traitement.

### 4.1. Les constatations

Sur des mâchefers non traités utilisés comme Grave Non Traitée sous une couverture bitumineuse de faible épaisseur, des gonflements de "masse" de quelques % et des gonflements ponctuels ont pu être constatés. Ces derniers ont un diamètre variable de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres en fonction de l'épaisseur de la couverture bitumineuse et une hauteur pouvant atteindre 2 à 3 cm.

Pour les mâchefers traités aux liants hydrauliques les pathologies sont différentes. Ainsi les désordres rencontrés sont de trois types :

- des phénomènes de non prise ou des résistances mécaniques très faibles,
- de la fissuration sur des mélanges ayant bien développé leur prise,
- des pertes de résistances mécaniques après quelques mois.

Sur les mâchefers traités au bitume recouverts d'une faible couverture bitumineuse, seules des gonfles de surface ont pu être constatées (fig. 2). Elles sont très semblables à celles constatées sur les mâchefers non traités.



Fig. 2 - Aspect d'une gonfle

### 4.2. Les causes

#### a. Les gonflements et fissuration

Diverses investigations réalisées sur les gonflements ponctuels et éprouvettes fissurées permettent d'attribuer la cause à la présence de particules d'aluminium de taille centimétrique. Ces particules, par corrosion de l'aluminium dans un contexte électrochimique favorable, se transforment en hydroxydes très expansifs (fig. 3).

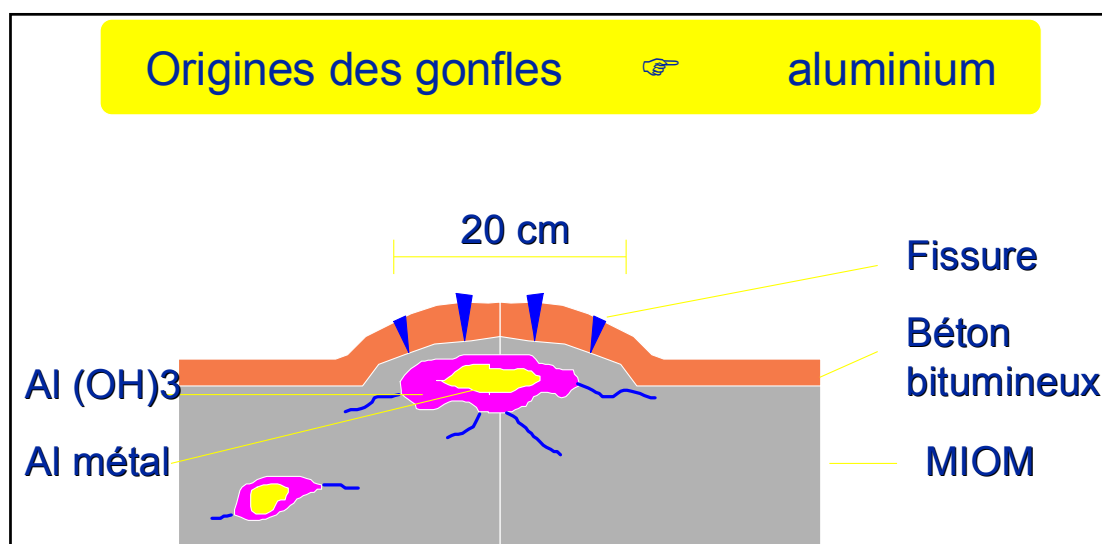


Fig. 3 - Schéma de la formation d'une gonfle.

### b. Les phénomènes de non prise

Les interactions entre le liant hydraulique et les composants du mâchefer sont très complexes et les causes sont sans doute multiples. Parmi celles-ci, la maturation effective du mâchefer semble importante comme le montre la figure 4. Le graphique montre l'incidence du temps de maturation du mâchefer avant son traitement par un ciment sur la résistance en traction après 14 jours de conservation des éprouvettes.

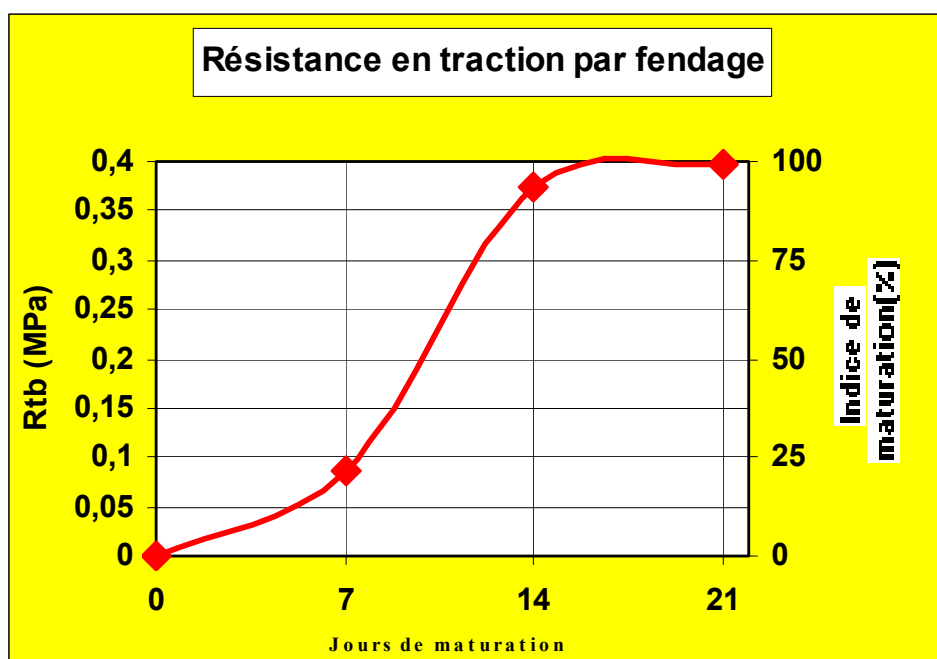


Fig. 4 - Incidence de la maturation (ici accélérée) sur la prise des mâchefers traités aux liants hydrauliques.

### **4.3. Les solutions**

#### ***a. Vis à vis des gonflements***

Une première solution consiste à séparer les particules métalliques d'aluminium du mâchefer à l'aide de machines à courants de Foucault. Cette opération peut être limitée à la fraction grossière, 6/D par exemple, qui contient les particules incriminées. La seconde consiste à s'assurer que le mâchefer dans la chaussée soit recouvert par au moins 15 cm d'autres matériaux. Cette épaisseur est en général suffisante pour éviter toute apparition de gonfles en surface.

#### ***b. Vis à vis de la fissuration et des pertes de résistances des matériaux traités aux liants hydrauliques***

La solution passe par la séparation de l'aluminium comme indiqué ci-avant pour les gonfles.

#### ***c. Vis à vis des phénomènes de non prise***

Pour limiter le risque que le matériau ne fasse pas prise, il y a lieu de lui assurer une bonne maturation et de choisir un liant adapté.

### **5. Les techniques d'amélioration**

#### **5.1. Elaboration de Graves Non Traitées (GNT)**

Il s'agit d'une préparation plus élaborée que celle prévue par la circulaire de mai 94. Elle comporte des opérations de concassage, de criblage, de déferrailage à deux niveaux et de séparation des métaux non ferreux et des fractions légères imbrûlées. Le résultat est une grave non traitée bien calibrée 0/20 ou 0/31,5 de classe A de la norme NF P 98-129 ayant une bonne stabilité dimensionnelle .

#### **5.2. Traitement aux liants hydrauliques**

Deux techniques existent : la technique des MTLH (Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques et compactés) et la technique des bétons de ciment.

##### **a. La technique MTLH**

Les principaux liants utilisés sont soit des ciments Portland, soit des liants Spéciaux Routiers, soit encore des liants spécifiques.

La teneur en liant, en général comprise entre 5 et 8 %, dépend de la nature du liant, du mâchefer lui-même, et de la classe de performances mécaniques visée.

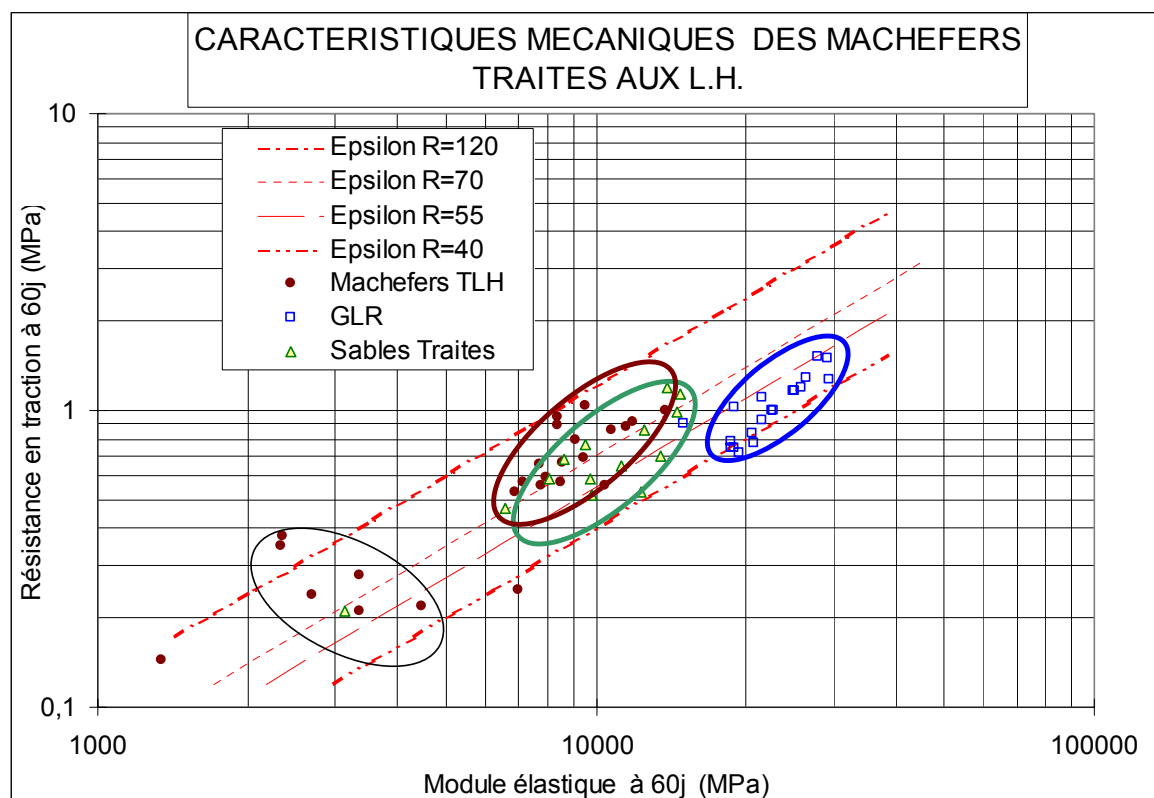
A titre d'exemple, les caractéristiques mécaniques obtenues avec différents liants et dosages sont données dans le tableau 4 où elles sont comparées avec celles de graves et de sables traités.



PARAMETRES	Valeurs moyennes		
	G.T.L.H.	Mâchefer T.L.H.	S.T.L.H.
Résistance en traction (MPa)	1,03	0,57	0,69
Module élastique (MPa)	22 500	7 100	10 500
Déformation à la rupture	$46 \cdot 10^{-6}$	$85 \cdot 10^{-6}$	$66 \cdot 10^{-6}$

**Tab. 4 : Caractéristiques mécaniques moyennes à 28 j (ciment) ou 60 j (Liant Spécial Routier); G.T.L.H., Graves Traitées aux Liants Hydrauliques; S.T.L.H., Sables Traités aux Liants Hydrauliques.**

Les mâchefers T.L.H. se caractérisent par des résistances et surtout des rigidités nettement plus faibles que celles des GTLH. Ils s'apparentent de ce point de vue aux sables traités (STLH) comme le montre le diagramme de la figure 5 où est représenté l'ensemble des résultats de chacune des trois familles.



**Fig. 5 - Comparaison des caractéristiques mécaniques des mâchefers T.L.H. aux Graves et aux Sables T.L.H.**

Les mâchefers traités aux liants hydrauliques se classent ainsi en catégorie S2 et S3 de la classification des STLH (Norme NF P 98 113 [7]) en fonction de la teneur en liant du mélange.

### **b. Les bétons de mâchefers**

La technique béton de ciment permet de réaliser des produits destinés à la route :

- des bétons auto-plaçants excavables (donc à faible résistance) pour tranchées d'assainissement conformes aux spécifications du Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU),
- des bétons auto-compactants à résistance plus élevée pour couche de forme ou de fondation pour des applications où le compactage des matériaux est difficile, sols de faible portance ou fond de forme de faible largeur ne permettant l'accès qu'aux petits compacteurs.

### 5.3. Traitements au bitume

Les techniques d'enrobage à chaud et à froid sont applicables aux mâchefers. En France, la préférence va néanmoins aux techniques à froid.

#### a. Enrobage à chaud

Les essais de formulation de grave bitume ont montré des difficultés pour réaliser des formules avec du mâchefer uniquement. La tenue à l'eau de l'enrobé obtenu est très médiocre ( $r/R$  (voir tableau) = 0,15 alors que les spécifications prévoient des valeurs > 0,6). Cette contrainte conduit à ne retenir que des formules mixtes composées de mâchefers et de granulats naturels. Par ailleurs, la nécessité de chauffer les granulats, en général à flamme directe, peut être source de nuisances supplémentaires.

#### b. Enrobage à froid

Deux techniques de traitement existent, la première à l'émulsion et la seconde à la mousse de bitume. Ces deux techniques permettent, contrairement à la technique à chaud, de respecter les spécifications performantielles de la norme correspondante. Le tableau 5 compare les trois techniques au travers des résultats d'essais Duriez<sup>2</sup> (NF P 98 251-1 [8][9])

MATERIAUX	MACHEFER			GRANULATS NATURELS		
	Grave-bitume	Grave-émulsion	Grave-mousse	Grave-bitume	Grave-émulsion	Grave-mousse
Bitumes résiduel (ppc)	4,20	4,02	3,31	4,20	3,50	3,57
Module de richesse K <sup>3</sup>	2,52	2,42	1,80	2,52	2,12	2,13
Résistance à la compression (MPa)						
- Rc air	2,6	3,6	4,05	5,7	5,1	4,1
- rc eau	0,4	2,3	2,26	4,0	3,2	2,63
Tenue à l'eau (rc/Rc) (voir texte)	0,15	0,64	0,56	0,70	0,63	0,64

**Tab. 5 : Performances mécaniques comparées de mâchefers et de granulats naturels selon trois techniques de traitement au bitume**

<sup>2</sup> Essai Duriez : l'essai consiste à écraser des éprouvettes cylindriques après 8 j de conservation, soit à l'air libre, soit dans de l'eau. Le rapport entre les résistances en compression rc (conservation dans l'eau) et Rc (conservation dans l'air) traduit la sensibilité à l'eau du matériau.

<sup>3</sup> K grandeur proportionnelle à l'épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les granulats- (NF P 98 149 [10])

## 6.Exemple d'une gamme de produits développés par une entreprise

A l'exemple d'une entreprise, à travers son savoir faire né d'une recherche soutenue sur les MIOM, est développée une gamme de produits permettant de couvrir un domaine d'emploi aussi large que possible (tab. 6). Avant traitement les mâchefers font l'objet d'une extraction des métaux non ferreux et sont mis en œuvre dans le respect des solutions identifiées.

Produits	Traitement type de matériaux	Domaine d'emploi	
		Fonctionnalités	Trafic
SCORGRAVE	Sans liant GNT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• remblai</li> <li>• couche de forme</li> <li>• couche de fondation</li> </ul>	Tout trafic Tout trafic Faible trafic
SCORCIM	Liants hydrauliques MTLH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• couche de forme à haute performance conduisant à des plate-formes PF3 ou PF4</li> <li>• couche de fondation de structures mixtes.</li> </ul>	Tout trafic  Tout trafic
SCORSABLE	Sable fin corrigé par du mâchefer + L.H. MTLH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• couche de fondation</li> </ul>	Tout trafic
SCORMOUSSE	Mousse de bitume Mat. bitumineux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• couche de fondation</li> <li>• couche de base</li> </ul>	Tout trafic Moyen et faible
SCORCAN	Liants hydrauliques Béton de ciment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• excavable pour comblement des tranchées d'assainissement</li> </ul>	Tout trafic
SCORCAN PR	Liants hydrauliques Béton de ciment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• à résistances élevées pour poutres de rives dans le cadre d'élargissement de chaussées.</li> </ul>	Tout trafic

**Tab. 6 - Domaine d'emploi de la gamme SCORMAT**

## 7. Conclusions

Il y a encore quelques dizaines d'années, les "mâchefers gamelles" étaient utilisés pour réaliser des pistes de chantier. Depuis, la qualité des MIOM a bien évolué. La circulaire de mai 94 a marqué une étape importante en définissant des conditions minimales de préparation et un domaine d'emploi associé restreint aux chaussées à faible trafic.

Les efforts de recherche de ces dernières années, qui ont été axés sur :

- la préparation des MIOM,
  - la mise au point de nouveaux produits de meilleure qualité géotechnique et environnementale,
  - la meilleure connaissance de l'impact réel des ouvrages en MIOM sur le milieu naturel,
- portent leurs fruits.

Les débouchés sont de plus en plus nombreux puisque le domaine d'emploi n'exclut plus que les couches de roulement et les forts trafics pour les couches de base.

## Références :

- [1] XP P 18-540 <>Granulats Définitions, conformité, spécifications
- [2] P 98-129 <>Graves non traitées Définition - Composition - Classification
- [3] P 94-093 <>Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié
- [4] Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme septembre 1992 (SETRA-LCPC)
- [5] Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France .Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. Novembre 1998.
- [6] XP X 31-210 <>Déchets Essai de lixiviation
- [7] P 98-113 <>Assises de chaussées sables traités aux liants hydrauliques & pouzzolaniques
- [8] P 98-251-1 <>Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés PARTIE 1 : ESSAI DURIEZ SUR MELANGES HYDROCARBONES A CHAUD
- [9] P 98-251-4 P 98-251-4 <>Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés PARTIE 4 : ESSAIS DURIEZ SUR MELANGES HYDROCARBONES A FROID A L EMULSION DE BITUME
- [10] P 98-149 <>Enrobés hydrocarbonés Terminologie Composants & composition des mélanges Mise en oeuvre produits Techniques & procédés