

Caractérisation du comportement mécanique d'un mâchefer dans la perspective d'une méthodologie de dimensionnement adaptée aux structures de chaussées

Frédéric BECQUART

Département Génie Civil – Ecole des Mines de Douai – 59508 Douai Cedex, France

RESUME. Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) constituent des matériaux granulaires atypiques, puisque ces sous-produits industriels sont issus de la combustion des déchets ménagers. La filière de valorisation de ces déchets s'inscrit essentiellement aujourd'hui en techniques routières, en tant que matériaux de substitution aux graves naturelles classiquement utilisées dans ce domaine. A ce titre, la caractérisation du comportement mécanique du matériau pour ce champ d'application – qui demeure actuellement peu développée – s'avère indispensable si l'on souhaite pérenniser cette filière de valorisation, assurant ainsi la transition MIOM « déchet » / MIOM « matériau ». Dans ce contexte, une étude approfondie du comportement mécanique d'un mâchefer a été menée au département Génie Civil de l'Ecole des Mines de Douai : des dispositifs et des méthodologies spécifiques ont été mis en place pour la réalisation de tests standards représentatifs (notamment des tests oedométriques et triaxiaux). L'analyse du comportement mécanique restitué permet d'établir une méthodologie de dimensionnement mieux adaptée aux structures de chaussées à base de mâchefers.

MOTS-CLÉS : mâchefer, valorisation, comportement mécanique

ABSTRACT. MSWI bottom ashes constitute atypical granular materials because these industrial by-products are the results from the incineration of domestic waste. The field of beneficial use of these waste mainly lies in the road engineering today, like materials of substitution for the traditional natural aggregates, which are usually used in this field. For this reason, the characterisation of the mechanical behaviour of the material – which is developed currently little – proves to be essential in order to perennialize this field of beneficial use, assuring thus the transition “waste MSWI”/“material MSWI”. In this context, a thorough study of the mechanical behaviour of a MSWI bottom ash has been led to the Civil Engineering department of the “Ecole des Mines de Douai”: special devices and special methodologies were investigated for the realisation of representative standard tests (oedometric tests and triaxial tests). The analysis of the restored mechanical behaviour makes it possible to establish a methodology of road design adapted better to the structures of roadways containing MSWI bottom ashes.

KEYWORDS : MSWI bottom ash, beneficial use, mechanical behaviour

1. INTRODUCTION

Les mâchefers représentent approximativement un quart du produit d'incinération des ordures ménagères. En France, près de 3 millions de tonnes de mâchefers sont produites annuellement. Face à la croissance des déchets ménagers et à des réglementations environnementales de plus en plus strictes, la valorisation de ces matériaux granulaires demeure un véritable enjeu. Les mâchefers sont utilisés en techniques routières depuis quelques décennies déjà, mais leurs utilisations restent toutefois limitées : la transition « MIOM déchet » - « MIOM matériau » est encore sujette à certaines réticences. La circulaire du 9 mai 1994, spécifique à ces matériaux, précise les conditions de valorisation du mâchefer en techniques routières : il ressort d'études antérieures (Bernard, 2003) que le matériau

étudié est valorisable sur les plans environnemental et géotechnique. Cependant, jusqu'à présent, les performances mécaniques du mâchefer sont évaluées par le biais de paramètres de comportement mécanique (Ministère de l'Environnement, 1994). Cette considération apparaît comme trop réductrice, car elle ne permet pas de rendre compte de phénomènes tels que la non linéarité élastique du matériau (typique des matériaux granulaires), l'orniérage (accumulation des déformations permanentes), ou encore des phénomènes de fatigue : or, la prise en compte de tels phénomènes dans le dimensionnement des structures de chaussées s'avère indispensable pour la pertinence et la performance du dimensionnement. Dans ce contexte, une caractérisation approfondie du comportement mécanique du mâchefer pour le domaine d'application est entreprise. Le mâchefer étudié est recomposé suivant une même courbe granulométrique, qui répond au fuseau de spécification des graves non traitées 0/31.5 mm (Becquart, 2006), utilisables en techniques routières. D'autre part, le matériau est compacté suivant l'essai normalisé qui permet de rendre compte des conditions d'exécution de compactage sur chantier. Le matériau est non traité (assimilable à une grave non traitée de calibre 0/20 mm) et traité au ciment (Cibelcor® CEMI 42.5 R HRS LA) suivant des dosages répondant aux références normatives pour les conditions d'utilisation (Ministère de l'Équipement, 1994).

Une première approche du comportement du matériau est menée en réalisant des tests unidimensionnels, à la fois quasi-statiques et cycliques : la non linéarité élastique du matériau est relatée, au même titre que la stabilisation des déformations permanentes obtenue pour un nombre de cycles de chargement élevé. Le comportement en fatigue du matériau est étudié par le biais d'essais de flexion, qui permettent de simuler les sollicitations répétées de traction par flexion exercées par le trafic. Parallèlement, des tests triaxiaux monotones de cisaillement sur le matériau permettent une caractérisation expérimentale plus affinée, avec la mise en évidence de phénomènes caractéristiques des matériaux granulaires initialement denses et faiblement cimentés : ces types d'essais standards permettent d'orienter un choix de modèle de comportement compatible avec les observations expérimentales obtenues. Les propriétés mécaniques réelles du mâchefer sont alors intégrées dans un schéma de dimensionnement spécifiques aux structures de chaussées à base de mâchefers.

2. EXPERIENCE ET RESULTATS

Etant donné la spécificité du mâchefer (notamment la présence de particules très anguleuses), les surfaces d'arase des éprouvettes confectionnées pour tous les essais réalisés font l'objet de dispositions particulières, afin d'assurer au mieux la planéité de ces surfaces et d'assurer ainsi une meilleure mise en contact lors des essais. Dès chargement, un réarrangement granulaire s'opère en tête d'échantillon. Tous les essais sont contrôlés en déplacement.

2.1. COMPORTEMENT SOUS CHARGEMENTS QUASI-STATIQUES

2.1.1. Tests oedométriques sur le matériau non traité

Un dispositif spécifique (figure 1) est conçu afin d'assurer la représentativité des essais, notamment concernant la taille des éprouvettes (figure 1) et le niveau d'intensité de chargement (Becquart, 2005). Quelques cycles de charge-décharge à très faible vitesse de déplacement sont effectués : l'analyse des résultats met en évidence le caractère non linéaire de la déformation élastique en fonction de la contrainte normale appliquée (figure 2) : la déformation élastique est proportionnelle au logarithme de la pression appliquée. De ces essais, l'indice de gonflement κ du mâchefer étudié a pu être estimé : pour tous les essais réalisés, la valeur moyenne de ce paramètre est de l'ordre de 0,0015. D'autre part,

l'indice de compression λ est également estimé par le biais de tests sur des éprouvettes de mâchefers non compactés (un parallélisme semble se dessiner entre la phase normalement consolidée des courbes oedométriques des éprouvettes compactées et celles des éprouvettes non compactées (figure 3)): une valeur moyenne de l'ordre de 0,15 a pu être établie. Les influences des états de compacités et hydriques sont étudiées et ne révèlent pas de variations significatives de ces paramètres (Becquart, 2005). D'autre part, des tests oedométriques semblables à ceux décrits ci-dessus ont été réalisés sur une grave calcaire classique utilisée en techniques routières, de courbe granulométrique similaire à celle du mâchefer étudié : les valeurs des paramètres de compressibilité obtenus pour le calcaire sont similaires à ceux du mâchefer étudié (figure 4).

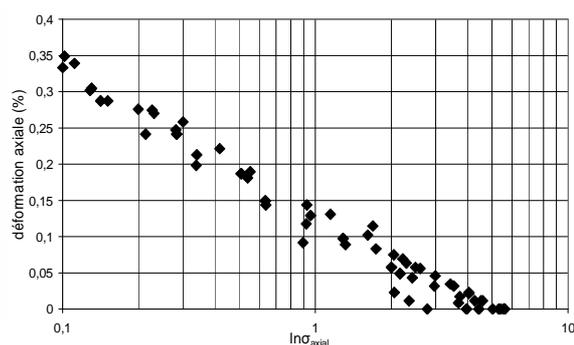


Figure 1: Dispositif expérimental et éprouvette « type ». Figure 2: Elasticité non linéaire du matériau.

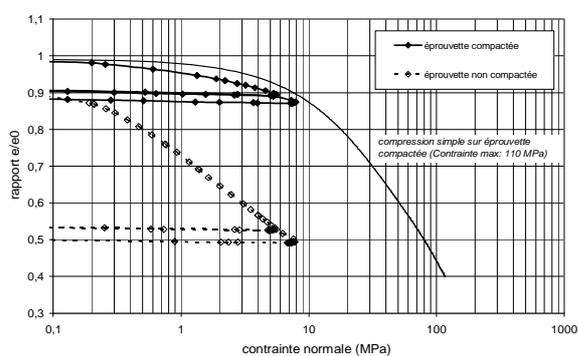


Figure 3: Courbes oedométriques types.

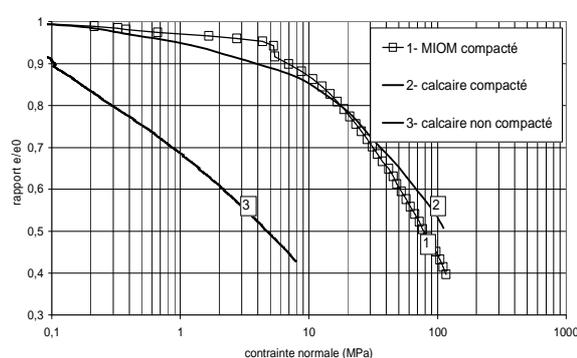


Figure 4: Comparaison MIOM/CALCAIRE.

2.1.2. Comportement sous sollicitations triaxiales de cisaillement

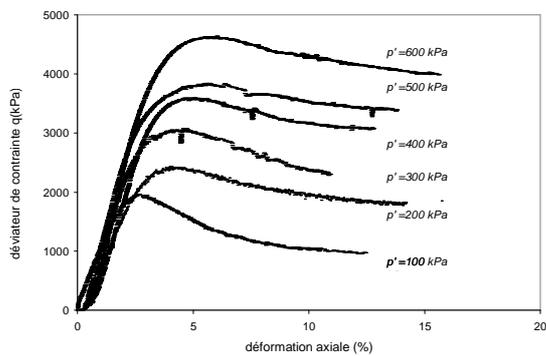
Etant donné la spécificité du mâchefer (matériau granulaire très anguleux et non inerte chimiquement), une méthodologie spécifique (qui résout notamment le problème de perforation de membranes, de saturation) est mise en œuvre afin d'assurer la faisabilité de tels essais. Les tests sont effectués sur des échantillons compactés de 117,5 mm de hauteur et 101,5 mm de diamètre (dimensions des moules sur lesquels sont effectués les compactages, figure 5a), confectionnés à la teneur en eau qui correspond à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Modifié, soit 11%. Le programme d'essais est constitué de tests de cisaillement monotones, effectués à différentes pressions de confinement (figure 6a), et suivant différents degrés de cimentation (mâchefer non traité, 1%, 3%, et 5% de ciment Cibecor®).



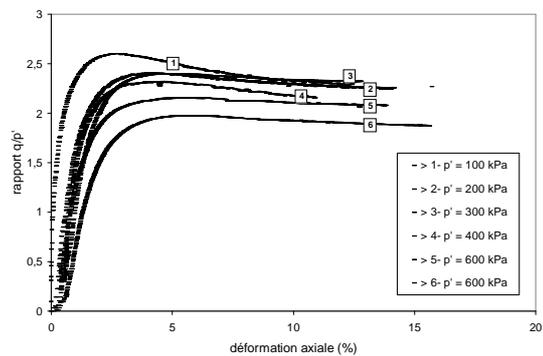
Figure 5: Echantillon « type » avant et après essai triaxial.

On constate qu'en dépit de la nature et de la spécificité du matériau (déchet à l'origine), le mâchefer présente des caractéristiques similaires aux matériaux granulaires initialement denses :

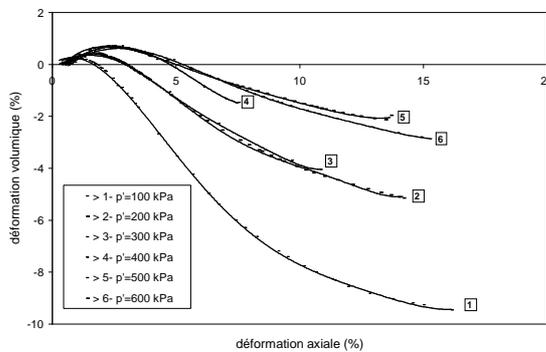
- comportement surconsolidé (partie pré-pic sur les courbes de la figure 6a) ;
- phase de contractance initiale puis dilatance progressive (vers les grandes déformations) : la dilatance est d'autant plus prononcée que la pression de confinement est faible (figure 6c) ;
- module de rigidité dépendant de la pression effective moyenne appliquée (figure 6e) ;
- angle de frottement interne élevé : dans le cas du mâchefer, on obtient un angle de frottement (au pic, $M=2.18$) de l'ordre de 53° , qui se justifie par une morphologie des grains très anguleuses. Cette valeur est compatible avec celles obtenues pour les graves classiques utilisées en techniques routières (Hornych, 1998) ;



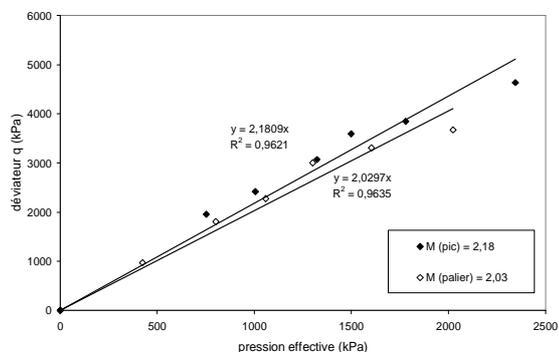
a) Diagramme $q-\varepsilon_a$.



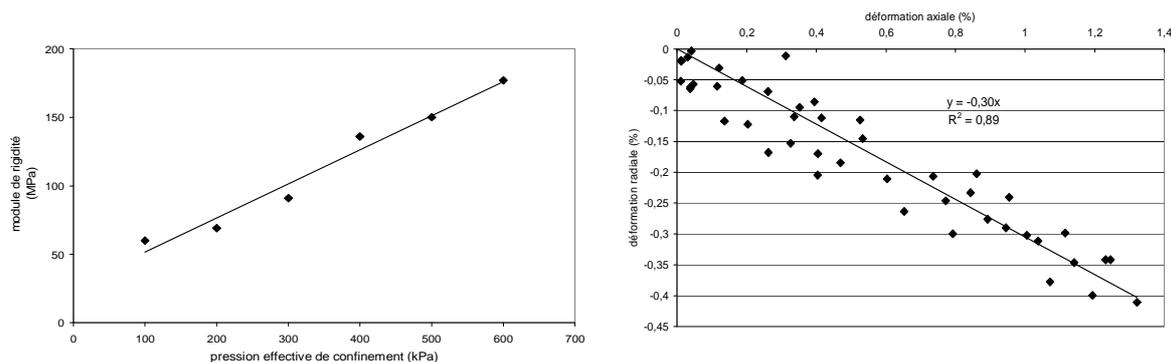
b) Diagramme $q/p' - \varepsilon_a$.



c) Diagramme $\varepsilon_v-\varepsilon_a$.



d) Droites de rupture et d'état critique.



e) Estimation du module de rigidité.

f) Estimation du coefficient de Poisson.

Figure 6 : Résultats d'essais triaxiaux drainés obtenus sur le mâchefer non traité.

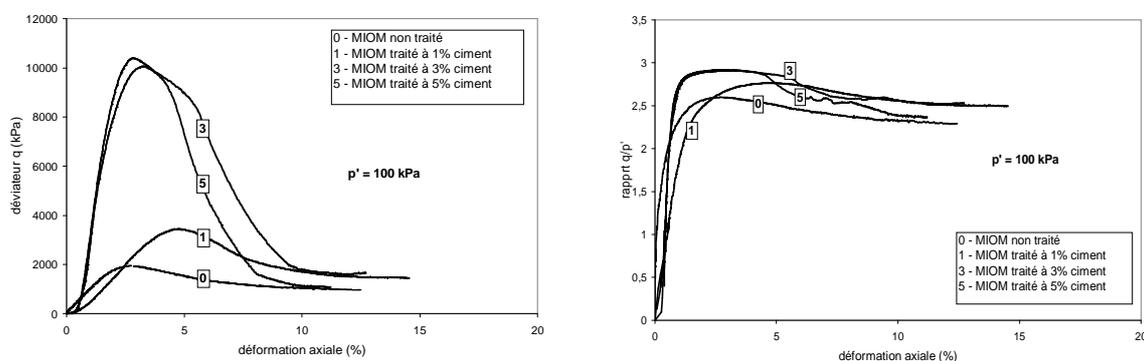
a) Diagramme $q-\varepsilon_a$.b) Diagramme $q/p' - \varepsilon_a$.

Figure 7 : Influence du degré de cimentation (essais triaxiaux drainés, à 28j).

- la cimentation des éprouvettes agit essentiellement sur la cohésion, l'amplitude du déviateur à la rupture, sur le module de rigidité initial (figure 7a) et sur le coefficient de Poisson ; on ne décèle pas de différences notables concernant l'influence de la cimentation sur l'angle de frottement interne du matériau, au pic (droites de rupture sensiblement parallèles dans le diagramme $q-p'$) comme à l'état critique (comparaison des figures 6b et 7b).

L'analyse du comportement global du mâchefer, sous sollicitations oedométriques et triaxiales, met en évidence les notions de régime surconsolidé (caractérisé par une élasticité non linéaire de type « milieux poreux », utilisant un seul paramètre, l'indice de gonflement κ), les concepts d'états caractéristiques (passage contractance / dilatance), de rupture et d'états critiques caractérisés par un rapport de contraintes constant ($M_{pic} \sim 2,18$ et $M_{palier} \sim 2,03$). Une modélisation par le modèle Cam-Clay pourrait être envisagée, voire également modifiée pour la prise en compte du comportement du mâchefer traité.

2.2. TESTS CYCLIQUES

Afin de mieux rendre compte de la réalité in-situ du domaine d'application, des tests unidimensionnels cycliques sont réalisés : la fréquence de sollicitation est de 1Hz, après une phase de conditionnement de 10000 cycles, près de 200000 cycles de chargement-déchargement sont effectués. Pour un nombre de cycles élevé, on constate une stabilisation des déformations permanentes ; d'autre part, l'influence du niveau de contrainte est également mise en évidence (figure 8).

Les lois d'évolution des déformations dépendent donc à la fois du nombre de cycles appliqué et de l'intensité de chargement appliquée. Nous proposons les relations analytiques suivantes, respectivement les lois d'évolution des déformations permanentes ε_p et élastiques ε_e , pour décrire le comportement sous chargements cycliques en conditions oedométriques :

$$\varepsilon_p(N, \tilde{\sigma}) = A_p(N) * \tilde{\sigma}^{B_p(N)} \quad [\text{Eq.1}]$$

$$\varepsilon_e(N, \tilde{\sigma}) = A_e(N) * \tilde{\sigma} + B_e(N) \quad [\text{Eq.2}]$$

avec: N, nombre de cycles appliqués; $\tilde{\sigma} = (\sigma_{\max}^{\text{axial}} - \sigma_{\min}^{\text{axial}})$, amplitude de la contrainte axiale appliquée;

$$A_p(N) = \alpha_p^A N^{\beta_p^A}; B_p(N) = \alpha_p^B N^{\beta_p^B}; A_e(N) = \alpha_e^A - \frac{N}{\beta_e^A}; B_e(N) = \frac{\alpha_e^B}{N^{\beta_e^B}} \quad [\text{Eq.3}]$$

$\alpha_p^A, \beta_p^A, \alpha_p^B, \beta_p^B, \alpha_e^A, \beta_e^A, \alpha_e^B, \beta_e^B$ paramètres déterminés expérimentalement à cohésion, compacité et teneur en eau fixées

Exemple d'application : tests réalisés sur éprouvettes compactées non traitées, d'indice des vides initial $e_0=0.35 \pm 0.05$, de cohésion quasi-nulle et de teneur en eau $w=11\% \pm 1\%$.

α_p^A	β_p^A	α_p^B	β_p^B	α_e^A	β_e^A	α_e^B	β_e^B
1.635	0.025	0.524	0.016	0.103	10^8	0.237	0.071

Tableau 1: Paramètres des formulations analytiques.

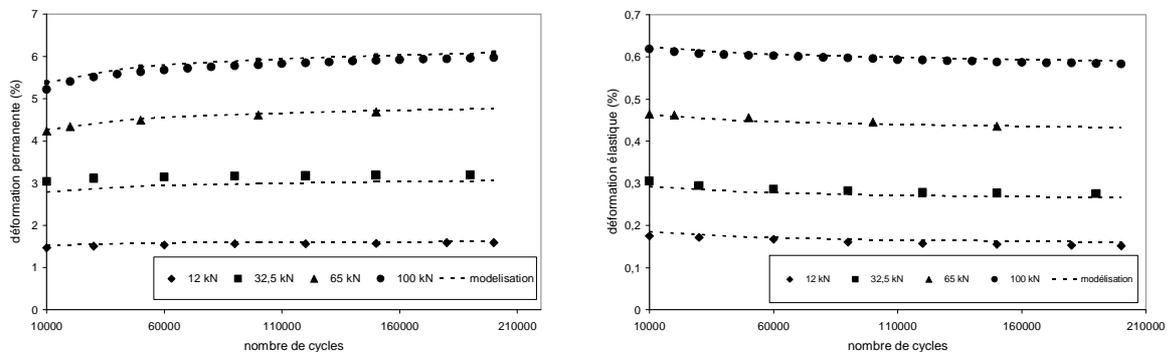


Figure 8: Evolution des déformations permanentes et élastiques : expérience et modélisation.

D'autres tests sont en cours de validation concernant les formulations analytiques proposées, pour des états différents de cohésion et de compacité. La stabilisation des déformations permanentes pour un nombre de cycles élevé constitue une donnée fondamentale, puisque dans la méthode de dimensionnement, l'un des critères retenus repose sur le fait que l'orniérage du sol doit rester inférieur à une valeur de déformation verticale ε_z limite, tenue pour admissible, et du type $\varepsilon_{z,adm} = f(N)$.

2.3. COMPORTEMENT EN FATIGUE DU MATERIAU TRAITE

Tout comme l'orniérage, la fissuration par fatigue d'une structure de chaussée (qui « travaille » en flexion) constitue un de ses principaux modes de dégradation. Dans ce contexte, la faisabilité d'un essai de flexion 3 points a été étudiée sur des éprouvettes de mâchefers traitées (7cm*7cm*28cm) à

5% de ciment Cibelcor®, avec une fréquence de sollicitation de 10Hz ; les essais ont lieu à 28j. La faisabilité de tels essais est avérée, mais reste délicate à mettre en oeuvre ; conformément au guide SETRA-LCPC de dimensionnement (Ministère de l'Équipement, 1994), on s'attache dans ces essais à déterminer le niveau de contrainte σ_6 qui va entraîner la rupture de l'éprouvette à un million de cycles de chargement : la loi de fatigue recherchée est de la forme (Guide Setra, 1994) :

$$\frac{\sigma}{f_f} = 1 + \beta \log N \quad [\text{Eq.4}]$$

avec f_f résistance en flexion au premier chargement, β pente de la droite de fatigue (figure 10).

Plusieurs essais (en cours) sont nécessaires pour la détermination de cette loi de fatigue : il convient en outre de s'assurer de la répétabilité des essais et de quantifier la dispersion expérimentale obtenue.

Un exemple de résultat (figure 9) est présenté ci-après: la rupture par fatigue de l'éprouvette est obtenue pour près de 180000 cycles, avec une contrainte σ de l'ordre de 0,413 MPa.

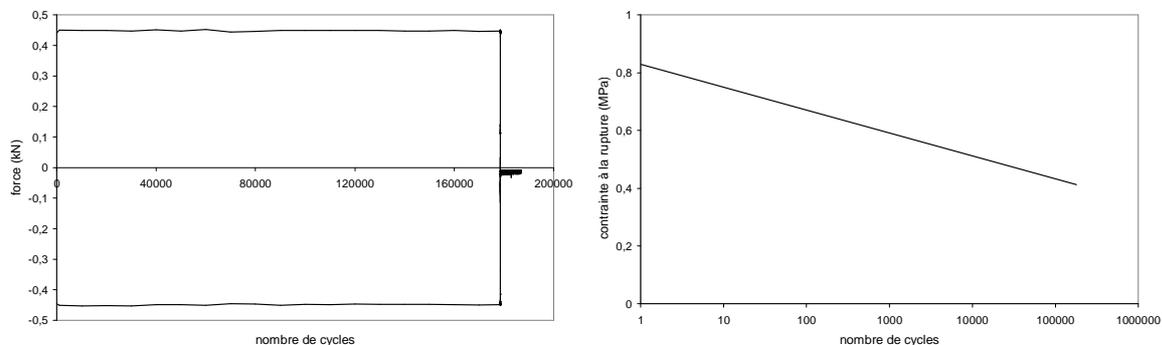


Figure 9: Flexion 3 points pour $\sigma=0.413\text{MPa}$. Figure 10 : 1ère estimation de la droite de fatigue.

Ces deux types de tests, qui caractérisent le comportement cyclique et le comportement en fatigue du mâchefer étudié, vont permettre de prendre en compte un comportement du matériau plus réel dans la méthode de dimensionnement : prise en compte de l'élasticité non linéaire, prise en compte des lois d'évolution des déformations permanentes en fonction du nombre de cycles appliqués, prise en compte du comportement en fatigue à travers la loi de fatigue pour les couches de mâchefers liées.

3. PROPOSITION D'UN SCHEMA DE DIMENSIONNEMENT ADAPTE AUX STRUCTURES DE CHAUSSEES A BASE DE MACHEFERS

L'objectif est de s'affranchir des données empiriques affectées aux matériaux constitutifs de la structure de chaussée en utilisant dans la mesure du possible les caractéristiques mécaniques réelles de ces matériaux.

Etape1 : Choix du type de structures : flexible (MIOM non traité) et rigide (MIOM traité),

Choix des matériaux et des épaisseurs de couches.

Etape2 : Contraintes σ^{max} générées par le trafic : prise en compte de l'effet cyclique du chargement

- pour la couche de mâchefers : calcul élastique non linéaire (paramètres κ et ν) et prise en compte de la loi d'évolution des déformations plastiques fonction du nombre de cycles,

- calcul élastique linéaire pour les autres couches (paramètres E et ν).

Etape3 : Contraintes admissibles σ^{adm} dans les différentes couches de matériaux :

-MIOM non traité : modèle d'endommagement par accumulation des déformations plastiques (orniérage) : considérations empiriques : $\sigma_z^{adm} = A_z N^{B_z}$, avec le couple de paramètres (A_z, B_z) variant suivant la nature de la chaussée et l'intensité de trafic, et N le nombre de passages de charges roulantes.

-MIOM traité : modèle d'endommagement par fatigue sous sollicitations répétées de traction par flexion exercées par le trafic : contrainte de traction admissible $\sigma_t^{adm} = A_t * P * N^{B_t}$, avec le couple de paramètres (A_t, B_t) déterminés à partir des essais de fatigue en laboratoire, P coefficient correcteur, et N le nombre de passages de charges roulantes pour toute la durée de service assignée à la chaussée.

Etape4 : confrontation des étapes (2) et (3), entre respectivement les contraintes maximales générées σ^{max} et les contraintes admissibles σ^{adm} .

Etape5 : ajustement éventuel des épaisseurs des couches pour valider l'étape (4) ($\sigma^{max} < \sigma^{adm}$).

4. CONCLUSION

La démarche de cette étude repose sur la caractérisation du comportement mécanique du mâchefer, à la fois en tant que matériau à part entière (passage « déchet » / « matériau »), et matériau potentiellement utilisable en techniques routières. Le comportement mécanique observé montre l'aptitude et les performances mécaniques de ce « nouveau matériau » pour une utilisation dans ce domaine d'application, au même titre que les graves classiquement utilisées. La caractérisation mécanique entreprise doit permettre l'amélioration de la méthode de dimensionnement classique en vigueur, s'affranchissant de considérations empiriques et prenant en compte un comportement plus réel du matériau granulaire.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Becquart F., Zentar R., Bernard F., Abriak N.E. (2005) «Mechanical characterization of behaviour under one dimensional consolidation tests of a bottom ash from municipal solid waste incineration», *Proceeding of the First International Conference On Engineering for Waste Treatment*, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, May 17-19, 2005.
- Becquart F., Bernard F., Zentar R., Abriak N.E. (2006) «Contribution to the characterisation of the mechanical behaviour of a granular medium resulting from a municipal solid waste incineration for a potential use in road engineering», *Proceeding of the Twenty-First International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, PA, USA, March 26-29, 2006.
- Bernard F., Abriak NE. (2003) «Etude physique, géotechnique et mécanique d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères», *Journal of catalytic materials and environment*, Vol.1, pp. 9-18.
- Hornych, P., Abdellah, K., Piau, JM. (1998) «Study of the resilient behaviour of unbound granular materials», *The Fifth Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Norway, July 1998, Vol. III, pp. 1277-1287.
- Ministère de l'Environnement (France) (1994) «Circulaire DPPR/SEI/BPSIED No. 94-IV-I du 9 mai 1994 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains».
- Ministère de l'Equipement, des Transports et du Tourisme (France) (1994) «Conception et dimensionnement des structures de chaussées», Guide Technique SETRA-LCPC.