
Comportement mécanique au triaxial d'un matériau granulaire issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères

Frédéric Becquart, Rachid Zentar, Nor Edine Abriak

Ecole des Mines de Douai – Département Génie Civil et Environnemental
764, Boulevard Lahure
59500 Douai Cedex France
becquart@ensm-douai.fr

RÉSUMÉ. Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) constituent des matériaux granulaires potentiellement valorisables en technique routière. Cependant, l'étude du comportement mécanique de ces matériaux reste aujourd'hui peu développée, et les critères et paramètres de dimensionnement s'appuient essentiellement sur des considérations empiriques. Une caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux s'avère donc indispensable si l'on souhaite pérenniser cette filière de valorisation. En ce sens, ce papier présente une première approche du comportement mécanique à l'appareil triaxial d'un matériau granulaire issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères. Du fait de l'origine et de la spécificité du matériau, une méthodologie d'essai spécifique est mise au point. Les résultats des tests mettent en évidence l'influence de la pression moyenne sur le comportement du matériau.

ABSTRACT. MSWI bottom ashes constitute granular material potentially beneficial used in road engineering. However, the study of the mechanical behaviour of these materials is developed little today. The design criteria and the design parameters are mainly based on empirical considerations. A characterisation of the mechanical behaviour of these materials proves to be essential in order to perennialize this field of beneficial use. In this way this paper presents a first approach of the mechanical behaviour of a MSWI bottom ash in triaxial conditions. Being given the origin and the specificity of the material, a specific methodology is investigated. The tests results show the influence of the average pressure on the behaviour of the material.

MOTS-CLÉS : mâchefer ; matériau granulaire ; comportement mécanique ; triaxial

KEYWORDS: MSWI bottom ash ; granular material ; mechanical behaviour ; triaxial

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 technique routière 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 technique routière. Peu d'études ont été menées sur le comportement mécanique des mâchefers, et leurs utilisations reposent essentiellement sur la base de considérations empiriques, par analogie à d'autres matériaux pulvérulents. Jusqu'à présent, les performances mécaniques du mâchefer sont évaluées par le biais de paramètres de comportement mécanique, essentiellement les caractéristiques d'usure des granulats (Ministère de l'Environnement, 1994). Cette considération apparaît comme trop réductrice, car elle ne fait intervenir les caractéristiques que d'une seule fraction granulaire, et ne traduit pas la performance mécanique globale du mélange granulaire.

Ce papier présente une première approche du comportement mécanique du matériau granulaire « mâchefer » sous sollicitations triaxiales monotones de cisaillement. Les observations expérimentales obtenues doivent permettre d'orienter le choix vers un modèle de comportement adapté au matériau granulaire « mâchefer ».

Dans une première partie, le matériau granulaire est présenté. La seconde section aborde la méthodologie adoptée pour la faisabilité des essais triaxiaux sur le matériau granulaire : l'arasement en tête d'échantillon, les perforations membranaires et les problèmes de saturation constituent les principales difficultés de réalisation d'un essai triaxial sur le matériau. La troisième partie présente les résultats obtenus pour un programme d'essais visant à rendre compte en premier lieu de la répétabilité des essais et de l'influence de la pression moyenne sur le comportement du matériau granulaire.

2. Présentation du matériau granulaire

2.1. Description du mâchefer

Le sous-produit industriel s'apparente à un matériau granulaire poreux, se présentant sous la forme d'un mélange gris sombre hétérogène de scories, de métaux ferreux et non ferreux, de particules de verre, de céramiques et d'imbrûlés (figure 1). Après incinération, des opérations de criblage et de déferrailage sont effectuées afin d'homogénéiser le mélange granulaire. Une phase de maturation du

matériau est entreprise afin de réduire le potentiel polluant du mâchefer. Après ces étapes de pré-traitements et selon la circulaire du 9 mai 1994 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (Ministère de l'Environnement, 1994), le mâchefer étudié apparaît valorisable du point de vue environnemental et géotechnique (Becquart, 2007).



Figure 1. Différentes fractions granulaires du mâchefer étudié

2.2. Caractéristiques géotechniques

Le tableau 1 présente les caractéristiques géotechniques du mâchefer étudié.

Paramètres géotechniques	Plages de valeurs classiques	Mâchefer étudié
Granularité	0/31.5 mm	0/20 mm
Teneur en fines	$5\% \leq \text{Passants à } 0.08 \text{ mm} \leq 12\%$	4.2 %
Passants à 2 mm	$20\% \leq \text{Passants à } 2 \text{ mm} \leq 45\%$	23.9 %
Valeur au bleu sur la fraction 0/5 mm	$0.01 \leq \text{Valeur au bleu VBS} \leq 0.04$	0.0135
Equivalent de sable	$30 \leq \text{Equivalent de sable ES} \leq 55$	74
Résistance mécanique sur la fraction 10/14 mm	$36 \leq \text{Los Angeles LA} \leq 50$ $15 \leq \text{Micro-Deval MDE} \leq 45$	42.3 31
Teneur en eau	$8\% \leq \text{Teneur en eau } W \leq 25\%$	13.8 %
Densité absolue		2.68 g/cm ³
Indice Portant Immédiat	$30 \leq \text{Indice portant immédiat IPI} \leq 60$	68
Optimum Proctor Modifié	Teneur en eau : $12.5\% \leq W \leq 15\%$ Densité sèche: $1.75 \leq \rho_d (\text{g/cm}^3) \leq 1.87$	12.7 % 1.81 g/cm ³

Tableau 1. Principales caractéristiques géotechniques du mâchefer étudié

D'après le classement des sols selon le guide technique des terrassements routiers (GTR, 1992), le mâchefer s'apparente à une grave naturelle, insensible à l'eau, sans cohésion et perméable. Les caractéristiques géotechniques du mâchefer

sont en concordance avec les caractéristiques des mâchefers couramment rencontrés en France (Becquart, 2007).

3. Méthodologie d'essai à l'appareil triaxial

La difficulté de réalisation d'un essai triaxial sur le mâchefer est principalement liée à la nature et la spécificité du matériau granulaire. La procédure d'essai est réalisée suivant la norme en vigueur (NF P 94-074), complétée par des dispositions spécifiques assurant la conduite des essais à leur terme et leur validité.

3.1. Arasement après compactage

A l'issue du compactage dynamique initial, les éprouvettes sont arasées en surface, mais la présence de particules anguleuses empêchent la planéité de cette surface. L'enlèvement des particules gênantes est effectuée et la porosité ainsi créée est comblée avec une fraction fine du matériau issu du compactage.

3.2. Résolution du problème de perforations membranaires

La présence de particules anguleuses entraîne le plus souvent la perforation de la membrane Latex, séparant l'échantillon du fluide cellulaire. Pour palier à ce problème, un film plastique strié vient recouvrir la membrane Latex. Suite à cette opération, une seconde membrane Latex vient recouvrir la première membrane. Cette précaution initiale permet la conduite des essais à leur terme.



a) avant essai (protection plastique + membrane latex) b) après essai

Figure 2. Echantillon « type » avant et après essai triaxial

3.3. Saturation des échantillons

La difficulté de la phase de saturation s'explique essentiellement par les points suivants:

- initialement, l'échantillon n'est pas saturé : sa teneur en eau est celle de l'Optimum Proctor Modifié ;
- le réseau poreux est hétérogène et le matériau est dense ;

- le matériau granulaire étudié reste un déchet, et il peut être le siège de réactions chimiques (désaturation du matériau constatée expérimentalement).

3.3.1 Première étape : calcul du volume d'eau à injecter

En pratique, suite au compactage Proctor modifié, on peut estimer que la porosité totale de l'échantillon est de l'ordre de 25 à 30% (soit un indice des vides compris entre 0.35 et 0.45). Etant donné que le volume des moules Proctor est de l'ordre de 950 cm³, cela signifie que les volumes d'eau à injecter pour une saturation totale sont compris entre 237.5 cm³ et 285 cm³. Expérimentalement, on est amené le plus souvent à introduire un volume d'eau dans l'échantillon de l'ordre de 200 à 250 cm³.

3.3.2 Seconde étape : dégazage de l'échantillon

Deux burettes sont utilisées pour effectuer le dégazage d'air au sein de l'échantillon: l'une est reliée à la partie inférieure de l'éprouvette, l'autre est reliée à la partie supérieure. A l'aide d'un GDS, une pression de confinement $\sigma_3 = 20$ kPa est appliquée. On effectue un dégazage de l'échantillon par la circulation du bas vers le haut d'un courant ascendant, chassant progressivement l'air contenu au sein de l'échantillon. Des cycles de saturation sont effectués jusqu'à la disparition visuelle des bulles d'air en sortie d'échantillon.

Expérimentalement, on trouve un volume d'air chassé nettement inférieur (de l'ordre de 1/3) au volume de la porosité totale calculée précédemment. Cette observation peut s'expliquer par l'emprisonnement de bulles d'air au sein de l'échantillon.

La saturation est effectuée pour chacune des deux configurations : la première considérant un volume d'eau à injecter équivalent à l'air chassé, la seconde en injectant un volume d'eau équivalent à la porosité estimée. Dans le premier cas, le coefficient de Skempton était de l'ordre de 0.6 - 0.7, alors que dans le second cas, il s'avérait très bon (> 0.95). Pour la réalisation de l'ensemble des essais triaxiaux, la méthode qui consiste à estimer le volume d'eau à injecter a été utilisée, en partant de la porosité estimée pour chacun des échantillons confectionnés. On peut estimer qu'une bonne saturation du matériau peut être obtenue après quelques heures (~4h) en cycles de saturation continus.

3.4. Consolidation des échantillons

Suite à la phase de saturation, l'échantillon est consolidé sous une pression effective de confinement p' variant de 100 kPa à 600 kPa. Pour chacun des essais réalisés, la durée de la phase de consolidation est fixée à 24h. Cette phase de consolidation est réalisée avec une pression interstitielle U_c constante (drainage assuré par une consigne de pression au GDS) fixée soit à 200 kPa, soit à 400 kPa (ces niveaux de pression doivent permettre l'élimination des bulles d'air qui subsisteraient encore au sein de l'échantillon). La pression de confinement σ_3 passe

de 200 kPa (si $U_c = 200$ kPa) ou de 400 kPa (si $U_c = 400$ kPa), à la consigne de pression pour l'essai référent.

4. Programme expérimental et résultats

4.1. Confection des éprouvettes

Chaque éprouvette est reconstituée à partir des trois fractions granulaires présentées sur la figure 1, selon des proportions définies permettant de toujours travailler avec la même courbe granulométrique de base (répondant au fuseau de spécification des graves non traitées 0/31.5 mm utilisables en technique routière). Le mélange ainsi constitué subit un compactage dynamique au Proctor modifié dans un moule Proctor cylindrique, de dimensions 117.5 mm de hauteur et de diamètre 101.5 mm, soit un élancement h/d égal à 1.15 (les contraintes de dimension sont imposées par la cellule triaxiale).

4.2. Tests de répétabilité

Du fait de l'hétérogénéité du matériau « mâchefer » et pour la pertinence de l'analyse des résultats et du calcul des caractéristiques mécaniques, la répétabilité des essais triaxiaux est analysée. La figure 3 présente les courbes déviatoriques obtenues pour une série de trois configurations, chaque configuration étant triplée. Les essais drainés sont réalisés aux pressions effectives de confinement de 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa, avec une contre-pression U_c égale à 400 kPa.

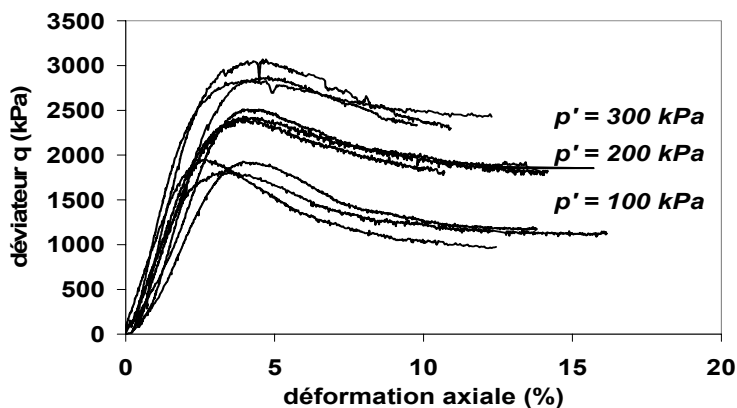


Figure 3. Tests de répétabilité à l'appareil triaxial

Une bonne répétabilité des tests est obtenue, confirmant l'efficacité de la méthodologie. Les courbes déviatoriques décrivent toutes la même allure:

initialement et jusqu'au voisinage d'un déviateur équivalent à 50% du déviateur au pic, l'évolution du déviateur q en fonction de la déformation axiale apparaît relativement linéaire. La phase de développement de la rupture entraîne une incurvation progressive de la courbe jusqu'au déviateur maximal, caractérisée par une valeur au pic maximale q_{pic} . La rupture se propage ensuite et les courbes déviatoriques tendent à évoluer vers un palier, caractérisé par une valeur du déviateur q_{palier} constante.

4.3. Série de tests triaxiaux effectuée avec une contre-pression $U_c = 200$ kPa

Le tableau 2 présente les divers tests effectués en condition drainée, ainsi que les caractéristiques des essais réalisés à différentes pressions de confinement, pour une contre-pression U_c fixée à 200 kPa.

Essai	$e_{initial}$	$p'_{initial}$ (kPa)	σ_3 (kPa)	p'_{pic} (kPa)	q_{pic} (kPa)	$p'_{10\%}$ (kPa)	$q_{10\%}$ (kPa)	M_{pic}	$M_{10\%}$
TCP1U2	0.54	100	300	744	1927	525	1270	2.59	2.42
TCP2U2	0.44	200	400	1103	2709	849	1948	2.45	2.29
TCP3U2	0.47	300	500	1456	3470	1237	2812	2.38	2.27
TCP4U2	0.47	400	600	1497	3593	1356	3168	2.39	2.33
TCP5U2	0.48	500	700	1780	3841	1671	3514	2.15	2.10
TCP6U2	0.49	600	800	2344	4632	2227	4281	1.97	1.92

Tableau 2. Compilation des résultats pour la série de tests effectuée

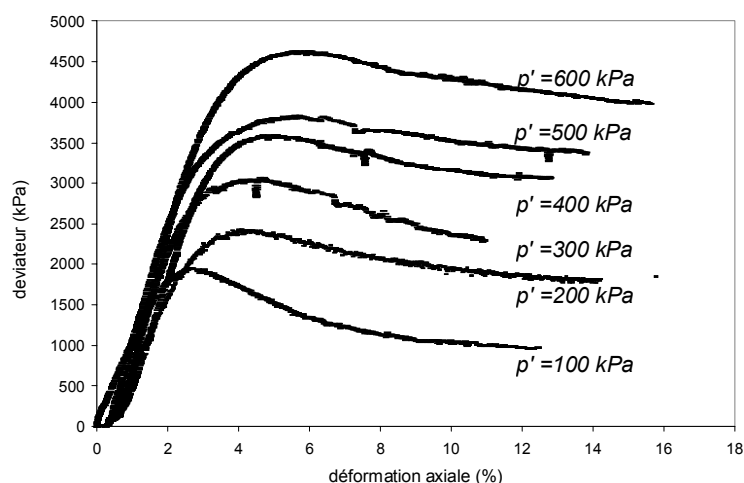


Figure 4. Courbes déviatoriques

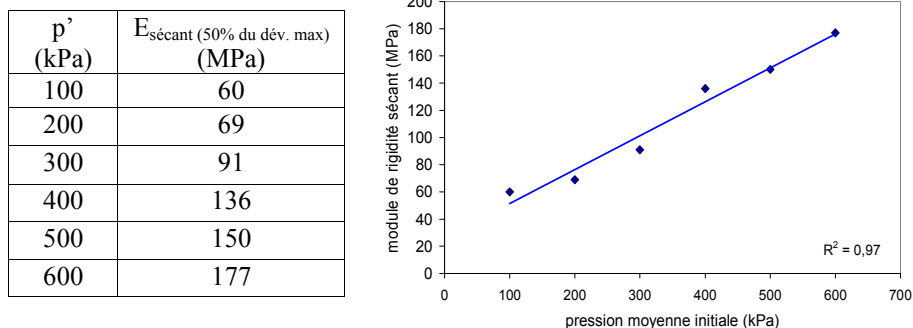


Figure 5. Evolution du module de rigidité sécant

L'analyse des résultats triaxiaux met clairement en évidence la dépendance du comportement vis-à-vis de la pression moyenne appliquée. Le module de rigidité sécant calculé à 50% du déviateur au pic s'étend dans la gamme 60 MPa-180 MPa, pour une plage de pression moyenne de 100 kPa à 600 kPa. L'angle de frottement est de l'ordre de 59° au pic et de l'ordre de 56° à 10% de déformation axiale; la courbure de l'enveloppe de rupture aux fortes pressions laisse à penser que l'angle de frottement interne diminue avec les fortes pressions moyennes.

5. Conclusion

Les premiers résultats obtenus au triaxial (en moyenne déformation) pour le mâchefer étudié révèle des similitudes de propriétés mécaniques et caractéristiques mécaniques analogues aux matériaux granulaires initialement denses, utilisables notamment en technique routière. Une perspective directe concerne l'étude du comportement mécanique du mâchefer en petites déformations, avec des degrés de sollicitations en correspondance avec celles rencontrées en technique routière.

6. Bibliographie

- Becquart F., Première approche du comportement mécanique d'un milieu granulaire issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères : valorisation en technique routière, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- GTR, Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, fascicule I, principes généraux, 100p. 1992.
- Ministère de l'Environnement (France) « Circulaire DPPR/SEI/BPSIED No. 94-IV-I du 9 mai 1994 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains », 1994.
- Norme AFNOR NF P-94-074 Essais à l'appareil triaxial de révolution, 1994.