
Comportement mécanique de graves à base de MIOM traitées au ciment par une modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelles

Libasse SOW^{1,2}, Fabrice BERNARD², Siham KAMALI-BERNARD², Cheikh Mouhamed Fadel KEBE¹

¹Ecole Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar - Sénégal

²Laboratoire Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), INSA de Rennes - France

Corresponding author: libasse.sow@esp.sn / libasse.sow@insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. Partant d'une granulométrie de particules de MIOM 0/25 qui a fait l'objet d'une étude expérimentale dans la thèse de Frédéric Becquart [BEC 07], nous avons mis en place un modèle numérique 3D dans des volumes élémentaires représentatifs (VER). Ce modèle est basé sur une stratégie de modélisation dite « multi-échelles » hiérarchique. Les agrégats traités à 3% de ciment ont été décomposés en deux VER : sub-mesoscopique (0/6) et mesoscopique (6/25). Pour les MIOM, nous avons pris des valeurs par défaut qui correspondent aux valeurs typiques des calcaires. Une campagne de simulations numériques ("Laboratoire virtuel") a été menée. A l'échelle sub-mesoscopique, par le biais de simulations multi-axiales menées sur le VER, nous avons obtenu les paramètres permettant d'alimenter un modèle d'endommagement plastique utilisé à l'échelle mesoscopique pour différents degrés d'hydratation. A l'échelle mesoscopique, les caractéristiques mécaniques de la grave routière traitée au ciment, habituellement déterminées par le biais d'expérimentations, ont été retrouvées.

ABSTRACT. Starting from a particle size distribution of 0/25 MSWI bottom ashes that was the subject of an experimental study in the thesis of Frédéric Becquart [BEC 07], a 3D numerical model developed in representative elementary volumes (REV). This model is based on a multi-scale hierarchical modeling strategy. The aggregates treated with cement have been decomposed into two REV at the sub-mesosopic and mesoscopic scales. We made the assumption that MSWI bottom ashes have mechanical properties similar to those of conventional road aggregates. The numerical simulations campaign ("virtual laboratory") lead to the following results. At the sub-mesosopic scale, we determined the input parameters for the Concrete Damaged Plasticity Model used at the mesoscopic scale. At the mesoscopic scale, the mechanical characteristics of the road aggregates usually determined through experiments have been found.

MOTS-CLÉS: modélisation multi-échelles hiérarchique, grave routière, MIOM, ciment, concrete damage plasticity model

KEY WORDS: hierarchical multi-scale modeling, road aggregates, MSWI, cement, concrete damage plasticity model

1. Introduction

L'idée est déjà ancienne de relier la structure et les propriétés des matériaux cimentaires. A la fin du XIX^{ème} siècle, Férêt proposait déjà une expression de la résistance en compression d'un mortier en fonction de sa porosité. Cette célèbre formule était fondée sur des considérations microscopiques et sur une représentation simplifiée du matériau à cette échelle. Mais l'approfondissement des connaissances et surtout le développement des matériaux cimentaires à base de produits recyclés ont montré que la structure du matériau était beaucoup trop complexe et aléatoire pour permettre le développement de formules analytiques exactes qui décrivent comment les propriétés et les performances lui sont reliées. Parallèlement à ce constat, le développement incessant des possibilités de calcul numérique et des moyens informatiques a permis le développement de simulations basées sur une description explicite de plus en plus réaliste des matériaux cimentaires. De telles approches présentent des avantages indéniables, comparées aux méthodes plus traditionnelles évoquées ci-dessus, parmi lesquels :

- la compréhension et une simulation des mécanismes locaux de déformation, d'endommagement et plus généralement de transformation de la microstructure ;
- une prédiction plus fine des propriétés en particulier dans le cas de chargements complexes ou lorsque les propriétés des différents constituants sont très contrastées ;
- et aussi, par une analyse inverse, la possibilité de définir la microstructure permettant l'obtention de certaines performances/propriétés.

Ainsi, depuis quelques années, le « calcul des microstructures » et les méthodes de changement d'échelles se sont fortement développées dans la communauté mécanicienne au sens large du terme. Le travail présenté dans cet article concerne la modélisation à l'échelle mesoscopique de graves routières traitées avec un ciment. Une application est ensuite faite sur les graves à base de Mâchefers d'Incineration d'Ordures Ménagères (MIOM) traitées au ciment en vue de déterminer leurs paramètres mécaniques. Les MIOM en question sont ceux étudiés expérimentalement dans la thèse de Frédéric Becquart soutenue en 2007 [BEC 07].

2. Stratégie de modélisation adoptée

La composition granulométrique considérée dans cette modélisation permet de répondre au fuseau de spécification des graves utilisables en techniques routières. La courbe moyenne du fuseau granulométrique retenu pour les graves routières est donc considérée. Comme tout matériau présentant un squelette granulaire, les

granulats traités aux liants, peuvent voir leur structure granulométrique se diviser en différentes échelles. Nous développons une modélisation multi-échelles hiérarchique consistant à représenter l'hétérogénéité de la grave routière traitée au ciment dans des volumes élémentaires représentatifs des différentes échelles d'études. En raison d'une étendue granulaire trop grande, le matériau traité est décomposé en deux Volumes Elémentaires Représentatif (VER) : une échelle sub-mesoscopique et une échelle mesoscopique. Les tableaux 1 et 2 donnent les compositions de ces VER.

Tableau 1. Composition VER sub-mesoscopique

Phases	15 % de Matrice	85 % de squelette granulaire : granulats 0/6		
Composition	CEMI 42,5R hydraté	40 % $dm=1$	31 % $dm=3$	14 % $dm=5$

Tableau 2. Composition VER mesoscopique

Phases	47,5 % de Matrice	52,5 % de squelette granulaire : granulats 6/25			
Composition	Micro-grave-ciment	22 % $dm=7,5$	14,5 % $dm=12,5$	11 % $dm=17,5$	5% $dm=22,5$

Générer des pourcentages de grains aussi élevés s'avère être une tâche difficile. Nous avons choisi la méthode du "Take and Place" sur un maillage déjà existant en nous arrangeant pour que les grains les plus petits ne fassent qu'un élément fini. Cela nous a permis d'atteindre des fractions aussi grandes. Le problème de la connexion des plus petits éléments, formant ainsi un seuil de percolation d'une face à une autre, a été remédié à en imposant un comportement fragile et donc une possible rupture de cette phase continue. Les figures 1 et 2 montrent les maillages obtenus aux deux échelles par la méthode du « Take and Place ».

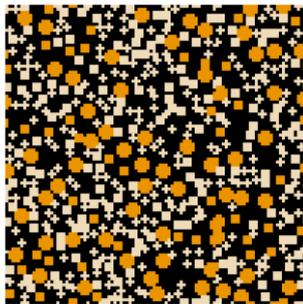


Figure 1. Image 2D de la MGC générée avec la méthode du « Take and place »

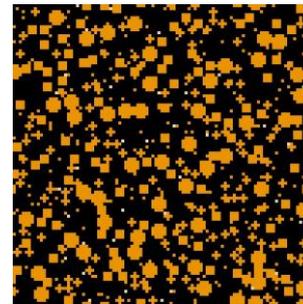


Figure 2. Image 2D de la mesostructure générée avec la méthode du « Take and place »

Des propriétés élastiques habituelles ($E=80$ GPa et $\nu=0.3$) ont été affectées aux particules. Le comportement post-pic de la pâte de ciment considérée est déterminé selon les résultats de [BER12]. Il a utilisé un modèle de fissuration diffuse (concrete smeared cracking) avec le modèle d'Hillerborg. La porosité estimée pour 3% de ciment dans la grave routière représente 70 % environ de la « matrice » pour un temps d'hydratation long. A l'échelle mesoscopique, un modèle d'endommagement plastique (CDP) est retenu pour caractériser le micro-grave-ciment (MGC). Ce modèle utilise une variable scalaire d'endommagement, la surface de charge de Lee and Fenves [LEE 98] et le potentiel plastique de Drucker-Prager (version hyperbolique). Il requiert la détermination de paramètres par le biais de simulations menées à l'échelle sub-mesoscopique. Le module d'Young (E), le coefficient de Poisson (ν), la résistance en traction (f_t) et la résistance en compression uniaxiale (f_b) sont déterminés à partir des tests uniaxiaux de compression/traction. La résistance en compression biaxiale (f_{b0}) est obtenue avec le test de compression biaxiale. Le degré de déformabilité du matériau (K), le coefficient M_{pic} (rapport entre le déviateur des contraintes au pic et la contrainte moyenne), l'angle de frottement interne (ϕ) et l'angle de dilatance (ψ) sont obtenus par le biais de tests triaxiaux.

La compression et la traction uniaxiale consistent à appliquer un déplacement imposé sur une face, à bloquer les déplacements sur la face opposée et à laisser les autres faces du VER libres. La compression biaxiale consiste à appliquer deux déplacements imposés et égaux sur deux faces et dans deux directions perpendiculaires. Le triaxial de compression consiste à soumettre au VER un champ de contraintes qui a pour composantes : une pression de confinement (50 KPa, 100 KPa et 150 KPa) et une contrainte déviatorique appliquée sous forme de déplacement imposé.

La stratégie de modélisation adoptée est décrite comme suit :

Simulations sur VER sub-mesoscopique à $2,5E^{-6} S^{-1}$: MGC (0/6)

- compression uniaxiale
- compression biaxiale
- essai de traction
- triaxial de compression



Détermination des caractéristiques élastiques et paramètres du modèle CDP de la MGC : $E, \nu, K, f_{b0}/f_b, \phi, \psi$



Simulations sur VER mesoscopique à $2,5E^{-6} S^{-1}$: MGC (0/6) + Granulats (6/25)

- compression uniaxiale
- essai de traction
- triaxial de compression



Détermination des propriétés de comportement mécanique de la grave traitée au ciment : $E, \nu, f_b, f_t, M_{pic}, \phi, \psi$

3. Application aux graves routières à base de MIOM

3.1. Valorisation des MIOM en techniques routières

Dans un cadre de recyclage et de développement durable, les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) peuvent représenter un gisement de substitution de granulats classiques stratégique pour faire face à l'impossibilité de mise en décharge continue des déchets et aux difficultés d'ouverture de nouvelles carrières de matériaux routiers. Les MIOM répondant aux exigences de la réglementation en vigueur [ARR 11] peuvent être valorisés en techniques routières [HUN 11]. [BEC 07] et [HUN 11] ont travaillé expérimentalement sur les graves à base de MIOM. Plusieurs documents scientifiques se sont également intéressés à leur étude expérimentale : [ARI 08], [BIR 07], [BEC 07], [BAD 08], [CHI 03], [FER 08], entre autres. Il est toutefois rare de voir des auteurs s'intéresser de façon approfondie à la modélisation multi-échelles hiérarchique de graves routières à base de MIOM traités au ciment.

3.2. Quelques résultats expérimentaux de [BEC, 07]

[BEC, 07] a effectué des essais triaxiaux sur des graves routières traitées avec différentes quantités de ciment. Le tableau 3 présente quelques résultats et la figure 4 montre quelques courbes déviatoriques.

Tableau 3. Caractéristiques des essais triaxiaux sur les MIOM traités à 28 jours avec une pression de confinement p' de 100 KPa [BEC 07]

% de ciment	p'_{pic} (KPa)	q_{pic} (KPa)	$p'_{10\%}$ (KPa)	$q_{10\%}$ (KPa)	M_{pic}	$M_{10\%}$
1	1243	3434	656	1675	2.72	2.54
3	3456	10064	700	1793	2.91	2.54
5	3566	10400	474	1131	2.91	2.38

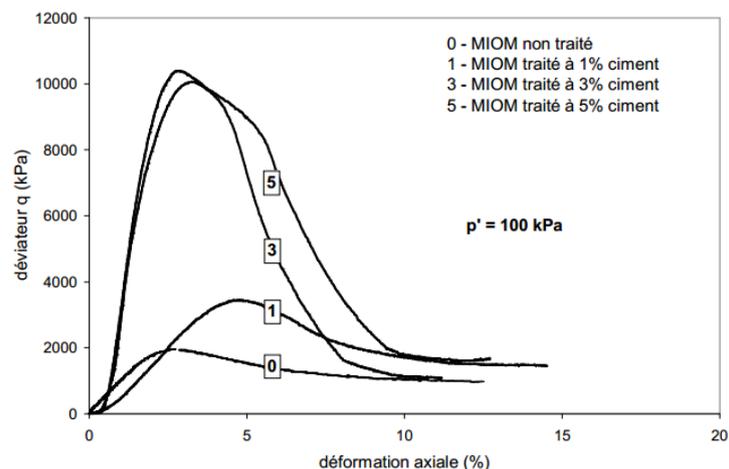


Figure 4. Courbes déviatoriques à 28 jours sur les MIOM traités pour $p'=100$ kPa [BEC 07]

3.3. Résultats de la modélisation et validation

Les paramètres du modèle CDP obtenus par la simulation et caractérisant la micro-grave-ciment sont donnés au tableau 4.

Tableau 4. Paramètres mécaniques de la MGC à différents degrés d'hydratation de la pâte de ciment

Domaines			Elastique		CDPM					
Paramètres			E (GPa)	ν	K	f_{bd}/f_b	B	ϕ (°)	ψ (°)	M_{pic}
α	0,83	$p'=50$ KPa	25,29	0,21	0,619	1,075	0,065	56,24	44,07	2,30
		$p'=100$ KPa		0,21						
		$p'=150$ KPa		0,21						
	0,64	$p'=50$ KPa	15,13	0,21	0,619	1,081	0,070	46,90	25,21	1,93
		$p'=100$ KPa		0,20						
		$p'=150$ KPa		0,20						
	0,27	$p'=50$ KPa	1,40	0,18	0,619	1,189	0,137	13,34	0,18	0,50
		$p'=100$ KPa		0,18						
		$p'=150$ KPa		0,17						

Les résultats de la modélisation numérique d'essais triaxiaux sur MIOM traités à 3% de ciment avec un temps d'hydratation long sont comparables à ceux de [BEC 07]. Le tableau 5 montre cette comparaison en termes de déviateur de contraintes, de coefficient M_{pic} et d'angle de frottement interne..

Tableau 5. Comparaison entre les résultats expérimentaux [BEC 07] et les résultats de la modélisation

	Déviateur au pic avec $p'=100$ KPa (MPa)	M_{pic}	ϕ (°)
Expérimental	10,064	2,91	78,46
Modélisation	10,65	2,87	76,07
Ecart relatif (%)	5,5	1,389	3,04

4. Discussions et conclusions

Les simulations numériques ont permis d'avoir un angle de frottement interne de 76,07° correspondant à un facteur M_{pic} de 2,87. [HUN 11] et [BEC 07] justifient la valeur élevée de l'angle de frottement interne par le fait que le matériau granulaire est composé de grains anguleux bien gradués. L'ordre de grandeur de l'angle de frottement obtenu est comparable aux angles de frottement obtenus sur des graves routières [HOR 98]. Les courbes d'évolution des déformations volumiques obtenues indiquent un effet de serrage des grains (contractance) lors de l'essai triaxial de compression, suivi d'une dilatance (effet de désenchevêtrement des grains) vers les grandes déformations. A différentes pressions de confinement, le comportement de la grave traitée ne dépend que de la pression de confinement effective. Ce résultat conforte les constats de [BEC 07] et [HUN 11] dans ce sens. Les angles de dilatance « Ψ » trouvés avec notre modèle numérique sont respectivement de 9.43, 7.07, 6.79° pour les trois degrés d'hydratation de la pâte de ciment. Ils sont alors compris entre 0 et 15°, intervalle dans laquelle s'échelonnent les angles de dilatance trouvés expérimentalement par [HUN 11].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [APP 04] Rapport APPIA. Valorisation des MIOM dans les infrastructures routières. Ecole des mines de Doua, Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille. Avril 2004.
- [ARI 08] Arickx S., Gerven T. V., Boydens E., L'hoest P., Blanpain B., Vandecasteele C., 2008. Speciation of Cu in MSWI bottom ash and its relation to Cu leaching. Applied Geochemistry 23 (2008) 3642-3650.
- [ARR 11] Arrêté du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.
- [BAD 08] Badreddine R., François D., 2008. Assessment of the PCDD/F fate from MSWI residue used in road construction in France. Chemosphere (2008).
- [BEC 07] Frédéric Becquart. Première approche du comportement mécanique d'un milieu granulaire issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères : valorisation en technique routière. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille. Mars 2007.
- [BIR 07] Birgisdottrir H., Bhandar G., Hauschild M. Z., Christensen T. H., 2007. Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: Recycling of bottom ash in road construction or landfilling in Denmark evaluates in the ROAD-RES model. Waste Management 27 (2007) S75-S84.
- [CHI 03] Chimenos J. M., Fernandez A. I., Miralles L., Segarra M., Espiell F., 2003. Short-term natural weathering of MSWI bottom ash as a function of particle size. Waste Management 23 (2003) 887-895.
- [FER 08] Fernandes M. H. V., 2008. Characterization of MSWI bottom ashes towards utilization as glass raw material. Waste Management 28 (2008) 1119-1125.
- [HUN 11] LE Ngoc Hung. Contribution à la modélisation du comportement mécanique d'un matériau hétérophasé rematérialisé issu d'un mâchefer d'incinération d'ordures ménagères : Valorisation en Génie Civil. PhD thesis. Ecole des mines de Doua, Université d'Artois, Décembre 2011.
- [HOR 98] Hornych P., Kazai A., Quibel Q., 1998. Study of the resilient behaviour of unbound granular materials, Proc. 5th Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway, July 1998, vol 3, pp. 1277-1287.
- [LEE 98] Lee J, Fenves GL. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. J Eng Mech, ASCE 1998 ; 124 (8) : 892-900.