



HAL
open science

Mâchefers d'incinération de déchets non dangereux : gisement stratégique de substitution de granulats routiers classiques

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard

► To cite this version:

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard. Mâchefers d'incinération de déchets non dangereux : gisement stratégique de substitution de granulats routiers classiques. 26ème Congrès Mondial de la Route, Oct 2019, Abou Dhabi, Émirats arabes unis. hal-02274511

HAL Id: hal-02274511

<https://hal.science/hal-02274511>

Submitted on 29 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MACHEFERS D'INCINERATION DE DECHETS NON DANGEREUX : GISEMENT STRATEGIQUE DE SUBSTITUTION DE GRANULATS ROUTIERS CLASSIQUES

L. Sow

Ecole Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar – Sénégal
Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), INSA de Rennes – France
libasse.sow@esp.sn

F. Bernard

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), INSA de Rennes – France
fabrice.bernard@insa-rennes.fr

S. Kamali-Bernard

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), INSA de Rennes – France
siham.kamali-bernard@insa-rennes.fr

RESUME

Les matériaux étudiés dans ce travail sont des Mâchefers d'Incineration de Déchets Non Dangereux (MIDND) composés de particules fines accompagnées de granulats de diamètres allant jusqu'à 25 mm. L'étude de la faisabilité d'un réemploi en techniques routières de ces types de sous-produits industriels est l'objectif visé en couplant expérimentations et modélisation. Un modèle numérique tridimensionnel de grave routière traitée au ciment CEM I 42,5R a été mis en place dans des Volumes Elémentaires Représentatifs des différentes phases du matériau composite. Le modèle numérique est basé sur une stratégie de modélisation dite « multi-échelle » hiérarchique. Pour alimenter ce modèle numérique avec des propriétés intrinsèques aux matériaux étudiés, une campagne expérimentale originale a été menée. Près de 70 % des particules étudiées ont une masse volumique apparente inférieure à 2 g/cm^3 . Cela a permis de classer les MIDND dans la catégorie des granulats légers contrairement aux granulats naturels dont la masse volumique est supérieure à 2 g/cm^3 . La composition chimique des granulats étudiés est conforme à celle fournie dans la littérature. Les modules élastiques ont été déterminés avec des tests d'indentation jamais menés jusqu'à maintenant sur ces types de granulats particuliers dans leur texture et leur composition. Les valeurs de modules élastiques obtenues varient de 15 à 68 GPa. Elles mettent en évidence l'hétérogénéité particulière qui caractérise la rigidité dans un granulat de MIDND. Toutefois, une valeur de 20 GPa a été retenue pour le module d'Young homogénéisé prenant en compte les différentes phases solides et la porosité dans un granulat de MIDND. Avec la modélisation développée, le « laboratoire virtuel » a permis de déterminer les paramètres mécaniques caractérisant la grave traitée à 3 % de ciment. L'angle de frottement interne élevé de 76° confère une bonne capacité portante au matériau. Les angles de dilatance obtenus sont compris entre 6 et 10° . Ils sont proches des angles de dilatance du sable et du gravier. La classification de la Grave Traitée au Liant Hydraulique (GTLH) en classes mécaniques 3 et 4 lorsque le module d'Young des particules de mâchefers varie de 20 à 80 GPa prouve la faisabilité d'un réemploi de ce type de Sous-Produits Industriels dans ce secteur d'activités.

1. INTRODUCTION

En techniques routières, les couches de chaussée doivent être constituées de matériaux capables de reprendre et de repartir les charges provenant des véhicules roulants. De manière générale, les granulats naturels issus de carrières d'extraction ont depuis longtemps été les seules possibilités pour la réalisation de couches de chaussée. Le secteur de la construction consomme annuellement environ 350 millions de tonnes de granulats naturels en France [1]. Cependant, quel que soit la quantité de réserve disponible dans une zone donnée, l'extraction conduira à un épuisement à moyen ou long terme. Face à ce

constat, les chercheurs s'intéressent de plus en plus aux matériaux alternatifs pouvant répondre à la fois aux critères de résistance mécanique et au respect des normes environnementales.

En fonction de la croissance démographique et de la consommation sans cesse croissante des populations, la production d'ordures ménagères ne cesse de croître partout dans le monde. Une étude menée par Eurostat (direction générale de la commission européenne chargée de l'information statistique à l'échelle communautaire) en 2014 montre que chaque habitant en France produit annuellement en moyenne 511 kg de déchets [2]. La gestion des déchets est un enjeu majeur qui s'inscrit durablement dans les politiques publiques de tous les pays du monde. Dans les pays en développement comme le Sénégal, des politiques sont menées pour trouver des solutions de gestion des déchets. Une des solutions est de traiter les déchets solides avec des options technologiques telles que la collecte des déchets et l'enfouissement dans des cellules de 5 m sur 6 m et 3 m de profondeur (figure 1). Cette disposition permet de générer du terreau au bout d'un an sans intervention humaine (décomposition anaérobie des matières organiques mélangées à la fraction minérale des déchets). Le contenu des cellules est récupéré peu avant la période des pluies pour être recyclé dans les champs après tamisage [3].

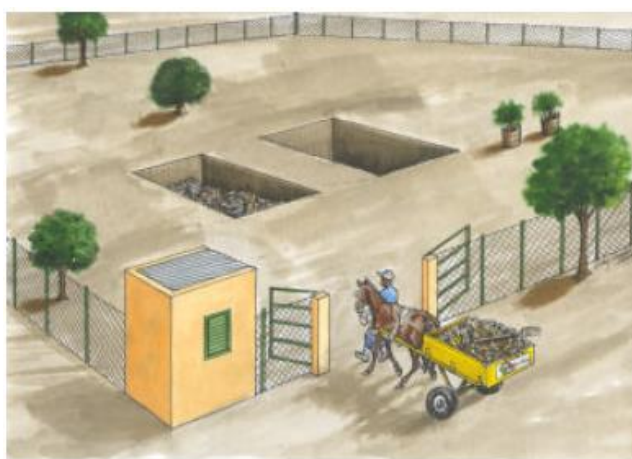


Figure 1 - Option technologique d'enfouissement des déchets solides dans des cellules au Sénégal [3]

Cependant, la solution de mise en dépôt à terre a été prise en compte dans les pays développés mais s'avère trop coûteuse car elle nécessite une surface importante et des frais de transport importants. En plus, les métaux lourds et les matières organiques contenus dans les déchets peuvent engendrer une dispersion vers les eaux souterraines et dans l'environnement, ce qui va à l'encontre du contexte législatif français, européen et international qui prône, au contraire, une plus grande protection de l'environnement [4]. Dans les pays développés, il existe plusieurs méthodes de traitement des ordures ménagères dans un cadre de recyclage et de développement durable : thermique, biologique, tri pour recyclage, stockage. Face aux tonnages de déchets de plus en plus croissants, l'incinération reste le moyen de traitement le plus adapté puisqu'elle permet de réduire en moyenne de 70 % la masse des déchets incinérés et de 90 % leur volume [4, 5]. L'incinération est un mode de traitement thermique des déchets non dangereux qui consiste à les brûler à haute température. Ce procédé de traitement des déchets non dangereux produit une quantité importante de mâchefers qu'il convient de valoriser. Les agrégats qui en résultent sont appelés Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND) réglementés en France par [6]. Il faut noter que la réglementation de ces types de sous-produits industriels n'est pas unifiée même au sein de l'union européenne. En France, on évalue à plus de 3 millions de tonnes la production annuelle des MIDND [7]. Ils peuvent représenter un gisement stratégique de substitution de granulats routiers classiques. Ils

doivent pour cela répondre aux critères physico-chimiques et mécaniques, mais aussi au respect des normes environnementales. Des travaux ont porté sur l'étude des propriétés physico-chimiques et mécaniques de ces types de granulats en vue de leur valorisation ([4-5], [8-14], entre autres). Le travail présenté dans cet article entre dans le cadre de l'étude de la faisabilité d'une réutilisation en techniques routières des MIDND. Cette étude passe par un couplage entre des expérimentations et un travail de modélisation numérique multi-échelle hiérarchique. La finalité étant de déterminer les propriétés mécaniques d'une grave routière à base de MIDND traités au ciment. Les expérimentations portent sur la masse volumique apparente, la composition chimique et des tests d'indentation instrumentée pour déterminer les modules élastiques réduits qui caractérisent le matériau. Ces résultats expérimentaux servent de données d'entrée au « laboratoire virtuel » mis en place à travers des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER). Les simulations numériques sont effectuées à l'aide du logiciel Abaqus.

2. PRESENTATION DES MATERIAUX ET DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

2.1. Matériaux étudiés

Les mâchefers étudiés proviennent des carrières de la Garenne à Vignoc (Bretagne, France) chez Scorvalis (filiale d'Eurovia). Ils sont sur la plateforme de maturation depuis octobre 2015 et sont classés "V". La figure 2 montre l'aspect gris-sombre du matériau composé de métaux, de céramique, de verre, de scories, d'imbrulés, etc.



Figure 2 - MIDND étudiés

2.2. Résultats expérimentaux

Dans un premier temps, les expérimentations ont consisté à déterminer la masse volumique apparente réelle des granulats étudiés. Des tests ont été effectués sur une sélection de 21 granulats isolés de diamètres compris entre 20 et 25 mm. Les images de la figure 3 montrent le pycnomètre sans grain rempli d'eau et lorsqu'il est accompagné d'un grain enrobé de paraffine. Pour chaque granulat isolé de MIDND, il faut les masses en grammes :

- du grain seul « M_1 » ;
- du grain enrobé de paraffine « M_2 » ;
- de la paraffine qui enrobe le grain « M_3 » ;
- du pycnomètre rempli d'eau « M_4 » ;
- du pycnomètre rempli d'eau contenant le grain enrobé de paraffine « M_5 ».

Connaissant la masse volumique de la paraffine qui est prise égale à $\rho_p = 0,87 \text{ g/cm}^3$, la relation de l'équation 1 a été utilisée pour déterminer la masse volumique « ρ_g » de chaque granulat. La masse volumique de l'eau « ρ_e » étant égale à 1 g/cm^3 .

$$\rho_g = \frac{M_1}{\frac{M_4 + M_2 - M_5}{\rho_e} - \frac{M_3}{\rho_p}} \quad (1)$$

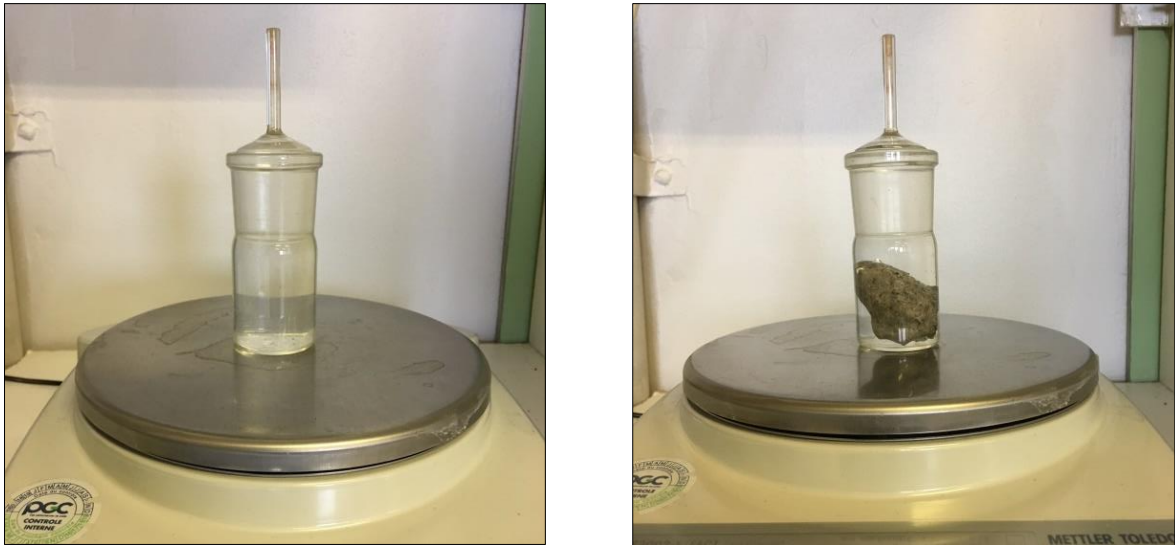


Figure 3 - Pycnomètre rempli d'eau sans et avec un grain de MIDND enrobé de paraffine

Nous avons décomposé les masses volumiques obtenues en 4 plages de valeurs sous forme d'histogramme (figure 4).

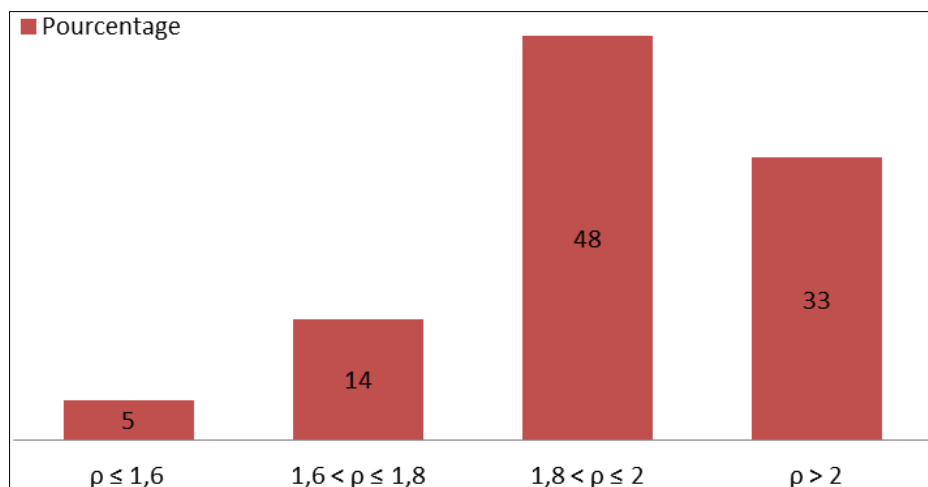


Figure 4 - Histogramme de répartition des classes de masse volumique dans l'échantillon de 21 grains de diamètre compris entre 20 et 25 mm

Les valeurs maximale et minimale obtenues sont respectivement de 2,82 et 1,58 g/cm³. Près de 70 % des particules ont une masse volumique apparente inférieure à 2 g/cm³.

Pour ce qui concerne la détermination de la composition chimique et l'indentation instrumentée, il a fallu au préalable préparer les échantillons. Nous avons suivi les étapes suivantes :

- prélèvement d'échantillons de MIDND 0/25 mm ;
- séparation en deux classes granulaires par un tamis de maille 12,5 mm : 0/12,5 mm et 12,5/25 mm ;
- enrobage et sciage des grains après durcissement de la résine ;

- polissage des surfaces des échantillons en utilisant différents draps de polissage.

Avec le Microscope Electronique à Balayage (MEB) du Centre de Microscopie Électronique à Balayage et microAnalyse (CMEBA) de l'Université de Rennes 1, il a été effectué une trentaine d'analyses ponctuelles. Nous avons ensuite effectué une analyse statistique qui a donné les résultats reproduits sous forme d'histogramme (figure 5).

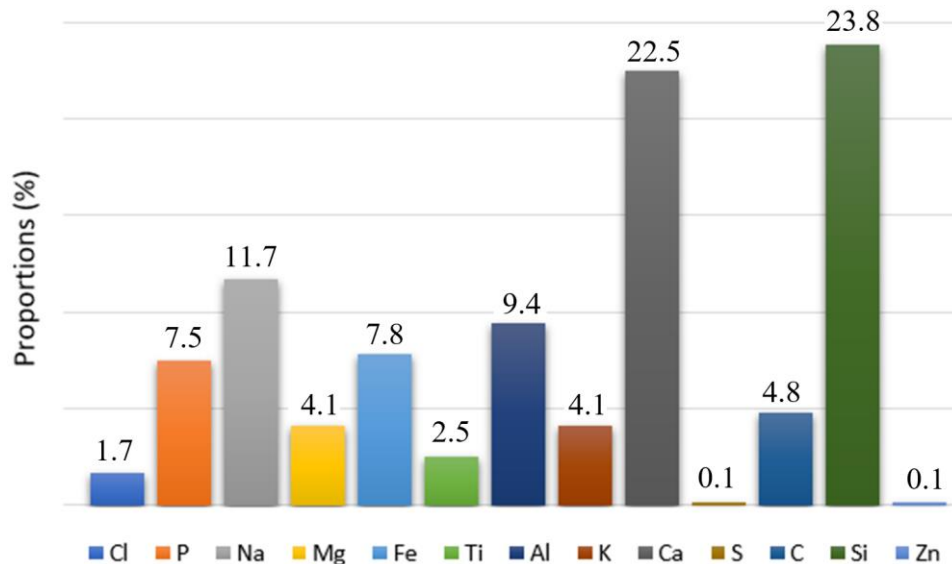


Figure 5 - Proportions des éléments chimiques après 30 analyses ponctuelles

L'indentation instrumentée consiste à appliquer une charge, dans des conditions déterminées, à la surface d'un matériau, à l'aide d'un indenteur. Après l'essai, le matériau s'étant déformé, on observe une empreinte que l'on peut mesurer. Les conditions d'essai sont la géométrie de l'indenteur, la force et la dureté. Le dispositif d'indentation comprend principalement l'indenteur, des capteurs d'effort et de déplacements, un support. Lors de l'essai, la tête du poinçon de l'indenteur est amenée au contact du matériau testé. Le début d'indentation est repéré par la variation de la courbe déplacement-temps et on acquiert, dans la suite de l'essai, des séries de couples force-déplacement permettant de tracer la courbe d'indentation. On peut extraire de la phase de décharge de la courbe d'indentation, le module réduit et la dureté du matériau testé. Pour effectuer les tests d'indentation, un 9 échantillon de grains isolés de diamètres compris entre 20 et 25 mm ont été préparés. Les particules de MIDND sont fréquemment très friables ; leur texture extérieure est souvent d'apparence identique. Afin de caractériser l'intérieur de ces grains sans les abîmer, il a fallu les protéger et ainsi les enrober dans une résine. Pour chaque échantillon, il est d'une grande importance d'avoir une surface la plus lisse possible pour les tests d'indentation. L'uni et la planéité de la surface testée sont requis car une surface rugueuse ne permet pas un contact parfait entre l'indenteur et le matériau, ce qui peut mener à des résultats erronés. Les grains sont indentés en suivant le protocole expérimental de « Olivier and Pharr » [15]. La procédure d'essai d'indentation, le matériel utilisé ainsi qu'une description détaillée des tests d'indentation effectués sont fournis dans [2, 8, 11, 12]. Les modules élastiques réduits obtenus varient de 15 à 68 GPa lorsque les phases solides présentes dans un granulat sont testées séparément à l'aide d'un indenteur de rayon petit (0,5 mm). Une valeur moyenne de 15 GPa a été obtenue lorsque l'indenteur sphérique utilisé a un diamètre important (140 mm). Cet indenteur de rayon important permet de tester différentes phases solides ainsi que la porosité interne. Le module réduit d'un matériau s'exprime en fonction de son module d'Young et son coefficient de Poisson. Si on considère toutes les valeurs que peut prendre le coefficient de Poisson, nous considérons une valeur de 20 GPa pour le module

d'Young homogénéisé des particules de MIDND. Vu l'étendu des valeurs de modules élastique que l'on peut trouver dans un granulat de MIDND, quatre valeurs de modules d'Young sont considérées pour alimenter le modèle numérique : 20, 40, 60 et 80 GPa. Une étude de l'influence de la variabilité du module de Young des granulats dans une grave routière traitée au ciment est ainsi faite.

3. DEVELOPPEMENT D'UNE MODELISATION HIERARCHIQUE TRIDIMENSIONNELLE

3.1. Etat des lieux et stratégie de modélisation adoptée

Le développement incessant des possibilités de calcul numérique et des moyens informatiques a permis la mise en place de simulations basées sur une description explicite de plus en plus réaliste des matériaux cimentaires. Ainsi, depuis quelques années, le « calcul des microstructures » et les méthodes de changement d'échelles se sont fortement développés dans la communauté mécanicienne au sens large du terme. Les avantages des modélisations morphologiques 3D multi-échelle sont multiples. Elles permettent l'obtention des distributions (et concentrations) de contraintes dans chaque constituant du matériau hétérogène. Mais aussi la compréhension des mécanismes locaux de déformation, ceux-ci n'étant pas gouvernés par des valeurs moyennes de contrainte ou de déformation. Enfin, une prédiction plus fine des propriétés des matériaux hétérogènes est obtenue d'autant plus lorsque les propriétés des constituants sont très contrastées ou dans le cas de chargements complexes, multi-axiaux ou cycliques par exemple. L'approche de modélisation de type « hiérarchique » consiste à représenter l'hétérogénéité du matériau dans des volumes élémentaires représentatifs des différentes échelles d'études. Les propriétés physiques et mécaniques à une échelle se déterminent à partir de celles de l'échelle inférieure. Dans ce sens, une plateforme de simulation numérique 3D des matériaux cimentaires, appelée « Multi-scale Modeling of Computational Concrete » ou MuMoCC est développée depuis 2006 à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Rennes (France). Cette plateforme permet de simuler numériquement le comportement mécanique et les propriétés de transfert (diffusion, etc...) de pâtes de ciment (échelle microscopique) et de composites granulaires cimentaires (échelles sub-mesoscopique et mesoscopique). Dans la plateforme MuMoCC, les trois échelles représentatives des différentes phases d'un matériau composite hétérogène :

- l'échelle mesoscopique : le matériau est modélisé comme un empilement granulaire 3D compact de grains de diamètres compris entre quelques millimètres et quelques dizaines de millimètres (gravillon) enrobés par un mortier. Les propriétés du mortier sont déduites de la mesostructure générée à l'échelle sub-mesoscopique ;
- l'échelle sub-mesoscopique : le mortier est décrit comme un empilement compact 3D de grains de diamètres compris entre une centaine de microns et quelques millimètres (sable) enrobés par une pâte de ciment durcie. Les propriétés de la pâte de ciment sont déduites de la microstructure générée à l'échelle microscopique ;
- l'échelle microscopique : la pâte de ciment durcie est décrite à partir de la composition du ciment et du rapport E/C comme un assemblage poreux 3D composé :
 - de phases hydratées telles que les silicates de calcium hydratés (C-S-H), la portlandite (C-H), les sulfo-aluminates de calcium hydratés (ettringite, monosulfoaluminate), etc. ;
 - de phases anhydres ou en cours d'hydratation telles que les silicates de calcium et les aluminates de calcium.

De nombreux travaux abordent la modélisation des matériaux avec des matrices cimentaires. Ces modélisations se distinguent par le type de simulations (simulations par Eléments Finis, par Eléments Discrets ou Lattice models), par la méthode de génération des grains, ou par l'approche multi-échelle retenue. D'autres approches où les échelles

communiquent entre elles sont également développées : sous-modélisation où les conditions aux limites en termes de déplacement résultant d'un calcul macroscopique sont imposées à l'échelle microscopique. On peut également trouver des approches de type « hiérarchique » où les Volumes Élémentaires Représentatifs (VER) sont représentés explicitement à chaque échelle et où des calculs sont menés afin de déterminer un comportement homogénéisé du VER à une échelle donnée, à imposer à l'échelle immédiatement supérieure. C'est ce dernier type d'approche qui est retenu dans ce travail et qui fait suite à plusieurs travaux publiés précédemment ([9, 10, 13, 14], [16-22], entre autres). Une quatrième échelle d'étude a été ajoutée dans la démarche : l'échelle nanoscopique à laquelle des simulations de différentes natures (Théorie de la Fonctionnelle de la Densité, Dynamique Moléculaire, Eléments Finis Atomiques) ont été menées sur les cellules élémentaires des principaux hydrates de la pâte de ciment [23]. Ainsi, les avancées actuelles de la plateforme sont montrées à la figure 6. Dans une telle approche, les données de sortie à une échelle sont considérées comme données d'entrée à l'échelle immédiatement supérieure.

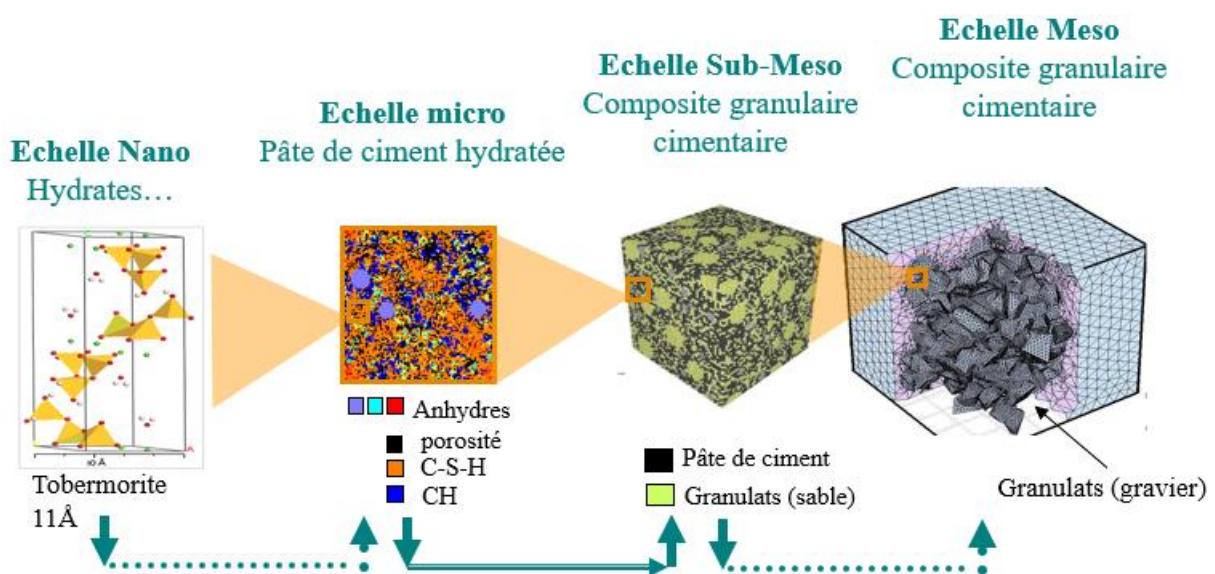


Figure 6 - Modélisation de type « hiérarchique » : création de VER à chaque échelle et simulation de différents tests

Jusqu'à maintenant, le passage de l'échelle sub-mesoscopique à l'échelle mesoscopique n'avait été traité que très partiellement. Ce passage peut nécessiter la simulation de tests multi-axiaux, ce qui a rarement été fait dans la littérature internationale. Cette approche de modélisation est appliquée dans ce travail aux graves routières, traitées avec un liant hydraulique (cimentaire).

La fraction granulométrique des particules de MIDND considérée dans ce travail est de 0/25 mm. Elle est trop étendue pour être considérée dans son intégralité dans une modélisation aux éléments finis 3D. On aurait un nombre de grains et de degrés de liberté important. Deux échelles d'étude ont donc été considérées : l'échelle sub-mesoscopique contenant la fraction 0/6 mm du squelette granulaire noyée dans une matrice poreuse de liant hydraulique (ou micro-grave-ciment, μ -GC) et l'échelle mesoscopique contenant la fraction 6/25 mm, noyée dans la μ -GC. A l'échelle mesoscopique, un modèle d'endommagement plastique (CDPM) est retenu pour caractériser la micro-grave-ciment. Il est basé sur la plasticité et l'endommagement du matériau. Il considère que les deux principaux mécanismes de rupture sont la fissuration à la traction et l'écrasement du matériau à la compression. Ce modèle d'endommagement avec plasticité non associée a montré sa capacité à décrire le comportement mécanique des matériaux granulaires avec

une matrice cimentaire. Il utilise une variable scalaire d'endommagement, la surface de charge de (Lee and Fenves) [24] et le potentiel plastique de Drucker-Prager (version hyperbolique). Les équations 2 à 6 décrivent la surface de charge et le potentiel plastique.

$$F = \frac{1}{1-B} (\sqrt{3J_2} - B I_1 + C \langle \sigma_{\min} \rangle - D \langle \sigma_{\min} \rangle) - \sigma_c(\varepsilon_{pc}) \quad (2)$$

$$B = \frac{f_{b0}/f_b - 1}{2f_{b0}/f_b - 1}; 0 \leq B \leq 0.5 \quad (3)$$

$$C = \frac{\sigma_c(\varepsilon_{pc})}{\sigma_t(\varepsilon_{pt})} (1 - B) - (1 + B) \quad (4)$$

$$D = \frac{3(1-K)}{2K-1} \quad (5)$$

$$G = \sqrt{(\sigma_{t0} \tan \psi)^2 + 3J_2} - \frac{\bar{I}_1}{3} \tan \psi \quad (6)$$

Le CDPM 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 compression uniaxiale (f_b) sont déterminés à partir des tests uniaxiaux de compression. 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. Les figures 7, 8, 9 et 10 décrivent respectivement la compression uniaxiale, la compression biaxiale, la traction uniaxiale et le test de triaxial de compression.



Figure 7 - Compression uniaxiale

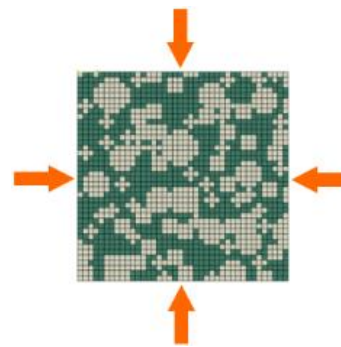


Figure 8 - Compression biaxiale



Figure 9 - Traction uniaxiale

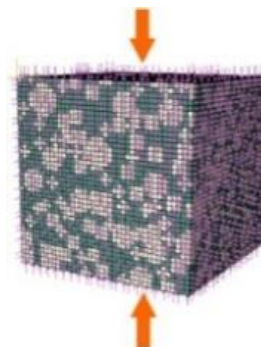


Figure 10 - Triaxial de compression

La résistance à la compression biaxiale (f_{b0}) est obtenue avec le test de compression biaxiale. En se basant sur les travaux [25], le paramètre (K) caractérisant le degré de déformabilité du matériau peut être déterminé en utilisant la relation de l'équation 9. Le paramètre (α) est déterminé à l'aide de l'équation 10.

$$\Psi = \arcsin \left(\frac{\frac{d\varepsilon_V}{d\varepsilon_1}}{2 + d\varepsilon_V/d\varepsilon_1} \right) \quad (7)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{3M}{M+6} \right) \quad (8)$$

M : rapport entre le déviateur de contrainte au pic (q) et la contrainte moyenne (p).

$$K = \frac{(1-\alpha)(\sin\varphi-3)}{2\alpha(3-\sin\varphi)-(\sin\varphi+3)} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1-A}{-2A+1} \quad (10)$$

$$A = \frac{f_{b0}}{f_b} \quad (11)$$

La stratégie de modélisation adoptée est résumée dans la figure 11.

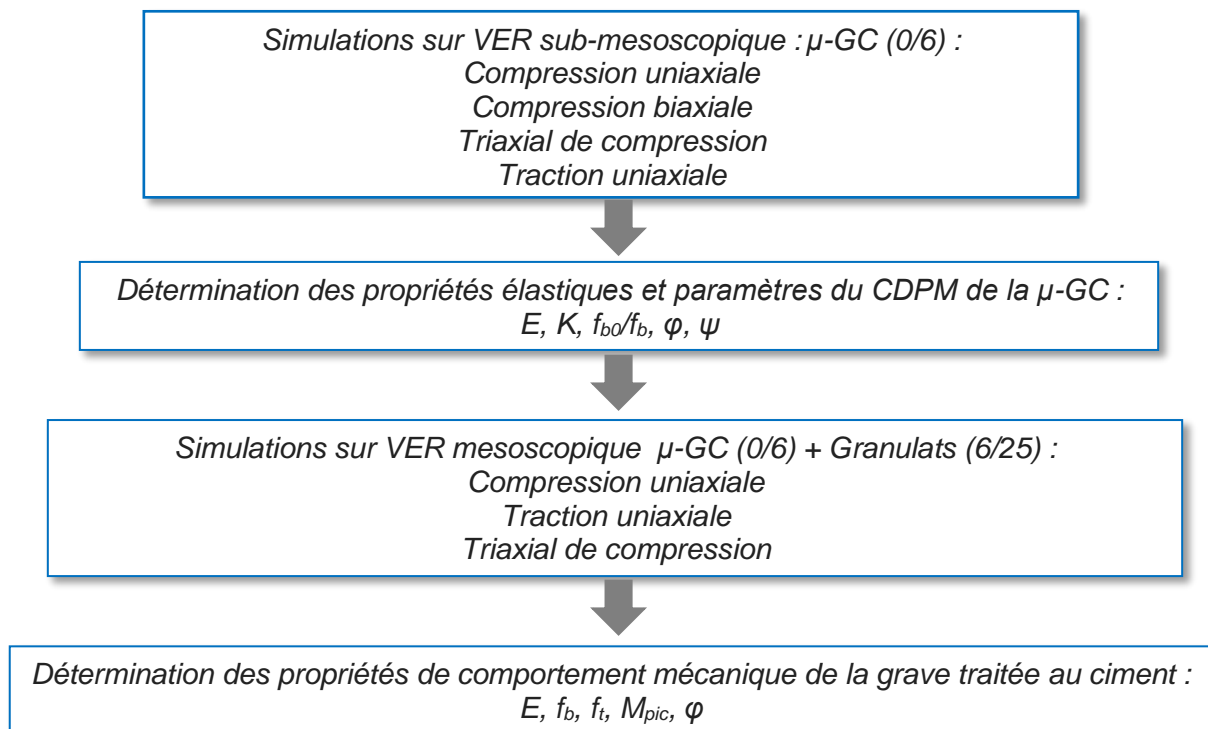


Figure 11 - Stratégie de modélisation hiérarchique développée dans ce travail

3.2. Mise en place des Volume Elémentaires Représentatifs (VER)

Afin de modéliser la granulométrie étalée 0/25 mm avec la présence d'une pâte de ciment comme liant, il est nécessaire de représenter l'hétérogénéité avec les différentes phases explicites qui la caractérisent : granulats, liant, porosité. Les volumes élémentaires représentatifs de chaque échelle suivent les compositions données dans les tableaux (1 et 2).

Nous avons un modèle bi-phasique (grains + matrice). L'auréole de transition dans les matrices cimentaires est supposée ne pas avoir d'influence sur le comportement mécanique homogénéisé [20, 26]. La méthode du « Take and Place » a été choisie sur un maillage déjà existant en nous arrangeant pour que les grains les plus petits aient une forme cubique. Une étude d'influence sur la taille du plus petit élément a été menée. Les figures 12, 13, 14 et 15 montrent les VER 2D et cubiques générés et sur lesquels les simulations sont effectuées.

Tableau 1 - Composition du VER sub-mesoscopique

Matrice : 15 %	Squelette granulaire : micro-grave 0/6 à 85 %		
Pâte de ciment 42,5R	40 %, dm = 1	31 %, dm = 3	14 %, dm = 5

Tableau 2 - Composition du VER mesoscopique

Matrice : 47,5 %	Squelette granulaire : grave 6/25 à 52,5 %			
μ-GC	22 %, dm = 7,5	14,5 %, dm = 12,5	11 %, dm = 17,5	5 %, dm = 22,5

dm : diamètre moyen des granulats en mm.

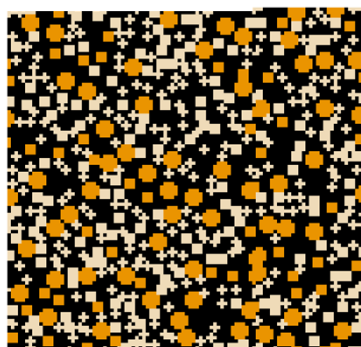


Figure 12 - μ-GC (40×40) mm²

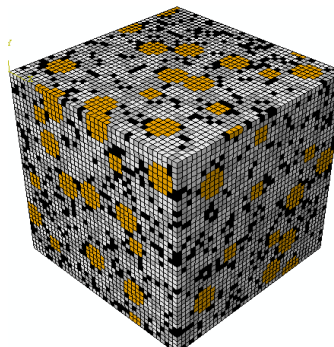


Figure 13 - μ-GC dans Abaqus

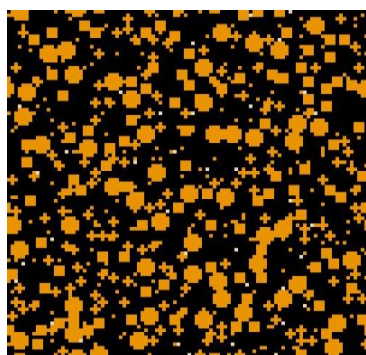


Figure 14 - Grave-Ciment (100×100) mm²

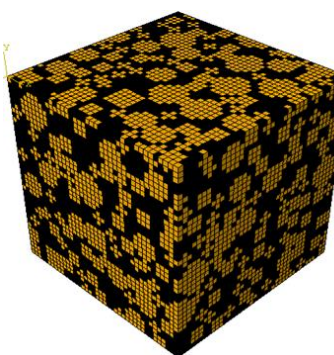


Figure 15 - Grave-Ciment dans Abaqus

3.3. Propriétés des phases de la modélisation

3.3.1. La pâte de ciment

Le comportement post-pic de la pâte de ciment considérée est déterminé selon les résultats de [16]. Les auteurs ont utilisé un modèle de fissuration diffuse (concrete smeared cracking) avec le modèle d'Hillerborg décrit à la figure 16. Les paramètres de comportement post-pic de la pâte de ciment sont déterminés en utilisant les relations données aux équations 12 à 16.

$$f_1/f_0 = \begin{cases} 0,119 f_{\text{cap-p}} + 0,8481 & \text{si } f_{\text{cap-p}} > 0,35 \\ -22,486 f_{\text{cap-p}}^2 + 15,99 f_{\text{cap-p}} - 1,9525 & \text{si } f_{\text{cap-p}} \leq 0,35 \end{cases} \quad (12)$$

$$f_0 = 1,6673(1 - f_{\text{cap-p}})^{1,967} \quad (\text{MPa}) \quad (13)$$

$$w_1 = 0,0661 f_{\text{cap-p}}^{-0,7565} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (14)$$

$$w_2 = 17,102 f_{\text{cap-p}}^{1,4863} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (15)$$

$$E = 35,931(1 - f_{\text{cap-p}})^{1,6973} \text{ (GPa)} \quad (16)$$

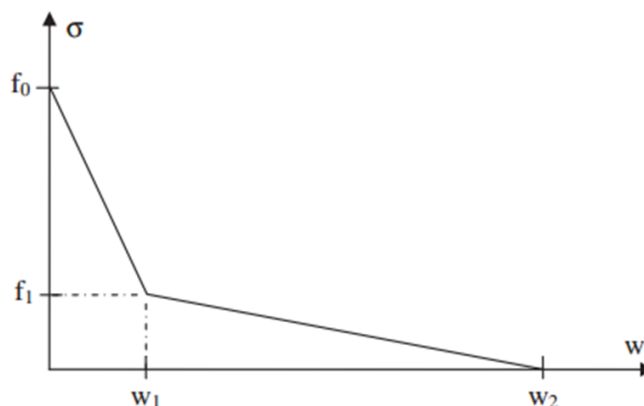


Figure 16 - Modèle d'Hillerborg – Paramètres de comportement post pic de la pâte de ciment

- f_1 et f_0 : contraintes de traction minimale et maximale de la pâte de ciment ;
- w_1 et w_2 : ouvertures de fissures pour f_1 et f_0 ;
- $f_{\text{cap-p}}$: porosité.

Les auteurs de [16] ont étudié trois types de pâtes qui se différencient par leur porosité. Cette dernière est de (17 % ; 24,9 % ; 41 %) pour respectivement des degrés d'hydratation (α) de (0,83 ; 0,64 ; 0,27). La porosité estimée pour 3 % de ciment dans la grave routière représente 70 % environ de la « matrice » pour un temps d'hydratation long ($\alpha = 0,83$). Nous avons également estimé la porosité de la pâte de ciment correspondant aux deux autres degrés d'hydratation à savoir $\alpha = 0,64$ et $\alpha = 0,27$ pour trouver respectivement 79 % et 95 % environ. En appliquant les résultats de [16], ils viennent les caractéristiques mécaniques données au tableau 3 caractérisant le comportement de la pâte de ciment dans la micro-grave-ciment.

Tableau 3 - Caractéristiques mécaniques de comportement post-pic de la pâte de ciment

Degré d'hydratation α	E (GPa)	f_1 (MPa)	f_0 (MPa)	f_1/f_0	w_1 (μm)	w_2 (μm)
0,83	4,17	0,13	0,138	0,91	0,09	10,45
0,64	2,51	0,07	0,076	0,92	0,08	12,1
0,27	0,19	$3,8E^{-3}$	$4E^{-3}$	0,97	0,07	15,9

Dans la suite, nous présenterons les résultats obtenus avec une pâte de ciment bien hydratée correspondant à un temps d'hydratation long ($\alpha = 0,83$).

3.3.2. Granulats de MIDND

En raison de l'étendue de la granulométrie, les grains les plus petits (1 et 3 mm) vont percoler d'une face à l'autre du VER. Un modèle d'Hillerborg associé à une technique de "kill element" est choisi pour remédier à la percolation. La résistance de cette phase continue a été déterminée par une modélisation simplifiée (figures 17 et 18) permettant d'obtenir le comportement de granulats connectés équivalents à des granulats non-connectés. Ce comportement est caractérisé par le déplacement post-pic maximum (u_{ck}), donné dans le tableau 4 pour les différentes sollicitations.

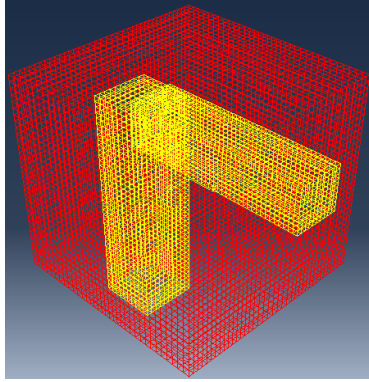


Figure 17 - Modèle à granulats connectés

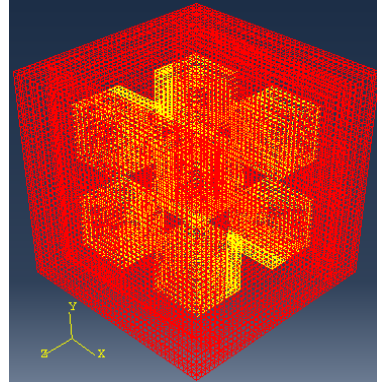


Figure 18 - Modèle à granulats non connectés

Tableau 4 - Caractéristiques de comportement post-pic des granulats (diamètres 1 et 3)

Tests	Compression uniaxiale	Compression biaxiale	Triaxial de compression	Traction uniaxiale
u_{ck} (mm)	$2E^{-4}$	$3,5E^{-4}$	$2E^{-4}$	$2E^{-4}$
ν	0,3			
f_t (MPa)	8			
G_f (N/mm)	0,1			

G_f : énergie de fissuration ; f_t : résistance à la traction ; E : modules d'Young ; ν : coefficient de poisson.

Le tableau 5 regroupe les modules homogénéisés de la phase percolante composée des granulats (diamètres 1 et 3 mm) et de la pâte de ciment. Ils ont été déterminés en suivant le raisonnement suivant :

- dans une direction, les granulats 1 et 3 sont notés $G_{1,3}$ et leur pourcentage se calcule par :

$$\% G_{1,3} = \sqrt[3]{(\% G_{1,3,5} - \% G_5)} \quad (17)$$

Avec G_5 : granulats de diamètre 5 mm

- le reste sera la pâte, à savoir (on met de côté les granulats de diamètre 5) :

$$\% \text{ Pâte de ciment} = 100 - \% G_{1,3} \quad (18)$$

- le module homogénéisé, E_{hom} , de l'assemblage (pâte+diamètre1+diamètre3) est donné par :

$$\frac{1}{E_{\text{hom}}} = \frac{\% G_{1,3}}{E_{\text{granulats}}} + \frac{\% \text{ Pâte}}{E_{\text{Pâte}}} \quad (19)$$

Tableau 5 - Modules d'Young homogénéisés de la phase percolante en fonction des modules d'Young des granulats

E_{MIDND} (GPa)	80	60	40	20
E_{hom} (GPa)	27	24	20,4	14

Les granulats de diamètre moyen supérieur ou égal à 5 mm sont considérés élastiques avec les caractéristiques mécaniques données au tableau 6.

Tableau 6 - Modules d'Young homogénéisés de la phase percolante en fonction des modules d'Young des granulats

Gf (N/m)	ft (MPa)	E (GPa)	ν
100	8	20 - 80	0,3

3.3.3. Résultats aux deux échelles d'étude

A l'échelle sub-mesoscopique, les paramètres qui caractérisent le comportement Mécanique de la micro-grave-ciment sont déterminés (tableau 7). A l'échelle mesoscopique, les courbes de comportement obtenues avec les différentes simulations ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques qui caractérisent la grave routière traitée au ciment à base de MIDND (tableau 8).

Tableau 7 - Paramètres caractérisant le CDPM pour la μ -GC

Domaines			Elastique		CDPM				
Paramètres			E (GPa)	K	f_{b0}/f_b	B	Φ (°)	M_{pic}	ψ
Modules d'Young des granulats (GPa)	80	50	25,29	0,571	1,075	0,065	56,15	2,30	26
		100							
		150							
	60	50	22,03	0,609	1,107	0,088	49,12	2,02	20
		100							
		150							
	40	50	18,22	0,645	1,183	0,134	44,55	1,83	16
		100							
		150							
	20	50	12,63	0,689	1,201	0,144	38,02	1,55	10
		100							
		150							

Tableau 8 - Caractéristiques mécaniques de la grave-ciment traitée à 3 % de ciment

E_{MIDND} (GPa)	E_{GC} (GPa)	Contraintes déviatoriques q_{pic} (MPa)	M_{pic}	ϕ (°)	$R_c \leftrightarrow f_b$ (MPa)	$R_t \leftrightarrow f_t$ (MPa)
80	46,59	11,16	2,87	76,07	10,11	0,617
60	37,59	11,95	2,85	75,23	10,29	0,613
40	27,65	12,78	2,88	76,60	10,90	0,611
20	15,8	14,7	2,83	74	11,55	0,61

Deux constats peuvent être faits :

- lorsque le module d'Young des MIDND diminue : le module d'Young diminue, le déviateur de contraintes au pic et la résistance en compression au pic augmente au niveau de la grave routière ;
- lorsque le module d'Young des MIDND varie : l'angle de frottement interne et le facteur M_{pic} restent quasi-stables.

Les résultats de résistance obtenus avec la modélisation montrent que le comportement mécanique est complexe car le matériau est hétérogène. Ainsi, les granulats rigides peuvent constituer des points durs générant des concentrations de contraintes pouvant initier la fissuration et donc une diminution des résistances.

Il ressort de cette étude de sensibilité que le module d'Young des particules de mâchefers n'interfère pas sur les caractéristiques de portance de la grave routière traitée à 3 % de ciment. Ces résultats permettent de classer la grave routière à base de MIDND traitée au

liant hydraulique. Le classement d'une Grave Traitée au Liant Hydraulique (GTLH) se fait en fonction des valeurs du module d'Young et de la résistance en traction. Notre matériau a été classé entre les classes mécaniques 3 et 4 lorsque le module d'Young des granulats varie de 20 à 80 GPa (figure 19). Les classes mécaniques 3 et 4 correspondant aux classes de trafic 2 et 3, pouvant supporter jusqu'à 300 PL/jour/sens.

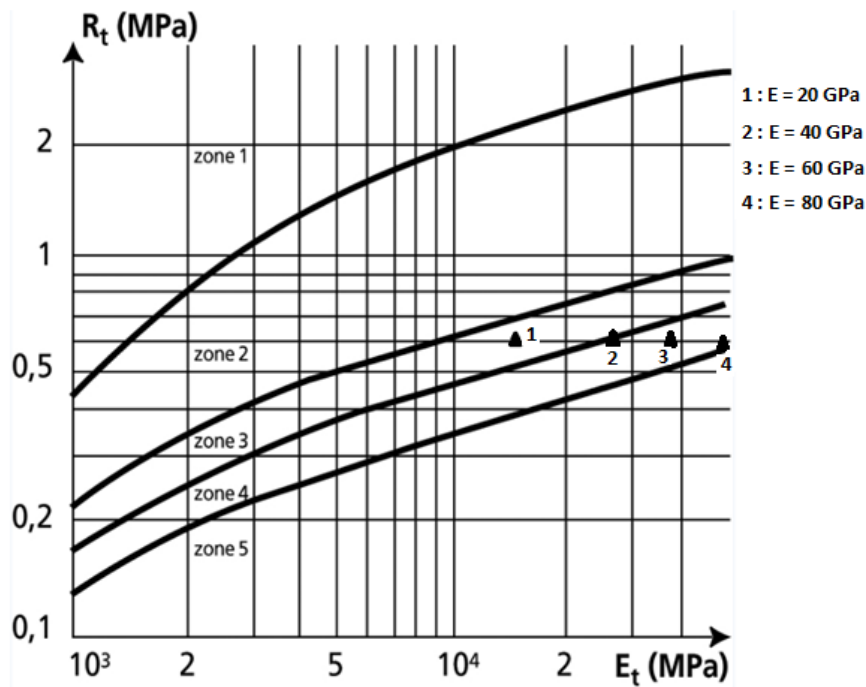


Figure 19 - Classement de la Grave routière à base de MIDND Traitée au Liant Hydraulique (NF EN 14227-1)

3.3.4. Validation de la modélisation

La répartition granulométrique de la modélisation développée dans ce travail est celle utilisée par [5]. L'auteur a effectué plusieurs expérimentations sur mâchefers non traités et sur mâchefers traités au ciment. Nous avons effectué une étude de sensibilité au module d'Young des MIDND. On compare les résultats de [5] avec l'ensemble des résultats de l'étude de sensibilité ($E_{\text{granulats}} = 20 - 80 \text{ GPa}$). En effet, les résultats de l'indentation prenant en compte la porosité des grains donnent un module proche de 20 GPa mais aussi une certaine variabilité ; par ailleurs les matériaux utilisés dans [5] ne proviennent pas de la même usine d'incinération ni même de la même région. Des essais triaxiaux expérimentaux ont été effectués à 28 jours par l'auteur. Nous avons effectué des simulations numériques d'essais triaxiaux sur MIDND traités à 3 % de ciment avec un temps d'hydratation long ($\alpha = 0,83$) et nos résultats sont comparables à ceux de [5] en termes de déviateur de contraintes, de coefficient M_{pic} et d'angle de frottement interne. Le tableau 9 illustre cette comparaison avec des écarts relatifs faibles pour chacun de ces paramètres.

Tableau 9 - Comparaison entre quelques résultats expérimentaux de [5] et ceux issus de la modélisation

	Déviateur au pic avec $p'=100 \text{ KPa}$ (MPa)	M_{pic}	ϕ (°)
Expérimental	10,064	2,91	78,46
Modélisation	10,65 – 14,30	2,83 – 2,87	74 – 76,07

4. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Avec près de 70 % de masse volumique inférieure à 2 g/cm³, les MIDND sont plutôt légers comparés aux granulats naturels. L'observation visuelle des granulats de MIDND montre une porosité interne importante pouvant expliquer en partie la légèreté qui caractérise ces types granulats.

La composition chimique des MIDND étudiés s'inscrit dans les plages de valeurs trouvées dans la littérature. Ces plages sont toutefois étendues. Cette composition peut donc être influencée par plusieurs paramètres à savoir : le tri sélectif des ordures ménagères en amont, le choix de l'incinérateur, le mode de refroidissement, le processus de maturation et surtout le type de séparateurs magnétiques utilisés. Les caractéristiques physico-chimiques des MIDND semblent dépendre de la zone de production et donc de leur origine. Ce qui laisse comprendre que les caractéristiques intrinsèques du matériau, notamment son module d'élasticité, peuvent varier d'une localité de production à une autre.

On note une faible rigidité homogénéisée (15-20 GPa en moyenne) lorsque la porosité et les phases solides sont prises en compte. Les modules élastiques réduits obtenus sur phases solides varient entre 15 et 68 GPa environ selon la zone testée et selon la nature de la particule de MIDND étudiée. Vu les différents matériaux que l'on peut rencontrer dans un granulat de MIDND, il est normal que les modules obtenus en des zones ponctuelles soient différents.

Le « laboratoire virtuel » mis en place a permis de déterminer les paramètres mécaniques caractérisant la grave traitée avec 3% de ciment. Cette modélisation est générale et n'est pas valable que pour les MIDND. Nous avons trouvé un angle de frottement interne de 76°. La valeur élevée obtenue confère au matériau une bonne capacité portante. Notre modèle a permis de constater entre autres que les paramètres mécaniques varient sensiblement avec le degré d'hydratation de la pâte de ciment. Les angles de dilatance obtenus sont compris entre 6 et 10°, en accord avec les angles de dilatance trouvés expérimentalement par [4]. Ils sont proches des angles de dilatance du sable et du gravier [27]. La classification en classes mécaniques 3 et 4 lorsque le module d'Young des particules de mâchefers varie de 20 à 80 GPa prouve la faisabilité d'un réemploi de ce type de Sous-Produits Industriels dans ce secteur d'activités.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM. Gérard Mauvoisin et Olivier Bartier pour leur aide et leur expertise dans la campagne expérimentale de tests d'indentation, ainsi que l'entreprise Eurovia, en particulier M. Loïc Seguin, pour leur approvisionnement en MIDND.

REFERENCES

1. Cluster Eco-Chantiers (1993). Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Franche-Comté en technique routière. Les graves issues des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux MIDND.
2. Sow, L. Kamali-Bernard, S. Mauvoisin, G. Bartier, O. and Bernard, F. (2019). Original Experimental Campaign of Indentation Instrumented on Aggregates of Non-Hazardous Waste Incineration Bottom Ash to Study the Heterogeneity of their Rigidity. Materials Science Forum.
3. Guide pour la gestion des déchets solides des petites collectivités du Sénégal. Décentralisation et Gouvernance Locale pour une gestion locale plus efficace, démocratique et responsable des services et des ressources (2004). Préparé par DGL Felo pour ARD, Inc. Au titre du Contrat N° 685-C-00-00-000037-00 Avec USAID/Sénégal.
4. Hung, L. N. (2011). 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 Douai, Université d'Artois.
5. Becquart, F. (2007). 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.

6. Arrêté 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, France (18 Novembre 2011).
7. Amorce (2012). Etat des lieux de la gestion des mâchefers en France. Rapport technique DT 50.
8. Sow, L. (2018). Approche couplée expérimentation-modélisation multi-échelle pour la détermination du comportement mécanique des graves routières traitées aux liants. Application à la valorisation des Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux. PhD. thesis. INSA Rennes.
9. Sow, L. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. and Kébé, C. M. F. (2018). Experiment-based modelling of the mechanical behaviour of non-hazardous waste incineration bottom ashes treated by hydraulic binder. MATEC Web of Conferences, 149, 01038.
10. Sow, L. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. Kébé, C. M. F. (2018). Mesoscale modeling of the temperature-dependent viscoelastic behavior of a Bitumen-Bound Gravels. Coupled Systems Mechanics, 7(5), pp 509-524.
11. Sow, L. Kamali-Bernard, S. Bartier, O. Mauvoisin, G. Bernard, F. (2018). Experimental Estimation of the Elastic Modulus of Non-Hazardous Waste Incineration Bottom Ash Aggregates by Indentation Tests - Microanalysis of Particles by Scanning Electron Microscopy. Advanced Materials Research, 1145, pp 80-84.
12. Sow, L. Kamali-Bernard, S. Bartier, O. Mauvoisin, G. and Bernard, F. (2019). Tests d'indentation instrumentée sur granulats de Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux. Influence de la taille de l'indenteur sur le module élastique. MATEC Web of Conferences, 261, 01002.
13. Sow, L. Bernard, F. Kamali-Bernard, Kébé, C. M. F. (2019). Mechanical behaviour of Cement-Bound Gravels by experiment-based 3D multi-scale modelling: application to Non Hazardous Waste Incineration bottom ashes aggregates for use in road techniques. Submitted to Road Materials and Pavement Design.
14. Sow, L. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. and Kébé, C. M. F. (2018). Approche couplée modélisation-expérimentation pour étudier le comportement mécanique de Mâchefers d'Incinération des Déchets Non Dangereux traités avec un liant hydraulique. MATEC Web of Conferences, 149, 01038.
15. Oliver, W. C., Pharr, G. M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Journal of Materials Research, 7, pp 1564-1583.
16. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. (2012). Predicting the evolution of mechanical and diffusivity properties of cement pastes and mortars for various hydration degrees – A numerical simulation investigation. Computational Materials Science, 61. pp 106-115.
17. Bernard, F. Fu, J. (2018). Kamali-Bernard S. Multiscale modeling approach to determine the specific heat of cementitious materials. European Journal of Environmental and Civil Engineering.
18. Kamali-Bernard, S. Bernard, F. Prince, W. Hjiat, M. (2017). Modélisation tridimensionnelle et multi-échelle du comportement des matériaux cimentaire, application à la lixiviation. 25e rencontre de l'AUGC, pp 23-25 Mai Bordeaux.
19. Kamali-Bernard, S. Bernard, F. (2009). Effect of tensile cracking on diffusivity of mortar: 3D numerical modelling. Computational Materials Science.
20. Keinde, D. (2014). Etude du béton à l'échelle mesoscopique : simulation numérique et tests de micro-indentation. PhD thesis. INSA de Rennes.
21. Sow, L. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. and Kébé, C. M. F. (2017). Comportement mécanique de graves à base de MIOM traitées au ciment par une modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelle. 35èmes Rencontres de l'AUGC, ECN/UN, 22 au 24 mai 2017, Nantes, France.
22. Sow, L. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. and Kébé, C. M. F. (2017). Détermination du comportement visco-élastique d'une grave routière à base de MIOM traitée au bitume par modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelles. 35èmes Rencontres de l'AUGC, ECN/UN, 22 au 24 mai 2017, Nantes, France.
23. Fu, J. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. (2017). Assessment of the elastic properties of amorphous calcium silicates hydrates (I) and (II) structures by molecular dynamics simulation. Molecular Simulation, 39(14-15), pp 1-15.
24. Lee, J. Fenves, G. L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of Engineering Mechanics, 124(8), pp 892-900.
25. Javier, R. Francisco, M. Joaquín, M. (2013). Concrete Constitutive Model, Calibration and Applications. Simulia Community Conference.
26. Bernard, F. Kamali-Bernard, S. (2015). Numerical study of ITZ contribution on mechanical behavior and diffusivity of mortars. Computational Materials Science, 102, pp 250-257.
27. Prat, M. (1995). La modélisation des ouvrages AFPC. Emploi des éléments finis en génie civil.