



**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**

Libasse Sow

► **To cite this version:**

Libasse Sow. 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. Matériaux composites et construction. INSA de Rennes; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2018. Français. NNT : 2018ISAR0001 . tel-01797954

HAL Id: tel-01797954

<https://theses.hal.science/tel-01797954>

Submitted on 23 May 2018

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.

Thèse

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

THESE INSA Rennes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'INSA RENNES
Spécialité : Génie Civil

présentée par

Libasse SOW

ECOLE DOCTORALE : *Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)*
LABORATOIRE : *LGCGM*

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.

Olivier Bartier

Maitre de conférences HDR à l'IUT de Rennes / Membre invité

Thèse soutenue le 06.04.2018

devant le jury composé de :

Nor-Edine Abriak

Professeur, IMT Lille-Douai / Rapporteur / Président

Ibrahima Khalil Cissé

Professeur, Ecole Polytechnique de Thiès / Rapporteur

Christophe Petit

Professeur, Université de Limoges / Examinateur

Fabrice Bernard

Maitre de conférences HDR à l'INSA Rennes / Directeur de thèse

Cheikh Mouhamed Fadel Kébé

Maitre de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique de l'UCAD /
Co-directeur de thèse

Siham Kamali-Bernard

Maitre de conférences HDR à l'INSA Rennes / Co-encadrante

**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.**

Libasse SOW



En partenariat avec



Thèse en cotutelle

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.

présentée par :

Libasse SOW

à

l’INSA de Rennes le 06 Avril 2018

pour obtenir les diplômes :

Docteur de l’Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Rennes, France

Ecole Doctorale Sciences Pour l’Ingénieur : ED-SPI

Spécialité : **Génie Civil**

et

Docteur de l’Université Cheikh Anta DIOP (UCAD) de Dakar, Sénégal

Ecole Doctorale Physique, Chimie, Sciences de la Terre, de l’Univers et de l’Ingénieur : ED-PCSTUI

Mention : **Sciences de l’Ingénieur**

devant le jury:

Nor-Edine Abriak

Professeur, IMT Lille-Douai, France / Rapporteur / Président

Ibrahima Khalil Cissé

Professeur, Ecole Polytechnique de Thiès, Sénégal / Rapporteur

Christophe Petit

Professeur, Université de Limoges, France / Examineur

Fabrice Bernard

Maitre de conférences HDR à l’INSA Rennes, France / Directeur de thèse

Cheikh Mouhamed Fadel Kébé

Maitre de conférences à l’Ecole Supérieure Polytechnique de l’UCAD, Sénégal / Co-directeur de thèse

Siham Kamali-Bernard

Maitre de conférences HDR à l’INSA Rennes, France / Co-encadrante

Olivier Bartier

Maitre de conférences HDR à l’IUT de Rennes, France / Membre invité

Nous posons à travers cette thèse un jalon aigre-doux marquant à la fois une Fin et un Début. Nous devons nous ouvrir à l'avenir, tout en exprimant notre gratitude envers CELUI qui nous a guidés avec tant de perspicacité jusque-là où nous sommes aujourd'hui. Je rends grâce au Tout Puissant, L'Omniscient. Il dit : mais vous ne pouvez vouloir, que si ALLAH veut, (LUI), le Seigneur de l'Univers [Coran, Sourate 81, Verset 29].

Il est certes vrai qu'Il ne tolère guère d'être associé à une quelconque égalité voire rivalité, mais Il impose toutefois, qu'après attestation de son Unicité, que nous prions sur CELUI à travers QUI, Il répand sa Miséricorde dans l'ici-bas et dans l'au-delà. Paix et Salut sur LUI.

Si le mot « Gratitude » devait faire l'objet d'un chapitre à développer dans cette thèse, les termes « Mère et Père » en seraient les mots clés pour deux raisons majeures : m'engendrer et me soutenir infailliblement dans toutes les circonstances.

Libasse Laye
Sokhna Assiétou Laye
Seydina Ababacar Laye
Seydina Limamou Lahi Al Mahdi (PSL)

A mes filles, Sokhna Adama Laye et Sokhna Khary Laye.

.....

A la mémoire de Meissa Fall, Que le Tout Puissant l'accueille dans son Paradis !

Remerciements

Ce travail de thèse s'est fait dans le cadre d'une convention cotutelle entre l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes et l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar. Il s'est déroulé principalement au Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM) de Rennes.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à Fabrice Bernard, Directeur de thèse, Maitre de conférences HDR à l'INSA de Rennes.

Pour des travaux de thèse avec toutes leurs exigences, il n'est pas toujours évident au premier coup de faire confiance à un candidat qu'on ne connaît pas. Donc je te remercie de m'avoir fait confiance en acceptant de diriger cette thèse. Tes conseils et orientations pragmatiques m'ont permis d'avancer efficacement tout en cumulant les enseignements à honorer à Dakar et le travail de thèse à mener en parallèle.

Je remercie Cheikh Mouhamed Fadel Kébé, co-directeur de thèse, Maitre de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar. Son expérience a bien servi dans cette thèse et plus particulièrement dans l'exercice de rédaction.

Mes remerciements vont à l'encontre de Siham Kamali-Bernard, Maitre de conférences HDR à l'INSA de Rennes en sa qualité de co-encadrante. La partie expérimentale de ce travail n'aurait pas pu être faite sans son implication effective. Merci d'avoir co-encadré cette thèse.

Je remercie Gérard Mauvoisin et Olivier Bartier pour leur aide précieuse et leur expertise dans la campagne expérimentale de tests d'indentation.

Je remercie également l'entreprise Eurovia, en particulier Loïc Seguin, pour l'approvisionnement en Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND).

Ma reconnaissance va également à l'encontre du personnel du Centre de Microscopie Électronique à Balayage et microAnalyse de l'Université de Rennes 1 pour leur collaboration sur la partie concernant les analyses MEB.

Une grande reconnaissance à mon collègue Dame Keinde par l'intermédiaire de qui j'ai pu faire la connaissance de Fabrice Bernard.

Je suis sensible à la flexibilité des autorités de l'Ecole Supérieure Polytechnique de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar particulièrement le personnel enseignant et administratif du département génie civil. Merci pour la gestion des temps de séjours à Rennes et le soutien financier.

Je ne peux parler de ce travail de thèse sans adresser mes plus sincères remerciements au Service de Coopération et d'Actions Culturelles de l'Ambassade de France à Dakar pour le financement dont j'ai eu à bénéficier et qui m'a été d'une utilité considérable.

Enfin, à ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce travail, je vous dis Merci.

Libasse.

Table des matières

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	VII
Liste de abréviations.....	XI

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I - Présentation du matériau. Généralités et résultats d'une nouvelle campagne expérimentale sur des particules de MIDND..... 5

I.1. Introduction.....	6
I.2. Etats des lieux sur les graves à base de MIDND	6
I.2.1. Origines et composition des MIDND	6
I.2.2. Composition des MIDND	9
I.2.3. Textes règlementaires relatifs aux MIDND	11
I.2.4. Valorisation des MIDND en techniques routières	12
I.3. Quelques études expérimentales approfondies de MIDND dans la bibliographie en rapport avec les travaux de cette thèse.....	14
I.3.1. Procédure expérimentale de l'essai triaxial	14
I.3.2. Comportement des graves de MIDND sous sollicitations triaxiales	15
I.4. Campagne expérimentale originale sur particules isolées de MIDND.....	21
I.4.1. Présentation des MIDND étudiés et détermination de leur masse volumique.....	21
I.4.2. Préparation des échantillons pour la MEB et l'indentation instrumentée.....	24
I.4.3. Analyses au Microscope Electronique à Balayage (MEB).....	25
I.4.3.1. Matériels utilisés	25
I.4.3.2. Résultats obtenus au MEB et microanalyse	25
I.4.4. L'indentation instrumentée	29
I.4.4.1. Principe de l'indentation et méthodes d'exploitation des résultats.....	29
I.4.4.2. Tests d'indentation sur particules de MIDND et résultats obtenus	31
I.4.4.2.1. Série de tests A : avec un indenteur monobloc05b	33
I.4.4.2.1.1. Echantillon 1	34
I.4.4.2.1.2. Echantillon 2	36
I.4.4.2.1.3. Echantillon 3	37
I.4.4.2.1.4. Echantillon 4	39
I.4.4.2.1.5. Echantillon 5	41
I.4.4.2.1.6. Echantillon 7	42
I.4.4.2.1.7. Echantillon 8	45
I.4.4.2.1.8. Echantillon 9	48
I.4.4.2.1.9. Récapitulatifs des résultats d'indentation de la série A	52
I.4.4.2.1.10. Retour d'expérience sur les tests non concluants	52
I.4.4.2.2. Série de tests B : avec un indenteur monobloc140a	53
I.4.4.3. Discussions	56

I.5. Conclusion	58
-----------------------	----

Chapitre II - Quelques stratégies de modélisation multi-échelle de matériaux granulaires dans la bibliographie..... 60

II.1. Introduction	61
II.2. Modélisation des matériaux granulaires cimentaires.....	61
II.2.1. Processus d'hydratation du ciment Portland	61
II.2.2. Les différentes phases et échelles de la modélisation.....	63
II.2.3. Simulations numériques des matériaux cimentaires avec Abaqus	67
II.2.3.1. Présentation du progiciel Abaqus	67
II.2.3.2. Présentation de quelques stratégies de simulations numériques de matériaux cimentaires	67
II.3. Modélisation des matériaux granulaires bitumineux.....	70
II.3.1. Définition et origine des bitumes.....	70
II.3.2. Caractéristiques générales des bitumes	70
II.3.3. Classification des bitumes	71
II.3.4. Comportement visco-élastique du bitume	71
II.3.5. Propriétés rhéologiques du bitume	72
II.3.6. Modèle Maxwell généralisé.....	72
II.3.7. Les séries de Prony	73
II.3.8. Stratégies de simulation numérique des matériaux traités aux liants hydrocarbonés....	73
II.4. Conclusion	80

Chapitre III - Comportement mécanique de graves à base de MIDND traitées au ciment par une modélisation numérique 2D et 3D hiérarchique multi-échelle 83

III.1. Introduction	84
III.2. Procédure générale de modélisation.....	84
III.2.1. Construction des VER.....	84
III.2.2. Hypothèses sur le comportement des matériaux de la modélisation.....	86
III.2.2.1. La pâte de ciment	86
III.2.2.2. Les granulats	87
III.2.3. Stratégie de modélisation adoptée.....	90
III.3. Application aux graves routières à base de MIDND.....	95
III.3.1. Valorisation des MIDND en techniques routières	95
III.3.2. Résultats de la modélisation pour un module d'Young égal à 80 GPa.....	96
III.3.2.1. Echelle sub-mesoscopique	96
III.3.2.2. Echelle mesoscopique	103

III.3.3. Etude de sensibilité au module d'Young des particules de MIDND	109
III.3.3.1. Propriétés des matériaux et description des simulations effectuées.....	109
III.3.3.2. Résultats obtenus et conclusions	111
III.3.3.2.1. Echelle sub-mesoscopique	111
III.3.3.2.2. Echelle mesoscopique	114
III.3.4. Comparaison et validation des résultats de la modélisation avec quelques résultats expérimentaux de [BEC 07]	122
III.4. Etude de l'influence du maillage.....	122
III.4.1. Développement d'une modélisation 2D.....	122
III.4.2. Simulations effectuées et comparaison des résultats	123
III.5. La prise en compte de la porosité dans le VER 2D.....	124
III.5.1. Définition d'une porosité explicite.....	124
III.5.2. Simulations effectuées et résultats obtenus	125
III.6. Discussions.....	126
III.7. Conclusion.....	127

Chapitre IV - Détermination du comportement viscoélastique d'une grave routière à base de MIDND traitée au bitume par modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelle..... 130

IV.1. Introduction.....	131
IV.2. Stratégie de modélisation	132
IV.2.1. Poids de la série de Prony	133
IV.2.2. Constantes de la loi WLF et modules de relaxation.....	134
IV.2.2.1. Définition du principe d'équivalence temps-température pour un matériau thermo-rhéologiquement simple	134
IV.2.2.2. Modules de relaxation normalisés.....	135
IV.3. Modélisations à l'échelle sub-mesoscopique.....	136
IV.3.1. Volume Elémentaire Représentatif sub-mesoscopique.....	136
IV.3.2. Hypothèses sur les propriétés rhéologiques des matériaux.....	137
IV.3.2.1. Les granulats de MIDND	137
IV.3.2.2. La matrice bitumineuse poreuse	137
IV.3.3. Tests de relaxation de contraintes en fonction du temps	139
IV.3.3.1. Détermination des courbes de relaxation de contraintes pour la micro-grave bitume.....	139
IV.3.3.2. Détermination des constantes de la loi WLF de la micro-grave bitume	140
IV.3.3.3. Validation des caractéristiques thermo-rhéologiques de la μ GB	144
IV.4. Modélisations à l'échelle mesoscopique.....	145
IV.4.1. Volume Elémentaire Représentatif mesoscopique	145
IV.4.2. Propriétés thermo-rhéologiques des phases de la modélisation mesoscopique	146
IV.4.2.1. Les granulats de MIDND	146
IV.4.2.2. La matrice bitumineuse : μ GB	146
IV.4.3. Tests de relaxation de contraintes en fonction du temps	146
IV.4.3.1. Détermination des courbes de relaxation de contraintes pour la grave-bitume	146
IV.4.3.2. Détermination des constantes de la loi WLF de la grave-bitume	147

IV.4.3.3. Données déduites des courbes de relaxation de contraintes.....	148
IV.4.3.4. Validation des paramètres thermo-rhéologiques de la grave-bitume.....	149
IV.5. Influence du module d'Young des particules de MIDND sur les propriétés thermo-rhéologiques de la grave-bitume	150
IV.5.1. Relaxation de contraintes pour Egrains = 20 GPa	150
IV.5.2. Comparaison des propriétés thermo-rhéologiques lorsque Egrains grains varie	153
IV.6. Conclusion	154
Conclusion générale et perspectives	157
Conférences/Publications	161
Références et sources	163

Liste des figures

Figure I.1. Principe de fonctionnement d'une UIOM	7
Figure I.2. Bilan des flux de matières solides d'une IUOM [DAB 08]	7
Figure I.3. Exemple de synoptique simplifié d'une Installation de Maturation et d'Elaboration de MIDND, IME [CNR 01]	8
Figure I.4. Composition moyenne des ordures ménagères [HUN 11]	10
Figure I.5. Composition générale des graves de MIDND après traitement [CNR 01]	10
Figure I.6. Utilisation des MIDND en technique routière (Destombes et al., 2003) cité par [DAB 08]	13
Figure I.7. Schéma de principe de la cellule triaxiale (norme NF P 94-074)	15
Figure I.8. Schéma de sollicitations de l'éprouvette (norme NF P 94-074)	15
Figure I.9. Echantillons de MIDND avant et après test triaxial [BEC 07]	15
Figure I.10. Diagramme q - ϵ_a des MIDND non traités [BEC 07]	16
Figure I.11. Courbes déviatoriques à 28 jours sur le matériau traité pour $p'=100$ kPa [BEC 07]	17
Figure I.12. Evolution de la déformation volumique pour $u = 200$ kPa [HUN 11]	18
Figure I.13. Evolution du déviateur de contrainte q pour $u = 200$ kPa [HUN 11]	19
Figure I.14. MIDND 0/25 mm provenant des carrières de la Garenne	21
Figure I.15. Fraction 12,5/25 mm des particules de MIDND étudiées	21
Figure I.16. Pycnomètre rempli d'eau sans et avec un grain de MIDND	22
Figure I.17. Histogramme de répartition des classes de masse volumique dans l'échantillon de 21 grains de diamètre compris entre 20 et 25 mm	23
Figure I.18. Echantillons de MIDND préparés pour les analyses au MEB et les tests d'indentation	25
Figure I.19. Répartition des éléments chimiques dans l'échantillon de MIDND	26
Figure I.20. Cartographie sur particules de MIDND de Garenne	27
Figure I.21. Composition chimique d'une particule isolée de MIDND au 25 ^{ième} point EDS	28
Figure I.22. Quelques images microscopiques des particules 0/12,5 mm de MIDND de Garenne (Vignoc)	28
Figure I.23. Appareil d'indentation utilisé (Equipements PSM-LGCGM INSA Rennes)	29
Figure I.24. Courbe charge-décharge de l'indentation expérimentée	30
Figure I.25. Courbe charge-décharge - méthode « Olivier et Pharr »	30
Figure I.26. Représentation schématique d'un contacts sphère rigide/plan (cas du contact de Hertz)	31
Figure I.27. Dispositif d'indentation instrumentée [LIA 17]	31
Figure I.28. Microscope utilisé pour l'observtion et la mesure des surfaces indentées (Equipements PSM-LGCGM INSA Rennes)	32
Figure I.29. Courbes descriptives de la forme de l'indenteur monobloc05b	33
Figure I.30. Image 3D de la surface de contact de l'indenteur monobloc05b	33
Figure I.31. Echantillon 1 avec les zones testées	34
Figure I.32. Rugosité de la surface indentée dans les essais 1 et 2	34
Figure I.33. Courbes d'indentation - échantillon 1 avec indenteur monobloc05b	35

Figure I.34. Echantillon 2 avec la zone testée.....	36
Figure I.35. Courbe d'indentation - échantillon 2 avec un indenteur monobloc05b	36
Figure I.36. Echantillon 3 avec la zone testée.....	37
Figure I.37. Courbes d'indentation - échantillon 3 avec un indenteur monobloc05b.....	37
Figure I.38. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 3 - Essai 1 ...	37
Figure I.39. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 3 - Essai 2 ...	38
Figure I.40. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 3 - Essai 3 ...	38
Figure I.41. Echantillon 4 avec la zone testée.....	39
Figure I.42. Courbes d'indentation - échantillon 4 avec un indenteur monobloc05b.....	39
Figure I.43. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 4 - Essai 1 ...	39
Figure I.44. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 4 - Essai 2 ...	40
Figure I.45. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 4 - Essai 3 ...	40
Figure I.46. Echantillon 5 avec la zone testée.....	41
Figure I.47. Courbes d'indentation - échantillon 5 avec un indenteur monobloc05b.....	41
Figure I.48. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 5 - Essai 1 ...	41
Figure I.49. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 5 - Essai 2 ...	42
Figure I.50. Echantillon 7 avec la zone testée.....	42
Figure I.51. Courbes d'indentation - échantillon 7 avec un indenteur monobloc05b.....	43
Figure I.52. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 7 - Essai 1 ...	43
Figure I.53. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 7- Essai 2 ...	43
Figure I.54. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 7 - Essai 3 ...	44
Figure I.55. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 7 - Essai 3	44
Figure I.56. Echantillon 8 avec la zone testée.....	45
Figure I.57. Courbes d'indentation - échantillon 8 avec un indenteur monobloc05b.....	45
Figure I.58. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 8 - Essai 1 ...	45
Figure I.59. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 8 - Essai 2 ...	46
Figure I.60. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 8 - Essai 3 ...	46
Figure I.61. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 8 - Essai 1	47
Figure I.62. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 8 - Essai 2	47
Figure I.63. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 8 - Essai 3	47
Figure I.64. Echantillon 9 avec la zone testée.....	48
Figure I.65. Courbes d'indentation - échantillon 9 avec un indenteur monobloc05b.....	48
Figure I.66. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 9 - Essai 1 ...	48
Figure I.67. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 9 - Essai 2 ...	49
Figure I.68. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 9 - Essai 3 ...	49
Figure I.69. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 9 - Essai 1	50
Figure I.70. Empreinte de l'indenteur au niveau de la zone indentée – Echantillon 9 - Essai 2	51
Figure I.71. Exemple de courbe d'enfoncement incompatible avec la forme de l'indenteur utilisé. Problème de contact initial en raison d'une rugosité trop grande	53
Figure I.72. Exemple de rugosité de surface ayant conduit à des résultats erronés	53
Figure I.73. Courbes descriptives de la forme de l'indenteur utilisé monobloc140b	54
Figure I.74. Image 3D de la surface de contact de l'indenteur monobloc140b utilisé.....	54
Figure I.75. Courbes d'indentation de l'essai 1 – indenteur monobloc140b	55
Figure I.76. Courbes d'indentation de l'essai 2 – indenteur monobloc140b	55
Figure I.77. Phase de décharge de l'essai 1 – indenteur monobloc140b	56
Figure I.78. Phase de décharge de l'essai 2 - monobloc140b	56

Figure II.1. Evolution des proportions volumiques des différents constituants au sein d'une pâte de ciment en fonction du degré d'hydratation [ROU 08]	63
Figure II.2. Etapes de la modélisation multi-échelle de la plateforme MuMoCC [KAM 07]	64
Figure II.3. Images 2D de la microstructure 3D de la pâte de ciment hydratée [KAM 07] ...	65
Figure II.4 Modélisation de type « hiérarchique » : création de VER à chaque échelle et simulation de différents tests.....	66
Figure II.5. Modèle bi-phasique utilisé pour la détermination du VER [KEI 14]	69
Figure II.6. Différents VER [KEI 14]	69
Figure II.7. Représentation schématique du modèle viscoélastique de Maxwell	72
Figure II.8. Représentation schématique du modèle viscoélastique de Maxwell généralisé..	72
Figure II.9. Représentation du modèle bi-phasique du béton bitumineux avec 5-6% de porosité du mastic [TEH 12]	75
Figure II.10. Modèle tridimensionnel généré par MOA [TEH 12].....	75
Figure II.11. Modèle bidimensionnel correspondant au modèle 3D généré par MOA [TEH 12]	76
Figure II.12. Conditions aux limites du modèle bidimensionnel [TEH 12]	76
Figure II.13. Exemples de maillage avec des tailles de : 0,3 mm (a) ; 0,6 mm (b) ; 1 mm (c) [TEH 12]	78
Figure II.14. Influence de la densité du maillage sur le module complexe pour une fréquence de 10 Hz [TEH 12]	78
Figure II.14. Variation du module complexe en fonction de la fréquence pour les agrégats circulaires idéaux et ceux polygonaux irréguliers [TEH 12]	79
Figure II.15. Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux : (a) module complexe ; (b) angle de phase – béton bitumineux pour T = 6 °C [TEH 12]	80
Figure III.1. Micro-grave-ciment générée avec la méthode du « Take and place »	85
Figure III.2. Mesostructure 2D générée avec la méthode du « Take and place »	85
Figure III.3. VER 3D de μ GC dans Abaqus	86
Figure III.4. VER 3D de GC dans Abaqus	86
Figure III.5. Courbe bilinéaire de comportement post-pic de la pâte de ciment	86
Figure III.6. Modèle à granulats connectés	89
Figure III.7. Modèle à granulats non connectés	89
Figure III.8. Courbes contraintes-déformations en compression uniaxiale sur modèles simplifiés	89
Figure III.9. Courbes contraintes-déformations en compression biaxiale sur modèles simplifiés	90
Figure III.10. Exemple de courbe contraintes-déformations d'un matériau cimentaire en compression uniaxiale [KEI 14].....	91
Figure III.11. Stratégie de modélisation multi-échelle hiérarchique développée	93
Figure III.12. Conditions aux limites de la compression uniaxiale	94
Figure III.13. Conditions aux limites de la compression biaxiale	94
Figure III.14. Conditions aux limites de la traction.....	94
Figure III.15. Conditions aux limites du triaxial	94
Figure III.16. Granulats de MIDND de [BEC 07].....	96
Figure III.17. Granulométrie des MIDND considérée dans la modélisation [APP 04].....	96
Figure III.18. Contraintes-déformations en compression uniaxiale de la μ GC	98
Figure III.19. Contraintes-déformations en compression biaxiale de la μ GC	98
Figure III.20. Contraintes déviatoriques-déformations de la μ GC pour $\alpha = 0,83$	99

Figure III.21. Courbes de déformations volumiques de la μ GC pour $\alpha = 0,83$	99
Figure III.22. Plan q, p de la μ GC pour $\alpha = 0,83$	100
Figure III.23. Contraintes déviatoriques-déformations de la μ GC pour $\alpha = 0,64$	100
Figure III.24. Courbes de déformations volumiques de la μ GC pour $\alpha = 0,64$	101
Figure III.25. Plan q, p de la μ GC pour $\alpha = 0,64$	101
Figure III.26. Contraintes déviatoriques-déformations de la μ GC pour $\alpha = 0,27$	102
Figure III.27. Courbes de déformations volumiques de la μ GC pour $\alpha = 0,27$	102
Figure III.28. Plan q, p de la μ GC pour $\alpha = 0,27$	103
Figure III.29. Contraintes – déformations de la grave-ciment en compression uniaxiale	104
Figure III.30. Contraintes déviatoriques – déformations de la grave-ciment pour $\alpha=0,83$..	105
Figure III.31. Courbes de déformations volumiques de la grave-ciment pour $\alpha=0,83$	105
Figure III.32. Plan q, p de la grave-ciment pour $\alpha=0,83$	106
Figure III.33. Contraintes déviatoriques – déformations de la grave-ciment pour $\alpha=0,64$..	106
Figure III.34. Courbes de déformations volumiques de la grave-ciment pour $\alpha=0,64$	107
Figure III.35. Plan q, p de la grave-ciment pour $\alpha=0,64$	107
Figure III.36. Contraintes déviatoriques – déformations de la grave-ciment pour $\alpha=0,27$..	108
Figure III.37. Courbes de déformations volumiques de la grave-ciment pour $\alpha=0,27$	108
Figure III.38. Plan q, p de la grave-ciment pour $\alpha=0,27$	109
Figure III.39. Contraintes – déformations de la grave-ciment en traction	109
Figure III.40. Stratégie de modélisation multi-échelle hiérarchique développée	111
Figure III.41. Courbes contraintes-déformations en compression uniaxiale de la μ GC	112
Figure III.42. Courbes contraintes-déformations en compression biaxiale de la μ GC	112
Figure III.43. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 80$ GPa	113
Figure III.44. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 60$ GPa	113
Figure III.45. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 40$ GPa	114
Figure III.46. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 20$ GPa	114
Figure III.47. Classement de la Grave routière à base de MIDND Traitée au Liant Hydraulique (NF EN 14227-1)	115
Figure III.48. Courbes contraintes-déformations en compression uniaxiale de la grave-ciment	116
Figure III.49. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 80$ GPa	116
Figure III.50. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 60$ GPa	117
Figure III.51. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 40$ GPa	117
Figure III.52. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 20$ GPa	118
Figure III.53. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 80$ GPa	118
Figure III.54. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 60$ GPa	119
Figure III.55. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 40$ GPa	119
Figure III.56. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 20$ GPa	120
Figure III.57. Déviateur de contraintes au pic de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND	120
Figure III.58. Module d'Young de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND	121

Figure III.59. Facteur M_{pic} de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND	121
Figure III.60. Angle de frottement interne de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND	121
Figure III.61. Maillage hétérogène 2D avec 40*40 éléments finis.....	123
Figure III.62. Maillage hétérogène 2D avec 80*80 éléments finis.....	123
Figure III.63. Conditions aux limites avec 40*40 éléments finis	123
Figure III.64. Courbes contraintes-déformations des maillages 40*40 et 80*80 éléments CPE4R.....	124
Figure III.65. Courbes contraintes-déformations des VER avec porosités implicite et explicite en déformations planes.....	126
Figure IV.1. Comportement des matériaux bitumineux en fonction du niveau de sollicitation [BAA 02].....	132
Figure IV.2. Stratégie de modélisation hiérarchique développée	133
Figure IV.3. Conditions aux limites pour la relaxation de contraintes en compression uniaxiale	133
Figure IV.4. Principe d'équivalence temps-température d'essai	135
Figure IV.5. Exemple de courbe d'évolution du module de relaxation en fonction du temps à la température de référence de 0 °C	136
Figure IV.6. Image 2D de la micro-grave-bitume générée par une méthode du « Take and Place »	137
Figure IV.7. Représentation schématisée du modèle viscoélastique de Maxwell généralisé	138
Figure IV.8. Courbes de relaxation de contraintes de la μ GB à différentes températures d'essais en fonction du temps	140
Figure IV.9. Comparaison des Log (a_T)	141
Figure IV.10. Modules normalisés de cisaillement de la μ GB à différentes températures..	142
Figure IV.11. Modules volumiques de la μ GB à différentes températures.....	143
Figure IV.12. Courbe maîtresse de la μ GB à toutes les températures d'essai	144
Figure IV.13. Comparaison entre VER homogène et hétérogène de μ GB à +10 °C.....	145
Figure IV.14. Image 2D de la micro-grave-bitume.....	146
Figure IV.15. Courbes de relaxation de contraintes de la grave-bitume à différentes températures d'essais en fonction du temps	146
Figure IV.16. Comparaison des Log (a_T).....	147
Figure IV.17. Courbe maîtresse de la GB à toutes les températures d'essai	148
Figure IV.18. Comparaison entre VER homogène et hétérogène de grave-bitume à une température d'essai de +10 °C	150
Figure IV.19. Courbes de relaxation de contraintes de la μ GB pour $E_{grains} = 20$ GPa.....	151
Figure IV.20. Courbes de relaxation de contraintes de la GB pour $E_{grains} = 20$ GPa.....	151
Figure IV.21. Courbe maîtresse de la μ GB pour $E_{grains} = 20$ GPa	152
Figure IV.22. Courbe maîtresse de la GB pour $E_{grains} = 20$ GPa	152
Figure IV.23. Comparaison en termes de rapport de contraintes pour $E_{grains} = 20$ et 80 GPa à l'échelle de la μ GB et à la température de référence	153
Figure IV.24. Comparaison en termes de rapport de contraintes pour $E_{grains} = 20$ et 80 GPa à l'échelle de la GB et à la température de référence.....	154

Liste des tableaux

Tableau I.1. Teneurs moyennes en éléments MAJEURS [ODI 12]	10
Tableau I.2. Teneurs moyennes en éléments TRACES minéraux et organiques [ODI 12]....	10
Tableau I.3. Seuils réglementaires de la circulaire du 9 Mai 1994 [DAB 08].....	11
Tableau I.4. Comportement à la lixiviation (NF EN 12457-2) du lot à caractériser ; valeurs limites à respecter pour les quantités relarguées à une fraction liquide/solide (L/S) = 10 l/kg [ARR 11]	12
Tableau I.5. Teneur intrinsèque en éléments polluants sur la base d'une analyse en contenu total du lot à caractériser [ARR 11]	12
Tableau I.6. Caractéristiques des essais triaxiaux sur les MIDND traités [BEC 07].....	16
Tableau I.7. Caractéristiques des essais triaxiaux sur le matériau traité [BEC 07]	17
Tableau I.8. Valeurs des caractéristiques élastiques des séries A et B des MIDND de [HUN 11]	19
Tableau I.9. Valeurs des caractéristiques de déformation volumique des séries A et B des mâchefers incinérés de [HUN 11]	20
Tableau I.10. Caractéristiques mécaniques des séries C et D des MIDND de [HUN 11]	20
Tableau I.11. Masse volumique apparente des granulats de MIDND	23
Tableau I.12. Proportions des éléments chimiques dans l'échantillon de MIDND.....	26
Tableau I.13. Caractéristiques de rugosité (paramètres de hauteur) de la surface testée de l'échantillon 1.....	35
Tableau I.14. Modules réduits obtenus sur échantillon 1 avec l'indenteur monobloc05b	35
Tableau I.15. Modules réduits obtenus sur échantillon 2 avec l'indenteur monobloc05b	36
Tableau I.16. Modules réduits obtenus sur échantillon 3 avec l'indenteur monobloc05b	38
Tableau I.17. Modules réduits obtenus sur échantillon 4 avec l'indenteur monobloc05b	40
Tableau I.18. Modules réduits obtenus sur échantillon 5 avec l'indenteur monobloc05b	42
Tableau I.19. Modules réduits obtenus sur échantillon 7 avec l'indenteur monobloc05b	44
Tableau I.20. Modules réduits obtenus sur échantillon 8 avec l'indenteur monobloc05b	46
Tableau I.21. Modules réduits obtenus sur échantillon 9 avec l'indenteur monobloc05b	52
Tableau I.22. Récapitulatif des modules élastiques sur échantillons 9 indentés avec l'indenteur monobloc05b.....	52
Tableau I.23. Modules réduits obtenus sur échantillon 1 avec l'indenteur monobloc140a....	55
Tableau II.1. Valeurs du module de Young et du coefficient de Poisson des principales phases prises en compte dans la modélisation [KAM 04]	65
Tableau II.2. Teneur en hydrates et porosité capillaire de la pâte de ciment hydratée d'après CEMHYD3D [KAM 09].....	68
Tableau II.3. Influence du maillage sur le comportement en traction [KEI 14].....	68
Tableau II.4. Données d'entrée de la modélisation, caractéristiques élastiques et résistance en compression [KEI 14]	69
Tableau II.5. Pourcentage de passants des agrégats pour la détermination du module dynamique du béton bitumineux [TEH 12].....	79
Tableau III.1. Composition VER sub-mesoscopique	85
Tableau III.2. Composition VER mesoscopique	85
Tableau III.3. Composition de la micro-grave-ciment	87

Tableau III.4. Caractéristiques mécaniques de comportement post-pic de la pâte de ciment	87
Tableau III.5. Modules homogénéisés de la phase continue à différents degrés d'hydratation	88
Tableau III.6. Caractéristiques mécaniques et déplacement maximum post-pic des granulats 1 et 3 mm	89
Tableau III.7. Paramètres du CDPM pour la μ GC à différents degrés d'hydratation (α) de la pâte de ciment	97
Tableau III.8. Résistances au pic et modules de Young de la μ GC pour différents degrés d'hydratation (α)	97
Tableau III.9. Caractéristiques mécaniques de la grave-ciment à différents degrés d'hydratation de la pâte de ciment (α)	103
Tableau III.10. Modules d'Young et résistances au pic de la grave-ciment selon les différentes simulations	103
Tableau III.11. Caractéristiques de comportement post-pic de la pâte de ciment ($\alpha=0,83$)	110
Tableau III.12. Caractéristiques mécaniques et déplacement maximum post-pic des granulats de diamètres 1 et 3	110
Tableau III.13. Modules homogénéisés en fonction du module des MIDND	110
Tableau III.14. Paramètres mécaniques de la μ GC pour différents E_{MIDND}	111
Tableau III.15. Sensibilité des caractéristiques mécaniques de la grave-ciment en fonction du module d'Young des particules de MIDND	115
Tableau III.16. Comparaison entre quelques résultats expérimentaux [BEC 07] et issus de la modélisation (Présente thèse)	122
Tableau III.17. Comparaison entre 40*40 et 80*80 éléments CPE4R en déformations planes	124
Tableau III.18. Caractéristiques mécaniques définissant le comportement post-pic de la pâte de ciment	125
Tableau III.19. Comparaison des VER avec porosités implicite et explicite en déformations planes	126
Tableau IV.1. Principales caractéristiques du bitume [NGU 08]	137
Tableau IV.2. Caractéristiques élastiques isotropes du bitume de l'échelle sub-mesoscopique	138
Tableau IV.3. Constantes de la loi WLF du bitume à 0 °C	138
Tableau IV.4. Série de Prony du bitume à 0 °C	139
Tableau IV.5. Valeurs de a_T issues des simulations de relaxation de contraintes à différentes températures d'essai	140
Tableau IV.6. Constantes ajustées de la loi WLF de la μ GB à une température de référence de 0 °C	141
Tableau IV.7. Série de Prony de la μ GB à 0 °C	141
Tableau IV.9. Valeurs de a_T issues des simulations de relaxation de contraintes à différentes températures d'essai	147
Tableau IV.10. Constantes ajustées de la loi WLF de la grave de MIDND à une température de référence de 0 °C	148
Tableau IV.11. Série de Prony de la GB à 0 °C	148
Tableau IV.12. Modules de cisaillement normalisés caractérisant la GB	149
Tableau IV.13. Modules volumiques normalisés caractérisant la GB	149
Tableau IV.15. Loi WLF pour Egrains = 20 GPa et 80 GPa à une température de référence de 0 °C	153

Tableau IV.16. Série de Prony de la GB pour $E = 20$ GPa.....	153
Tableau IV.17. Série de Prony de la GB pour $E = 80$ GPa.....	153

Liste de abréviations

MIOM	Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères
OM.....	Ordures Ménagères
IME.....	Installations de Maturation et d'Elaboration
MIDND.....	Mâchefers d'Incinération des Déchets Non Dangereux
μGC	Micro-Grave-Ciment
UIOM.....	Unités d'Incinération des Ordures Ménagères
REFIOM.....	Résidus d'Epuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères
UIDND.....	Usine d'Incinération des Déchets Non Dangereux
GC	Grave-Ciment
μGB	Micro-Grave-Bitume
GB	Grave-Bitume
SETRA.....	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
OPN.....	Optimum Proctor Normal
IPI.....	Indice Protant Immédiat
OPM.....	Optimum Proctor Modifié
CBR.....	Californian Bearing Ratio
GTR.....	Guide des Terrassements Routiers
LA.....	Los Angeles
MDE.....	Micro Deval
GNT.....	Grave Non Traitée
LCPC.....	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
INSA.....	Institut National des Sciences Appliquées
VER.....	Volume Elémentaire Représentatif
AFNOR.....	Association Française de Normalisation
TBA.....	Température Bille Anneau
2D.....	Deux Dimensions
3D.....	Trois Dimensions
CDP.....	Concrete Damaged Plasticity
CDPM.....	Concrete Damaged Plasticity Model
ADEME.....	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
NITS.....	National Institute of Technology Silchar
BF.....	Brittle Failure
WLF.....	Williams-Landel-Ferry
NF.....	Norme Française
CMEBA.....	Centre de Microscopie Electronique à Balayage et microAnalyse
GTLH.....	Grave Traitée au Liant Hydraulique
INSA.....	Institut National des Sciences Appliquées
UCAD.....	Université Cheikh Anta DIOP

Introduction générale

En techniques routières, les différentes couches doivent être constituées de matériaux capables de reprendre et de répartir les charges provenant des véhicules roulants. Les assises de chaussée jouent un rôle structurel important du fait qu'elles réduisent les contraintes exercées sur le sol de fondation. Les matériaux constitutifs de ces couches doivent présenter des caractéristiques mécaniques leur permettant de remplir pleinement leurs fonctions dans la structure de chaussée.

De manière générale, les granulats naturels issus de carrières d'extraction ont depuis longtemps été les seules possibilités pour la réalisation de couches de chaussées sous forme de graves traitées ou non aux liants hydraulique et hydrocarboné. La bibliographie fournit de nombreux travaux qui s'intéressent au comportement de ces matériaux composites. Le secteur de la construction consomme annuellement environ 350 millions de tonnes de granulats naturels en France [CLU 15]. Cependant, quel que soit la quantité de réserve disponible dans une zone donnée, l'extraction continue 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.

D'une part, la production d'ordures ménagères ne cesse de croître en fonction de la croissance démographique et la consommation sans cesse croissante des populations. Une étude menée par Eurostat (direction générale de la Commission européenne chargée de l'information statistique à l'échelle communautaire) en 2012 a révélé que chaque français produit annuellement en moyenne 458 kg de déchets ménagers [ADE 15].

Dans un cadre de recyclage et de développement durable, les ordures ménagères peuvent être soumises à plusieurs types de traitements (thermique, biologique, tri pour recyclage, stockage). Face aux tonnages de déchets de plus en plus croissants, l'incinération reste le moyen de traitement thermique le plus adapté puisqu'elle permet de réduire en moyenne de 70% la masse des déchets incinérés et de 90% leur volume [ADE 12]. Les agrégats qui en résultent sont appelés **Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND)** ; ils représentent les résidus solides issus de la combustion des déchets ménagers en sortie basse du four [MIN 17]. En France, on évalue à plus de 3 millions de tonnes la production annuelle des MIDND [AMO 15]. Ils peuvent représenter un gisement stratégique de substitution de granulats routiers classiques pour faire face à l'impossibilité de mise en décharge continue et l'ouverture de nouvelles carrières de matériaux routiers. Il n'existe cependant à ce jour aucune connaissance précise sur les caractéristiques élastiques (le module élastique par exemple) de ces types de sous-produits industriels.

D'autre part, l'approfondissement des connaissances et surtout le développement des matériaux traités au liant à base de produits recyclés ont montré que la structure des graves routières 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 la mise en place de simulations basées sur une description explicite de plus en plus réaliste des matériaux composites. De telles approches présentent des avantages indéniables, comparées aux méthodes plus traditionnelles, 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 développés dans la communauté mécanicienne au sens large du terme.

Les MIDND répondant aux exigences de la réglementation en vigueur [ARR 11] peuvent être valorisés en technique routière [HUN 11]. Des documents scientifiques se sont intéressés à leur étude expérimentale : [MIN 17], [VAL 13], [HUN 11], [FER 08], [ARI 08], [BIR 07], [BEC 05], [BEC 07], [BEC 09], [BAD 08], [CHI 03], entre autres. Il est toutefois rare de voir des auteurs s'intéresser de façon approfondie à la modélisation multi-échelle hiérarchique de graves routières à base de MIDND traitées aux liants (ciment et bitume).

Cette présente thèse est axée sur deux grandes parties : une campagne expérimentale et une modélisation multi-échelle hiérarchique. La campagne expérimentale originale et jamais menée jusqu'à maintenant sur des particules de mâchefers incinérés concerne la détermination des masses volumiques apparentes de particules isolées de MIDND, la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et l'indentation instrumentée de particules isolées de MIDND. Les résultats obtenus dans la campagne expérimentale en termes de modules élastiques servent de données d'entrée à la modélisation. Cette dernière concerne les graves routières traitées avec un ciment d'une part, et avec du bitume d'autre part. Une application est ensuite faite sur les graves à base de Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND) traitées aux liants en vue de déterminer le comportement mécanique les caractérisant.

Le travail est présenté comme suit :

- **Le premier chapitre** fait une synthèse bibliographique sur la description des MIDND avec leur origine, leur composition, leur production ainsi que leur valorisation en technique routière dans un cadre de développement durable. Dans la partie campagne expérimentale, les masses volumiques apparentes de particules isolées de MIDND de diamètres variant de 20 à 25 mm sont déterminées. Une partie importante est consacrée à une campagne d'indentation originale qui passe par deux étapes : la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) sur la fraction 0/12,5 mm et l'indentation instrumentée sur particules isolées de MIDND de diamètre variant de 20 à 25 mm. La MEB a pour but principal de déterminer la composition chimique des particules étudiées. L'indentation permet l'obtention de modules élastiques intrinsèques à ces types de granulats. Les caractéristiques élastiques intrinsèques aux particules étudiées servent de données d'entrée à la modélisation développée aux chapitres 3 et 4.
- Dans le **deuxième chapitre**, une succincte synthèse bibliographique sur la modélisation multi-échelle de matériaux granulaires traités ou non aux liants est faite. En technique routière, deux liants sont principalement utilisés : le liant hydraulique (ciment) et le liant hydrocarboné (bitume). Ce chapitre sert d'introduction aux chapitres 3 et 4 dans lesquels des stratégies spécifiques de modélisation multi-échelle hiérarchique sont développées.

- Au **troisième chapitre**, une modélisation 3D dite « hiérarchique multi-échelle » est développée. Elle consiste à représenter l'hétérogénéité de la grave routière traitée au ciment dans des volumes élémentaires représentatifs des différentes échelles d'études. Une campagne de simulations numériques "Laboratoire virtuel" a été menée. A l'échelle sub-mesoscopique, par le biais de simulations multiaxiales 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. Une modélisation 2D sur le même matériau est ensuite faite. Elle a permis d'étudier la finesse du maillage et d'évacuer le problème de son influence sur les résultats obtenus en 3D.
- Il est développé dans le **quatrième et dernier chapitre** une stratégie de modélisation similaire à celle développée au chapitre 3. Il s'agit d'une modélisation multi-échelle hiérarchique 3D des graves traitées avec un liant hydrocarboné qui est le bitume. Le comportement viscoélastique linéaire à faibles déformations de la grave-bitume est déterminé. Les propriétés thermo-rhéologiques en question sont les séries de Prony et les constantes de la loi WLF à une température de référence de 0 °C.

Conclusion générale et perspectives

Une conclusion générale synthétise les différents résultats obtenus. Des discussions sont faites et des perspectives avancées.

Chapitre I - Présentation du matériau. Généralités et résultats d'une nouvelle campagne expérimentale sur des particules de MIDND

I.1. Introduction

Dans des conditions environnementales maîtrisées, la valorisation des MIDND est une des solutions de substitution à une partie de la consommation des ressources naturelles non renouvelables, tout en limitant les distances de transport et en s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire [CLU 15]. Actuellement, les MIDND sont utilisés en grande majorité dans le domaine du génie civil à hauteur de 80 % de leur production [HUN 11]. Les MIDND répondant aux exigences de la réglementation en vigueur en France [ARR 11] peuvent être valorisés en techniques routières dans les terrassements, les remblais, les couches de chaussée, les parkings, la voirie et l'assainissement ([DAB 08] ; [HUN 11]). La connaissance de leur comportement sous sollicitations typiques de la mécanique des sols et sous sollicitations rencontrées in-situ s'avère indispensable pour une utilisation plus rationnelle. Il n'existe cependant à ce jour aucune connaissance précise sur les caractéristiques élastiques de ces types de matériaux.

Dans ce qui suit, nous présentons des généralités sur les MIDND et quelques études expérimentales remarquables réalisées dans la bibliographie. La masse volumique apparente est déterminée sur un échantillonnage de 21 particules isolées de MIDND de diamètres compris entre 20 et 25 mm. Une partie importante est consacrée à une campagne d'indentation originale et jamais menée jusqu'à maintenant sur des particules isolées de MIDND. Cette campagne expérimentale permet d'avoir des valeurs intrinsèques de modules élastiques réduits permettant d'alimenter les modèles numériques mis en place dans cette présente thèse. La campagne expérimentale passe par trois étapes : la masse volumique de particules isolées de MIDND, la Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et l'indentation instrumentée.

I.2. Etats des lieux sur les graves à base de MIDND

I.2.1. Origines et composition des MIDND

Les Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND) sont anciennement appelés Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM). Les MIDND s'apparentent 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 ([BEC 07], [HUN 11], [MIN 17]). Les MIDND sont issus des Unités d'Incinération des Ordures Ménagères (UIOM) dont le schéma de principe est donné à la figure I.1 [DAB 08].

Les étapes générales de production de MIDND sont, selon [DAB 08], les suivantes :

- admission des ordures ménagères (OM) via une fosse de stockage ;
- pré-traitements éventuels (criblage, déferrailage et homogénéisation) ;
- combustion dans un four à grilles, tournant ou à lit fluidisé ;
- refroidissement des gaz de combustion et récupération possible d'énergie calorifique par cogénération ;
- traitement des fumées (production de Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères - REFIOM) ;
- récupération et trempe des résidus (production de mâchefers).



Figure I.1. Principe de fonctionnement d'une UIOM

- (1) Admission des OM ; (2) Fosse de stockage (homogénéisation) ; (3) Grue de déchargement ; (4) Trémie d'alimentation ; (5) Chambre de combustion ; (6) Chaudière (récupération d'énergie) ; (7) Production de mâchefers ; (8) Traitements des fumées ; (9) Dépoussiérage ; (10) Production de REFIOM ; (11) Evacuation des gaz par des cheminées ; (12) Turbines à vapeur. [DAB 08]

L'incinération engendre des déchets secondaires sous diverses formes : pour 1000 kg de déchets traités, il en résulte :

- 250 kg de MIDND ;
- 42 kg de résidus d'épuration des fumées d'incinération de déchets non-dangereux ;
- 0,05 kg de fines issues des fumées.

Ces informations sont reprises par [DAB 08] sous forme de schéma détaillé (figure I.2).

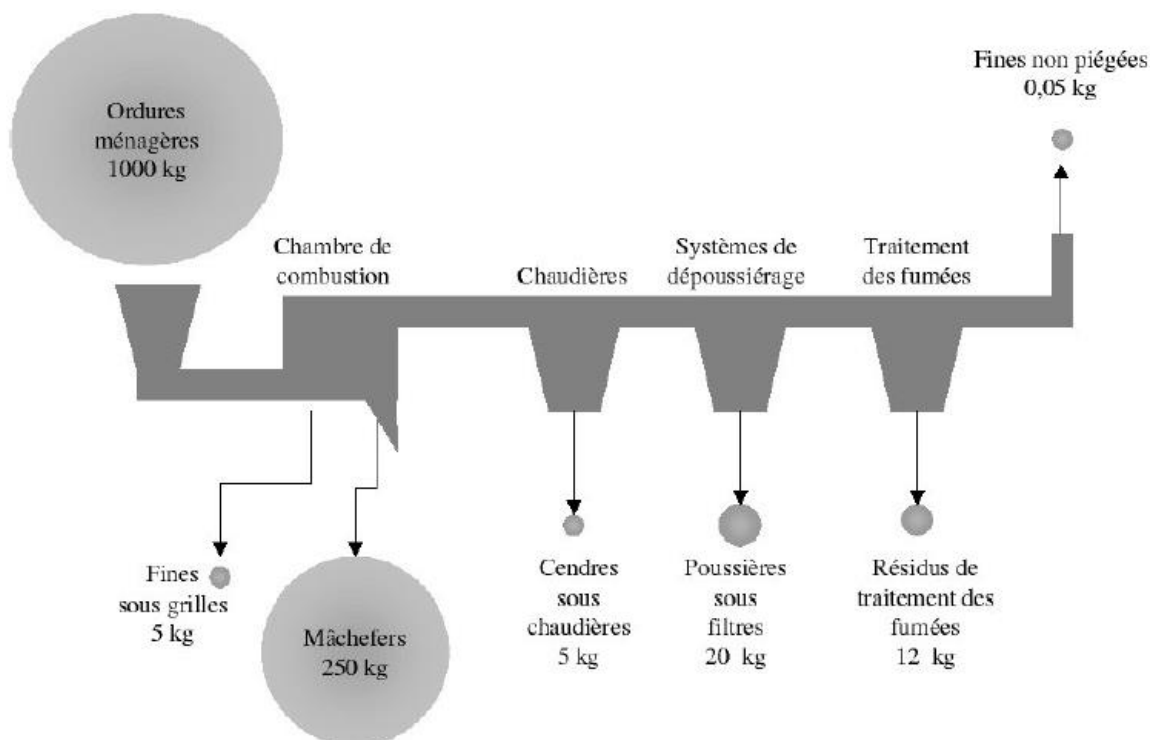


Figure I.2. Bilan des flux de matières solides d'une IUOM [DAB 08]

Ces résidus, généralement refroidis à l'eau, sont très riches en matières minérales (silicium, aluminium, calcium, etc.) mais contiennent également de l'eau (20 à 25%), en moyenne 6 à 10% de particules métalliques récupérables et des indésirables ([AMO 15], [CEW 16]). En 2010, 14 millions de tonnes de déchets ménagers ont été incinérés en France, produisant ainsi en moyenne 3 millions de tonnes de MIDND (20 - 25% du tonnage incinéré) [AMO 15].

Après la phase d'incinération, les mâchefers sont dans un premier temps refroidis, puis ils subissent un criblage manuel ou mécanique afin d'éliminer les particules trop larges. Des opérations de déferrailage à l'aide d'overbands sont effectuées pour débarrasser au mieux les mâchefers des particules métalliques. Ils sont par la suite stockés sur le site de l'usine pour mûrir ou bien dirigés le cas échéant, vers une installation de maturation et d'élaboration (IME) pour poursuivre le processus d'élaboration de la grave de mâchefers [MIN 17].

Les installations de maturation et d'élaboration peuvent être internes ou externes à l'Usine d'Incinération des Déchets Non Dangereux (UIDND). Le passage en IME se fait selon les étapes du schéma de la figure I.3. Les IME ont pour rôle de poursuivre le processus d'élaboration et de maturation des mâchefers d'incinération avant toute valorisation potentielle dans la construction. Ces installations sont également équipées de tambours magnétiques, de séparateurs à courants de Foucault pour enlever davantage les métaux ferreux et non-ferreux contenus dans les MIDND. Des aires de stockage sont prévues pour la maturation afin de réduire le potentiel polluant des mâchefers en métaux lourds. Dans la plupart des cas, la maturation des mâchefers d'incinération peut durer entre 2 et 4 mois, voire 12 mois [MIN 17]. Le matériau est alors exposé à l'air et aux pluies afin que ses composantes instables puissent évoluer vers des composés secondaires beaucoup plus stables par le principe de la carbonatation.

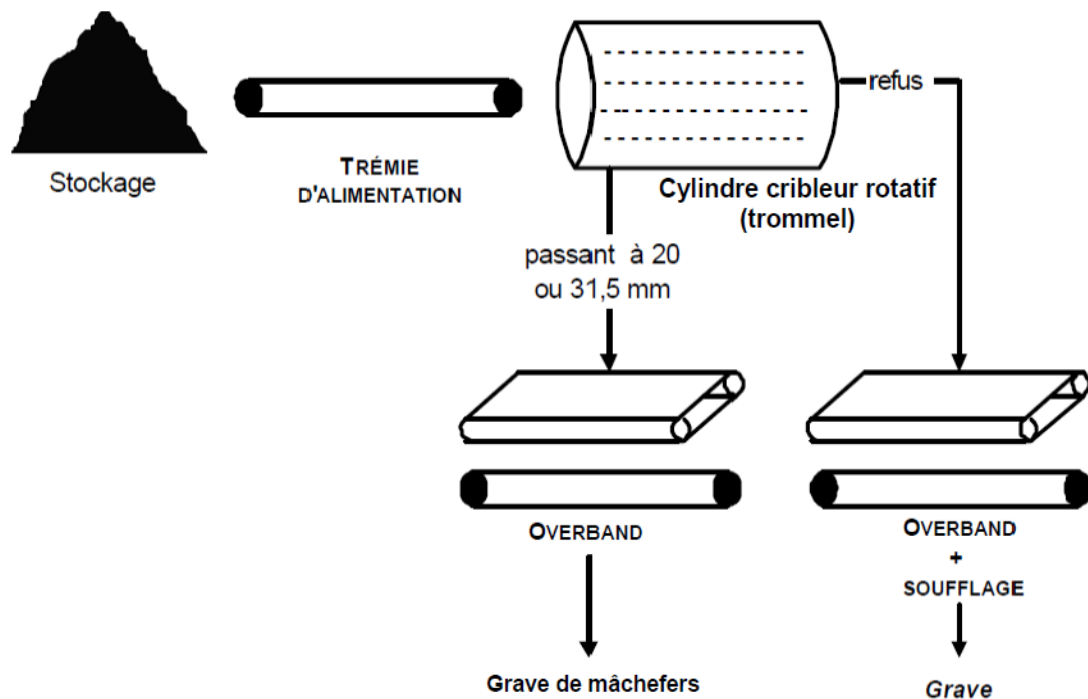


Figure I.3. Exemple de synoptique simplifié d'une Installation de Maturation et d'Elaboration de MIDND, IME [CNR 01]

L'élaboration renvoie aux opérations de criblage, déferraillage, maturation des mâchefers traités séparément. La formulation désigne la préparation d'un matériau routier à partir d'un mélange de matériaux pouvant comporter une portion plus ou moins importante de mâchefers. Chaque étape se résume en générale de la façon suivante :

- le refroidissement ou extinction : cette étape qui se situe à la sortie du four est généralement réalisée dans un siphon hydraulique ; le mâchefer frais présente ainsi une forte teneur en eau ;
- le scalpage : il permet d'enlever tous les éléments grossiers et est assuré par une grille d'une coupure moyenne de 200 à 250 mm ; ces éléments grossiers sont parfois broyés puis remis dans le circuit d'élaboration ;
- le criblage : cette étape permet de calibrer les mâchefers (entre 20 et 31,5 mm) afin de répondre aux exigences des utilisateurs des graves de mâchefers en techniques routières. L'unité de criblage est soit représentée par des cribles rotatifs, soit par des cribles plans (vibrants ou non), soit par des cribles à étoiles (plus rares) ;
- la séparation des imbrûlés légers : cette étape se fait par tri aéraulique avec des techniques de soufflage ou d'aspiration ; les imbrûlés légers ainsi séparés sont généralement retournés vers l'UIDND pour y être incinérés.

I.2.2. Composition des MIDND

La composition physico-chimique et minéralogique des MIDND dépend directement de la composition des ordures ménagères incinérées. [HUN 11] propose la répartition donnée à la figure I.4 dans laquelle les principales composantes des ordures ménagères sont représentées avec leurs pourcentages. La composition générale des graves de MIDND après traitement est donnée à la figure I.5 selon [CNR 01]. [ODI 12] donne plus de détails sur la composition des mâchefers telle qu'indiqué aux tableaux I.1 et I.2.

Cependant, une étude comparative réalisée sur la composition moyenne des ordures ménagères en France et dans un département pilote (Jura), où la collecte sélective a été réalisée a permis d'observer les différences majeures sur la composition des déchets à incinérer [KAI 04]. Elle 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 [MIN 17]. On note une diminution respective de 10% et de 8% des proportions de verres et de papiers/cartons tandis que les composés tels que les textiles, combustibles et éléments fins augmentent en moyenne de 30%. La diminution du taux d'incinération des matières qui peuvent avoir une seconde vie augmente le taux de matières qui ne peuvent bénéficier d'un recyclage [KAI 04]. Des différences sont observées dans la zone où un programme de collecte sélective des ordures ménagères a été réalisé avant l'incinération. Il met en exergue par exemple une baisse des proportions en silicium dans la composition des MIDND où la collecte sélective est pratiquée, conséquence de la réduction des importantes quantités de débris de verres dans les ordures ménagères [REN 07].

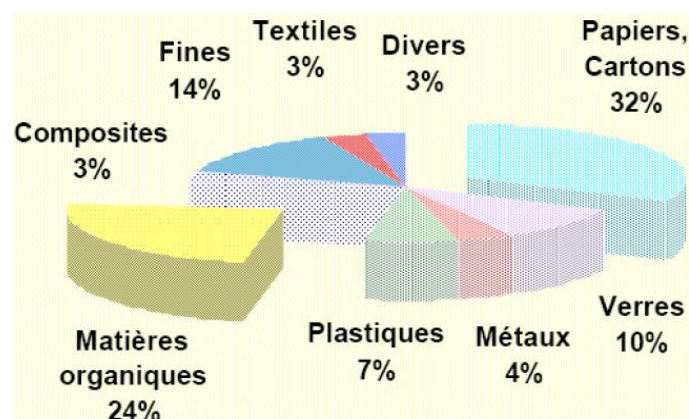


Figure I.4. Composition moyenne des ordures ménagères [HUN 11]

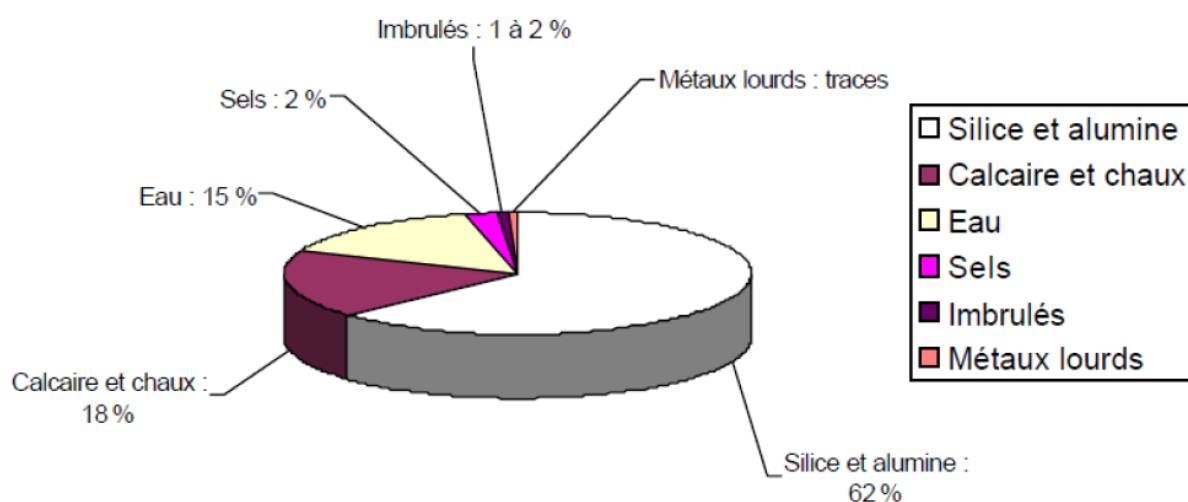


Figure I.5. Composition générale des graves de MIDND après traitement [CNR 01]

Tableau I.1. Teneurs moyennes en éléments MAJEURS [ODI 12]

Silicium (silicates)	50 à 60 % (exprimé en SiO ₂)
Calcium (hydrides, carbonates, sulfates)	12 à 60 % (exprimé en CaO)
Fer (oxydes, silicates, métal)	6 à 16 % (exprimé en Fe ₂ O ₃)
Aluminium (oxydes, silicates, métal)	7 à 15 % (exprimé en Al ₂ O ₃)
Sodium (chlorures, silicates)	3 à 8 % (exprimé en Na ₂ O)
Magnésium (silicates, hydroxydes)	1 à 3 % (exprimé en MgO)
K, P, Ti, Mn, S, Cl, C	0,5 à 3 %
H ₂ O	12 à 20 %

Tableau I.2. Teneurs moyennes en éléments TRACES minéraux et organiques [ODI 12]

Cuivre	2 à 7 % (exprimé en SiO ₂)
Zinc	2 à 4 % (exprimé en CaO)
Plomb	0,8 à 2 % (exprimé en Fe ₂ O ₃)
Baryum	0,8 à 1,5 % (exprimé en Al ₂ O ₃)
Chrome	0,2 à 0,6 % (exprimé en Na ₂ O)
Sn, Ni, Sr, Mo, As, Cd, etc.	0,02 à 0,3 %
Dioxines	7 à 9 ng I-TEQ/kg

I.2.3. Textes réglementaires relatifs aux MIDND

[MIN 17] donne un descriptif bien détaillé des réglementations en vigueur dans plusieurs pays européens. On peut y voir que les réglementations sur les MIDND ne sont pas unifiées, même dans l'Union Européenne. Cependant en France, avant Juillet 2012, les mâchefers incinérés devaient répondre aux exigences de la circulaire n°94-IV-1 du 9 mai 1994 [CIR 94] relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains. Elle classait les mâchefers incinérés en trois catégories à partir du taux d'imbrûlés et des résultats de l'essai de lixiviation statique normalisé NF X31-210 donnés au tableau I.3. On distinguait, avec cette circulaire, les classes :

- Stockage (S) : les mâchefers à forte fraction lixiviable sont orientés vers les décharges et ne peuvent pas être valorisés ;
- Maturation (M) : les mâchefers intermédiaires sont stockés en plate-forme de maturation équipée pour gérer les percolats pendant une durée n'excédant pas un an avant d'être à nouveau testés ;
- Valorisation (V) : les mâchefers à faible fraction lixiviable sont directement utilisables (en pratique maturés 3 à 6 mois) en substitution aux graves naturelles traditionnellement employées en technique routière type sous-couches de route ou de parking (à l'exception des chaussées réservoirs ou poreuses), ainsi qu'en remblai compacté de trois mètres de hauteur maximum (à condition qu'il soit recouvert d'une structure routière, d'un bâtiment couvert ou d'un substrat végétal d'au moins 50 cm). L'utilisation se doit d'être en dehors des zones inondables et des périmètres de protection des captages d'eau potable, ainsi qu'à une distance minimale de 30 m de tout cours d'eau.

La circulaire de 1994 [CIR 94] a cependant été remplacée par l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 [ARR 11]. Actuellement, les MIDND qui peuvent être valorisés au sein d'ouvrages routiers sont ceux servant à l'élaboration de graves de mâchefers dont les caractéristiques mécaniques sont conformes aux normes de spécifications d'usage en vigueur concernant les usages routiers visés et dont les caractéristiques environnementales respectent les critères de recyclage définis à l'annexe I de [ARR 11]. A partir de la teneur intrinsèque en éléments polluants et des résultats de l'essai de lixiviation statique normalisé, les tableaux I.4 et I.5 donnent les valeurs limites pour l'utilisation des MIDND.

D'après cet arrêté, les usages autorisés sont les usages au sein d'ouvrages routiers revêtus ou recouverts des types 1 et 2 définis dans [ARR 11]. Les tableaux I.4 et I.5 précisent les valeurs seuils à respecter dans l'optique de valoriser les MIDND en technique routière.

Tableau I.3. Seuils réglementaires de la circulaire du 9 Mai 1994 [DAB 08]

Paramètres	Valorisation (V)	Maturation (M)	Stockage (S)
Taux d'imbrûlés	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	$\geq 5\%$
Fraction soluble	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$	$\geq 10\%$
Mercure (Hg)	$\leq 0,2 \text{ mg/kg}$	$\leq 0,4 \text{ mg/kg}$	$\geq 0,2 \text{ mg/kg}$
Plomb (Pb)	$\leq 10 \text{ mg/kg}$	$\leq 50 \text{ mg/kg}$	$\geq 50 \text{ mg/kg}$
Cadmium (Cd)	$\leq 1 \text{ mg/kg}$	$\leq 2 \text{ mg/kg}$	$\geq 2 \text{ mg/kg}$
Arsenic (As)	$\leq 2 \text{ mg/kg}$	$\leq 4 \text{ mg/kg}$	$\geq 4 \text{ mg/kg}$
Chrome hexavalent (CrVI)	$\leq 1,5 \text{ mg/kg}$	$\leq 3 \text{ mg/kg}$	$\geq 3 \text{ mg/kg}$
Sulfates (SO ₄)	$\leq 10\,000 \text{ mg/kg}$	$\leq 15\,000 \text{ mg/kg}$	$\geq 15\,000 \text{ mg/kg}$
Carbone organique total (COT)	$\leq 1\,500 \text{ mg/kg}$	$\leq 2\,000 \text{ mg/kg}$	$\geq 2\,000 \text{ mg/kg}$

Tableau I.4. Comportement à la lixiviation (NF EN 12457-2) du lot à caractériser ; valeurs limites à respecter pour les quantités relarguées à une fraction liquide/solide (L/S) = 10 l/kg [ARR 11]

Eléments chimiques	Valeur limite à respecter Usage de type 1 (mg/kg de matière sèche)	Valeur limite à respecter Usage de type 2 (mg/kg de matière sèche)
Arsenic (As)	0,6	0,6
Ba	56	28
Cadmium (Cd)	0,05	0,05
Cr total	2	1
Cuivre (Cu)	50	50
Hg	0,01	0,01
Mo	5,6	2,8
Nickel (Ni)	0,5	0,5
Plomb (Pb)	1,6	1
Sb	0,7	0,6
Se	0,1	0,1
Zinc (Zn)	50	50
Fluorure	60	30
Chlorure (Cl)	10 000	5 000
Sulfates (SO ₄)	10 000	5 000
Fraction soluble	20 000	5 000

Tableau I.5. Teneur intrinsèque en éléments polluants sur la base d'une analyse en contenu total du lot à caractériser [ARR 11]

Paramètres	Valeur limite à respecter
COT (carbone organique total)	30 g/kg de matière sèche
BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène)	6 mg/kg de matière sèche
PCB (polychlorobiphényles 7 congénères*)	1 mg/kg de matière sèche
Hydrocarbures (C10 à C40)	500 mg/kg de matière sèche
HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)	50 mg/kg de matière sèche
Dioxines et furannes	10 ng I-TEQ** _{OMS,2005} /kg

* Les 7 congénères : 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

** TEQ : Toxic Equivalent Quantity

I.2.4. Valorisation des MIDND en techniques routières

Les MIDND sont utilisés en grande majorité dans le domaine du Génie Civil à hauteur de 80 % de la production [HUN 11]. Les mâchefers répondant aux exigences de la réglementation en vigueur [ARR 11] peuvent être valorisés en techniques routières dans les terrassements, les remblais, les couches de chaussée, les parkings, la voirie et l'assainissement ([DAB 08] ; [HUN 11]). Le schéma de la figure I.6 montre les zones où les MIDND peuvent être utilisés dans une structure de chaussée.

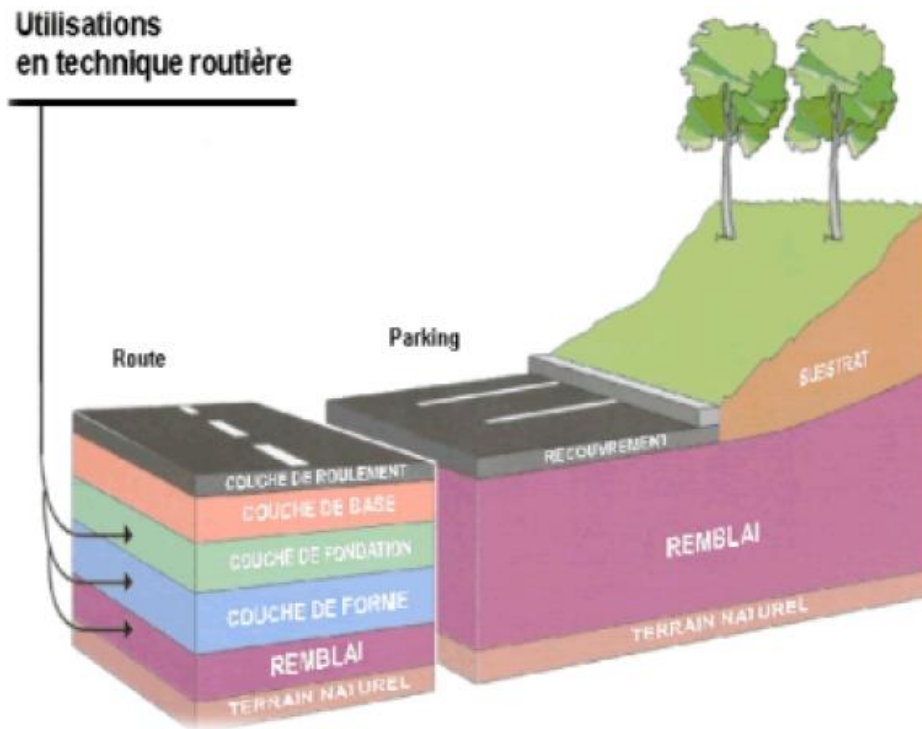


Figure I.6. Utilisation des MIDND en technique routière (Destombes et al., 2003) cité par [DAB 08]

En France, la valorisation en techniques routières représente 90 % de la quantité de mâchefers recyclée. Ce qui représente 2 millions de tonnes en 2002 selon [DAB 08]. Pour être utilisables en techniques routières, les mâchefers incinérés doivent être traités puis criblés afin d'éliminer les éléments de taille supérieure à 50 mm, et de faciliter ainsi leur mise en œuvre et leur compactage [HUN 11]. Selon l'annexe I de l'arrêté ministériel du 18 novembre [ARR 11], les usages routiers autorisés sont ceux, au sein d'ouvrages routiers revêtus ou recouverts, de types 1 et 2 :

- les usages routiers de type 1 sont les usages d'au plus trois mètres de hauteur en sous-couche de chaussée ou d'accotements d'ouvrages routiers revêtus : remblai sous ouvrage, couche de forme, couche de fondation, couche de base, et couche de liaison [GUI 15] ;
- les usages routiers de type 2 sont les usages d'au plus six mètres de hauteur en remblai et techniques connexes à l'infrastructure routière ou en accotement, dès lors qu'il s'agit d'usages au sein d'ouvrages routiers recouverts [GUI 15].

Un ouvrage routier est dit revêtu si sa couche de surface est réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumineux, d'enduits superficiels d'usure, de béton, de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié, et si elle présente en tout point une pente minimale de 1 %. Un ouvrage routier est dit recouvert si les matériaux routiers qui y sont présents sont recouverts par au moins 30 centimètres de matériaux naturels, et s'il présente en tout point de son enveloppe extérieure une pente minimum de 5 %. L'utilisation de graves de MIDND est interdite pour la réalisation de systèmes drainants et de travaux de pré-chargement. Selon [DAB 08], une couche contenant des mâchefers doit être au moins distante de la couche de surface de 15 centimètres pour éviter les éventuels problèmes de déformation de la chaussée dus à l'oxydation de particules d'aluminium (gonflement de la couche de surface). D'un point de vue environnemental, cette mesure permet de limiter les transferts vers les couches sous-jacentes. Entre autres exclusions données par [ARR 11], la couche contenant les mâchefers ne doit pas être :

- dans une zone inondable ;
- à moins de 50 cm par rapport aux plus hautes eaux connues et à moins de 30 mètres de tout cours d'eau, y compris les étangs et les lacs ;
- dans des périmètres de protection rapprochés des captages d'alimentation en eau potable ;
- dans des zones répertoriées comme présentant une sensibilité particulière vis-à-vis des milieux aquatiques couvertes par une servitude d'utilité publique instituée, en application de l'article L. 211-12 du code de l'environnement, parcs nationaux ;
- dans des zones de karsts affleurant.

Pour limiter les contacts avec les eaux météoriques, superficielles et souterraines, la quantité de matériaux routiers stockés pour un chantier en cours ne peut en aucun cas excéder 1000 m³. Toutefois, l'utilisation des MIDND repose essentiellement sur la base de considérations empiriques, par analogie à d'autres matériaux pulvérulents [HUN 11]. Les études expérimentales sur les phénomènes mécaniques plus ou moins complexes comme l'élasticité (linéaire et non linéaire), la plasticité, le phénomène de gonflement et de tassement, l'anisotropie, la dilatance sous cisaillement, la liquéfaction, le comportement cyclique, restent à nos jours limités.

De façon générale, on peut noter ces précisions concernant l'utilisation des MIDND en techniques routières :

- GNT A 0/20 dans le fuseau de spécification de la norme NF EN 13285 ;
- Remblai et couche de forme, guide technique du SETRA/LCPC « Réalisation des remblais et couches de forme » : matériau de catégorie F61 pour tous trafics ;
- Couche de fondation : pour trafics $\leq T4$;
- Mise en œuvre en couches de 15 à 30 cm d'épaisseur.

Des études ont montré que les MIDND peuvent servir de matériaux granulaires secondaires principalement comme :

- chape de couverture de la chaussée et remblais dans les décharges [VAL 13] ;
- matériaux de recouvrement des sites miniers après exploitation [VAL 13] ;
- granulats de substitution en sous-couche de chaussée [VAL 13], [REC 15], [GRO 11], [BEC 09].

En France, les MIDND sont utilisés comme matériaux de substitution, principalement en remblais routiers pour les couches constituant le corps de la chaussée [BEC 07]. Plusieurs exemples de recyclage des MIDND en techniques routières dans différentes régions françaises sont répertoriés dans [AMO 15]. Le cas de plus récent sur la valorisation des mâchefers d'incinération en technique routière est la route du MIOM. C'est une route expérimentale construite en 2013 à Frétin dans la région des Hauts-de-France, et dont une fraction de mâchefers (0-6,3 mm) a été utilisée en partie directement sous l'enrobé avec une structure de trafic sous à un trafic T3 (100 PL/J/sens) [NEO 14].

I.3. Quelques études expérimentales approfondies de MIDND dans la bibliographie en rapport avec les travaux de cette thèse

I.3.1. Procédure expérimentale de l'essai triaxial

L'essai triaxial (NF P 94-074) consiste à soumettre à une éprouvette cylindrique un champ uniforme de contraintes qui a pour composantes : une pression hydrostatique σ_3 , appliquée par l'intermédiaire d'un fluide (généralement) remplissant la cellule et une contrainte déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$), appliquée par l'intermédiaire d'un piston (figures I.7 et I.8).

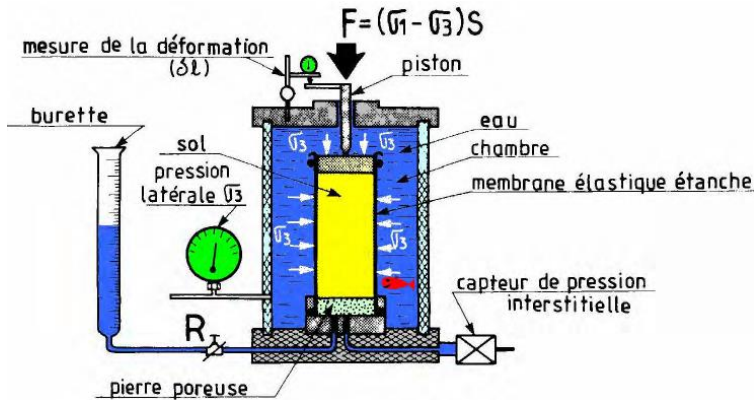


Figure I.7. Schéma de principe de la cellule triaxiale (norme NF P 94-074)

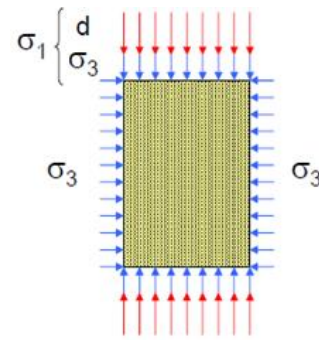


Figure I.8. Schéma de sollicitations de l'éprouvette (norme NF P 94-074)

Dans le cas des graves routières, l'essai triaxial de cisaillement permet de déterminer, entre autres caractéristiques mécaniques : le module de rigidité (E), le coefficient de poisson (ν), l'angle de frottement interne (ϕ), l'angle de dilatance (ψ).

I.3.2. Comportement des graves de MIDND sous sollicitations triaxiales

[BEC 07] a effectué des tests triaxiaux monotones de cisaillement sur ses mâchefers, dans un but de faire une caractérisation expérimentale plus affinée, avec la mise en évidence de phénomènes caractéristiques des matériaux granulaires initialement denses et faiblement cimentés. Il a effectué des essais drainés sur des échantillons de mâchefers et compactés de 117,5 mm de hauteur et 101,5 mm de diamètre (dimensions des moules sur lesquels sont effectués les compactages, (figure I.9), confectionnés à la teneur en eau qui correspond à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Modifié, soit 11%. Les essais sont effectués à différentes pressions de confinement, et suivant différents degrés de cimentation (mâchefer non traité, 1%, 3%, et 5% de ciment).



Figure I.9. Echantillons de MIDND avant et après test triaxial [BEC 07]

Les résultats obtenus montrent que les mâchefers d'incinération non-traités présentent des caractéristiques proches à celles des matériaux granulaires initialement denses. Les constats de [BEC 07] sont les suivants :

- comportement surconsolidé (partie pré-pic sur les courbes de la figure I.10) ;
- 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 ;
- module de rigidité dépendant de la pression effective moyenne appliquée ;
- angle de frottement interne élevé : dans le cas du mâchefer non-traité, 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 anguleuse. Cette valeur est compatible avec celles obtenues pour les graves classiques utilisées en techniques routières.

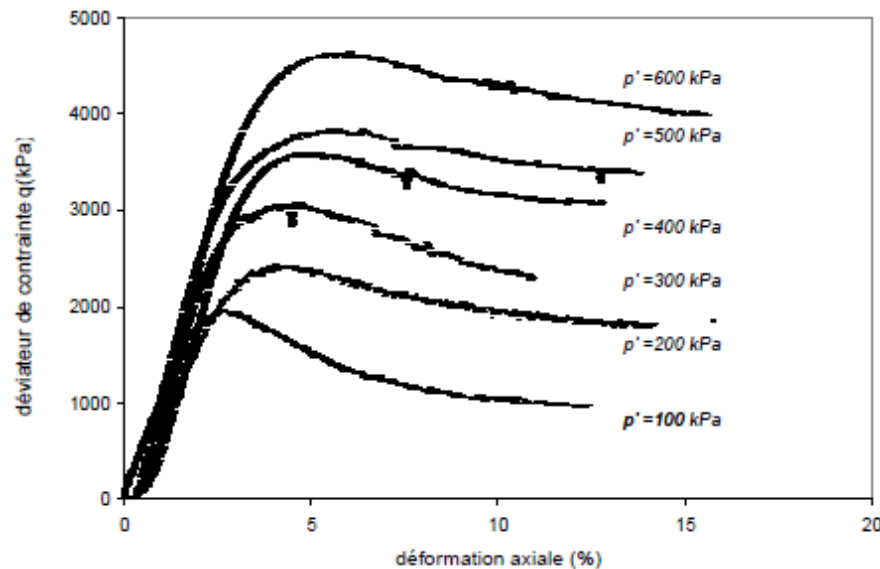


Figure I.10. Diagramme $q-\varepsilon_a$ des MIDND non traités [BEC 07]

Pour les mâchefers traités au ciment, l'auteur a effectué deux séries de tests pour étudier l'influence de la cimentation :

➤ **Première série :**

L'influence de la cimentation sur le comportement du matériau granulaire a été étudiée par la réalisation de tests triaxiaux réalisées à 7 jours, en conditions drainées, avec des pressions effectives de confinement p' égales à 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa et des degrés de cimentation de 1%, 3% et 5%. Le tableau I.6 résume la série d'essais effectués.

Tableau I.6. Caractéristiques des essais triaxiaux sur les MIDND traités [BEC 07]

Pression de confinement p' (KPa)	% de ciment	p'_{pic} (KPa)	q_{pic} (KPa)	$p'_{10\%}$ (KPa)	$q_{10\%}$ (KPa)	M_{pic}	$M_{10\%}$
50	1	744	2051	270	622	2,75	2,44
	3	1704	4963	529	1438	2,91	2,71
	5	1982	5798	-	-	2,92	-
100	1	832	2200	681	1725	2,62	2,56
	3	2740	8000	848	2244	2,91	2,64
	5	3100	9000	920	2461	2,90	2,67
200	1	1551	4034	1180	2941	2,60	2,49
	3	3378	9539	1188	2949	2,82	2,48
	5	-	>10000	-	-	-	-

Par comparaison au matériau non traité, on observe une chute brutale du déviateur après le franchissement du pic pour le matériau traité à 3% et à 5% de ciment. Les résultats expérimentaux obtenus à 7 jours montrent une résistance au cisaillement croissante avec le degré de cimentation et la pression moyenne : en effet, le déviateur au pic augmente avec le degré de cimentation et la pression moyenne appliquée (tableau I.10). La cimentation agit également sur le rapport de contraintes au pic (gamme des valeurs de M_{pic} : 2,60-2,92 pour p'

variant de 50 à 200 kPa), où on obtient des valeurs plus élevées par comparaison au matériau non traité (gamme des valeurs de M_{pic} : 1,97-2,59 pour p' variant de 100 à 600 kPa).

➤ **Deuxième série :**

Dans cette série de tests, les essais au triaxial sont effectués à 28 jours. Le tableau I.7 présente les essais réalisés avec les caractéristiques au pic de rupture et à 10 % de déformation axiale.

Tableau I.7. Caractéristiques des essais triaxiaux sur le matériau traité [BEC 07]

Pression de confinement p' (KPa)	% de ciment	p'_{pic} (KPa)	q_{pic} (KPa)	$p'_{10\%}$ (KPa)	$q_{10\%}$ (KPa)	M_{pic}	$M_{10\%}$
100	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
200	3	3490	9865	510	1280	2,82	2,50
	5	4044	11546	1005	2430	2,85	2,41

La prise du liant augmente la résistance au cisaillement du matériau (un déviateur maximal de 11,5 MPa a été enregistré pour cette série d'essais). La figure I.11 montre « l'effet de la colle » sur le comportement du matériau, pour une pression moyenne effective de 100 kPa. On distingue nettement deux types de comportements, dans le sens où la cimentation tend à rendre le milieu moins discontinu (milieu discontinu : 0% - 1% ; milieu moins discontinu : 3% - 5%). En termes de rapport de contraintes, on observe des valeurs de M similaires à ceux obtenus pour les essais à 7 jours, au pic comme à 10% de déformation.

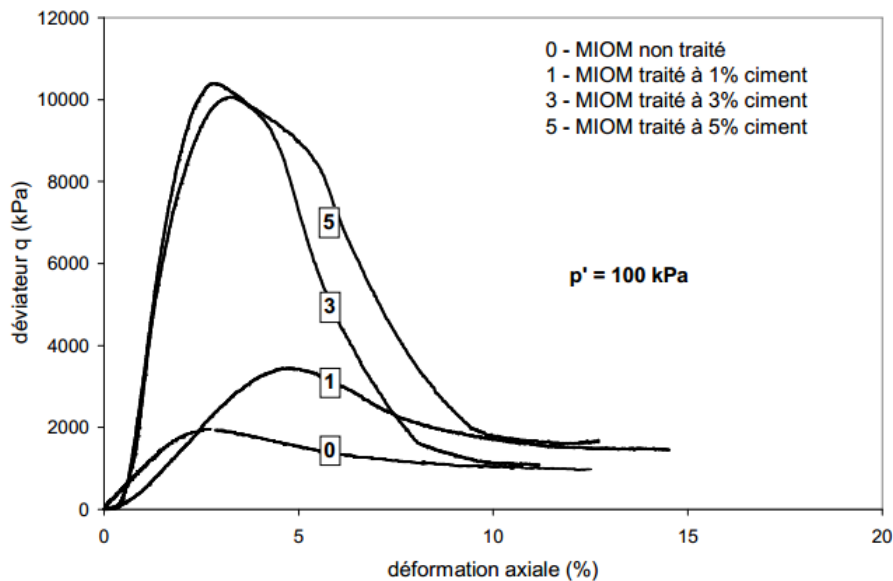


Figure I.11. Courbes déviatoriques à 28 jours sur le matériau traité pour $p'=100$ kPa [BEC 07]

Le comportement du matériau granulaire « MIDND » à l'appareil triaxial révèle une dépendance du comportement vis-à-vis de la pression moyenne appliquée : celle-ci influe sur le module de rigidité, sur la dilatance du matériau et sur l'angle de frottement interne aux fortes pressions. Les tests sur les mâchefers traités au ciment montrent que la cimentation des éprouvettes agit essentiellement sur la cohésion, l'amplitude du déviateur à la rupture, sur le module de rigidité initial et sur le coefficient de Poisson.

[HUN 11] a choisi l'essai triaxial consolidé drainé de cisaillement en compression pour étudier les caractéristiques de déformations et de résistances des mâchefers et par ailleurs, pour étudier de façon plus approfondie l'influence de la vitesse de chargement de l'essai sur le comportement mécanique des mâchefers. Il a réalisé sa phase de cisaillement en imposant une vitesse de déplacement axial constante. La valeur de cette vitesse a été fixée à 0,036 mm/min pour les essais destinés à la détermination des caractéristiques mécaniques des mâchefers. Cinq valeurs (0,009 mm/min ; 0,018 mm/min ; 0,036 mm/min ; 0,072 mm/min ; 0,144 mm/min) ont été sélectionnées pour étudier l'influence de la vitesse de chargement de l'essai sur le comportement mécanique des mâchefers. L'auteur a réalisé quatre séries d'essais triaxiaux. La première série d'essais est nommée « A » correspond aux essais drainés en compression avec une pression interstitielle « u » constante, fixée à 200 kPa et la seconde série est nommée « B » sont ceux où une pression interstitielle u constante est fixée à 400 kPa. Dans les deux séries d'essais la pression de confinement effective varie de $p' = 100$ kPa à $p' = 400$ kPa par pas de 100 kPa. Ces deux séries d'essais ont pour objet d'étudier les caractéristiques de déformation et de résistance des MIDND. Les courbes d'évolution des déformations volumiques (figures I.12 et I.13) indiquent que le cisaillement de l'essai est accompagné d'une phase contractante initiale (effet de serrage des grains), suivi d'une phase de dilatance (effet de désenchevêtrement des grains) vers les grandes déformations. Les effets de serrage et de désenchevêtrement entraînent des phénomènes irréversibles importants. Le phénomène de dilatance qu'il observe est d'autant plus prononcé que la pression de confinement effective est faible. En effet, à déformation axiale fixée, on observe une diminution de la déformation volumique avec l'augmentation de la pression de confinement effective. En comparant les mêmes évolutions à différentes pressions de confinement effectives (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa et 400 kPa), il vient le constat comme quoi, le comportement des MIDND ne dépend que de la pression de confinement effective et pas de la pression interstitielle. Ce résultat est important car il permet de simplifier les simulations des essais triaxiaux drainés des mâchefers par des logiciels basés sur la méthode des éléments finis. Les modules de Young obtenus par l'auteur indiquent que le comportement élastique des mâchefers se rapproche du comportement élastique des sables et des graviers (Sable : $E = 50$ à 80 MPa, Gravier : $E = 100 - 200$ MPa).

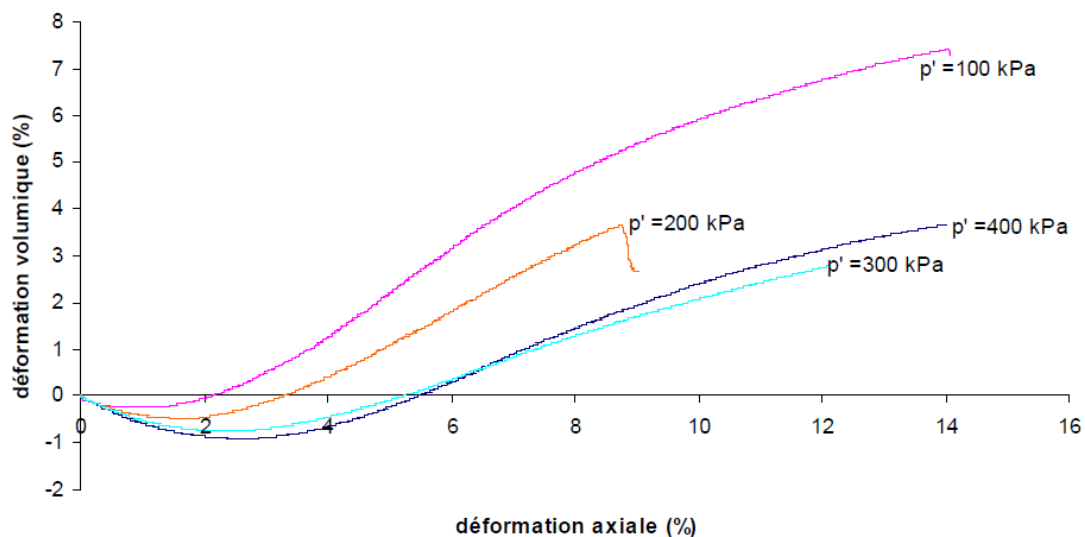


Figure I.12. Evolution de la déformation volumique pour $u = 200$ kPa [HUN 11]

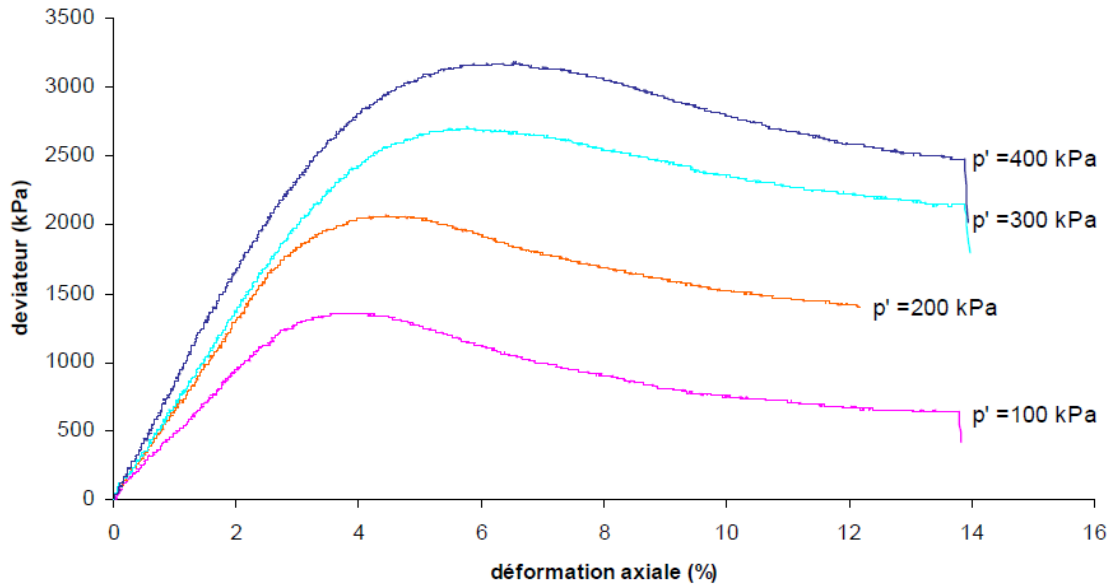


Figure I.13. Evolution du déviateur de contrainte q pour $u = 200$ kPa [HUN 11]

Par contre, le coefficient de Poisson ne change pas de manière significative avec la pression de confinement effective (tableau I.8). Cette conclusion est en phase avec celle de [BEC 07]. Les valeurs des caractéristiques de cisaillement et de rupture obtenues par [HUN 11] au pic $M = 2,33$ sont $\phi' = 54,51^\circ$ et $c' = 0$ kPa. Il explique la valeur élevée de l'angle de frottement par le fait que le matériau granulaire soit composé de grains anguleux bien gradués. L'ordre de grandeur de l'angle de frottement obtenu est comparable à l'angle de frottement obtenu sur des mâchefers par [BEC 07] et qui est de 53° . L'angle caractéristique ϕ_c et l'angle de dilatance Ψ ont également été déterminés par [HUN 11] à partir de la courbe de déformation volumique.

$$\Psi = \arcsin \left(\frac{\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}}{2 + d\varepsilon_v / d\varepsilon_1} \right) \quad [I.1]$$

Tableau I.8. Valeurs des caractéristiques élastiques des séries A et B des MIDND de [HUN 11]

Essais	u (kPa)	σ_3 (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{pic}$	$E_{0,2}$ (MPa)	E_{50} (MPa)	ν
A1	200	300	1250	75,33	42,56	0,198
A2	200	400	2283	83,02	70,01	0,235
A3	200	500	2463	87,23	73,22	0,206
A4	200	600	3090	92,47	79,82	0,197
B1	400	500	1357	72,56	48,71	0,217
B2	400	600	2073	78,89	63,56	0,224
B3	400	700	2707	86,35	69,51	0,212
B4	400	800	3179	94,85	81,90	0,18

Les résultats obtenus par l'auteur se resument au tableau I.9. Les angles de dilatance Ψ trouvés sont proches de l'angle de dilatance du sable et du gravier qui s'échelonne entre 0° et 15° , et varie de façon peu significative avec la pression de confinement effective constate l'auteur. Mais, les angles caractéristiques ϕ_c obtenus par ce dernier montrent une dépendance du phénomène de dilatance vis-à-vis de la pression de confinement effective appliquée : la dilatance diminue lorsque la pression de confinement effective augmente constate enfin l'auteur.

Tableau 1.9. Valeurs des caractéristiques de déformation volumique des séries A et B des mâchefers incinérés de [HUN 11]

Essais	u (kPa)	σ_3 (kPa)	p' (kPa)	Φ_c (°)	Ψ (°)
A1	200	300	100	11,7	11,36
A2	200	400	200	15,29	13,28
A3	200	500	300	16,26	11,01
A4	200	600	400	18,53	12,46
B1	400	500	100	15,49	14,79
B2	400	600	200	18,09	14,83
B3	400	700	300	18,12	12,11
B4	400	800	400	19,70	11,01

La troisième série d'essais est nommée « C » et correspond aux essais drainés en compression avec une pression interstitielle « u » constante, fixée à 200 kPa. L'auteur a également réalisé une quatrième série nommée « D » où une pression interstitielle u constante est fixée à 400 kPa. Dans les deux séries d'essais la pression de confinement effective est constante $p' = 200$ kPa. Les vitesses de chargement d'essai de ces deux séries d'essai sont respectivement de 0,009 mm/min ; 0,018 mm/min ; 0,036 mm/min ; 0,072 mm/min et 0,144 mm/min. Ces deux séries d'essais ont pour objet d'étudier l'influence de la vitesse de chargement de l'essai sur le comportement mécanique des mâchefers. Les caractéristiques mécaniques des mâchefers des séries C et D sont regroupées au tableau I.10.

L'analyse des résultats rassemblés dans le tableau I.16 montre que les valeurs des différents paramètres sont relativement homogènes. La valeur du module de Young E_{50} est comprise entre 50 et 75 MPa et les valeurs moyennes de ce paramètre pour la série « C » et la série « D » sont respectivement 61,70 MPa et 62,89 MPa. Elles sont similaires à ceux des sables denses. Une remarque similaire peut être faite sur d'autres paramètres dont les valeurs sont relativement proches. En outre, il est difficile de voir une vraie tendance dans les résultats. Par exemple, le déviateur maximal varie entre 2 et 2,4 MPa mais ne montre aucune évolution monotone entre ces deux bornes. L'angle de frottement moyen au pic est $\phi_{pic} = 58,26^\circ$. Cette valeur élevée est similaire à celle obtenue dans la partie précédente. La valeur élevée de l'angle de frottement se justifie par 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].

Tableau I.10. Caractéristiques mécaniques des séries C et D des MIDND de [HUN 11]

Essais	Vitesse de chargement (mm/min)	Caractéristiques élastiques			Déformations volumiques		
		q_{max} (kPa)	$E_{0.2}$ (MPa)	E_{50} (MPa)	v	Φ_c (°)	Ψ (°)
C1	0,009	2341	80,53	53,48	0,2065	18,00	12,96
C2	0,018	2259	82,25	50,74	0,1742	16,59	13,02
C3	0,036	2262	83,02	70,01	0,2350	15,29	13,28
C4	0,072	2099	80,26	66,11	0,2256	14,37	13,47
C5	0,144	2174	85,52	68,17	0,1907	16,38	12,36
Moyenne		2227	83,32	61,70	0,2064	16,21	13,02
D1	0,009	2019	78,86	62,30	0,2133	16,23	12,18
D2	0,018	2235	82,49	75,73	0,1937	14,58	11,91
D3	0,036	2048	78,89	63,56	0,2240	18,09	14,83
D4	0,072	2232	76,17	52,90	0,2054	16,30	13,69
D5	0,144	2029	77,46	59,95	0,2261	15,79	13,60
Moyenne		2113	78,77	62,89	0,2125	16,20	13,24

I.4. Campagne expérimentale originale sur particules isolées de MIDND

I.4.1. Présentation des MIDND étudiés et détermination de leur masse volumique

Les mâchefers étudiés ont été proviennent des carrières de la Garenne à Vignoc chez Scorvalis (filiale d'Eurovia). Vignoc est une commune française située dans le département d'Ille-et-Vilaine, en région Bretagne (France). L'usine d'incinération est située à Quimper (France) et les mâchefers sont sur la plateforme de maturation depuis octobre 2015 et sont classés "V". La figure V.14 montre l'aspect des MIDND. Lorsqu'on procède à un tamisage, on peut obtenir des fractions granulaires comme celle montrée à la figure I.15.



Figure I.14. MIDND 0/25 mm provenant des carrières de la Garenne



Figure I.15. Fraction 12,5/25 mm des particules de MIDND étudiées

Pour connaître la masse volumique apparente des particules de MIDND, des tests ont été effectués sur une sélection de 21 granulats isolés de diamètres compris entre 20 et 25 mm. Pour chaque grain, le principe adopté est le suivant :

- peser le grain ;
- enrober le grain avec de la paraffine, le repeser ensuite ;
- peser un pycnomètre rempli d'eau ;
- repeser le pycnomètre contenant le grain enrobé de paraffine ;
- en déduire la masse volumique apparente.

Les images de la figure I.16 montrent le pycnomètre sans grain rempli d'eau et lorsqu'il est accompagné d'un grain enrobé de paraffine.

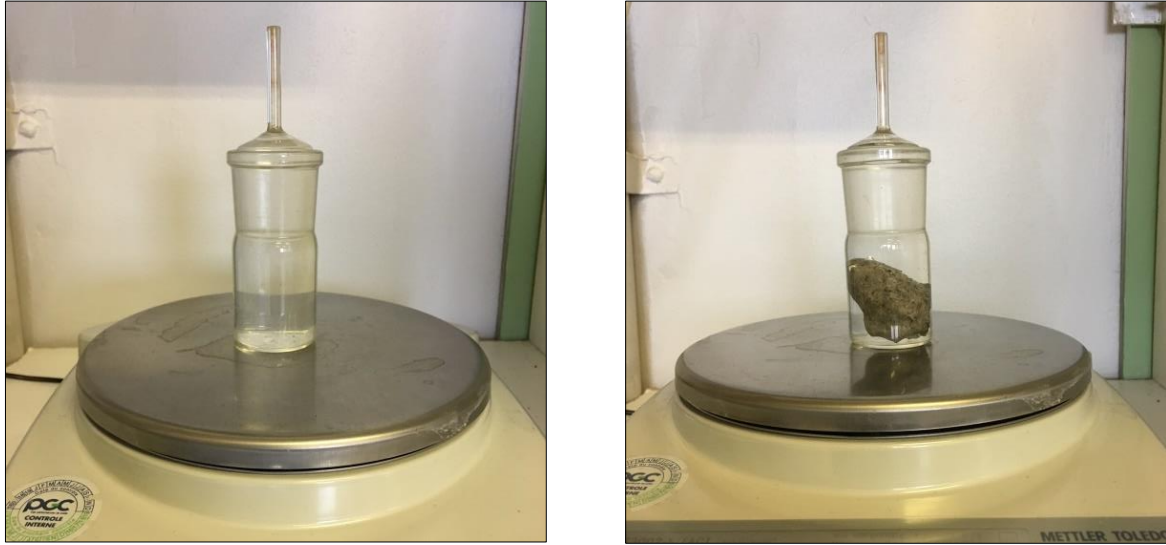


Figure I.16. Pycnomètre rempli d'eau sans et avec un grain de MIDND

Le pycnomètre à bouchon capillaire de capacité 67 cm³ utilisé est composé de deux éléments en verre s'assemblant précisément par un joint en verre rodé : une fiole et un bouchon percé d'un tube très fin. Lorsqu'on ajuste le bouchon sur la fiole, le trop-plein d'eau s'échappe par l'extrémité supérieure du tube. Il suffit de peser au moyen d'une balance de précision le pycnomètre avant et après remplissage pour déterminer par calcul la masse volumique du granulat.

Pour chaque granulat isolé de MIDND, connaissant les masses en grammes :

- du grain « M₁ »,
- du grain enrobé de paraffine « M₂ »,
- de la paraffine qui enrobe le grain « M₃ »
- du pycnomètre rempli d'eau « M₄ »,
- du pycnomètre rempli d'eau contenant le grain enrobé de paraffine « M₅ »,

ainsi que la masse volumique de la paraffine qui est prise égale à $\rho_p = 0,87 \text{ g/cm}^3$, la relation de l'équation I.2 a été utilisée pour déterminer la masse volumique de chaque granulat « ρ_g ». La masse volumique de l'eau « ρ_e » étant égale à 1 g/cm³.

$$\rho_g = \frac{M_1}{\frac{M_4 + M_2 - M_5}{\rho_e} - \frac{M_3}{\rho_p}} \quad [\text{I.2}]$$

Cette relation prend en compte la présence de la paraffine. Les résultats obtenus sur une série de 21 grains sont donnés au tableau I.11. Les valeurs maximale et minimale sont respectivement de 2,82 et 1,58 g/cm³.

Nous avons décomposé les masses volumiques obtenues en 4 plages de valeurs sous forme d'histogramme (cf. Figure I.17).

Tableau I.11. Masse volumique apparente des granulats de MIDND

Numéro du grain	Masse volumique calculée (g/cm ³)
1	1,67
2	1,85
3	2,02
4	1,97
5	1,72
6	1,77
7	2,82
8	1,84
9	1,97
10	1,92
11	2,04
12	1,83
13	1,83
14	2,03
15	1,86
16	2,03
17	1,83
18	2,35
19	2,04
20	1,89
21	1,58

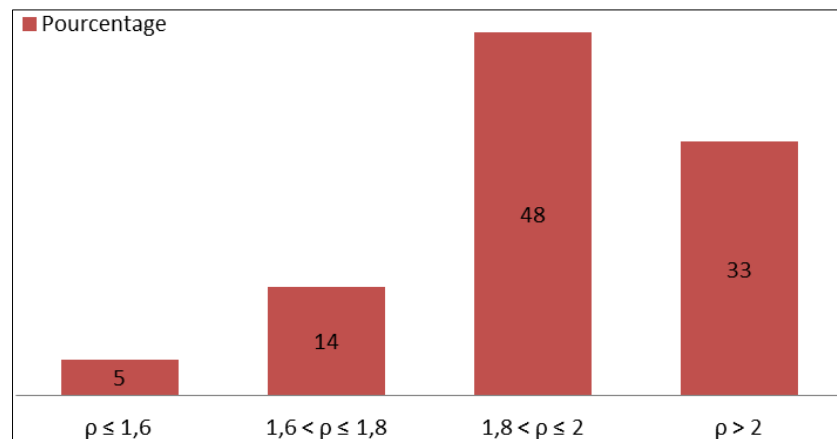


Figure I.17. Histogramme de répartition des classes de masse volumique dans l'échantillon de 21 grains de diamètre compris entre 20 et 25 mm

Près de 70% des particules ont une masse volumique apparente inférieure à 2 g/cm³. Ce résultat montre que les MIDND sont plutôt légers comparés aux granulats naturels dont la masse volumique est supérieure à 2 g/cm³.

I.4.2. Préparation des échantillons pour les analyses au MEB et l'indentation instrumentée

Pour effectuer des analyses de qualité, précises et reproductibles il n'est souvent pas possible d'utiliser un échantillon tel quel. Une phase préalable de préparation est nécessaire.

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.

Nous avons suivi les étapes suivantes :

- prélèvement d'échantillons de MIDND 0/25 mm reçus ;
- 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.

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.

L'opération de polissage a été effectuée en deux étapes :

- un polissage manuel avec des papiers abrasifs de différentes tailles de grains ;
- un polissage de finition avec une machine de polissage automatique afin d'offrir une surface lisse et la plus brillante possible.

Les images de la figure I.18 montrent les échantillons préparés. L'image (a) montre la fraction 0/12,5 mm et les images (b) montrent les particules isolées. On constate visuellement différentes phases dont certaines vitreuses plus ou moins étendues. La particule de l'image (b_2) est moins vitreuse que celle de l'image (b_1). On peut noter que la particule de l'image (b_1) a un aspect amorphe évident, caractéristique des matériaux qui subissent une élévation de température et une trempe. Cependant, toutes les particules de MIDND n'ont pas le même aspect. On note cependant une quantité importante de porosité interne.

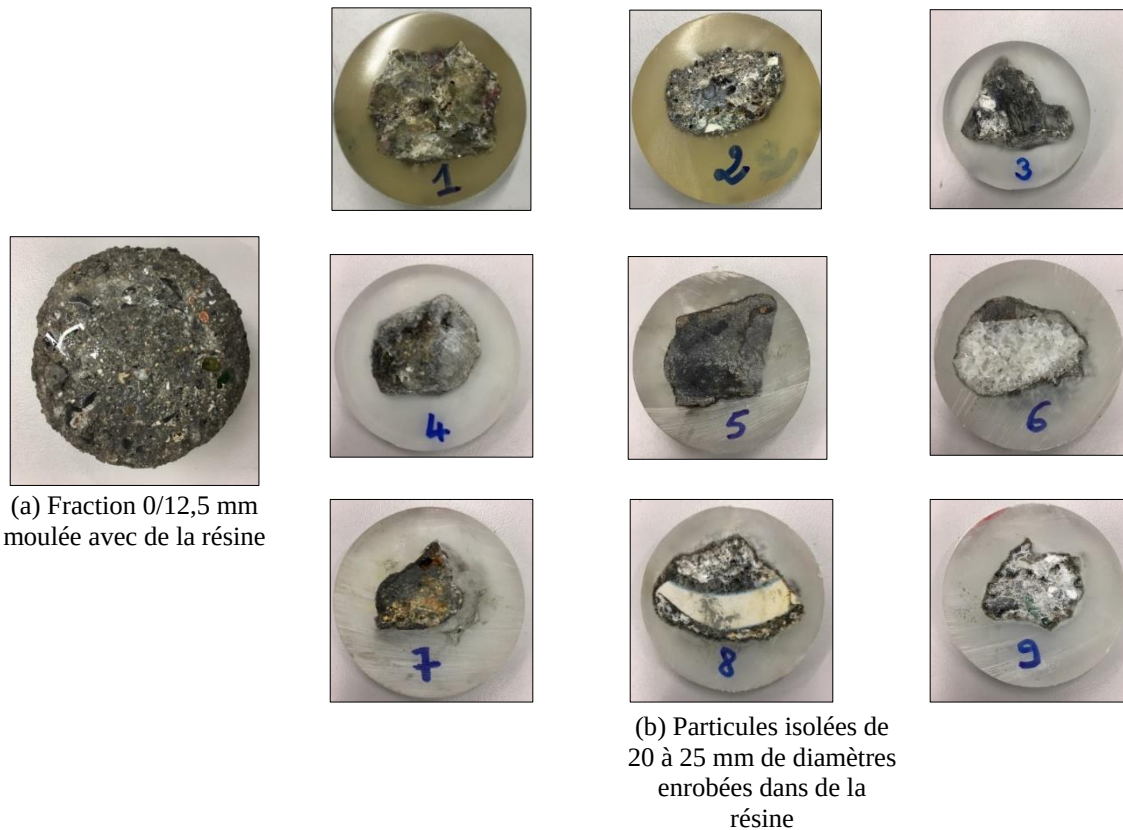


Figure I.18. Echantillons de MIDND préparés pour les analyses au MEB et les tests d'indentation

L'observation de ces différentes images de granulats de MIDND montre l'hétérogénéité particulière qui caractérise ce type de matériau. Une porosité importante notée peut expliquer en partie la légèreté qui caractérise ces types granulats.

I.4.3. Analyses au Microscope Electronique à Balayage (MEB)

I.4.3.1. Matériels utilisés

La microscopie électronique à balayage et les microanalyses sont employées très largement dans les secteurs académiques et industriels pour imager, caractériser et quantifier des échantillons solides de toute nature.

Les analyses ont été faites en collaboration avec le Centre de Microscopie Électronique à Balayage et microAnalyse (CMEBA) de l'Université de Rennes 1.

Le MEB utilisé est un IT300 LA de la marque JEOL. Cet outil est équipé d'un système à dispersion d'énergie pour l'analyse élémentaire.

I.4.3.2. Observations au MEB et microanalyses

La cartographie sur les particules de MIDND donne les résultats de la figure I.20. Les analyses chimiques ponctuelles quantitatives (EDS) au MEB ont cependant donné plus de précisions sur la composition de nos particules de MIDND. Il a été effectué une trentaine d'analyses ponctuelles et de ces analyses sort une composition chimique assez variée telle que décrite dans la littérature. Nous avons ainsi effectué une analyse statistique qui a donné les résultats confinés au tableau I.12 sous forme de pourcentages représentatifs de chaque élément chimique. La figure I.19 reproduit sous forme d'histogramme cette répartition des éléments chimiques ainsi que leurs représentativités dans l'échantillon étudié.

La figure I.21 donne un exemple de résultat graphique parmi les 30 analyses ponctuelles effectuées. Il correspond au 25^{ième} point EDS montré à la figure I.22.

La figure I.22 montre quelques images des zones cartographiées et analysées. Ces images montrent entre autres l'hétérogénéité granulométrique du matériau à l'échelle microscopique.

Tableau I.12. Proportions des éléments chimiques dans l'échantillon de MIDND

Eléments chimiques	Pourcentage (%)
Silicium (Si)	23,80
Calcium (Ca)	22,46
Sodium (Na)	11,65
Aluminium (Al)	9,38
Phosphore (P)	7,38
Fer (Fe)	7,78
Carbone (C)	4,81
Magnésium (Mg)	4,13
Potassium (K)	4,07
Titane (Ti)	2,48
Potassium (K)	4,07
Titane (Ti)	2,48
Chlore (Cl)	1,41
Soufre (S)	0,14
Zinc (Zn)	0,11

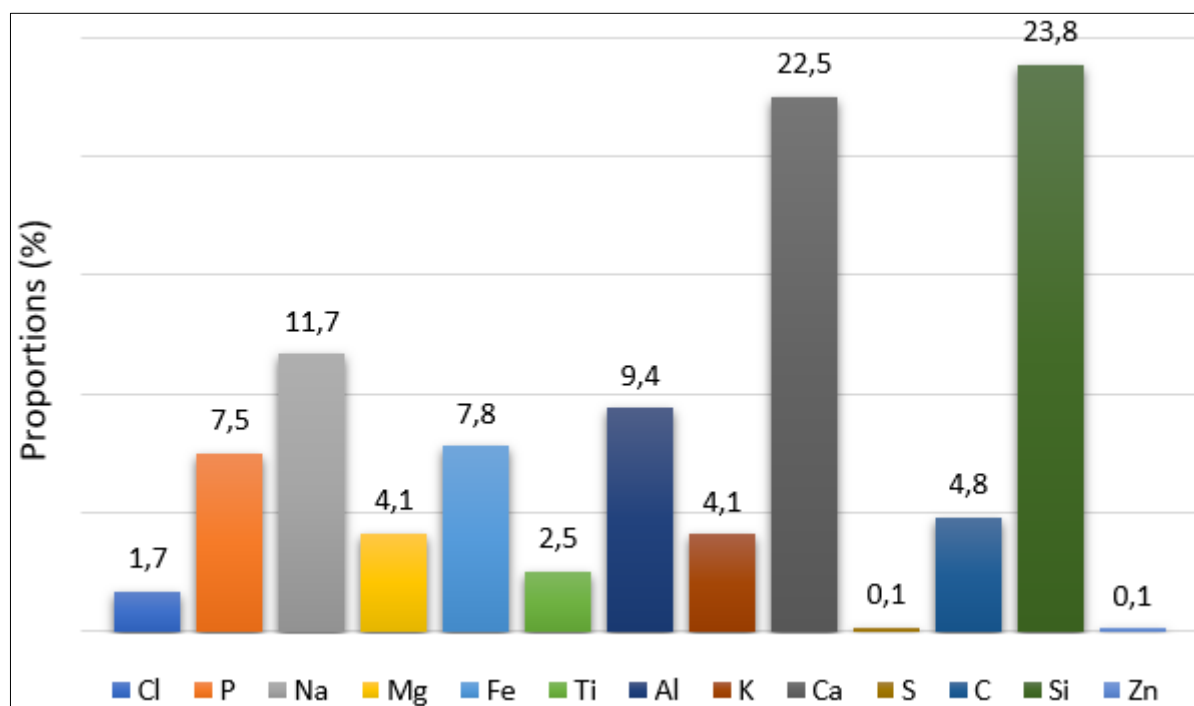


Figure I.19. Répartition des éléments chimiques dans l'échantillon de MIDND

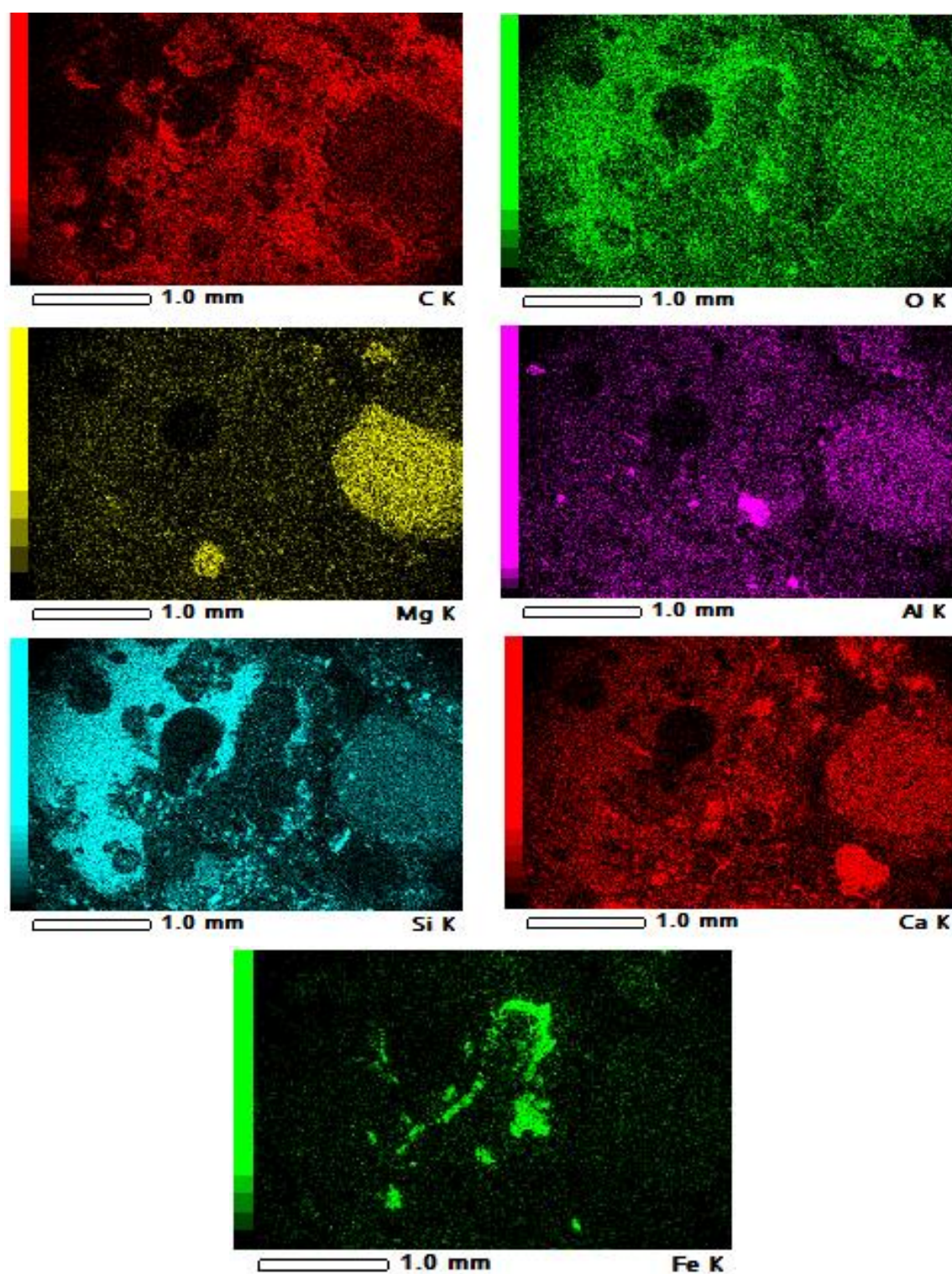


Figure I.20. Cartographie sur particules de MIDND de Garenne

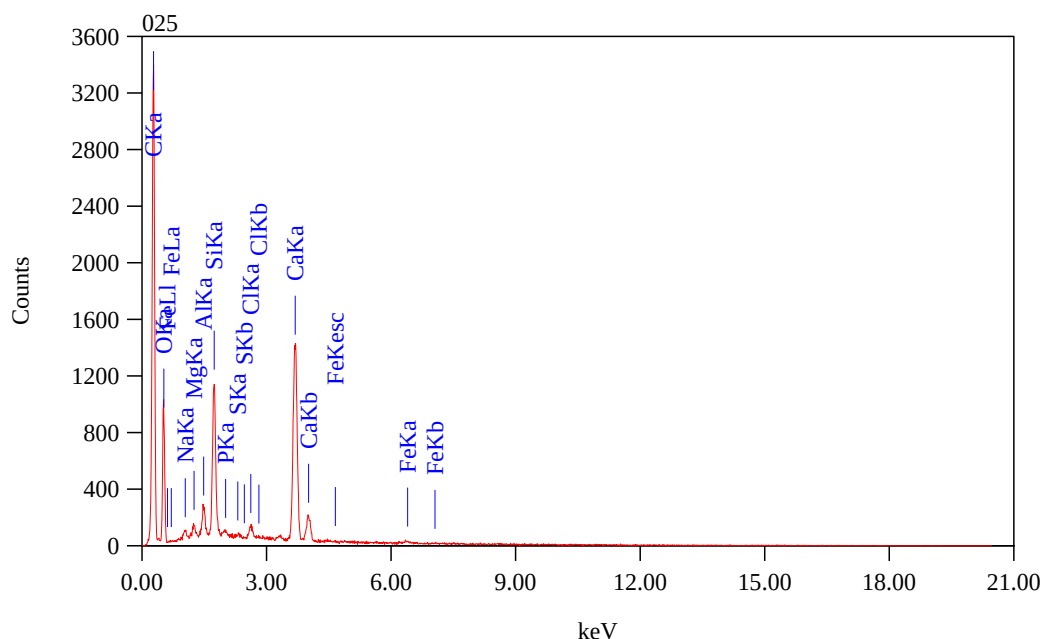


Figure I.21. Composition chimique d'une particule isolée de MIDND au 25^{ième} point EDS

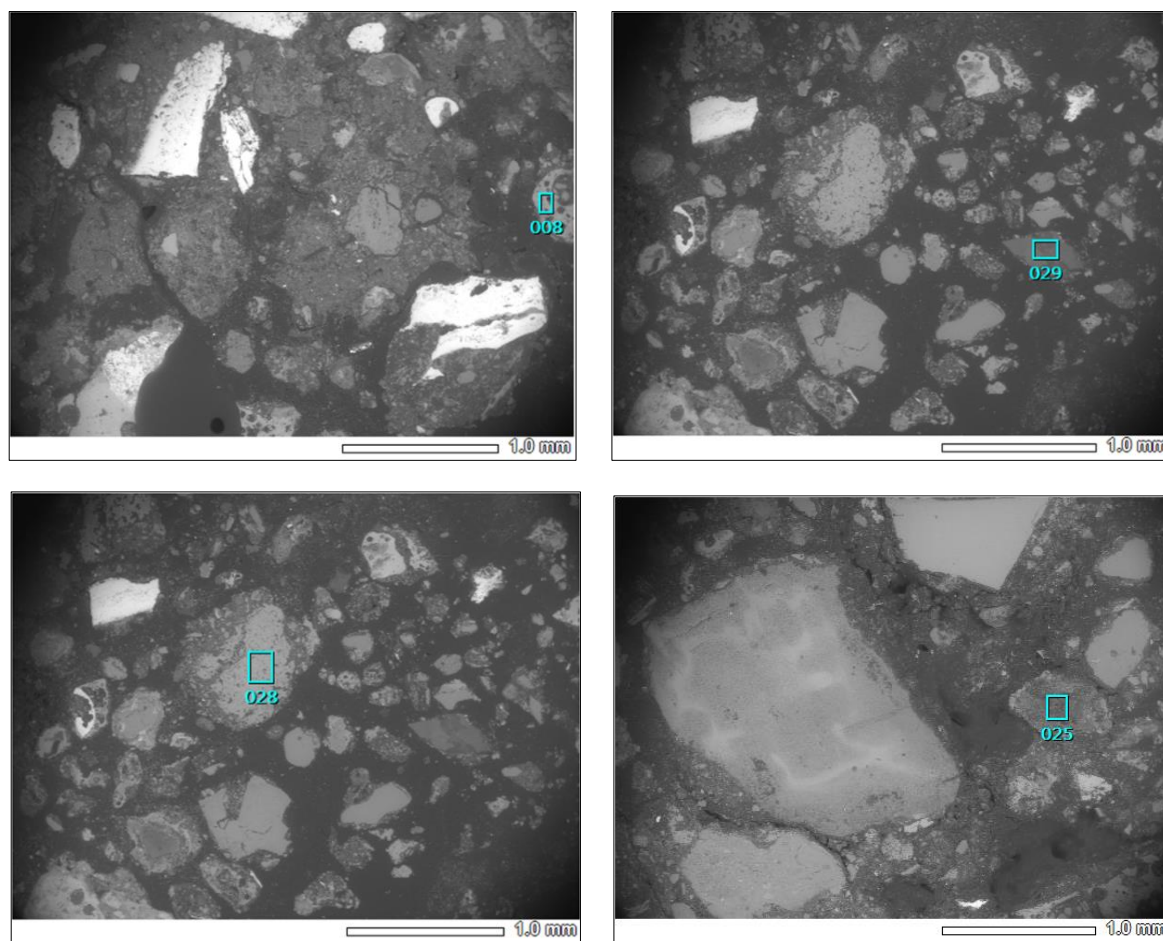


Figure I.22. Quelques images microscopiques des particules 0/12,5 mm de MIDND de Garenne (Vignoc)

I.4.4. L'indentation instrumentée

I.4.4.1. Principe de l'indentation et méthodes d'exploitation des résultats

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. La figure I.23 montre l'appareil d'indentation utilisé dans cette présente thèse et qui fait partie des équipements de l'équipe PSM du LGCGM INSA Rennes.

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 (figure I.24). On peut extraire de la phase de décharge de la courbe d'indentation, le module réduit et la dureté du matériau testé. La courbe est caractérisée par :

- F_m : la charge maximale appliquée ;
- h_e : la profondeur élastique ;
- h_m : la profondeur maximale ;
- h_r : la profondeur élastique résiduelle.



Figure I.23. Appareil d'indentation utilisé (Equipements PSM-LGCGM INSA Rennes)

L'obtention de ces paramètres élastiques sans passer par la détermination de l'aire résiduelle « A », a poussé plusieurs chercheurs à proposer des modèles d'analyse de la courbe charge/déplacement. La surface de contact « A » est le paramètre de base de la méthode d'analyse la plus connue : la méthode de Olivier et Pharr [OLI 92]. En mettant en observation les courbes charge-décharge de plusieurs matériaux, [OLI 92] a proposé une loi permettant d'ajuster la courbe de décharge (équation I.3).

$$F = B \cdot (h - h_r)^m \quad [I.3]$$

Où :

- F : charge instantanée ;
- h : profondeur d'indentation ;
- h_r : profondeur résiduelle d'indentation ;
- B et m : constantes ajustables en fonction des données expérimentales.

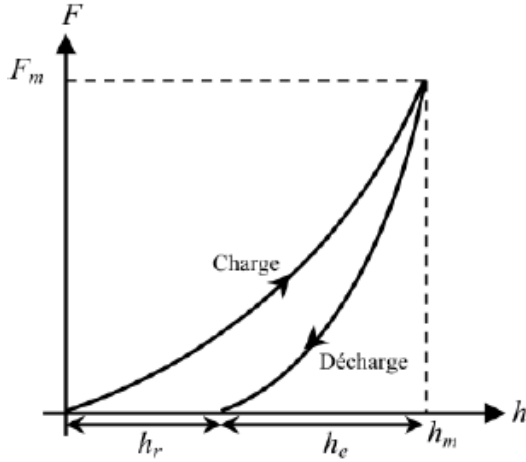


Figure I.24. Courbe charge-décharge de l'indentation expérimentée

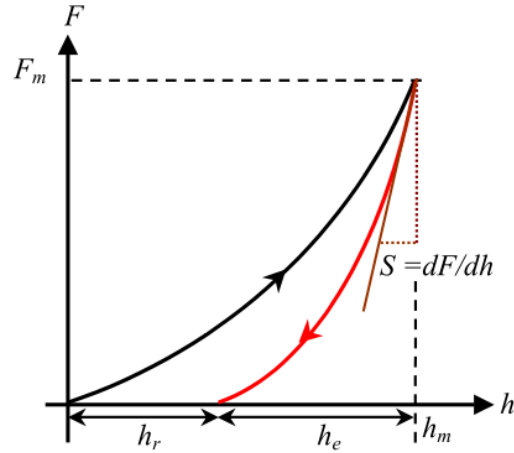


Figure I.25. Courbe charge-décharge - méthode « Olivier et Pharr »

La raideur de contact « S » est la pente de la courbe de décharge (figure I.25) au point de la charge maximale et est évaluée par la dérivée de la pente :

$$S = \left(\frac{dF}{dh} \right)_{h=h_m} = Bm(h_m - h_r)^{(m-1)} \quad [I.4]$$

h_m : la profondeur d'indentation maximale

La raideur de contact « S » étant déterminée, les auteurs introduisent deux paramètres :

- la profondeur de contact « h_p » : profondeur sur laquelle l'indenteur est en contact avec la surface du matériau ;
- la profondeur « h_s » : déflexion élastique du matériau.

Les auteurs formulent la relation de l'équation I.5 dans laquelle seule « h_m » est connue expérimentalement, et avancent les hypothèses suivantes :

- matériau homogène ;
- matériau élasto-plastique linéaire ;
- matériau à comportement sink-in.

$$h_s = (h_m - h_p) \quad [I.5]$$

Ainsi, [OLI 92] établit la formule de l'équation I.6 :

$$h_p = h_m - \alpha F_m / S \quad [I.6]$$

« α » est un paramètre traduisant la géométrie de la pointe tel que :

- $\alpha = 0,75$ pour une sphère ;
- $\alpha = \frac{2}{\pi} (\pi - 2)$ pour un indenteur conique ;
- $\alpha = 1$ pour un indenteur plat.

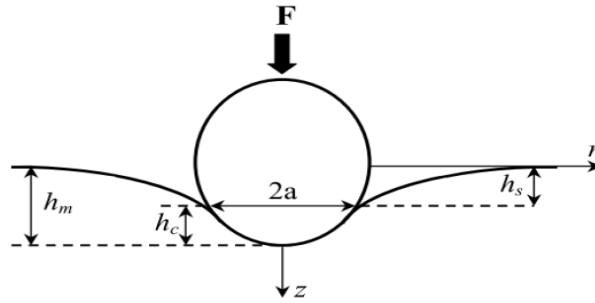


Figure I.26. Représentation schématique d'un contacts sphère rigide/plan (cas du contact de Hertz)

Connaissant « h_p », il est facile d'évaluer la valeur de la surface de contact « A », si on connaît la géométrie du poinçon. En faisant l'hypothèse que la décharge infinitésimale d'un indenteur axisymétrique est régie par les mêmes équations que la décharge d'un indenteur plat de même, l'expression du module élastique réduit « E_r » est établie dans [OLI 92] telle que :

$$E_r = \frac{1}{2\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} S \quad [I.7]$$

Avec :

- « β » : coefficient correcteur qui compense la non-axisymétrie de l'indenteur ;
- « $A = 24,5h_p^2$ » : aire de contact pour un indenteur Berkovich parfait ;
- « $A = \pi a^2 = \pi(2Rh_c - h_c^2)$ » : aire de contact pour une sphère parfaite.

I.4.4.2. Tests d'indentation sur particules de MIDND et résultats obtenus

Le travail expérimental d'indentation a été mené en large collaboration avec l'équipe de recherche Procédés et Systèmes Mécaniques (PSM), une des trois équipes du Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM) de Rennes. Le schéma de principe de l'appareillage utilisé est montré sur les images de la figure I.27. L'appareil d'indentation est relié à un ordinateur donnant en temps réel les données recueillies de l'expérimentation à savoir la profondeur d'enfoncement en fonction de la force appliquée ainsi que la courbe obtenue.

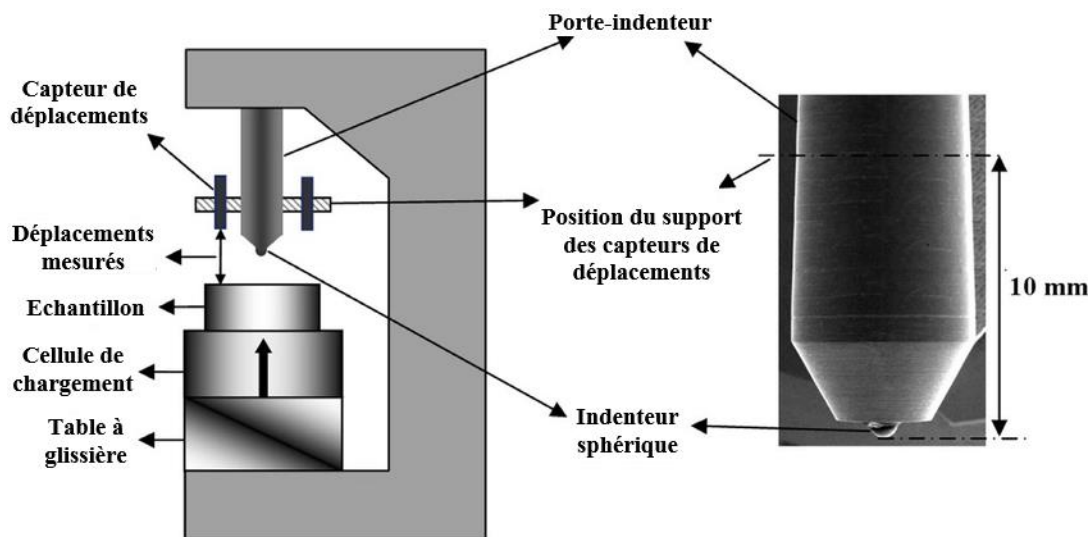


Figure I.27. Dispositif d'indentation instrumentée [LIA 17]

On notera que l'utilisation de capteurs de déplacement positionnés sur un support lié au porte-indenteur permet de s'affranchir de la complaisance de la machine d'essai et du montage et d'obtenir ainsi une mesure précise de l'enfoncement. Le module réduit de contact des MIDND peut être déterminé d'après la méthode de [OLI 92]. Avec un indenteur axisymétrique, il peut être déterminé par la relation de l'équation I.8.

$$E_r = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} S \quad [I.8]$$

Afin d'avoir la surface de contact A , il suffit de connaître la hauteur de contact « h_c » donnée par le profil de l'indenteur. Pour un contact élastique, la déflexion élastique « h_s » peut se déterminer avec la relation de l'équation I.9.

$$h_s = \epsilon \frac{P_{max}}{S} \quad [I.9]$$

Avec $\epsilon = 0,75$ dans le cas d'un indenteur axisymétrique

Il suffit de connaître « h_{max} », « P_{max} » et la pente lors de la décharge « S » pour obtenir « h_c » et donc déterminer le module réduit du contact.

A chaque essai, la surface indentée est observée et capturée à l'aide du microscope montré à la figure I.28. Ce dispositif a permis d'obtenir les surfaces de contact des deux indenteurs utilisés ainsi que les paramètres de rugosité de la surface indentée.

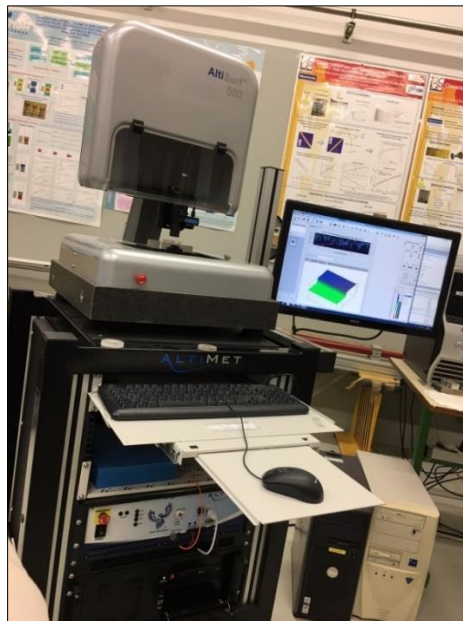


Figure I.28. Microscope utilisé pour l'observation et la mesure des surfaces indentées (Equipements PSM-LGCGM INSA Rennes)

L'indentation a été effectuée principalement dans les zones vitreuses. En indentant dans ces zones, nous avons caractérisé avec certitude les composants les plus rigides du MIDND. L'avantage d'indenter dans cette zone est d'avoir des conditions les plus parfaites pour atteindre la rigidité du matériau : comportement quasi-élastique du matériau et une surface parfaitement plane.

Caractériser la rigidité des autres zones est plus difficile à cause de la rugosité élevée, la présence de porosité, la possibilité d'endommagement lors de l'indentation. Pour être certain des résultats obtenus, la planéité de la zone indentée est à chaque fois contrôlée et le diamètre de l'empreinte obtenu est mesuré.

I.4.4.2.1. Série de tests A : avec un indenteur monobloc05b

Dans cette série de tests, un indenteur en carbure de tungstène de rayon 0,5 mm a été utilisé. Le matériau étant constitué de plusieurs phases solides et d'une porosité, ce type d'indenteur permet de tester les phases solides séparément. Comme le montrent les figures I.29 et I.30, l'indenteur a une forme proche d'une sphère de rayon $R = 0,5$ mm jusqu'à une valeur de rayon égale à 0,33 mm environ.

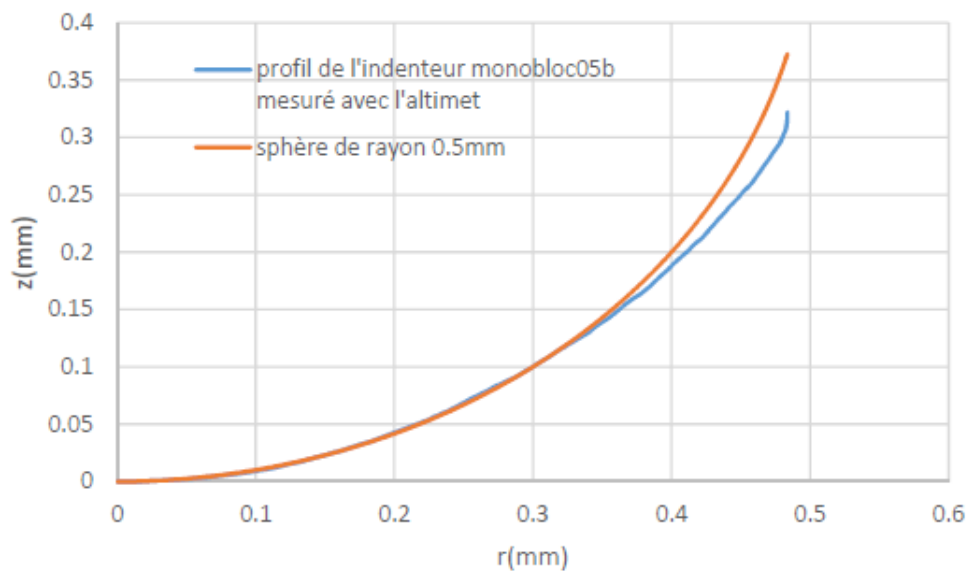


Figure I.29. Courbes descriptives de la forme de l'indenteur monobloc05b

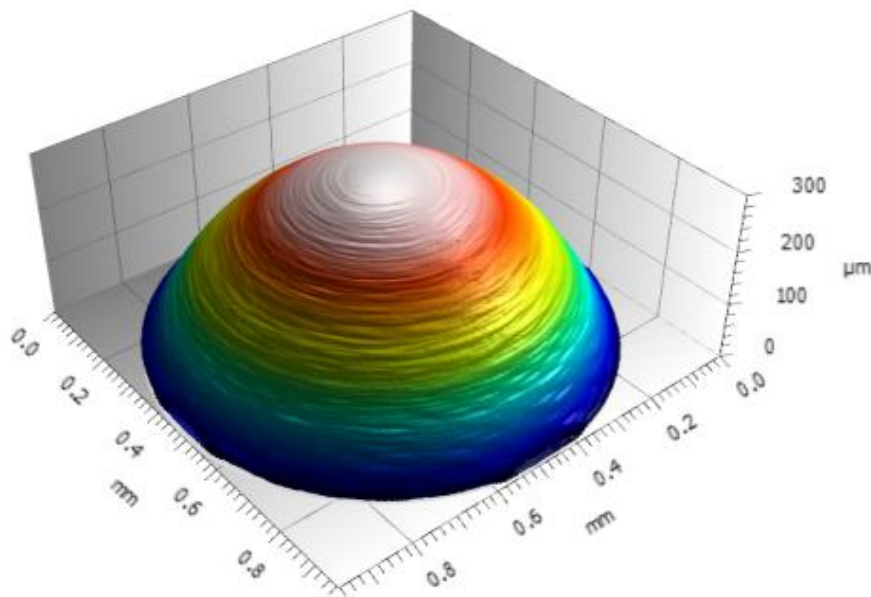


Figure I.30. Image 3D de la surface de contact de l'indenteur monobloc05b

Des séries de tests d'indentation sont effectuées sur les 9 échantillons préparés dont les images sont montrées à la figure I.18.

Le protocole d'essai suivi lors des 9 séries d'essais est le suivant [OLI 92] :

- 3 cycles de chargement jusqu'à 50N et de déchargement jusqu'à 5N sont appliqués ;
- 1 chargement à 50N suivi d'un maintien pendant 100s ;
- Le module réduit est ensuite mesuré lors d'un dernier déchargement.

I.4.4.2.1.1. Echantillon 1

La figure I.34 montre la particule en question et les zones testées dans les deux essais effectués. Un troisième essai a été effectué dans une autre zone semblable à celle montrée sur l'image de la figure I.31. L'échantillon a été poli à la pâte diamantée afin de limiter la rugosité. La figure I.32 montre la rugosité de la surface indentée au niveau des essais 1 et 2.

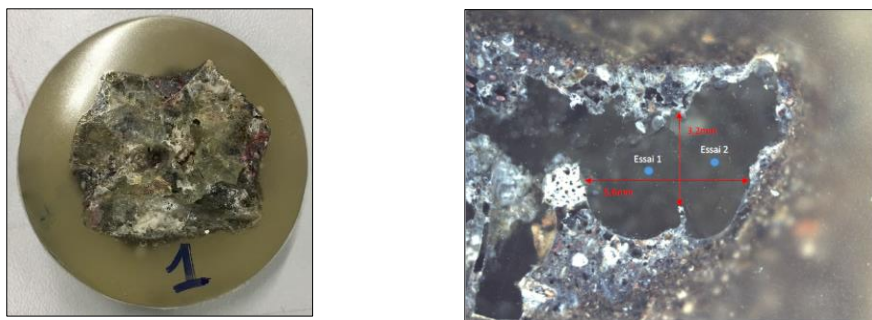


Figure I.31. Echantillon 1 avec les zones testées

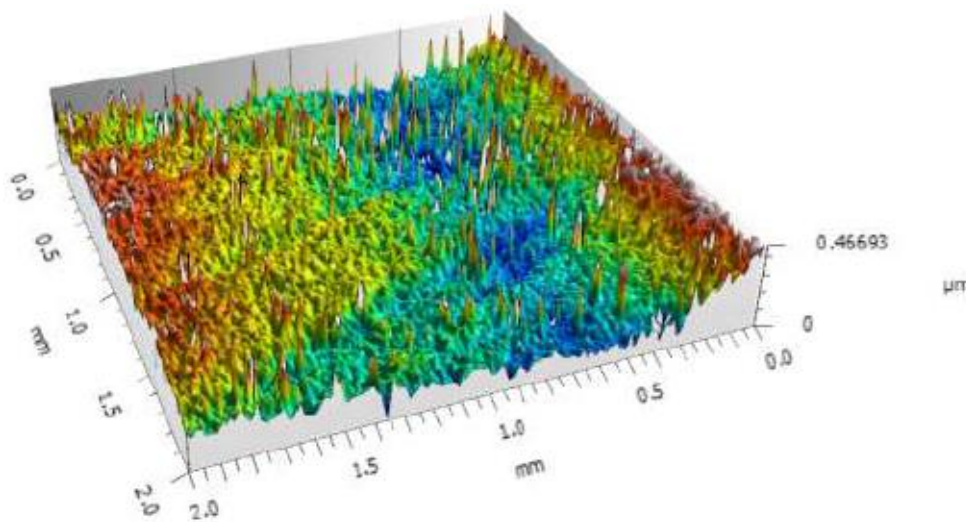


Figure I.32. Rugosité de la surface indentée dans les essais 1 et 2

Le tableau I.13 montre les caractéristiques de rugosité de la surface indentée.

Tableau I.13. Caractéristiques de rugosité (paramètres de hauteur) de la surface testée de l'échantillon 1

Paramètres de hauteur (ISO 25178)	
Sq (μm)	0,086496
Ssk (μm)	0,28577
Sku (μm)	2,5173
Sp (μm)	0,26087
Sv (μm)	0,20606
Sz (μm)	0,46693
Sa (μm)	0,071448

Les courbes d'indentation obtenues sont données à la figure I.33.

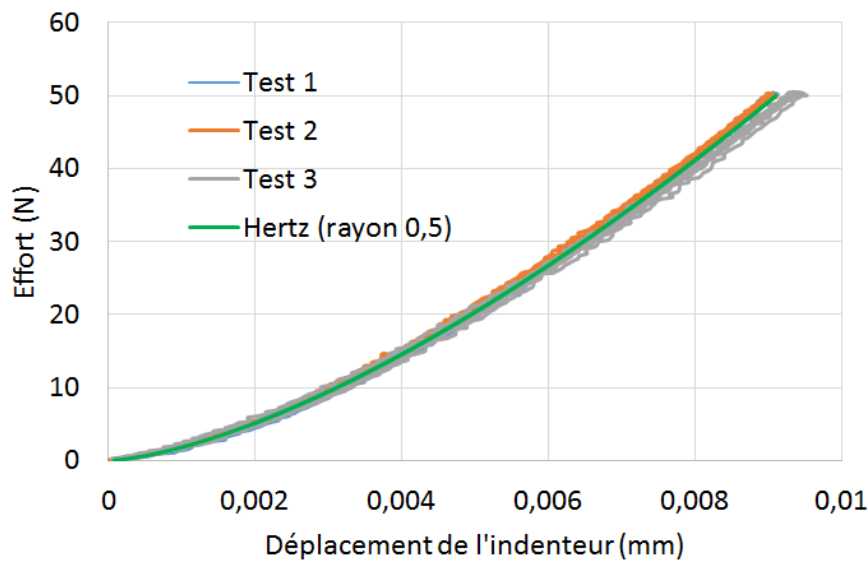


Figure I.33. Courbes d'indentation - échantillon 1 avec indenteur monobloc05b

La figure I.33 montre que le matériau indenté ne se déforme qu'élastiquement. Il n'y a pas de différence entre les courbes de chargement et de déchargement. Le palier à 50N n'a aucune influence sur le déplacement de l'indenteur pour les essais 1 et 2. Une légère influence est relevée pour l'essai 3.

On note également que la courbe issue de la théorie de Hertz suit parfaitement la courbe de chargement jusqu'à une profondeur de $3\mu\text{m}$ environ. L'examen des courbes obtenues montre que le profil de l'indenteur monobloc devient légèrement différent de celui d'une sphère parfaite à partir d'une valeur de « z » égale à $3\mu\text{m}$, ce qui explique le résultat obtenu.

Le tableau I.14 rassemble les valeurs de module réduit obtenues.

Tableau I.14. Modules réduits obtenus sur échantillon 1 avec l'indenteur monobloc05b

Essais	Module réduit de contact E^* (GPa)	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
1	62,647	69,522
2	62,923	69,863
3	57,649	63,420
Moyenne	61,073	67,602

On note une très bonne reproductibilité des résultats, surtout entre les essais 1 et 2. Le module réduit obtenu à partir de l'essai 3 est légèrement plus faible. Par rapport aux essais 1 et 2, la résistance à l'enfoncement a diminué et un léger enfoncement du pénétrateur lors du palier de 100s à 50N a été obtenu. La zone vitreuse au niveau de l'essai 3 étant plus petite, une légère participation des matériaux situés autour de cette zone vitreuse dans la déformation élastique peu expliquer le résultat obtenu.

I.4.4.2.1.2. Echantillon 2

L'échantillon 2 correspond à la particule moins vitreuse dont l'image est montrée à la figure I.34 avec la zone testée.

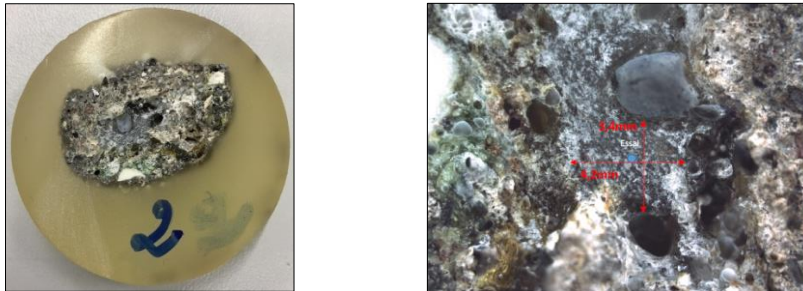


Figure I.34. Echantillon 2 avec la zone testée

La courbe d'indentation obtenue est donnée à la figure I.35.

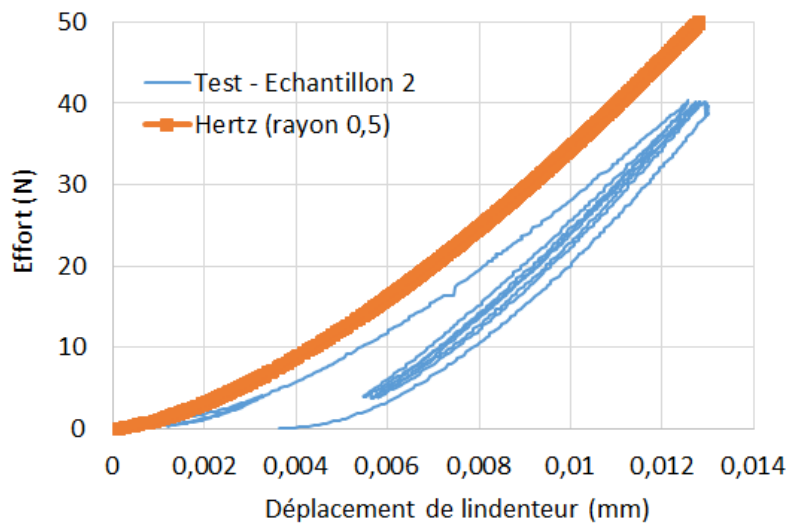


Figure I.35. Courbe d'indentation - échantillon 2 avec un indenteur monobloc05b

Une déformation permanente du matériau indenté a été obtenue. Le tableau I.15 donne les valeurs de module réduit obtenu.

Tableau I.15. Modules réduits obtenus sur échantillon 2 avec l'indenteur monobloc05b

Module réduit de contact E^* (GPa)	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
36,559	38,798

I.4.4.2.1.3. Echantillon 3

L'échantillon 3 est montré à la figure I.36 avec la zone testée. Une série de 3 essais a été effectuée et les courbes d'indentation obtenues sont données à la figure I.37. Les figures I.38, I.39 et I.40 montrent la comparaison de la courbe d'indentation obtenue pour chaque essai avec la courbe issue de la théorie d'Hertz.

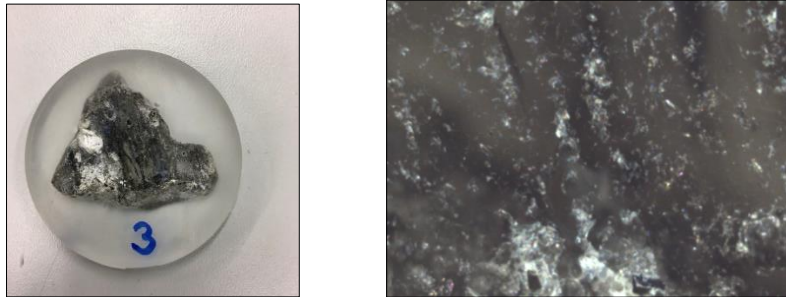


Figure I.36. Echantillon 3 avec la zone testée

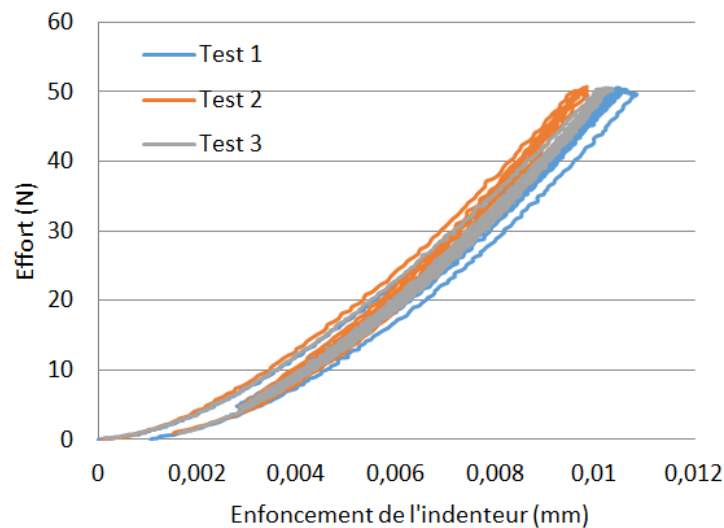


Figure I.37. Courbes d'indentation - échantillon 3 avec un indenteur monobloc05b

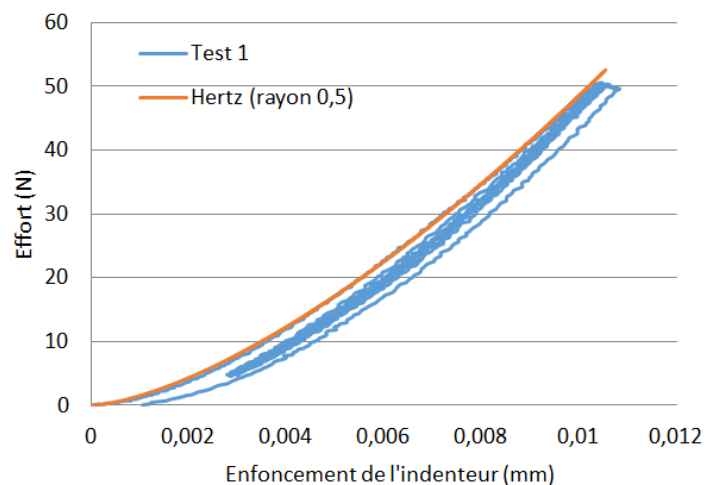


Figure I.38. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 3 - Essai 1

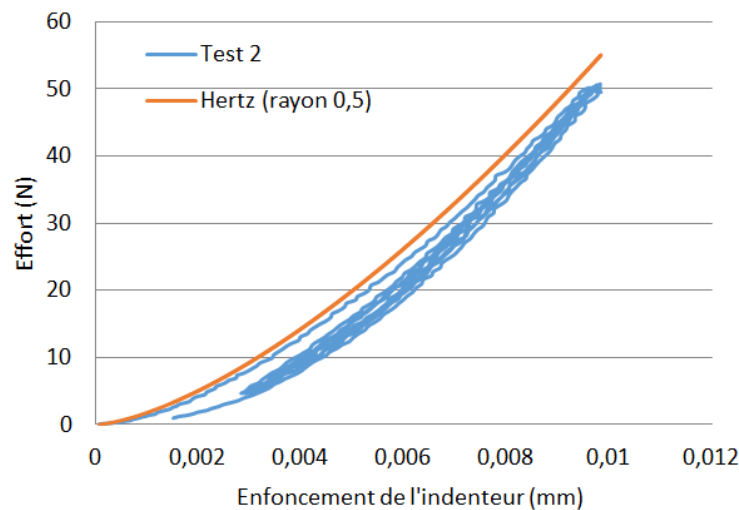


Figure I.39. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 3 - Essai 2

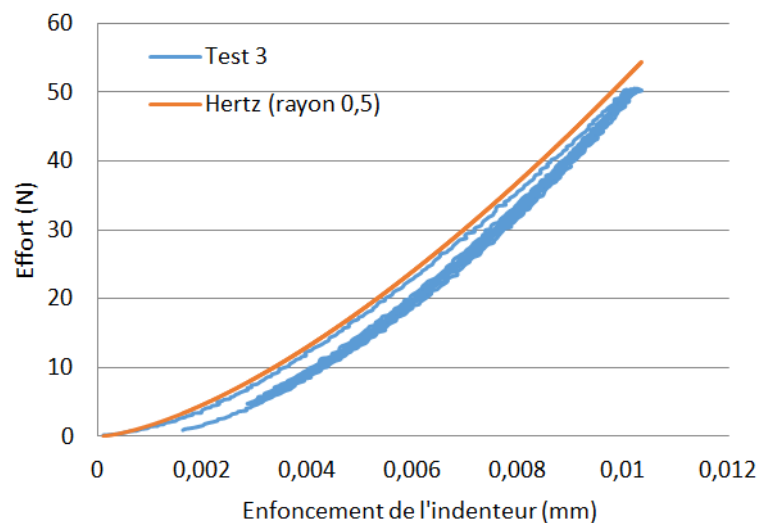


Figure I.40. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 3 - Essai 3

Ces figures montrent que la courbe issue de la théorie d'Hertz est très proche de la courbe de chargement obtenue lors des essais d'indentation, ce qui confirme que la déformation sous l'indenteur est quasi-élastique.

Le tableau I.16 donne les valeurs de modules réduits obtenues à partir des courbes de décharge.

Tableau I.16. Modules réduits obtenus sur échantillon 3 avec l'indenteur monobloc05b

Essais	Module réduit de contact E^* (GPa)	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
1	52	56
2	60	66
3	55	60
Moyenne	55,667	60,667

I.4.4.2.1.4. Echantillon 4

L'échantillon 4 est montré à la figure I.41 avec la zone testée. Une série de 3 essais a été effectuée et les courbes d'indentation obtenues sont données à la figure I.42. Les figures I.43, I.44 et I.45 montrent la comparaison de la courbe d'indentation obtenue pour chaque essai avec la courbe issue de la théorie d'Hertz.



Figure I.41. Echantillon 4 avec la zone testée

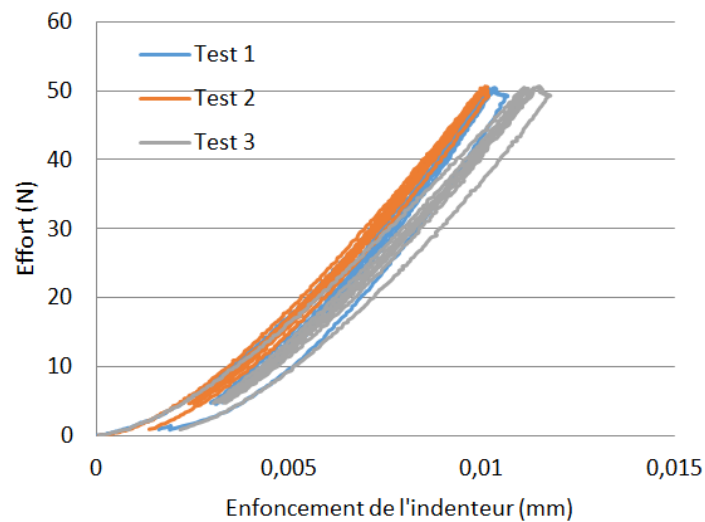


Figure I.42. Courbes d'indentation - échantillon 4 avec un indenteur monobloc05b

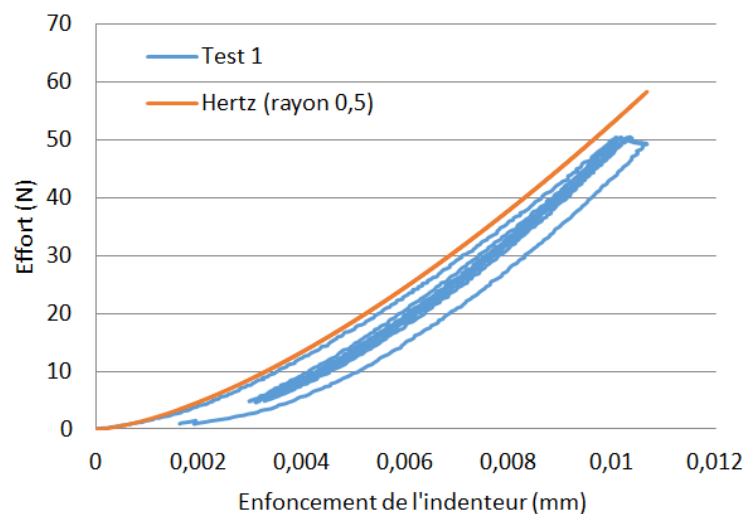


Figure I.43. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 4 - Essai 1

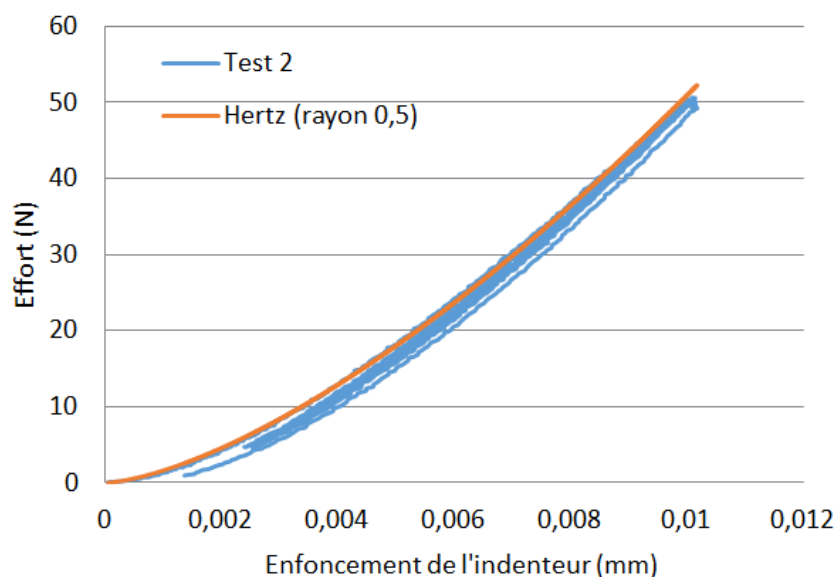


Figure I.44. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 4 - Essai 2

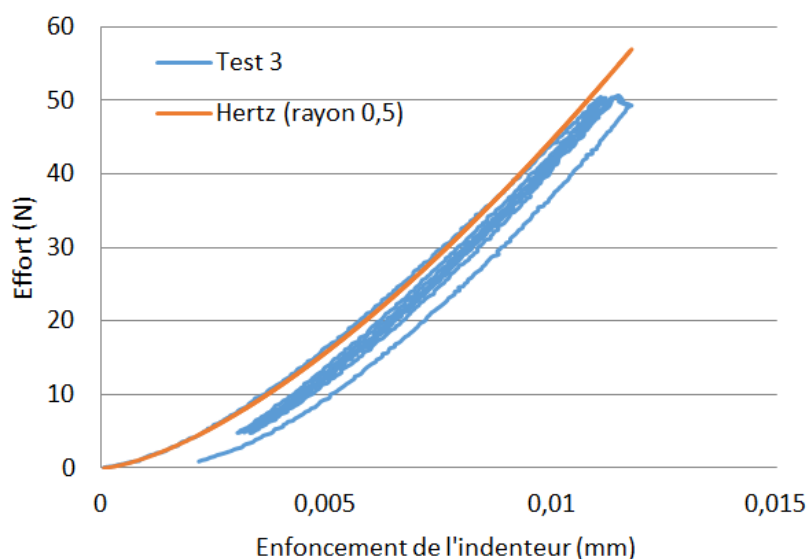


Figure I.45. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 4 - Essai 3

Ces figures montrent que la courbe issue de la théorie d'Hertz est très proche de la courbe de chargement obtenue lors des essais d'indentation, ce qui confirme que la déformation sous l'indenteur est quasi-élastique. Le tableau I.17 donne les valeurs de modules réduits obtenues à partir des courbes de décharge.

Tableau I.17. Modules réduits obtenus sur échantillon 4 avec l'indenteur monobloc05b

Essais	Module réduit de contact E^* (GPa)	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
1	56	61,5
2	54	59
3	47	51
Moyenne	52,333	57,167

I.4.4.2.1.5. Echantillon 5

L'échantillon 5 est montré à la figure I.46 avec la zone testée. Une série de 2 essais a été effectuée et les courbes d'indentation obtenues sont données à la figure I.47. Les figures I.48 et I.49 montrent la comparaison de la courbe d'indentation obtenue pour chaque essai avec la courbe issue de la théorie d'Hertz.

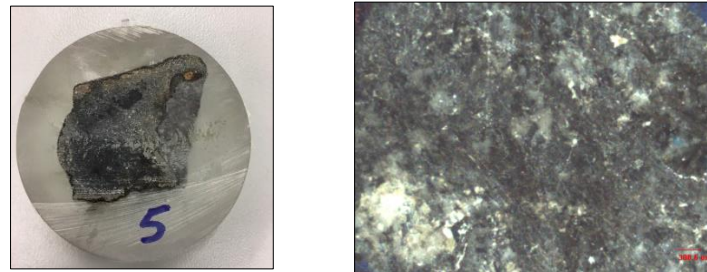


Figure I.46. Echantillon 5 avec la zone testée

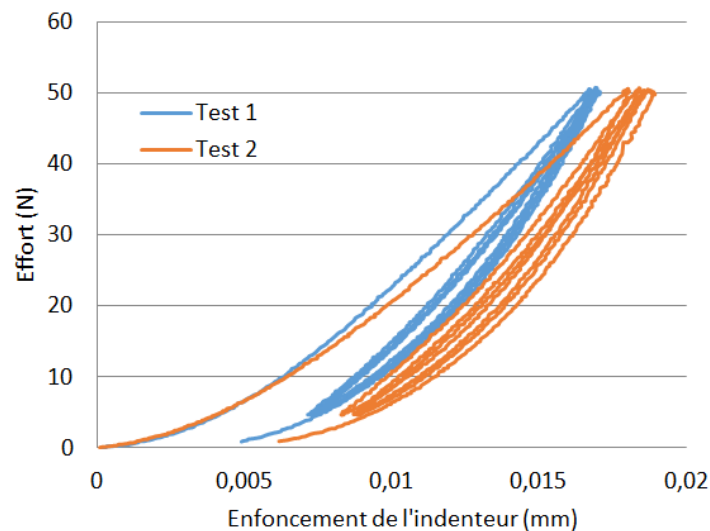


Figure I.47. Courbes d'indentation - échantillon 5 avec un indenteur monobloc05b

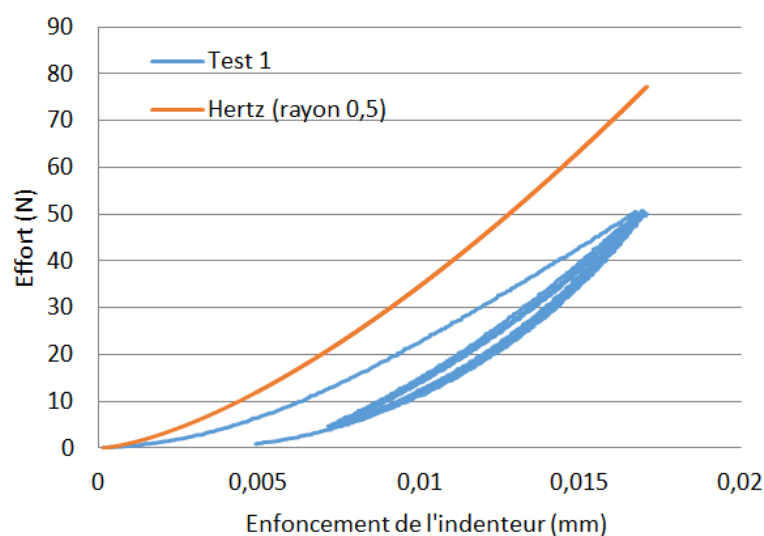


Figure I.48. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 5 - Essai 1

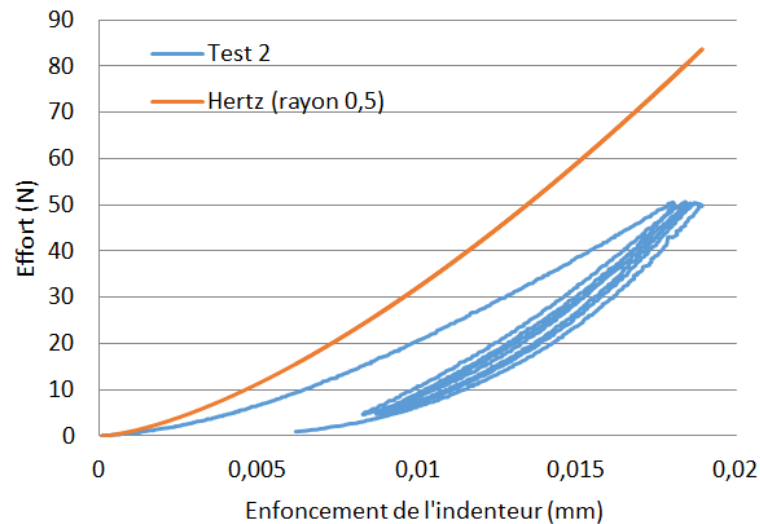


Figure I.49. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 5 - Essai 2

Ces figures montrent que la courbe issue de la théorie d'Hertz est assez éloignée de la courbe de chargement obtenue lors des essais d'indentation, ce qui confirme qu'une déformation permanente non négligeable du matériau indenté a été obtenue lors de l'essai.

Le tableau I.18 donne les valeurs de modules réduits obtenues à partir des courbes de décharge.

Tableau I.18. Modules réduits obtenus sur échantillon 5 avec l'indenteur monobloc05b

Essais	Module réduit de contact E^* (GPa)	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
1	36,5	39
2	34	36
Moyenne	35,25	37,5

I.4.4.2.1.6. Echantillon 7

L'échantillon 7 est montré à la figure I.50 avec la zone testée. Une série de 3 essais a été effectuée mais seul l'un d'eux a pu être exploité. L'état de surface des deux autres, trop rugueux, n'a pas permis d'avoir des résultats cohérents.

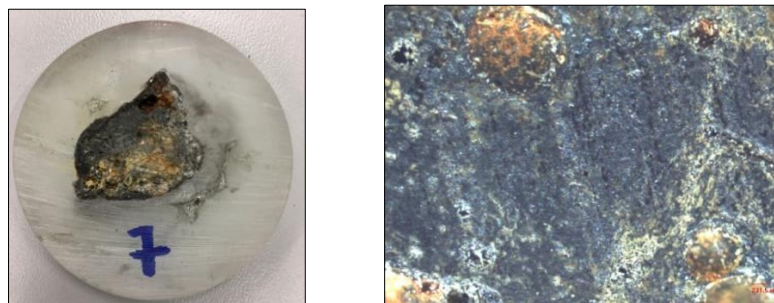


Figure I.50. Echantillon 7 avec la zone testée

Les figures I.51, I.52, I.53 et I.54 montrent la comparaison de la courbe d'indentation obtenue pour chaque essai avec la courbe issue de la théorie d'Hertz.

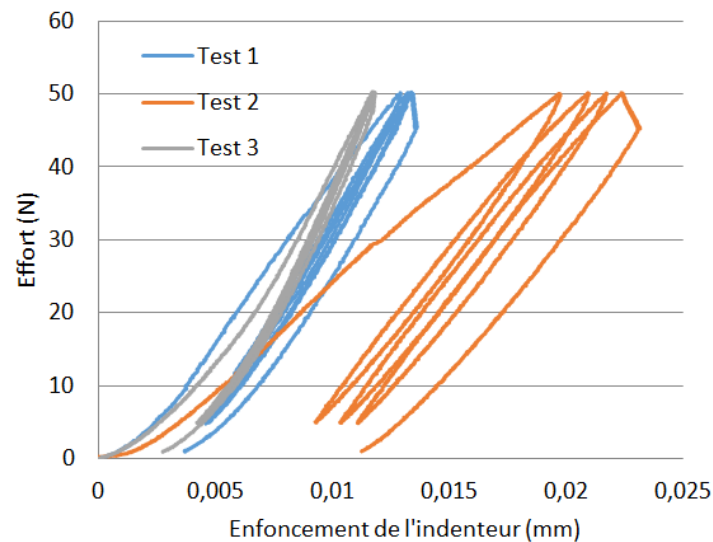


Figure I.51. Courbes d'indentation - échantillon 7 avec un indenteur monobloc05b

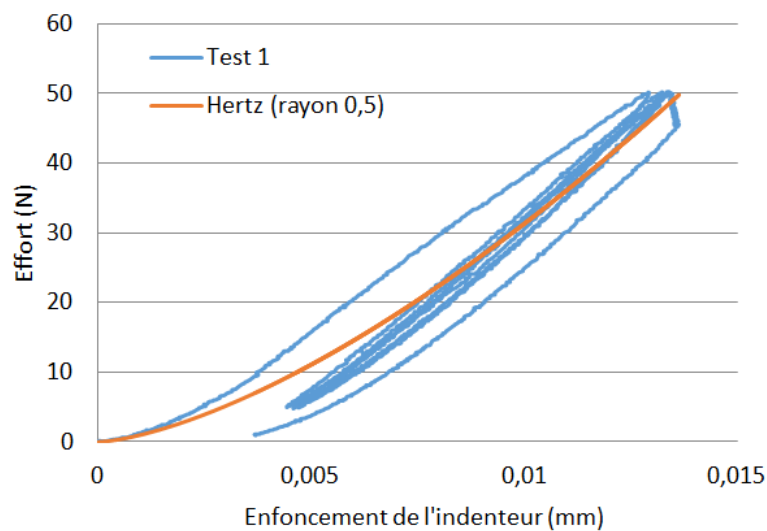


Figure I.52. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 7 - Essai 1

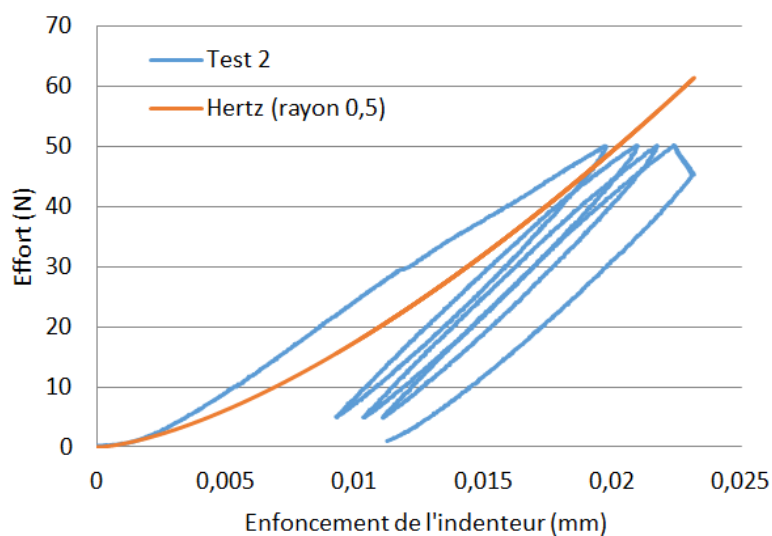


Figure I.53. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 7- Essai 2

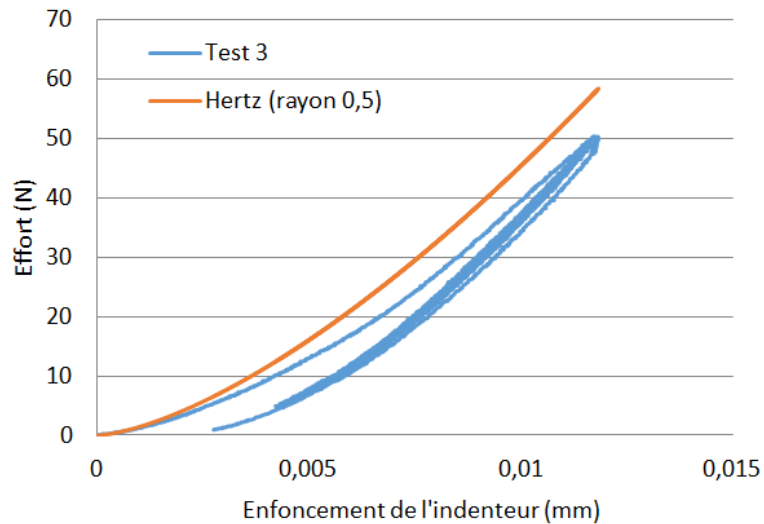


Figure I.54. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 7 - Essai 3

A partir de la courbe d'indentation de l'essai 3, un module réduit de 52 GPa a été obtenu. La comparaison entre la courbe de chargement et la courbe issue de la théorie d'Hertz montre un comportement correct à l'indentation.

Contrairement aux essais 1 et 2, un examen de la surface à l'endroit où l'essai 3 a été effectué montre que celle-ci a une planéité beaucoup plus satisfaisante pour un essai d'indentation (figure I.55).

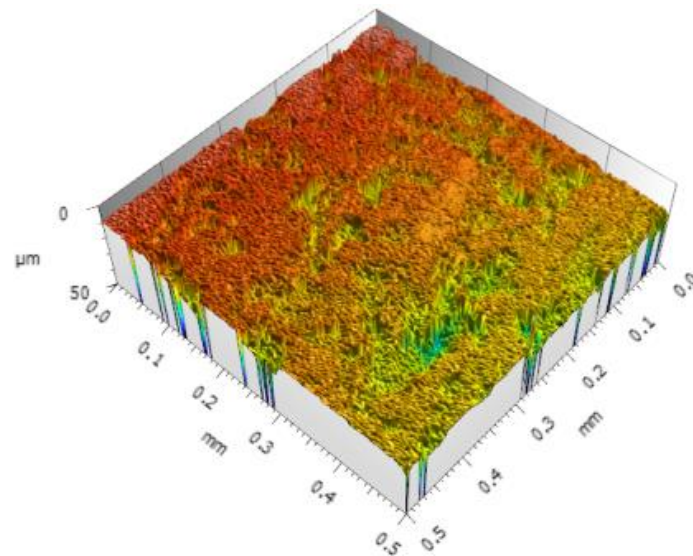


Figure I.55. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 7 - Essai 3

Tableau I.19. Modules réduits obtenus sur échantillon 7 avec l'indenteur monobloc05b

Essai	Module réduit de contact E^* (GPa)	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
3	52	63,35

I.4.4.2.1.7. Echantillon 8

L'échantillon 8 est montré à la figure I.56 avec la zone testée. Une série de 3 essais a été effectuée et les courbes d'indentation obtenues sont données à la figure I.57. Les figures I.58, I.59 et I.60 montrent la comparaison de la courbe d'indentation obtenue pour chaque essai avec la courbe issue de la théorie d'Hertz.



Figure I.56. Echantillon 8 avec la zone testée

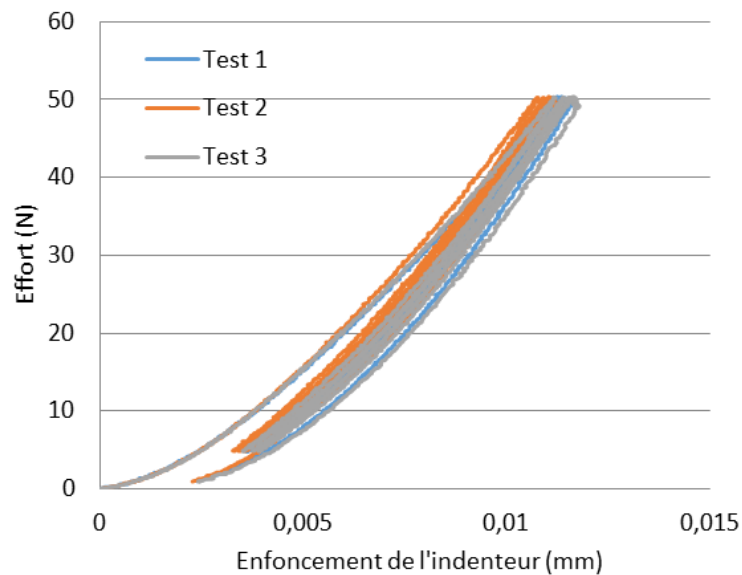


Figure I.57. Courbes d'indentation - échantillon 8 avec un indenteur monobloc05b

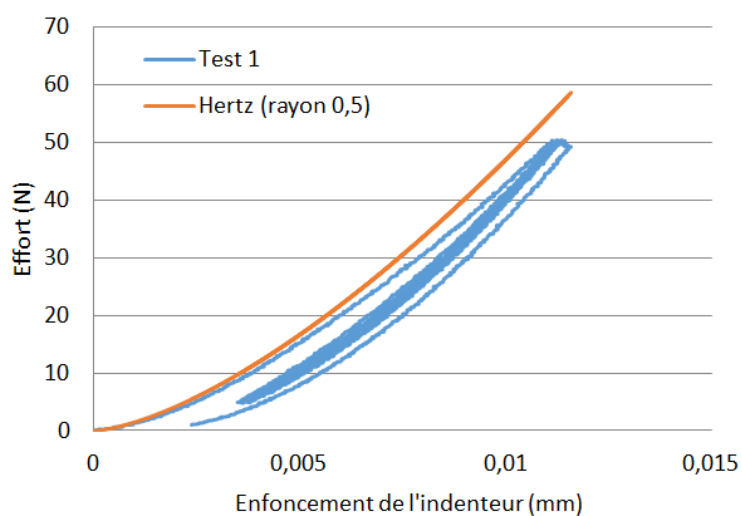


Figure I.58. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 8 - Essai 1

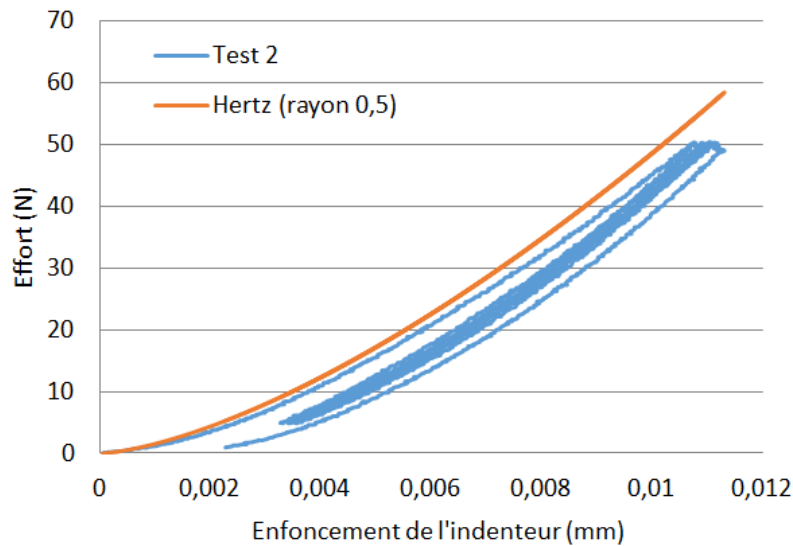


Figure I.59. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 8 - Essai 2

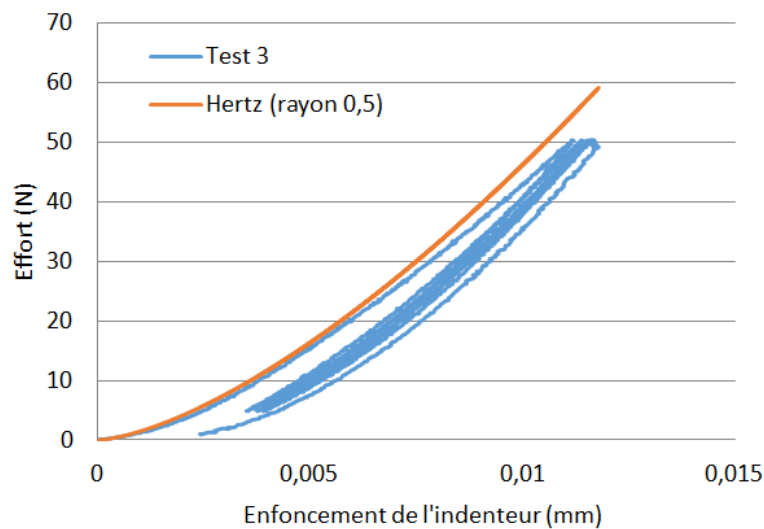


Figure I.60. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 8 - Essai 3

Ces figures montrent que la courbe issue de la théorie d'Hertz est très proche de la courbe de chargement obtenue lors des essais d'indentation, ce qui confirme que la déformation sous l'indenteur est quasi-élastique. Les surfaces indentées sont quasi-élastiques

Le tableau I.20 donne les valeurs de modules réduits obtenues à partir des courbes de décharge.

Tableau I.20. Modules réduits obtenus sur échantillon 8 avec l'indenteur monobloc05b

Essais	Module réduit de contact E^* (GPa)	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
1	50	54
2	51,5	56
3	49	53
Moyenne	50,167	54,333

Les courbes d'indentation obtenues dans les 3 essais ainsi que les valeurs de modules calculées sont similaires (proches). Les observations des surfaces indentées sont montrées sur les figures I.61, I.62 et I.63. Elles suivantes montrent que la surface est assez plane et peu rugueuse au niveau où les essais d'indentation ont été effectués.

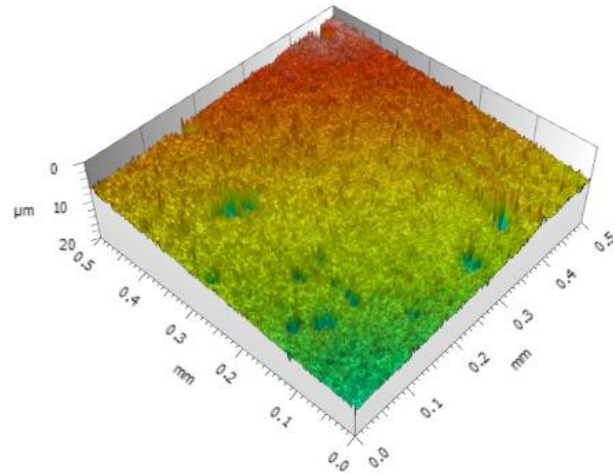


Figure I.61. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 8 - Essai 1

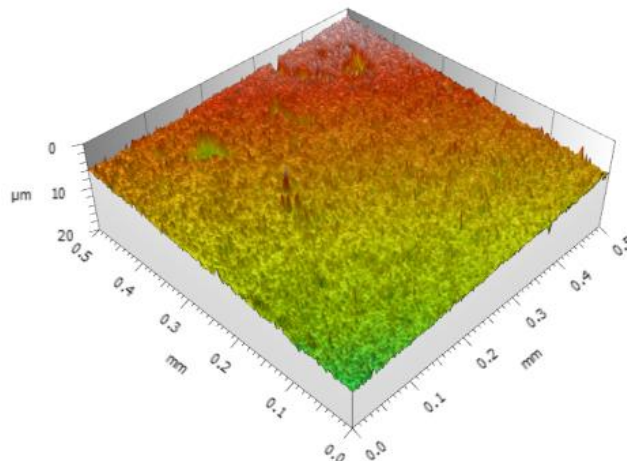


Figure I.62. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 8 - Essai 2

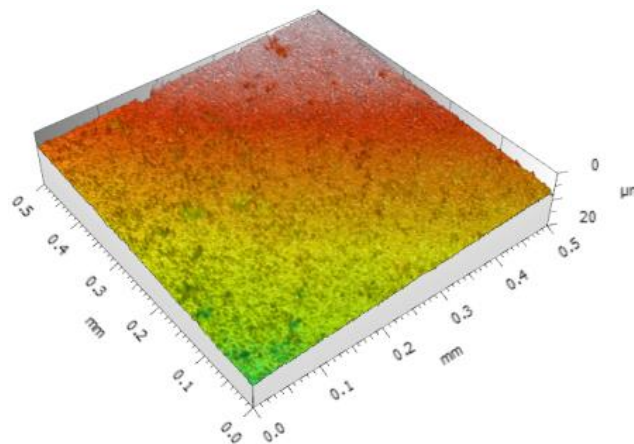


Figure I.63. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 8 - Essai 3

I.4.4.2.1.8. Echantillon 9

L'échantillon 9 est montré à la figure I.64 avec la zone testée. Une série de 3 essais a été effectuée et les courbes d'indentation obtenues sont données à la figure I.65. Les figures I.66, I.67 et I.68 montrent la comparaison de la courbe d'indentation obtenue pour chaque essai avec la courbe issue de la théorie d'Hertz.

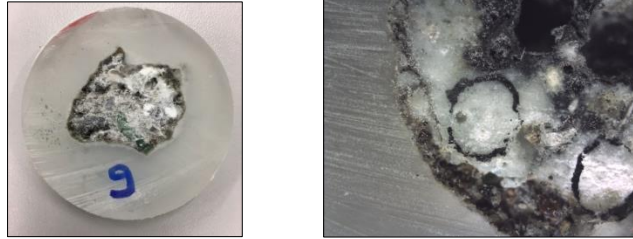


Figure I.64. Echantillon 9 avec la zone testée

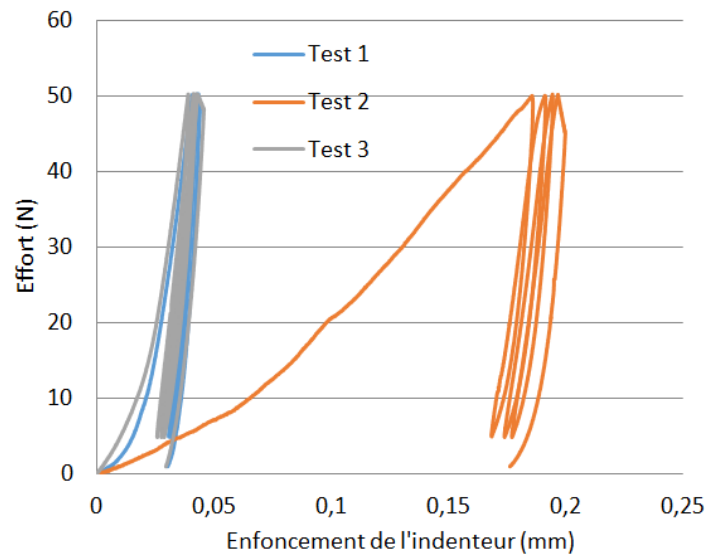


Figure I.65. Courbes d'indentation - échantillon 9 avec un indenteur monobloc05b

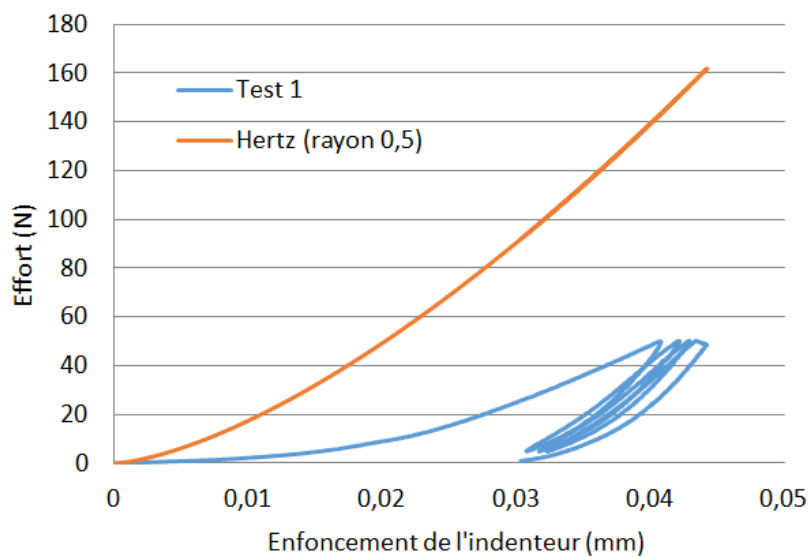


Figure I.66. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 9 - Essai 1

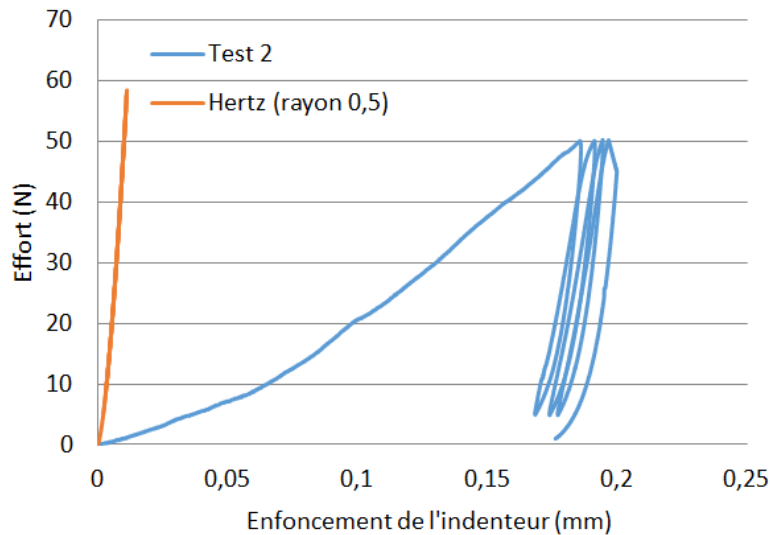


Figure I.67. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 9 - Essai 2

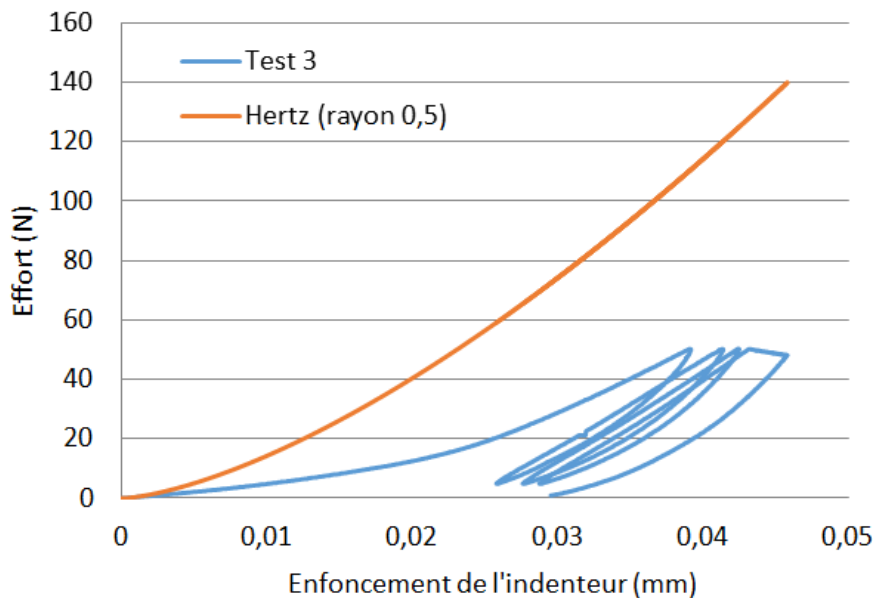


Figure I.68. Comparaison courbe indentation et courbe de hertz – Echantillon 9 - Essai 3

Comme le montre la figure I.65, une grande différence existe entre l'essai 2 et les essais 1 et 3. A partir des courbes d'indentation 1 et 3, on obtient respectivement des modules réduits égaux à 19 GPa et à 15,5 GPa.

Sur les figures I.67 et I.68, on relève après déchargement une pénétration résiduelle de l'ordre de $30\mu\text{m}$ ce qui montre qu'une déformation non permanente non négligeable s'est produite lors de l'indentation. Cette déformation non permanente explique que les courbes de chargement soient éloignées de la courbe élastique théorique d'Hertz. Cette différence assez élevée peut aussi provenir de la rugosité non négligeable du matériau, comme le montre la figure I.69.

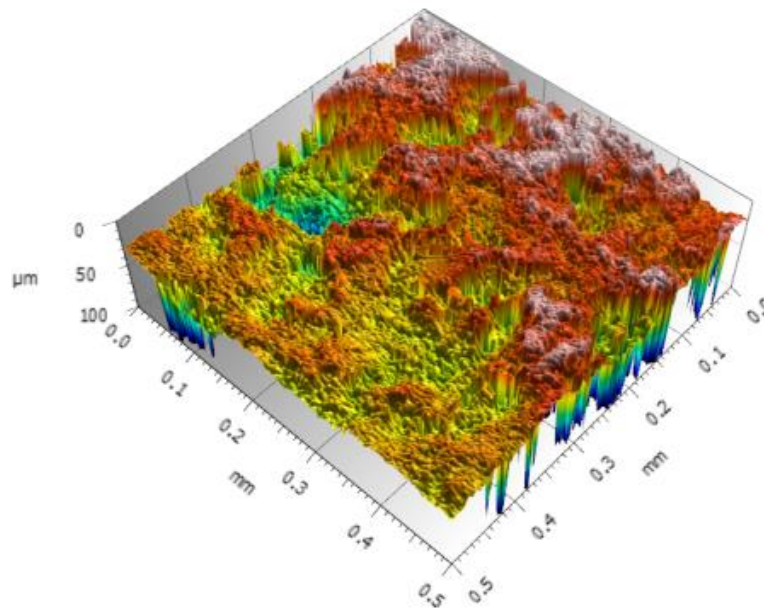


Figure I.69. Rugosité de surface de la zone indentée – Echantillon 9 - Essai 1

L'influence de la rugosité sur les mesures obtenues par indentation dépend du rapport entre la profondeur de pénétration et le paramètre de rugosité (R_a ou autre). Si la valeur de profondeur de pénétration est comparable à la valeur du paramètre de rugosité, une grande dispersion de mesure sera obtenue. La dureté mesurée et la rigidité calculée par la méthode de [OLI 92] seront plus faibles si on indente un pic de rugosité et seront plus élevées si on indente un creux. Si la profondeur de pénétration est beaucoup plus élevée que le paramètre de rugosité, la rigidité sera toujours sous-estimée et cette valeur tendra vers la valeur mesurée obtenue pour une surface parfaitement plane lorsque la profondeur de pénétration augmentera.

La figure I.69 montre qu'il est possible d'obtenir des différences de niveau de plusieurs dizaines de microns. Si on compare aux valeurs de rigidités mesurées, la valeur de la rigidité réelle du matériau indenté dépend de l'endroit où l'essai a été effectué. Elle peut être supérieure si l'essai a été effectué sur un pic ou inférieure si l'essai a été effectué dans un creux.

Pour ce qui concerne l'essai 2, une profondeur de pénétration résiduelle de l'ordre de 0,18 mm a été obtenue. Cette profondeur de pénétration élevée indique donc qu'une empreinte résiduelle de taille non négligeable a été obtenue. L'examen de la surface à l'endroit où l'essai 2 a été effectué confirme ce résultat (figure I.70).

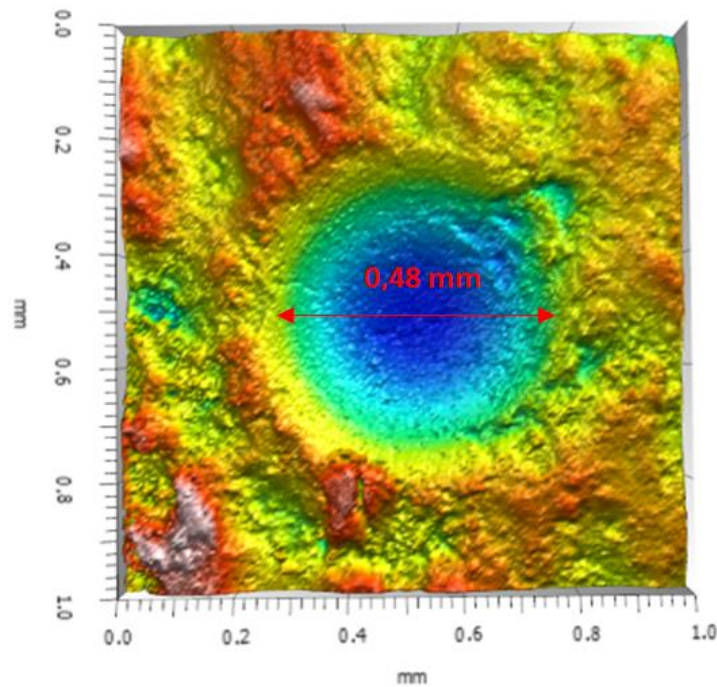


Figure I.70. Empreinte de l'indenteur au niveau de la zone indentée – Echantillon 9 - Essai 2

L'existence d'une empreinte de taille élevée montre que le granulat indenté dans l'échantillon 9 est donc beaucoup moins résistant que ceux indentés dans les autres échantillons.

L'application de la méthode de [OLI 92] à partir de la courbe de décharge conduit à la détermination d'un module réduit égal à 6500MPa, ce qui est très faible. L'application de cette méthode conduit aussi à un diamètre de contact maximum égal à 0,8 mm. Comme le montre la figure précédente, ce diamètre est très nettement supérieur au diamètre de l'empreinte résiduelle égale à environ 0,48 mm. L'application de la méthode de [OLI 92] valable dans le cas de l'indentation de surface plane conduit donc à une surestimation du rayon de contact et donc à une sous-estimation du module réduit de contact du matériau indenté.

Cette sous-estimation est due au problème de planéité de la surface indentée. L'examen de la surface du matériau près de la zone indentée montre en effet une très grande irrégularité et il semble que l'essai ait été effectué sur un pic de la surface.

Une mesure de rigidité correcte à partir de l'essai 2 peut être obtenue à partir de l'empreinte résiduelle observée. Si l'on fait l'hypothèse généralement admise que le diamètre de contact est égal au diamètre de l'empreinte résiduelle mesurée et égale à 0,48 mm, l'utilisation de la courbe de décharge d'indentation conduit à une valeur de module réduit égale à 11 GPa.

L'indentation montre donc que le matériau indenté dans l'échantillon 9 est beaucoup moins rigide et résistant que les matériaux indentés dans les autres échantillons.

Le tableau I.21 résume les valeurs de modules réduits obtenues à partir des courbes de décharge.

Tableau I.21. Modules réduits obtenus sur échantillon 9 avec l'indenteur monobloc05b

Essais	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
1	19
2	11
3	15,5
Moyenne	15,167

I.4.4.2.1.9. Récapitulatifs des résultats d'indentation de la série A

Le tableau I.22 rassemble les valeurs moyennes de modules élastiques réduits obtenues sur les différents échantillons indentés dont les résultats sont concluants.

Tableau I.22. Récapitulatif des modules élastiques sur échantillons 9 indentés avec l'indenteur monobloc05b

Numéro Echantillons	Module réduit moyen E_r (GPa)
1	67,602
2	38,798
3	60,667
4	57,157
5	37,5
7	63,55
8	54,333
9	15,167
Moyenne	49,347

I.4.4.2.1.10. Retour d'expérience sur les tests non concluants

Tous les essais effectués sur les 9 échantillons n'ont pas donné des résultats concluants. Il s'agit de ceux effectués sur l'échantillon 6 et des essais « 1 et 2 » sur l'échantillon 7. Contrairement aux essais effectués sur les autres échantillons qui ont donné des courbes d'indentation acceptables et exploitables, une grosse différence de comportement à l'indentation est obtenue à ces niveaux. La comparaison entre les courbes théoriques issues d'Hertz et les courbes de chargement montre ce fait. Au début du chargement, les courbes expérimentales sont au-dessus de la courbe issue de la théorie d'Hertz, ce qui est incorrect. La rugosité trop élevée des surfaces de contact des zones testées des échantillons 6 et 7 peut expliquer les résultats incohérents obtenus.

Un examen des surfaces indentées a donc été réalisé sur les échantillons en question. Cet examen montre en effet des différences de niveau de l'ordre de quelques dizaines de microns par endroit. Cette mauvaise planéité ne permet donc pas d'obtenir des modules réduits corrects car nous sommes très loin du cas théorique d'un plan indenté par une sphère.

La figure I.71 montre un exemple de courbe d'indentation incompatible avec la forme de l'indenteur utilisée (sphérique).

La figure I.72 montre un exemple de surface trop rugueuse conduisant à des résultats pas concluants.

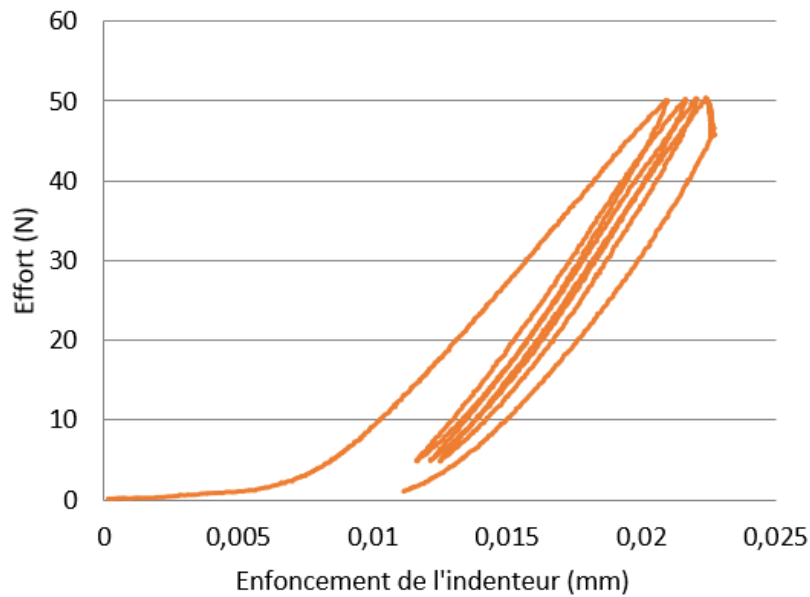


Figure I.71. Exemple de courbe d'enfoncement incompatible avec la forme de l'indenteur utilisé. Problème de contact initial en raison d'une rugosité trop grande

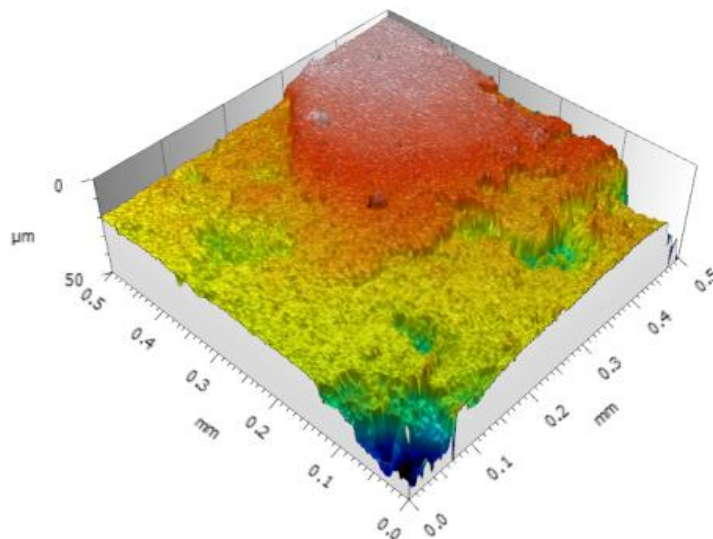


Figure I.72. Exemple de rugosité de surface ayant conduit à des résultats erronés

I.4.4.2.2. Série de tests B : avec un indenteur monobloc140a

Dans la série de tests A, un indenteur sphérique de 0,5 mm de rayon a été utilisé afin de tester la phase solide sans faire participer la porosité. Une des méthodes pour intégrer la porosité est d'utiliser un indenteur sphérique de rayon beaucoup plus grand que 0,5 mm.

Avec un indenteur de 140 mm de rayon, un plus grand volume de matériau est testé. Le test intègre les phases solides mais aussi la porosité et donne des modules homogénéisés de la particule testée. L'indenteur monobloc140a est en carbure de tungstène dont les caractéristiques élastiques sont $E_i = 600 \text{ GPa}$ $\nu_i = 0,23$. Comme le montrent les figures I.73 et I.74, il est de forme proche d'une sphère.

Le protocole de charge décharge suivi est celui décrit dans [OLI 92] :

- 3 phases successives de « chargement-déchargement » de 100N ;
- 1 Phase de chargement de 100N maintenue constant pendant 100s ;
- 1 Phase de déchargement pendant laquelle le module réduit est déterminé.

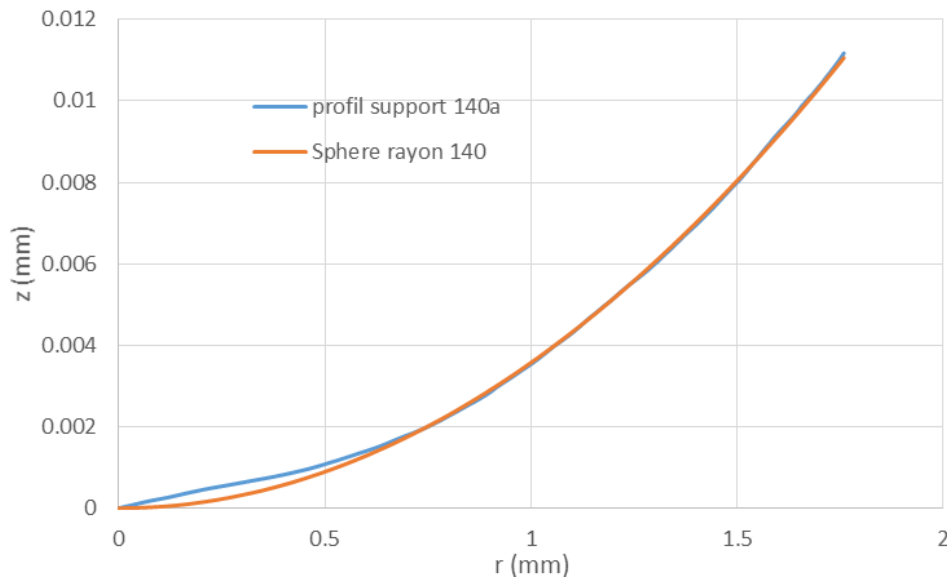


Figure I.73. Courbes descriptives de la forme de l'indenteur utilisé monobloc140b

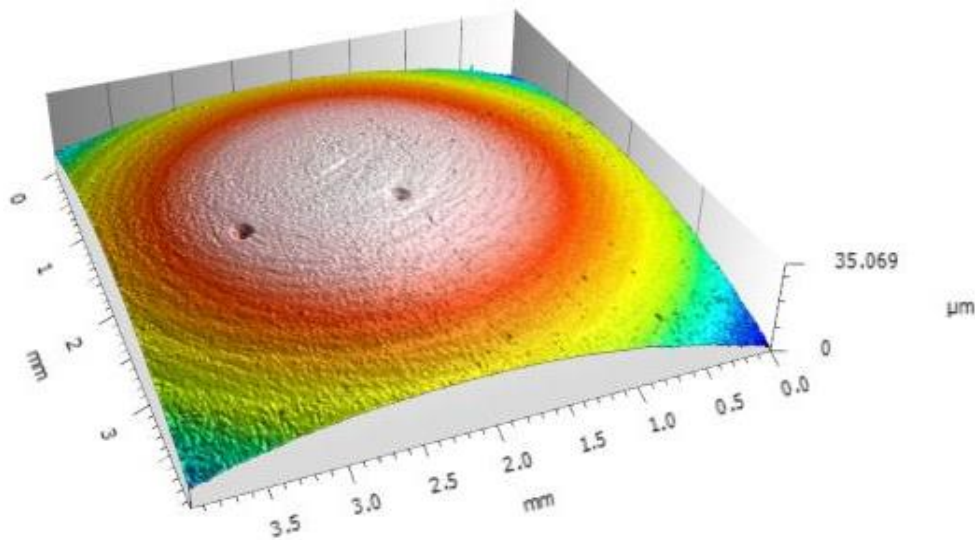


Figure I.74. Image 3D de la surface de contact de l'indenteur monobloc140b utilisé

Sur l'échantillon 1, vitreux, montré à la figure I.18, il a été effectué deux essais dont les courbes de réponses du matériau sont données aux figures I.75 et I.76. Chaque courbe est corrigée afin de prendre en compte la déformation du porte indenteur lors des essais (correction de la compliance du banc expérimental). Dans la courbe d'indentation, la phase de décharge est considérée suivre la relation puissance de l'équation I.9.

$$P = B \cdot (h - h_f)^m \quad [I.9]$$

L'optimisation des paramètres B , h_f et m est effectuée afin de superposer la courbe issue de cette relation de l'équation I.9 et la courbe expérimentale de décharge. Pour obtenir la pente de décharge « S » lorsque P est max, il suffit de dériver la relation puissance et calculer cette dérivée lorsque $h = h_{\max}$. Les figures I.77 et I.78 montrent les courbes de décharge expérimentales et corrigées obtenues avec les deux essais.

A partir des courbes de décharge, les valeurs indiquées au tableau I.23 sont obtenues.

Tableau I.23. Modules réduits obtenus sur échantillon 1 avec l'indenteur monobloc140a

Essais	Module réduit du matériau indenté E_r (GPa)
1	16
2	14
Moyenne	15

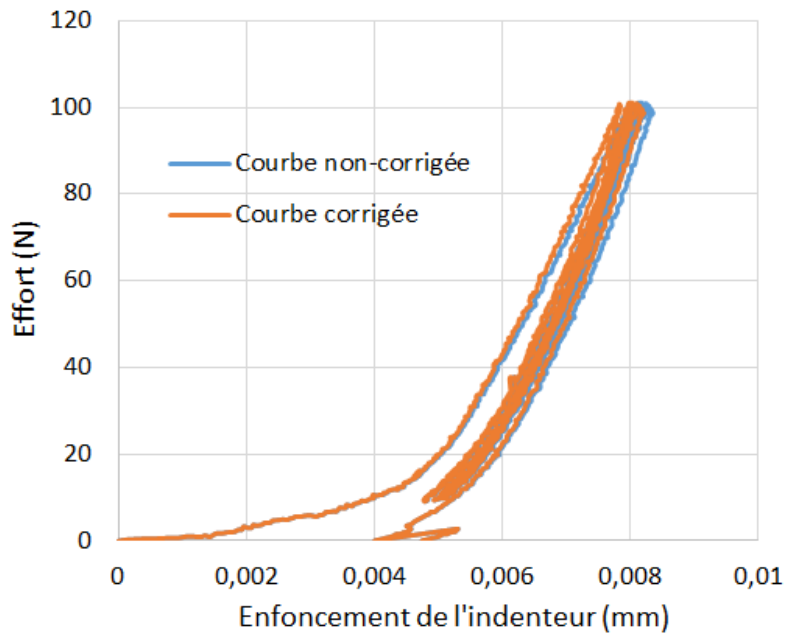


Figure I.75. Courbes d'indentation de l'essai 1 – indenteur monobloc140b

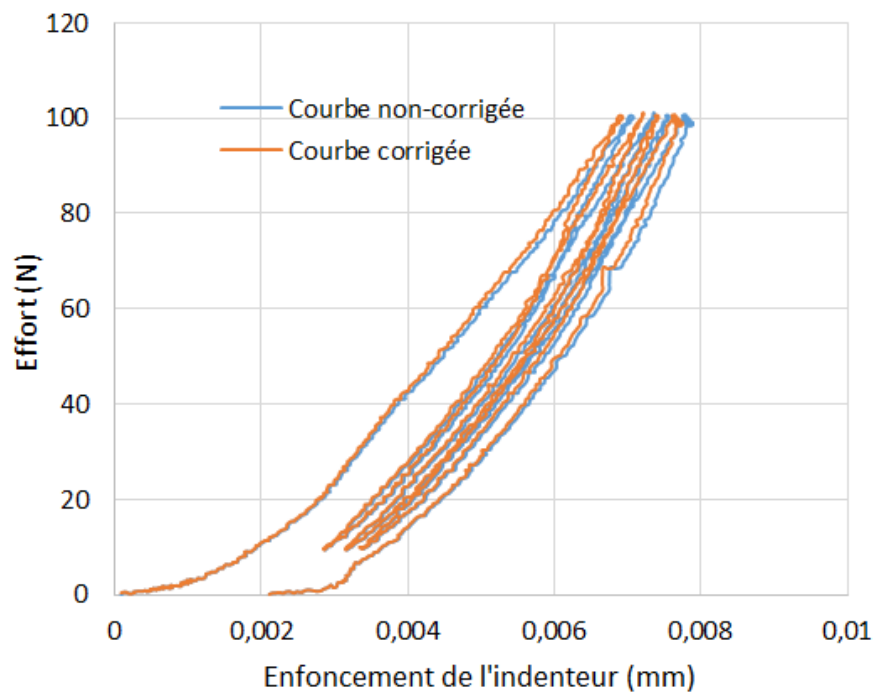


Figure I.76. Courbes d'indentation de l'essai 2 – indenteur monobloc140b

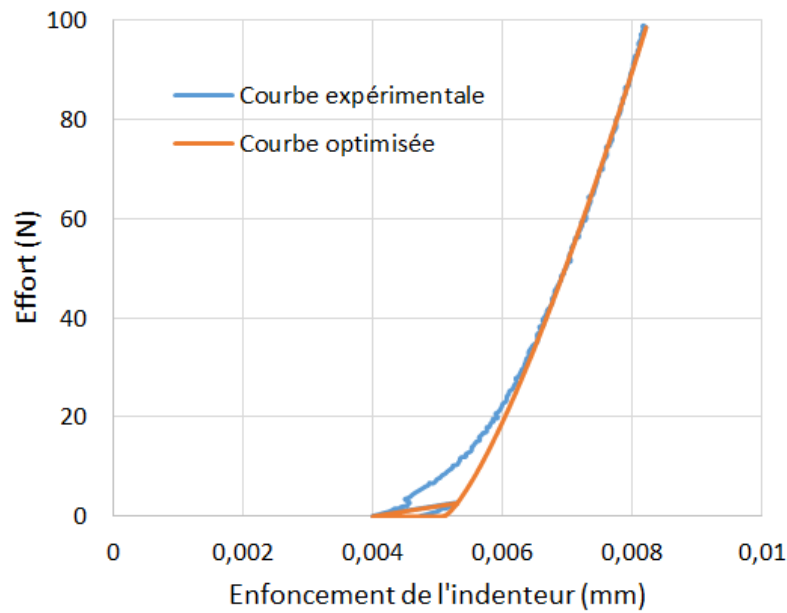


Figure I.77. Phase de décharge de l'essai 1 – indenteur monobloc140b

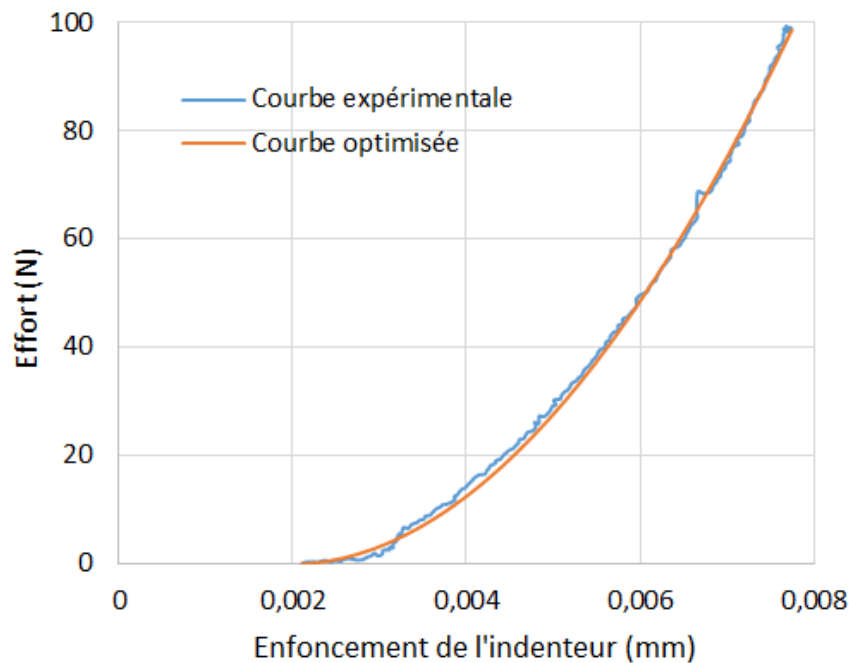


Figure I.78. Phase de décharge de l'essai 2 - monobloc140b

I.4.4.3. Discussions

Dans la bibliographie, les résultats de [BEC 07] montrent que les MIDND présentent des caractéristiques proches de celles des matériaux granulaires initialement denses. La cimentation des éprouvettes agit essentiellement sur la cohésion, l'amplitude du déviateur à la rupture, sur le module de rigidité initial et sur le coefficient de Poisson. Il n'existe tout de même pas de différences notables concernant l'angle de frottement interne du matériau dans le cas traité et non traité, au pic comme à l'état critique. Les courbes d'évolution des déformations volumiques obtenues par [HUN 11] indiquent un effet de serrage des grains lors de l'essai triaxial, suivi d'une dilatance (effet de désenchevêtrement des grains) vers les grandes déformations. Les

effets de serrage et de désenchevêtrement entraînent des phénomènes irréversibles importants. Le phénomène de dilatance qu'il observe est d'autant plus prononcé que la pression de confinement effective est faible. A différentes pressions de confinement effectives, le comportement des mâchefers ne dépend que de la pression de confinement effective et pas de la pression interstitielle. Ce résultat est important car il permet de simplifier les simulations des essais triaxiaux drainés des mâchefers incinérés par des logiciels basés sur la méthode des éléments finis. Les modules de Young obtenus par l'auteur indiquent que le comportement élastique du mâchefer incinéré se rapproche du comportement élastique des sables et des graviers (Sable : $E = 50$ à 80 MPa, Gravier : $E = 100 - 200$ MPa). Par contre, le coefficient de Poisson ne change pas de manière significative avec la pression de confinement effective. Cette conclusion est en phase avec celle de [BEC 05]. Les valeurs des caractéristiques de cisaillement et de rupture obtenues par [HUN 11] au pic $M = 2,33$ sont $\phi' = 54,51^\circ$ et $c' = 0$ KPa. L'ordre de grandeur de l'angle de frottement obtenu est comparable à l'angle de frottement obtenu sur des mâchefers incinérés par [BEC 07] et qui de 53° . Les angles de dilatance « Ψ » trouvés (13° en moyenne) sont proches de l'angle de dilatance du sable et du gravier qui s'échelonne entre 0° et 15° , et varie de façon peu significative avec la pression de confinement effective constatée [HUN 11]. Mais, les angles caractéristiques « ϕ_c » obtenus par ce dernier montrent une dépendance du phénomène de dilatance vis-à-vis de la pression de confinement effective appliquée : la dilatance diminue lorsque la pression de confinement effective augmente constatée enfin l'auteur.

Les expérimentations réalisées sur particules isolées de MIDND ont montré que ces types de granulats de substitution sont des granulats légers contrairement aux granulats naturels dont les masses volumiques sont supérieures à 2 g/cm^3 .

Les analyses MEB et la microanalyse ont permis de façon globale de mieux comprendre la composition chimique des particules de mâchefers des carrières de la Garenne. Les principaux éléments chimiques décelés sont le carbone (C), oxygène (O), magnésium (Mg), aluminium (Al), silicium (Si), calcium (Ca), fer (Fe). Ils représentent quelques éléments dits « Majeurs » qui font la constitution des mâchefers si on réfère à [ODI 12]. Les analyses chimiques ponctuelles quantitatives (EDS) au MEB ont cependant donné plus de précisions sur la composition chimique du matériau. La composition chimique des MIDND étudiés s'inscrit dans les plages de valeurs trouvées dans la littérature. Ces plages sont toutefois étendues. Selon [MIN 17], l'étude comparative effectuée sur la composition moyenne des ordures ménagères en France dans le département pilote (Jura) où la collecte sélective a été effectuée, met en exergue une baisse des proportions en silicium dans la composition des MIDND. Cela montre que les caractéristiques physico-chimiques des mâchefers dépendent fortement de la zone de production et donc de son 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.

Les résultats obtenus pour le module élastique réduit du mâchefer non traité montrent une faible rigidité homogénéisée (15 GPa en moyenne) lorsque la porosité et les phases solides sont prises en compte lors du test avec un indenteur à gros rayon ($R = 140 \text{ mm}$).

Les phases solides seules présentent toutefois de bonnes rigidités avec un indenteur de rayon beaucoup plus petit ($R = 0,5 \text{ mm}$) permettant de tester de façon localisée la phase solide. Les modules élastiques réduits obtenus sur phases solides varient entre $15,167$ et $67,602 \text{ GPa}$ selon la zone testée et selon la nature de la particule de MIDND étudiée. Un module élastique réduit moyen de la phase solide, tournant autour de 49 GPa , a ainsi été trouvé.

Le déroulement des différents essais effectués ainsi que l'analyse des résultats obtenus montrent encore une fois l'hétérogénéité particulière qui caractérise les MIDND. L'enfoncement de la

surface indentée dépend de la rigidité de la composante testée sur cette surface (fer, céramique, plastique, scories, verre, imbrûlés, etc...). Il est donc normal, vu les différents matériaux que l'on peut rencontrer dans un granulat de MIDND, que les modules obtenus en des zones ponctuelles soient différents.

Une étude statistique serait intéressante pour avoir une idée plus précise de l'ordre de grandeur du module élastique de ces types de matériaux du moment que leurs zones de production sont diverses.

I.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de faire un état des lieux sur les granulats de MIDND et de faire appel à quelques travaux expérimentaux originaux effectués sur des graves à base de mâchefers de déchets non dangereux. Ces expérimentations mises en évidence dans ce chapitre sont des éléments de validation de quelques résultats de la modélisation développée au chapitre 3.

La démarche de modélisation hiérarchique mise en place aux chapitres 3 et 4 permet d'étudier le comportement mécanique d'une grave routière à base de MIDND traitée avec un liant hydraulique et hydrocarboné. Cette démarche de modélisation nécessite d'être alimentée par des données expérimentales telles que les propriétés élastiques intrinsèques des particules de MIDND valorisées. Ces propriétés sont obtenues dans ce travail par le biais de la campagne d'indentation présentée dans ce chapitre.

Chapitre II - Quelques stratégies de modélisation multi-échelle de matériaux granulaires dans la bibliographie

II.1. Introduction

Dans une structure routière, les graves seules ont l'inconvénient d'avoir un module assez faible qui dépend de celui du sol support. Elles repartissent assez mal les charges sur le sol de fondation et ne peuvent convenir que pour les chaussées à faible trafic ou pour certaines utilisations particulières. Ces raisons sont à l'origine de l'amélioration des graves routières avec un traitement aux liants qui sont de deux natures :

- hydraulique : chaux, laitier de haut fourneau, pouzzolane, cendre volante, ciment ;
- hydrocarboné : bitume.

Les graves donnent une granularité continue de cailloux, de graviers, de sable avec généralement une certaine proportion de particules plus fines. Cette continuité conditionne la possibilité d'obtenir un bon arrangement des grains sous l'effet de compactage et une bonne compacité afin d'assurer une stabilité et une bonne résistance à l'orniérage sous charges cycliques. Dans cette granularité étalée (d/D), le plus gros diamètre (D) est dans les dizaines de millimètres (14 - 20) mm pour les couches de base et (20 – 31,5) mm pour les couches de fondation. Le plus petit diamètre (d) est de l'ordre de quelques micromètres (particules fines). La forme, l'angularité et la texture des graves concourent également à une bonne stabilité, avec une meilleure cohésion et une meilleure adhérence des grains dans la matrice.

Dans ce chapitre, nous faisons une succincte synthèse bibliographique sur la modélisation multi-échelle hiérarchique de matériaux granulaires traités au non aux liants. Les liants en question sont le ciment d'une part et le bitume d'autre part. Une description plus ou moins détaillée de ces liants est faite. Cette synthèse bibliographique permet d'introduire la modélisation multi-échelle hiérarchique développée au chapitres 3 et 4 afin d'étudier le comportement mécanique de graves routières traitées au ciment d'une part (chapitre 3) et au bitume d'autre part (chapitre 4).

II.2. Modélisation des matériaux granulaires cimentaires

Les matériaux dits « cimentaires » regroupent l'ensemble des matériaux dont le liant est un ciment hydraulique, c'est-à-dire qui réagit en présence d'eau pour former une matrice stable, qui a pour rôle d'assurer la cohésion entre les granulats utilisés dans leur confection. Les matériaux composites hétérogènes composés d'un squelette granulaire de grande étendue (de quelques microns à plusieurs dizaines de millimètres) enrobé par une matrice poreuse constituée par la pâte de ciment hydratée, ont depuis longtemps suscité un intérêt particulier pour les chercheurs. L'expérimentation permet de répondre à certaines questions, mais la simulation numérique est devenue un outil précieux incontournable, qui permet un gain de temps conséquent mais aussi une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu.

II.2.1. Processus d'hydratation du ciment Portland

Le ciment Portland dont les constituants sont hydrauliques, résulte du broyage fin de clinker et d'une petite quantité de sulfate de calcium (environ 5 %) comme régulateur de prise. Le clinker est obtenu par un mélange de calcaire (80 %) et d'argile (20 %) à haute température (1450 °C) : le calcaire apporte la chaux (CaO) tandis que l'argile apporte la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Les quatre phases principales de clinker, qui ne sont pas des corps purs du fait de la présence des corps mineurs dans l'argile et le calcaire, sont :

- silicate tricalcique Ca_3SiO_5 (C_3S) qui représente 50 à 70 % du clinker ;
- silicate bicalcique Ca_2SiO_4 (C_2S) qui représente 10 à 20 % du clinker ;
- aluminat tricalcique $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ (C_3A) qui représente 8 à 10 % du clinker ;
- aluminoferrite tétracalcique $\text{Ca}_4\text{AlFeO}_5$ (C_4AF) qui représente 5 à 15 % du clinker.

Il faut également noter la présence de gypse dans le ciment portland (environ 2 %).

L'hydratation du ciment est l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions commencent avant la prise et se poursuivent longtemps après celle-ci, mais de plus en plus lentement, constituant ainsi le durcissement [YUR 03]. L'état de surface des grains de ciment (dont la taille est de quelques microns en moyenne) est désorganisé par le broyage qui casse les liaisons interatomiques de la matière. Dès que l'eau et le ciment sont mélangés, à l'interface solide-liquide, il se crée une réactivité en raison de ces liaisons devenues insaturées par le broyage et plusieurs mécanismes entremêlés ont lieu le plus souvent simultanément. Ces mécanismes élémentaires qui sont l'absorption, l'hydrolyse, la dissolution et la cristallisation, conduisent à l'hydratation du ciment.

L'ajout d'eau au ciment anhydre engendre une hydratation de ses constituants, qui deviennent alors très peu solubles, ce qui aboutit à la création d'un liant stable et résistant d'un point de vue mécanique [ROU 08]. [TAZ 95] a proposé le mécanisme décrivant les réactions chimiques ayant lieu lors de cette hydratation. De façon générale, lors de la mise en contact avec l'eau, la surface des grains de ciment se recouvre de molécules d'eau. Les constituants du ciment se dissolvent alors, et se retrouvent sous forme d'ions (ions calcium, hydroxyle, aluminates, silicates et sulfate) en solution. Lorsque la concentration ionique dépasse le produit de solubilité, les ions précipitent sous forme d'hydrates. Ce phénomène se poursuit jusqu'à dissolution complète des constituants du ciment anhydre. La cinétique de cette hydratation diminue au fur et à mesure du temps, par l'effet d'une diminution de la diffusion de l'eau vers le ciment anhydre, ce dernier étant de plus en plus recouvert de couches d'hydrates. La période de maturation du matériau peut donc s'étendre sur plusieurs mois voire années [ROU 08].

Les travaux de [JEN 01] donnent l'évolution volumique des différentes phases constituant une pâte de ciment avec le degré d'hydratation, caractérisant la proportion du ciment ayant été hydraté ($E/C = 0,6$) noté α (figure II.1). Au départ de la réaction, seul le ciment anhydre et l'eau sont présents. Puis, au fur et à mesure, l'eau capillaire réagit avec ce ciment pour former un gel d'hydrates (ici décomposé en sa fraction solide et sa fraction liquide). Aucun apport d'eau extérieure n'étant réalisé, la consommation d'eau engendre la création de pores vides d'eau dans la structure de la pâte de ciment, le volume des produits d'hydratation étant plus faible que le volume des réactifs. Cette contraction « chimique » est dite de « Le Châtelier » et a notamment été quantifiée par [TAZ 95] à partir des relations stœchiométriques d'hydratation du ciment et par des mesures expérimentales. Une contraction de l'ordre de 11 % a été déterminée. La réaction prend fin lorsque toute l'eau capillaire a réagi pour former les hydrates (degré d'hydratation $\alpha_{\max}$, ici égal à 1) [ROU 08].

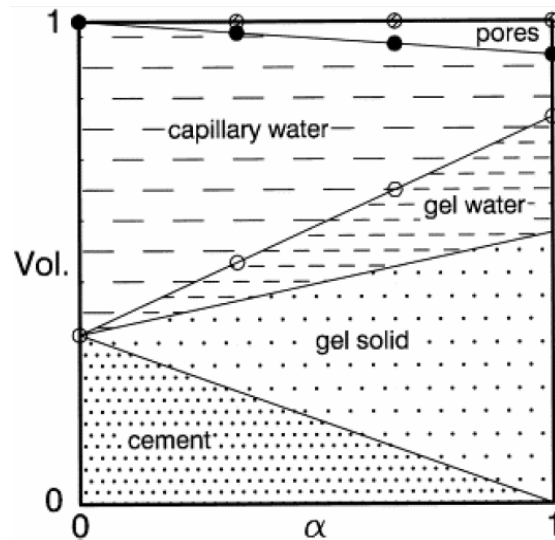


Figure II.1. Evolution des proportions volumiques des différents constituants au sein d'une pâte de ciment en fonction du degré d'hydratation [ROU 08]

Le principal constituant de la pâte de ciment est, avec la portlandite, les C-S-H. Cette phase est la « colle » qui tient l'ensemble des grains de sables d'un mortier ou les granulats d'un béton. Les propriétés mécaniques de la pâte de ciment dépendent donc principalement des C-S-H. L'équation II.1 donne une relation simplifiée de la réaction chimique de l'hydratation.



D'après [YUR 03], on trouve dans une pâte de ciment entièrement hydraté de rapport E/C = 0,5 :

- 56 % de silicates de calcium hydratés (C-S-H) ;
- 20 % de portlandite $Ca(OH)_2$ noté (C-H) ;
- 15 % de sulfoaluminates ;
- 7 % d'eau ;
- 7 % de vide.

II.2.2. Les différentes phases et échelles de la modélisation

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. Cette plateforme permet de simuler numériquement le comportement mécanique et les propriétés de transfert (diffusion etc...) de pâtes de ciment (échelle micro) et de composites granulaires cimentaires (échelles sub-meso et meso). Le logiciel CEMHYD3D du NIST est utilisé pour la génération de la microstructure de la pâte de ciment et de la mesostructure du mortier. L'approche développée par la plateforme MuMoCC, est de type « hiérarchique » : elle 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. La démarche générale originelle de la plateforme MuMoCC, telle que présentée dans la référence [KAM 07] est décrite à la figure II.2 et permet de distinguer trois échelles représentatives des différentes phases du 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. La zone d'interface entre les grains et la matrice, appelée auréole de transition, a des caractéristiques mécaniques et de transferts qui sont différentes de celles de la pâte de ciment du 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.

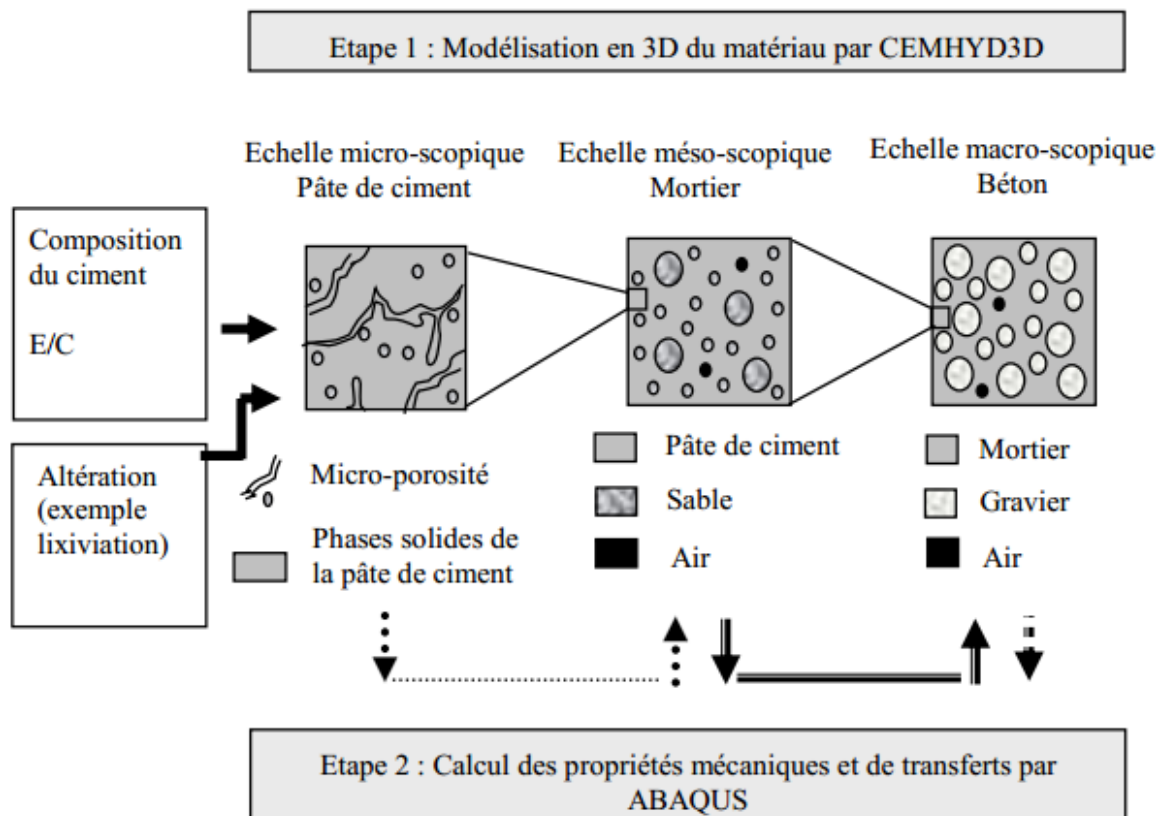


Figure II.2. Etapes de la modélisation multi-échelle de la plateforme MuMoCC [KAM 07]

Dans ce premier travail [KAM 07], la terminologie « mesoscopique » est utilisée à la place de « sub-mesoscopique », et « macroscopique » à la place de « mesoscopique ». Dans les travaux qui ont suivi, les auteurs ont renommé l'échelle mesoscopique en échelle sub-mesoscopique et l'échelle macroscopique en échelle mesoscopique. C'est cette terminologie que l'on utilisera dans ce nouveau travail. L'échelle mesoscopique est celle dans laquelle on observe des

granulats (graves) enrobés par une matrice (micro-grave-ciment) comportant un certain pourcentage de porosité.

La pâte de ciment hydraté est un matériau d'une hétérogénéité très complexe avec une forte porosité (saturée ou non). Elle est composée principalement de silicates de calcium hydratés (C-S-H), de la portlandite (CH), d'aluminates et de sulfo-aluminates. La différence des propriétés mécaniques des différentes phases sur chaque échelle augmente encore plus l'hétérogénéité des matériaux cimentaires. La complexité de ce type de matériau ne permet pas le développement de modèles analytiques pour la description réelle de son comportement. Par conséquent la seule alternative est l'utilisation de modèles numériques. Dans la modélisation faite par [KAM 07], la microstructure de la pâte de ciment hydratée comportant des vides d'air a été mise en évidence (figure II.3).

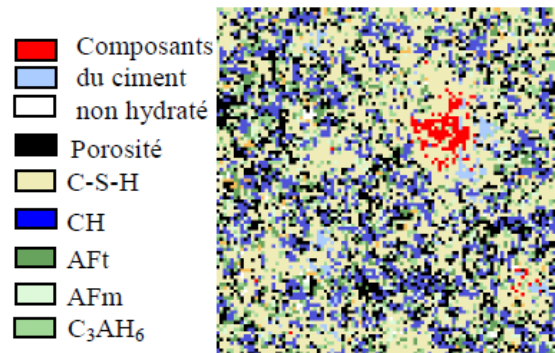


Figure II.3. Images 2D de la microstructure 3D de la pâte de ciment hydratée [KAM 07]

Pour la pâte de ciment hydratée, les caractéristiques mécaniques des différentes composantes ont été déterminées par [KAM 04] et sont résumées au tableau II.1.

Tableau II.1. Valeurs du module de Young et du coefficient de Poisson des principales phases prises en compte dans la modélisation [KAM 04]

Phases	E (GPa)	ν
C ₃ S	117,6	0,314
C ₂ S	117,6	0,314
C ₃ A	117,6	0,314
C ₄ AF	117,6	0,314
Gypse	45,7	0,33
Portlandite	42,3	0,324
C-S-H	22,4	0,25
C-S-H _{pouz}	22,3	0,25
AFm	42,3	0,324
Aft	22,4	0,25
Porosité	0	0

A l'échelle mesoscopique, il y a de nombreux travaux maintenant qui abordent ce type de modélisation pour les 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.

Sur ce dernier point, on peut trouver des modélisations avec des éléments de type (FE)² où :

- on procède à la résolution du calcul par Eléments Finis posé à l'échelle macroscopique afin d'en déduire l'état de contrainte macroscopique ;
- on effectue une boucle sur les points de Gauss pour l'échelle microscopique pour mener l'étape de localisation ; à partir de la connaissance de la contrainte macroscopique et de l'état d'endommagement du matériau s'il existe, on déduit la contrainte microscopique ;
- mener l'étape d'homogénéisation ; on calcule le comportement macroscopique du matériau homogène équivalent résultant du nouvel état de contrainte microscopique ;
- on peut procéder alors à un nouvel incrément de temps.

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 de thèse et qui fait suite à plusieurs travaux publiés précédemment : [KAM 04], [KAM 07], [KAM 09], [BER 12], [KEI 14], entre autres.

Depuis cette publication initiale [KAM 07], 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 [FU 17] [BER 18]. Ainsi, les avancées actuelles de la plateforme sont montrées à la figure II.4. Dans une telle approche, les données de sortie à une échelle sont considérées comme données d'entrée à l'échelle immédiatement supérieure.

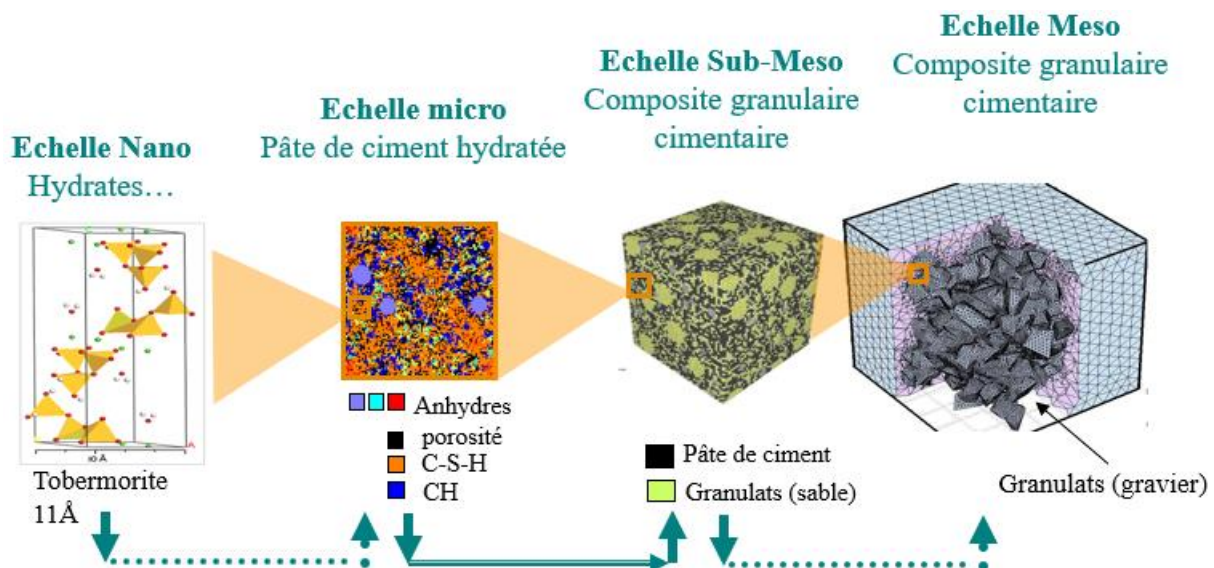


Figure II.4 Modélisation de type « hiérarchique » : création de VER à chaque échelle et simulation de différents tests

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 cette thèse aux graves routières, traitées avec un liant hydraulique (cimentaire) ou hydrocarboné (bitume).

II.2.3. Simulations numériques des matériaux cimentaires avec Abaqus

II.2.3.1. Présentation du progiciel Abaqus

« Abaqus » est un progiciel de calcul éléments finis développé par « Abaqus, Inc. », composé de différents produits. Il permet de simuler la réponse physique de matériaux solides soumis à des chargements mécaniques, des températures et autres conditions extérieures. Abaqus fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériaux. En 2005, Abaqus Inc. a été acquise par Dassault Systèmes et est devenue Simulia. Il se compose de trois produits : Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit et Abaqus/CAE. Abaqus/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite. Ce solveur peut être utilisé pour résoudre des problèmes linéaires et non-linéaires, avec des géométries 1D, 2D, 2D Axisymétrique et 3D. Il comprend de nombreuses procédures d'analyses dans le domaine temporel ou fréquentiel. Le solveur Abaqus/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes transitoires et dynamiques. Il peut être également utilisé pour des analyses quasi statiques fortement non-linéaires. Abaqus/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour ces solveurs.

II.2.3.2. Présentation de quelques stratégies de simulations numériques de matériaux cimentaires

Par rapport aux méthodes plus traditionnelles, la modélisation hétérogène présente des avantages indéniables, parmi lesquels :

- l'obtention de concentration et de distribution de contraintes dans chaque constituant du matériau hétérogène ;
- une compréhension des mécanismes locaux de déformation, ceux-ci n'étant pas gouvernés par des valeurs moyennes de contrainte ou de déformation ;
- une prédiction plus fine des propriétés générales des matériaux hétérogènes (ce genre de méthodes numériques est plus précis lorsque les propriétés des constituants sont très contrastées ou dans le cas de chargement complexe, multiaxial par exemple...) ;
- une possible prise en compte de modification dans la microstructure du matériau, consécutive par exemple à des réactions chimiques afin d'étudier les problèmes de durabilité du matériau cimentaire.

[KAM 09] a adopté une démarche de modélisation numérique qui a permis d'étudier le comportement mécanique d'un mortier à $E/C = 0,4$ sous traction et compression et ensuite sa durabilité vis-à-vis de la lixiviation par l'eau pure. Deux étapes constituent cette méthodologie :

- la représentation numérique en 3D du matériau étudié ;
- le calcul des propriétés mécaniques et de transfert du matériau sain ou altéré.

En se limitant aux échelles micro et méso, le mortier utilisé par [KAM 09] avait déjà été étudié expérimentalement auparavant par [KAM 99] et [BEL 01] afin de caractériser son comportement sous l'effet de sollicitation de compression, traction, flexion avant et après lixiviation par du nitrate d'ammonium. Ce mortier à base de ciment portland CEM I 42,5 a un rapport E/C égal à 0,4 et contient 414 kg/m³ de sable S1 (0,8-3,15) et 966 kg/m³ de sable S2

(0,16 - 0,2). L'idée donc était de confronter les résultats des simulations aux résultats expérimentaux. L'échelle de la microstructure (l'échelle des hydrates - quelques microns) est modélisée en utilisant le code CEMHYD3D développé par le NIST/USA [BEN 97]. Le matériau 3D généré dans l'étape précédente est ensuite repris par le logiciel ABAQUS. La génération de la microstructure de la pâte de ciment étudiée a donné les valeurs du tableau II.2.

Tableau II.2. Teneur en hydrates et porosité capillaire de la pâte de ciment hydratée d'après CEMHYD3D [KAM 09]

Porosité	CH	C-S-H	(C ₃ AH ₆ , AFm et AFt)
17 %	14,7 %	40,2 %	17,9 %

Les calculs mécaniques avec Abaqus pour la pâte de ciment ont été réalisés sur des cubes élémentaires de 50 µm de côté extraits des cubes obtenus par CEMHYD3D et des cubes de 5 mm de côté ont été utilisés pour le mortier. La représentativité du volume élémentaire est vérifiée en imposant différentes conditions aux limites (conditions homogènes en déplacements ou en forces en restant dans l'idée que 50 µm est une taille raisonnable pour les pâtes de ciment hydratées dont le rapport E/C est compris entre 0,2 et 0,5 et que la taille du VER de mortier est habituellement comprise entre 1 et 10 mm ([KAM 09] ; [SMI 05]). Les caractéristiques mécaniques utilisées dans la simulation numérique (module d'élasticité et coefficient de poisson) pour les différentes phases de la pâte de ciment sont celles données au tableau II.1, et ont été obtenues par test de micro indentation [KAM 04]. Entre autres phénomènes étudiés par [KAM 09], l'effet de la lixiviation sur le comportement mécanique du mortier (en traction, compression), a permis de tirer les conclusions suivantes :

- la dissolution de la portlandite entraîne une chute d'environ 32 % du module élastique (de 42 GPa à 29 GPa) et d'environ 40% de la résistance à la compression (de 63 MPa à 38 MPa) du mortier étudié ;
- le comportement post-pic paraît plus ductile après lixiviation de la portlandite.

[KEI 14] a mis en place un béton numérique à l'échelle mesoscopique, représentant explicitement les granulats noyés dans une matrice (mortier) avec prise en compte de l'auréole de transition (ITZ). Dans l'optique d'identifier le Volume Élémentaire Représentatif (VER), l'auteur a d'abord procédé à une optimisation du maillage (tableau II.3).

Tableau II.3. Influence du maillage sur le comportement en traction [KEI 14]

Taille approximative de l'élément	Numéro du maillage	Nombre d'éléments	Contrainte normale au pic (MPa)	Déformations au pic
1	1	11016	71,09	0,001838091
0,7	2	16416	68,68	0,0018378
0,6	3	38448	64,9	0,00170783
0,5	4	51408	62,74	0,001575733
0,4	5	83592	61,73	0,001575194
0,3	6	174528	62,03	0,001706176

Ainsi, les courbes contraintes déformations se regroupent en un même faisceau de courbes. On remarque très clairement que la contrainte maximale tend vers une limite, que l'on peut estimer atteinte dès le maillage 5 (taille de l'élément 0,4 ; 83592 éléments au total dans le modèle). Pour identifier la taille du (VER), l'auteur a considéré un milieu bi-phasique composé uniquement de la matrice et des granulats sans présence de l'ITZ avec donc une adhérence supposée parfaite

entre les deux phases. Les différents échantillons numériques ont été définis par le rapport entre la dimension du volume élémentaire et le diamètre des granulats (L/D) : 1,1 ; 2,2 ; 3,3 ; 5,5 ; 6,6 ; 7,7 ; 8,8 (figures II.5 et II.6). Chaque volume élémentaire défini par son rapport L/D a été testé en compression et en traction, l'analyse de la réponse du matériau, c'est à dire la courbe contrainte a permis d'identifier la taille du VER pour lequel les caractéristiques des courbes n'évoluent plus (module d'Young, résistance en compression et comportement adoucissant en compression ; module d'Young, résistance en traction et comportement adoucissant en traction). Les données d'entrée de la modélisation utilisées par [KEI 14] sont regroupées au tableau II.4.

Les conclusions tirées de l'analyse des courbes contrainte-déformation en compression sont les suivantes :

- pour étudier le module élastique du béton, le rapport $L/D = 1,1$ suffit ;
- pour étudier la résistance en compression du béton, le rapport $L/D = 2,2$ suffit ;
- Pour l'étude de la partie adoucissante du béton, les résultats montrent qu'il faut un rapport $L/D = 3,3$.

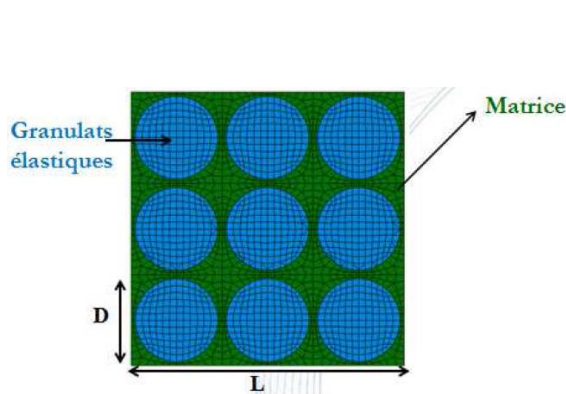


Figure II.5. Modèle bi-phasique utilisé pour la détermination du VER [KEI 14]

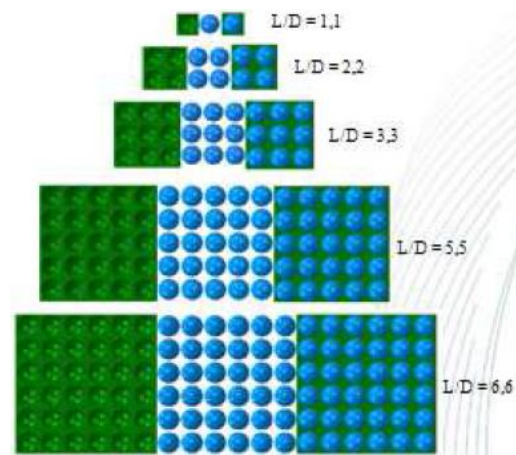


Figure II.6. Différents VER [KEI 14]

Tableau II.4. Données d'entrée de la modélisation, caractéristiques élastiques et résistance en compression [KEI 14]

Données d'entrée	Granulats	Matrice sans ITZ
ν	0,2	0,27
E (MPa)	80	45,65
Rc (MPa)	-	57,6

De la même manière, les conclusions des courbes contrainte-déformation en traction sont les suivantes :

- pour étudier la résistance en traction du béton, le rapport $L/D = 4,4$ suffit ;
- pour l'étude de la partie adoucissante du béton, les résultats montrent qu'il faut un rapport $L/D = 6,6$.

II.3. Modélisation des matériaux granulaires bitumineux

II.3.1. Définition et origine des bitumes

Les liants bitumineux, qui jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps. La substance, qui, additionnée de particules solides (granulats), développe au sein d'un mélange des forces de cohésion assurant une rigidité, une résistance à la déformation en traction, une résistance à la compression et une résistance au cisaillement est appelée liant bitumineux. En Amérique du Nord, le mot « asphalt » désigne le bitume, tandis que le mot « bitumen » désigne la fraction du bitume et du goudron soluble dans le tétrachlorure de carbone [NGU 08]. Le goudron ayant une constitution chimique également hydrocarbonée est obtenu à partir de la houille d'origine végétale. Les bitumes sont extraits des gisements naturels ou du pétrole. Le bitume se trouve dans les gisements sous forme de mélange avec des fines d'origine minérale. Le bitume pétrolier est obtenu par raffinage à partir des pétroles bruts. Il existe trois types de liants :

- les liants naturels, qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est la roche asphaltique présente dans le gisement et qui, après broyage, est dénommée asphalte ;
- les bitumes de raffinage, qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers ;
- les goudrons, qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air, de la lignite, de la tourbe et du bois.

Ayant des origines et des constitutions chimiques différentes, les bitumes et les goudrons sont des liants de base utilisés séparément ou en mélange dans la technique routière. Les bitumes purs, tels que produits, sont trop visqueux pour être manipulés et mélangés avec des granulats. Pour réduire leur viscosité, on procède généralement de deux manières :

- la mise en émulsion : cette opération vise à réaliser une dispersion fine de bitume dans l'eau à l'aide d'un émulsifiant et d'un appareil développant une énergie mécanique importante. Après rupture de cette émulsion au contact des granulats ou de la chaussée, le liant résiduel est très voisin du liant d'origine ;
- la fluidification : ce processus consiste à ajouter des diluants ou des produits appropriés provenant de la distillation du pétrole ou de la houille.

L'Association Française de Normalisation (AFNOR) distingue :

- les bitumes fluidifiés : bitumes mélangés avec un diluant plus ou moins volatil en vue d'abaisser leur viscosité ;
- les bitumes fluxés : bitumes ramollis par addition d'une huile de fluxage de faible volatilité ;
- les liants modifiés : mélanges de liants de base et de polymère. L'addition de polymère est destinée à modifier en particulier les propriétés rhéologiques des liants de base.

II.3.2. Caractéristiques générales des bitumes

Le bitume est un produit du raffinage du pétrole et constitue la fraction de distillation la plus lourde du pétrole brut. Il possède des propriétés d'une grande complexité à la fois sur le plan de sa composition chimique et de sa réponse aux sollicitations mécanique et thermique. A la température ambiante, il se présente sous la forme d'un fluide visqueux de couleur noire et il devient complètement liquide pour une température supérieure à +80 °C. Il est connu pour son fort pouvoir d'agglomération. Il est également utilisé pour ses propriétés d'adhésion à la majorité des matériaux usuels (pierre, béton, bois, métal). Quelquefois employé pour assurer l'étanchéité des bâtiments (thermique et acoustique), le bitume est majoritairement destiné aux applications routières puisque 90% de sa production est utilisé pour la construction de chaussées. Dans cette partie, nous présentons succinctement la composition des bitumes, les

méthodes d'obtention et les grandes familles de produits. Nous étudions ensuite plus en détails leurs propriétés mécaniques et les modèles permettant de décrire leur comportement sous chargement monotone.

II.3.3. Classification des bitumes

Afin de classer les différents bitumes, deux essais de caractérisation sont couramment pratiqués :

- la mesure de la pénétrabilité d'une aiguille dans un échantillon de bitume à +25 °C (EN-1426) ;
- la détermination de la température de ramollissement bille anneau (TBA) à laquelle une bille acier s'enfonce à travers un échantillon de bitume (EN-1427).

Pour un bitume pur, les résultats de ces essais permettent de définir le grade du bitume. Ainsi, pour un bitume 10/20, la pénétrabilité de l'aiguille est comprise entre 10 et 20 dixièmes de mm alors qu'elle est comprise entre 50 et 70 dixièmes de mm pour un bitume 50/70. La susceptibilité thermique des bitumes est définie par l'indice de pénétrabilité I_p (Equation II.2).

$$I_p = \frac{20-500d}{1+50d} \quad [\text{II.2}]$$

« d » est obtenu à partir des mesures de pénétrabilité à 25 °C et de la température de ramollissement bille anneau TBA en admettant qu'à cette température la pénétrabilité est de 8001/100 mm

$$d = \frac{\log(800) - \log(\text{pen})}{\text{TBA} - 25} \quad [\text{II.3}]$$

II.3.4. Comportement visco-élastique du bitume

Le bitume est un matériau viscoélastique c'est à dire que ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température. On considère qu'un enrobé bitumineux présente un domaine de sollicitation pour lequel son comportement est linéaire. Ceci nécessite d'appliquer des petites déformations dans les mesures du module des liants bitumineux. L'hypothèse d'un comportement viscoélastique linéaire des liants bitumineux suppose la validité du principe de superposition de Boltzmann. Ce principe suppose que la réponse d'un matériau à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations élémentaires. D'ailleurs, on trouve souvent, dans la littérature, l'application du principe d'équivalence temps-température pour ce comportement viscoélastique linéaire. La réponse en déformation des matériaux viscoélastiques sous une contrainte imposée dépend à la fois du temps et de la température. Le facteur de temps est fonction du taux de chargement, de l'amplitude et de la durée du chargement. La température dépend des propriétés thermiques du matériau. En viscoélasticité linéaire, la dépendance du temps et de la température du comportement peut se superposer et donc devenir essentiellement équivalente. Avec ces hypothèses, il existe plusieurs essais de caractérisation des liants bitumineux. Cependant, les essais conventionnels tels que la température de ramollissement ou la pénétrabilité ne permettent de déterminer les caractéristiques des bitumes que pour une température et un temps de charge donné. Afin de caractériser l'évolution du comportement du bitume de l'état liquide à l'état d'un solide viscoélastique, l'essai de mesure du module complexe est le plus approprié. Il permet de déterminer les caractéristiques intrinsèques du matériau (module et angle de phase) pour un grand nombre de couples température/fréquence. Si les liants bitumineux vérifient le principe d'équivalence temps/température, il est alors possible de connaître les propriétés du bitume

dans une large gamme de température et de fréquence par construction de sa courbe maîtresse. Les méthodologies détaillées de caractérisation temporelle et fréquentielle sont décrites dans la thèse de [NGU 08].

II.3.5. Propriétés rhéologiques du bitume

En modélisation par la méthode des éléments finis, le modèle de Maxwell peut être utilisé pour définir le comportement viscoélastique du bitume. Ce modèle viscoélastique linéaire est constitué par l'association en série d'un ressort de complaisance élastique J et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η .

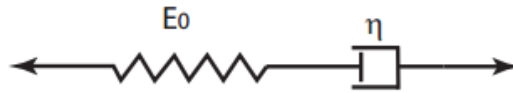


Figure II.7. Représentation schématique du modèle viscoélastique de Maxwell

Les équations II.4 et II.5 donnent respectivement la fonction de fluage et la fonction de relaxation de ce modèle.

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta} \quad \text{[II.4]}$$

$$R(t) = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{[II.5]}$$

avec E_0 module instantané et $\tau = \frac{\eta}{E}$, où τ est le temps de relaxation

Le module complexe du modèle Maxwell s'écrit comme suit :

$$E^*(w) = E_0 \frac{iw\tau}{1+iw\tau} = \frac{E_0 w^2 \eta^2 + iE_0^2 \omega \eta}{E_0^2 + \omega^2 \eta^2} \quad \text{[II.6]}$$

En général, le matériau liant bitumineux possède une fonction de relaxation beaucoup plus complexe qui ne peut pas s'exprimer par une seule courbe exponentielle. Un modèle mathématique comprenant des éléments Maxwell à différents temps de relaxation τ_i en série peut décrire plus exactement la relaxation de ce matériau.

II.3.6. Modèle Maxwell généralisé

Le modèle le plus simple pour représenter le comportement viscoélastique linéaire d'un matériau est le modèle de Maxwell généralisé en régime oscillatoire. Ce modèle est constitué par l'association en parallèle de n éléments de Maxwell. Chaque élément est défini par un module de rigidité E_i et par un coefficient de viscosité η_i (figure II.8).

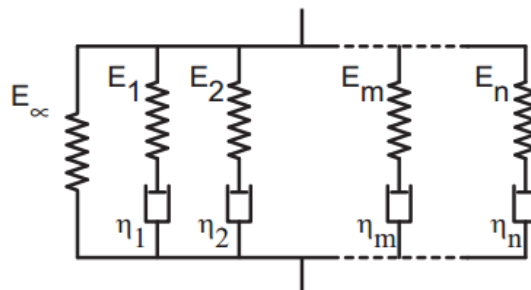


Figure II.8. Représentation schématique du modèle viscoélastique de Maxwell généralisé

Lors d'un essai de relaxation où l'on impose une déformation donnée, on mesure l'évolution de la contrainte. Le module $E(t)$ de relaxation est donné par la relation suivante :

$$R(t) = \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad [\text{II.7}]$$

Où $\tau_i = \eta_i/E_i$ représente le temps de relaxation

L'équation II.7 représente le comportement d'un matériau viscoélastique à l'état liquide. Un groupe d'éléments de Maxwell en parallèle représente un spectre discret de temps de relaxation, chaque temps τ_i étant associé à une rigidité spectrale E_i ($\tau_i = \eta_i/E_i$). Un ressort peut également être placé en parallèle au groupe de n éléments de Maxwell. Le module de relaxation de ce modèle s'écrit alors comme suit :

$$R(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad [\text{II.8}]$$

Avec $\tau_i = \eta_i/E_i$ représente le temps de relaxation élémentaire. On en déduit alors :

$$E_0 = R(t = 0) = E_\infty + \sum E_i \quad [\text{II.9}]$$

II.3.7. Les séries de Prony

Les propriétés mécaniques des matériaux viscoélastiques linéaires sont souvent déterminées à partir des essais sur des éprouvettes soumises à l'excitation transitoire ou sinusoïdale en régime permanent. Les séries de Prony dont le modèle rhéologique est composé des éléments de Maxwell en parallèle sont largement utilisées. Dans le cas des matériaux non vieillissants, l'expression générale du comportement viscoélastique linéaire isotherme s'écrit :

$$\sigma_t = \int_{-\infty}^t R(t-u) \dot{\epsilon}(u) du \quad [\text{II.10}]$$

Avec $R(t)$ et $\dot{\epsilon}(t)$ sont respectivement la fonction de relaxation et la vitesse de déformation

Dans le cas d'un modèle Maxwell généralisé, la fonction de relaxation $R(t)$ peut s'écrire :

$$R(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad [\text{II.11}]$$

On définit les termes adimensionnels des séries de Prony :

$$g_i = \frac{E_i}{E_0} \quad [\text{II.12}]$$

$$g_\infty = \frac{E_\infty}{E_0} = 1 - \sum g_i \quad [\text{II.13}]$$

Les séries de Prony en fonction de ces termes adimensionnels s'expriment comme suit :

$$g_R(t) = 1 - \sum g_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad [\text{II.14}]$$

II.3.8. Stratégies de simulation numérique des matériaux traités aux liants hydrocarbonés

Contrairement aux matériaux cimentaires, les travaux de modélisation multi-échelle sont moins répandus. Plusieurs auteurs se sont cependant intéressés à la modélisation des matériaux bitumineux : [NAR 17], [IOA 17], [AUG 15], [HAD 16], [WEI 16], [KEU 17], [BRA 17], [ŽEL 17], [LYT 90], [BUT 99], [EYA 16], [MET 99], [SHA 02], [KIM 04], [SHU 08], [DAI 11] et [TEH 12]. Nous en décrivons quelques et mettons l'accent sur les travaux de [TEH 12] dont la stratégie de modélisation a une certaine similitude avec celle effectuée dans cette thèse. [LYT 90] a proposé un modèle micromécanique dans lequel le béton bitumineux est traité comme un matériau composite à trois phases (agrégats d'asphalte, liant et bulles d'air).

[BUT 96] a évalué le potentiel de quatre modèles micromécanique bien connu pour prédire le module complexe de béton bitumineux. Ils mettent en évidence l'inefficacité actuelle des modèles micromécanique à considérer l'effet de verrouillage entre les agrégats. [SHU 08] a développé un modèle 3D en deux couches qui est basé sur un modèle 2D en deux couches. Ce dernier est a été présenté par [MET 99]. Ils ont construit leur modèle en intégrant le mastic d'asphalte dans un milieu équivalent au béton d'asphalte. Les agrégats et la distribution de bulles d'air ont été intégrés dans leur modèle. Ils ont constaté que le module complexe prédit était inférieur à la mesure expérimentale. Cette sous-estimation s'explique par un manque d'attention à l'effet de verrouillage entre les gros granulats, les effets de raidissement physico-chimique, et enfin par l'hypothèse de diminuer la surface totale des agrégats sphériques et d'augmenter en conséquence l'épaisseur du film autour des particules d'agrégats.

[HUU 07] et [HUU 08] ont proposé deux simulations numériques à trois dimensions de la résistance à l'effilochage de l'asphalte poreux à l'échelle mesoscopique. Ils ont également présenté une nouvelle approche à l'échelle mesoscopique sur la base de la méthode des éléments finis afin d'étudier l'état de contrainte à l'interface liant bitumineux agrégat et dans le mastic de l'enrobé poreux. Ces auteurs indiquent que l'amplitude de la contrainte dans le mastic du modèle 3D est d'environ 2,6 à 3,5 fois plus élevée que celle de la contrainte dans le modèle 2D. Leur conclusion indique que la rigidité du mélange de l'asphalte dépend de l'orientation de l'inclusion dans le mélange granulaire ; en outre, ils montrent que la rigidité des enrobés dans la direction de l'axe longitudinal du grain est supérieure à celle dans les directions des axes transversaux. [BAN 08] ont étudié le comportement mécanique d'un mélange à base d'asphalte sur des modèles issus des techniques de traitement d'images ; ils ont constaté que pour la même composition d'asphalte mélangée avec un arrangement global différent, les charges de rupture varient considérablement. Plus récemment, [DAI 11] a utilisé les rayons X et la tomographie optique pour capturer les images de la microstructure interne de béton bitumineux. Il a indiqué que l'étude micromécanique du module complexe et l'angle de phase un deux ou trois dimensions par la représentation des éléments finis, offre des résultats raisonnables. Les résultats obtenus avec la méthode des éléments finis à trois dimensions sont beaucoup plus proches des données des tests de laboratoire. En outre, l'effet des caractéristiques de surface des agrégats (forme, angularité et la texture) sur le comportement mécanique des bétons bitumineux à l'aide de rayons X et de la tomographie optique a été examiné par [MAS 05].

Dans sa thèse, [NGU 08] a fait une étude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique avec une analyse de l'essai de rupture sur un bitume viscoélastique pur de classe 50/70. Il a déterminé par un travail expérimental les propriétés thermo-rhéologiques (paramètres de la série de Prony, les constantes de la loi WLF, la courbe maitresse, entre autres). [TEH 12] a utilisé les propriétés du bitume de [NGU 08] et a mis en place une stratégie de modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis pour déterminer le module dynamique des enrobés poreux (matrice/inclusions). Le matériau considéré est modélisé comme un milieu bi-phasique 2D composé d'inclusions granulaires avec des propriétés élastiques linéaires et une matrice poreuse bitumineuse contenant un pourcentage donné de porosité (6 à 5%) présentant un comportement viscoélastique linéaire pour des valeurs de déformation faibles ($\epsilon_{\max} \leq 10^{-4}$) (figure II.9).

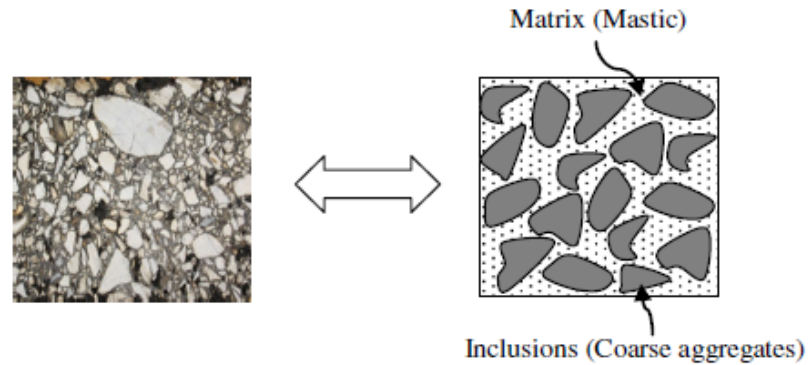


Figure II.9. Représentation du modèle bi-phasique du béton bitumineux avec 5-6% de porosité du mastic [TEH 12]

Pour ce modèle numérique hétérogène, un logiciel personnalisé appelé « MOA » (Random Object Modeler) a été développé pour générer aléatoirement des inclusions de différentes tailles avec des formes différentes afin d'en tirer le squelette granulaire respectant une courbe granulométrique donnée et des formes allant de sphérique à polyédrique en 3D à la gamme de circulaire à polygonale en 2D, et sont distribuées de façon aléatoire dans le volume défini par la matrice. Ce modèle est soumis à une charge cyclique à des fréquences données afin de déterminer l'angle de phase et le module complexe à comparer avec ceux de [DAI 11]. Les modèles bidimensionnel et tridimensionnel générés par le logiciel « MOA » sont donnés aux figures II.10 et II.11.

[TEH 12] a utilisé le modèle numérique 2D qui simplifie le problème et diminue le temps de calcul. Les dimensions du modèle représentatif sont fixées à 10 fois la dimension de la plus grande inclusion, ce qui donne des rectangles de dimensions (150*150) mm² pour le modèle bidimensionnel.

Les conditions aux limites du modèle sont décrites comme suit :

- sur la couche supérieure, le déplacement horizontal est nodal contraint ;
- sur la couche inférieure, à la fois les déplacements des nœuds verticaux et horizontaux sont limités (figure II.12).

Ces conditions représentent un état de liaison parfaite avec une plaque d'acier de la machine d'essai et la simulation est exécutée sous les conditions des contraintes planes.

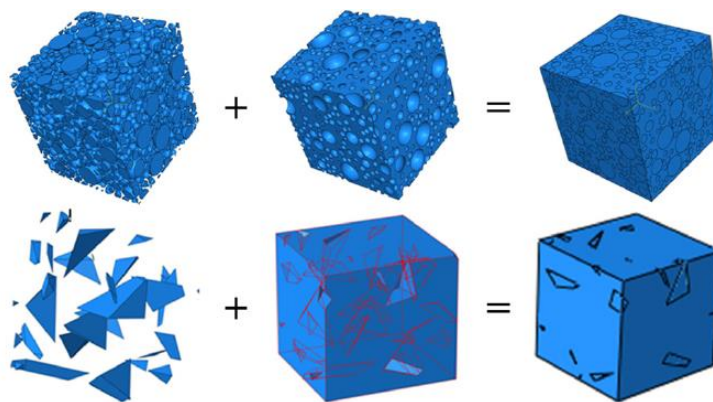


Figure II.10. Modèle tridimensionnel généré par MOA [TEH 12]

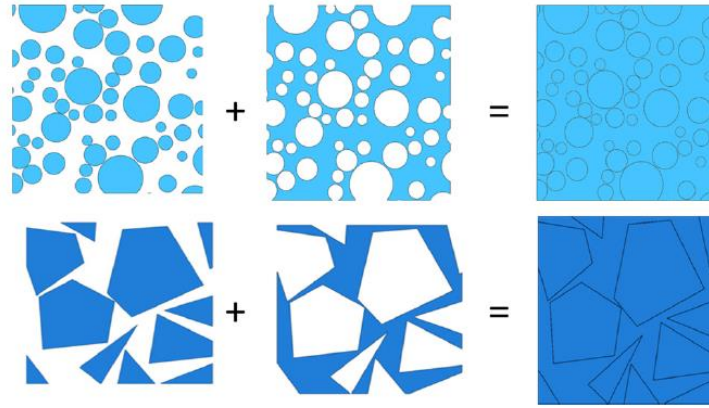


Figure II.11. Modèle bidimensionnel correspondant au modèle 3D généré par MOA [TEH 12]

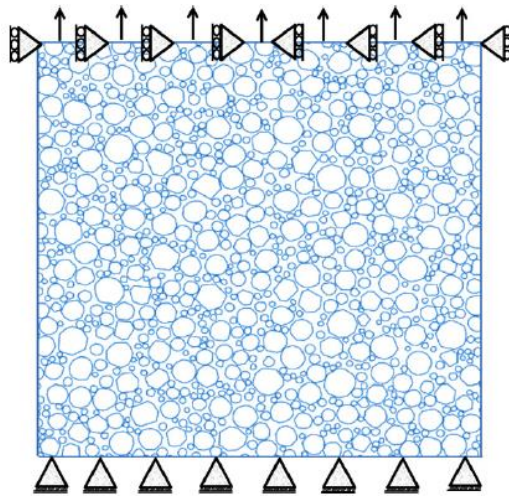


Figure II.12. Conditions aux limites du modèle bidimensionnel [TEH 12]

Les déplacements cycliques dans le sens vertical ont été imposés à la couche supérieure du modèle numérique, avec les fréquences suivantes : 0,1 Hz, 1 Hz, 5 Hz et 10 Hz. Sous Abaqus, le déplacement est imposé par une sous-routine qui appelle un fichier de données. Dans ce dernier, le déplacement sinusoïdal est discrétisé avec une étape assez proche du temps pour être sous la forme d'une charge sinusoïdale. Cinq chargements de déplacements cycliques (traction - compression) ont été imposées pour toutes les fréquences. L'amplitude est définie par rapport à la limite de contrainte dans le domaine viscoélastique linéaire ($\epsilon_{\max} = 10^{-4}$). Le temps global d'analyse est défini par le temps nécessaire pour imposer le pas de chargement cyclique. (Par exemple, pour 14 cycles à $f = 10$ Hz, le temps total est 1,4 s). Ensuite, pour capter la réponse de relaxation de mélange d'asphalte au début de la charge, un très faible temps d'étape doit être utilisé (de l'ordre de $1E^{-8}$ s). Par la suite, le nombre maximum d'itérations peut être réglé par l'utilisateur et qui représente le nombre maximum de points le long de la durée d'analyse totale. Quatre cents incréments pour chaque cycle ont été faits afin d'effectuer un calcul de haute précision. Enfin, pour équilibrer la différence de temps entre les étapes au début et à la fin du calcul, Abaqus augmente automatiquement le temps de l'étape allant de plus petit au maximum autorisé, défini par l'utilisateur. La force verticale est obtenue par post-traitement en additionnant les forces nodales sur la surface supérieure. Après cela, la contrainte axiale est calculée en divisant la force verticale par la section supérieure de la zone du modèle et la

déformation axiale est calculée en divisant le déplacement vertical de la surface supérieure de la première hauteur du modèle non déformé. Le module complexe « E » pour les matériaux viscoélastiques a été déterminé grâce à l'ensemble des équations qui suivent. Si σ_0 et ε_0 désignent les pics (maximum) de contrainte et de déformation, ils sont reliés au module complexe par l'équation :

$$\sigma_0 = E\varepsilon_0 = (E_1 + iE_2)\varepsilon_0 \quad [\text{II.15}]$$

Où :

E_1 et E_2 sont les parties réelle et imaginaire du module complexe E

La partie réelle E_1 est définie par :

$$E_1 = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right)\cos\delta \quad [\text{II.16}]$$

Avec :

δ est l'angle de phase

La partie imaginaire E_2 est définie par :

$$E_2 = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right)\sin\delta \quad [\text{II.17}]$$

Le module dynamique est défini comme la valeur absolue du module complexe :

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad [\text{II.18}]$$

Des équations (II.16, II.17 et II.18) on obtient :

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad [\text{II.19}]$$

Le module dynamique peut être calculé par :

$$|E^*| = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \right| \quad [\text{II.20}]$$

Où :

- $\sigma_{\max}$ et $\sigma_{\min}$ sont respectivement le maximum et le minimum de la contrainte axiale sur la partie supérieure du modèle ;
- $\varepsilon_{\max}$ et $\varepsilon_{\min}$ sont respectivement le maximum et le minimum de la déformation sur la partie supérieure du modèle.

[TEH 12] a également étudié l'influence de la densité du maillage sur le module dynamique du mélange. Quelle que soit la densité du maillage, le type d'élément utilisé dans l'opération de maillage est un élément à trois nœuds dans le plan. Pour les agrégats, la valeur du module de Young est égale à 60 GPa et coefficient de Poisson de 0,15. Pour une géométrie donnée, plusieurs tailles de maillages qui varient entre 10 mm et 0,3 mm, ont été générées pour identifier le fonctionnement optimal du maillage. La figure II.13 donne un exemple de maillage avec des tailles de 1 mm à 0,3 mm.

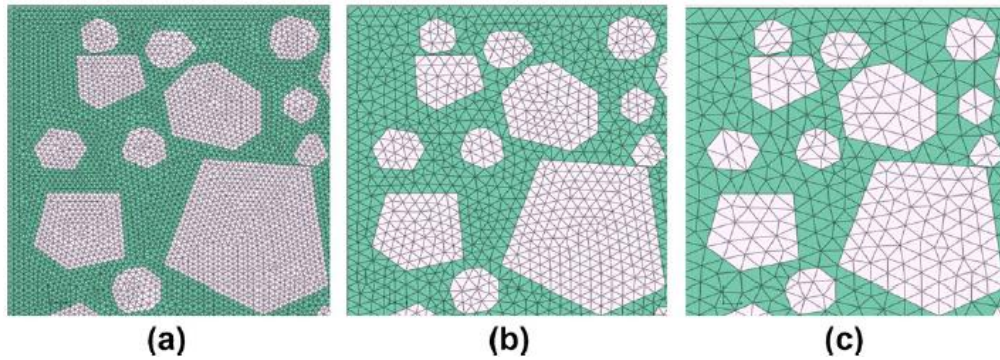


Figure II.13. Exemples de maillage avec des tailles de : 0,3 mm (a) ; 0,6 mm (b) ; 1 mm (c) [TEH 12]

Pour la fréquence de chargement égale à 10 Hz, l'influence de la densité du maillage sur le module dynamique est représentée à la figure II.14. Pour les résultats représentés sur cette figure, la géométrie du modèle est la même mais la taille de l'élément est variable. Lorsque la taille du maillage des éléments est égale à 10 mm, les agrégats ayant une dimension qui est inférieure à 10 mm ne peuvent pas être pris en compte. Par conséquent, pour l'opération de maillage, Abaqus affine automatiquement les tailles utilisées dans la discrétisation de ces agrégats. Sur la base de ces résultats, [TEH 12] observe que pour les éléments de taille inférieure à 0,5 mm, le maillage généré conduit à une situation d'équilibre en termes de valeurs de module complexe.

[TEH 12] conclut que la densité de maillage a un impact significatif sur les résultats numériques par la méthode des éléments finis. En outre, pour améliorer la précision des résultats, la valeur de 0,5 mm a été choisie pour mailler le modèle numérique mis en place. La forme des granulats joue naturellement un rôle sur le comportement du mélange granulaire noyé dans une matrice. Pour le béton bitumineux de [TEH 12], l'étude de l'influence de la forme des agrégats a été faite pour deux formes :

- une forme polygonale irrégulière ;
- une forme circulaire idéalisée.

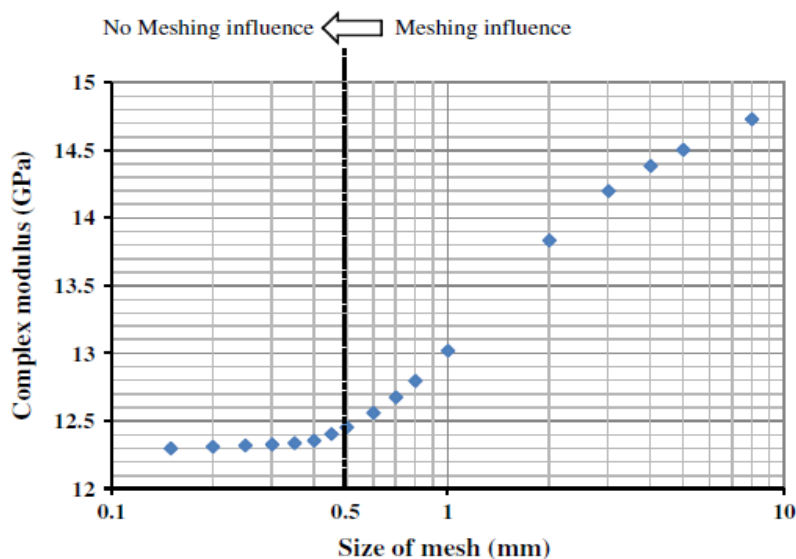


Figure II.14. Influence de la densité du maillage sur le module complexe pour une fréquence de 10 Hz [TEH 12]

Pour chaque catégorie, dix distributions aléatoires ont été générées et la moyenne du module complexe correspondant a été calculée. A la figure II.15, il est représenté la variation du module complexe en fonction de la fréquence pour les deux formes étudiées. La même tendance a été observée pour les résultats d'angle de phase. Selon [ABS 09], pour des modèles numériques contenant plus de 23 inclusions, les résultats obtenus en termes de module de Young sont homogènes, tandis que l'impact de la morphologie irrégulière devient insignifiant. [TEH 12] en a conclu que, à l'échelle mesoscopique, l'effet de la forme globale n'est pas significatif mais peut le devenir lorsqu'on se concentre sur les zones de couches minces existant entre agrégats (interface granulat-matrice).

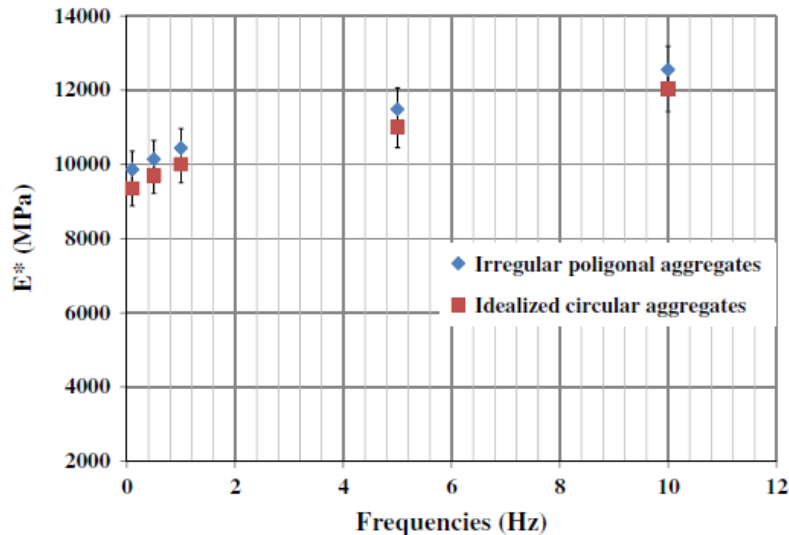


Figure II.14. Variation du module complexe en fonction de la fréquence pour les agrégats circulaires idéaux et ceux polygonaux irréguliers [TEH 12]

En résumé, les résultats provenant d'un certain nombre de générations aléatoires révèlent une valeur homogénéisée du module complexe, mais avec une distribution de contraintes marquée par la forme et la configuration des inclusions. La forme polygonale irrégulière a finalement été utilisée pour la simulation numérique de [TEH 12] puisqu'elle donne une meilleure distribution des contraintes dans le béton bitumineux. Pour valider son modèle numérique, [TEH 12] a effectué une application à un matériau déjà étudié par [DAI 11]. Dans le modèle généré, les valeurs des pourcentages en volume des agrégats, de la matrice et de la porosité dans l'échantillon sont respectivement : 40,78 % ; 54,86 % et 4,36 %. Des agrégats de calcaire ont été utilisés pour préparer les échantillons de mélange et un module de 55,5 GPa a été mesurée et utilisée à la fois pour une basse température (6 °C) et à différentes fréquences de chargement. La granulométrie des granulats a été indiquée dans le tableau II.5.

Tableau II.5. Pourcentage de passants des agrégats pour la détermination du module dynamique du béton bitumineux [TEH 12]

Taille tamis (mm)	Passants (%)
19	100
12,5	98,7
9,5	86,5
4,75	71,8
< 2,36	51,4

La simulation numérique est faite en supposant que le comportement global des agrégats est élastique linéaire (c'est-à-dire le module de Young = 55,5 GPa, le coefficient de Poisson = 0,15) et un comportement viscoélastique linéaire pour le sable. Un chargement de déplacement cyclique avec quatre fréquences différentes (0,1 Hz, 1 Hz, 5 Hz et 10 Hz) a été imposé sur la couche supérieure des échantillons numériques. Pour les fréquences de (0,1 ; 0,5 ; 1 Hz), sept cycles de déplacement de chargement ont été imposés et pour le reste des fréquences de chargement, 14 cycles ont été appliqués. La réponse contrainte-déformation des deux derniers cycles a été utilisée pour calculer le module dynamique des enrobés. Le chargement déplacement cyclique dans la direction « y » est appliqué sur la couche supérieure et respecte la condition d'une valeur de déformation égale à $\varepsilon = 1 \times 10^{-4}$. Les déplacements horizontaux et verticaux des nœuds à la couche inférieure ainsi que les déplacements horizontaux des nœuds sur la couche supérieure sont limités. Pendant la simulation, la déformation verticale est calculée en divisant le déplacement vertical de la couche supérieure par la hauteur initiale de l'échantillon non déformé. La force de réaction (RF) sur la couche supérieure est calculée en additionnant toutes les forces nodales. La contrainte axiale est alors obtenue en divisant la force de réaction totale de la coupe transversale de l'échantillon initial. La figure II.15 présente les courbes du module complexe et l'angle de phase du mélange d'asphalte à la fois avec et sans bulles d'air, obtenue par l'approche numérique proposé ainsi que les conclusions de [DAI 11]. [TEH 12] arrive à des résultats en accord avec ceux de [DAI 11] et constate par ailleurs qu'une différence moyenne inférieure à 9 % existe entre les résultats de simulation avec et sans bulles d'air.

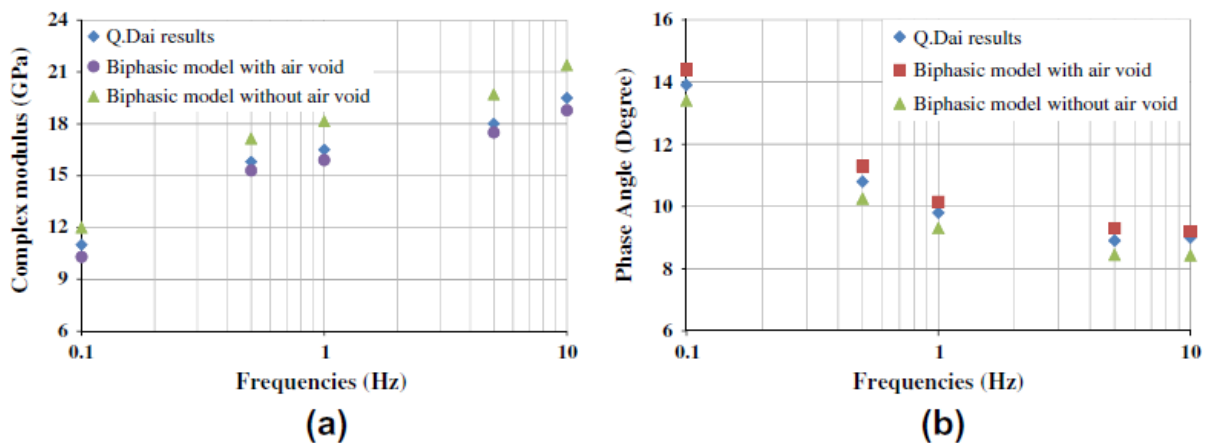


Figure II.15. Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux : (a) module complexe ; (b) angle de phase – béton bitumineux pour $T = 6^\circ\text{C}$ [TEH 12]

II.4. Conclusion

Les matériaux granulaires traités aux liants sont des matériaux composites hétérogènes composés d'un squelette granulaire de grande étendue (de quelques microns à plusieurs dizaines de millimètres) enrobé par une matrice poreuse.

Les stratégies de modélisation numérique des matériaux granulaires utilisées jusqu'ici pour ces matériaux peuvent se résumer en deux :

- un « matériau-modèle » 2D ou 3D créé dans Abaqus CAE (ou un autre logiciel de modélisation et de calcul éléments finis), et qui est soumis à des conditions aux limites représentant au mieux la nature des sollicitations et conditions d'appuis auxquelles est soumis le matériau réel ; la réponse de ce « matériau-modèle » permettra de prédire le comportement et/ou de déterminer les caractéristiques mécaniques recherchées ;

- la génération d'un modèle de matériau plus réel en 2D ou 3D, donnant une répartition aléatoire des grains dans la matrice poreuse (avec logiciel personnalisé), en respectant une courbe granulométrique et des formes données, représentant au mieux la nature du matériau réel à étudier ; le matériau généré dans l'étape précédente est ensuite repris par un logiciel de calcul éléments finis (Abaqus par exemple).

Chapitre III - Comportement mécanique de graves à base de MIDND traitées au ciment par une modélisation numérique 2D et 3D hiérarchique multi-échelle

III.1. Introduction

L'idée est déjà ancienne de relier la structure et les propriétés des matériaux cimentaires. A la fin du XIXème 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.

Il est développé ici une modélisation 3D dite « hiérarchique ». Elle consiste à représenter l'hétérogénéité de la grave routière traitée au ciment dans des volumes élémentaires représentatifs des différentes échelles d'études. 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. Une application est ensuite faite sur les graves traitées au ciment à base de Mâchefers d'Incinération des Déchets Non Dangereux en vue de déterminer les paramètres de comportement mécanique qui les caractérisent. Les MIDND en question sont ceux étudiés expérimentalement dans [BEC 07]. A l'échelle mesoscopique, les caractéristiques mécaniques de la grave routière traitée au ciment, habituellement déterminées par le biais d'expérimentations, ont été retrouvées. Une modélisation 2D sur le même matériau est ensuite faite. Elle a permis un raffinement du maillage et d'évacuer le problème de son influence sur les résultats obtenus en 3D. Enfin, une étude de sensibilité au module d'Young des particules de MIDND est faite pour voir comment ce dernier interfère sur les caractéristiques de comportement mécanique de la grave routière.

III.2. Procédure générale de modélisation

III.2.1. Construction des VER

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-échelle 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. Les VER sub-mesoscopique et mesoscopique sont respectivement des cubes de $(40*40*40)$ mm³ et $(100*100*100)$ mm³. Les résolutions respectives sont de 1 mm et 2,5 mm, ce qui donne pour chaque VER, 64000 éléments cubiques linéaires « voxels ».

Tableau III.1. Composition VER sub-mesoscopique

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

Tableau III.2. Composition VER mesoscopique

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

Avec Φ : diamètre moyen des granulats en mm

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 et régulier en nous arrangeant pour que les grains les plus petits ne fassent qu'un élément fini (un « voxel »). Cela nous a permis d'atteindre des fractions aussi grandes. En conservant une forme sphérique de l'ensemble des grains, il serait impossible d'atteindre des pourcentages granulaires si grands. Le problème de la connexion des plus petits éléments, formant ainsi un seuil de percolation d'une face à une autre, a été remédié en imposant un comportement fragile et donc une possible rupture de cette phase continue. La résistance de cette phase a été déterminée par une modélisation simplifiée (figures III.6 et III.7). Les figures III.1 et III.2 montrent les maillages obtenus aux deux échelles par la méthode du « Take and Place ». Les figures III.3 et III.4 montrent les images des VER dans Abaqus.

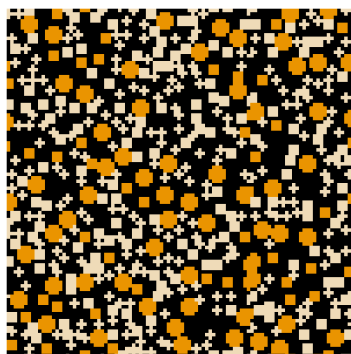


Figure III.1. Micro-grave-ciment générée avec la méthode du « Take and place »

- **Noir** : Pâte de ciment
- **Marron** : diamètre 5
- **Gris** : diamètre 3
- **Blanc** : diamètre 1

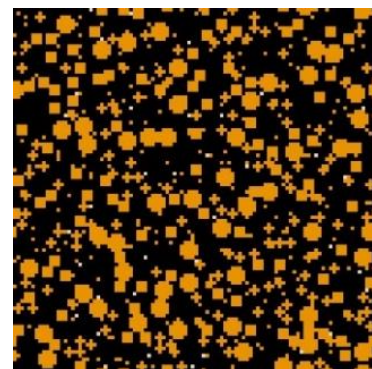


Figure III.2. Mesostructure 2D générée avec la méthode du « Take and place »

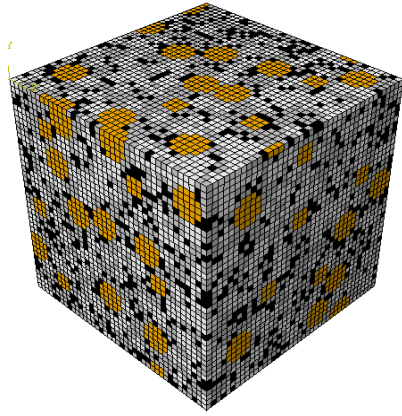


Figure III.3. VER 3D de μ GC dans Abaqus

- **Noir** : μ GC
- **Marron** : Granulats 7.5, 12.5, 17.5 et 22.5

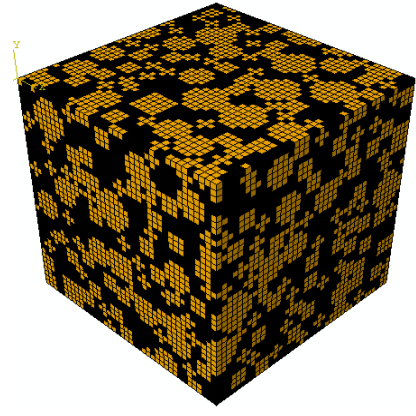


Figure III.4. VER 3D de GC dans Abaqus

III.2.2. Hypothèses sur le comportement des matériaux de la modélisation

III.2.2.1. La pâte de ciment

Le comportement post-pic de la pâte de ciment considérée est déterminé selon les résultats de [BER 12]. Il a utilisé un modèle de fissuration diffuse (concrete smeared cracking) avec le modèle d'Hillerborg décrit à la figure III.5 telle que :

- 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 .

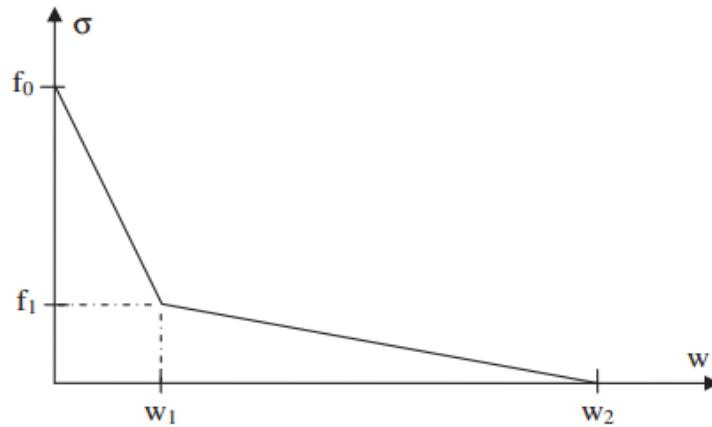


Figure III.5. Courbe bilinéaire de comportement post-pic de la pâte de ciment

Les caractéristiques de comportement post-pic de la pâte de ciment sont déterminées avec les équations III.1, III.2, III.3, III.4 et III.5 selon [BER 12].

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

$$f_0 = 1,6673 (1 - f_{\text{cap-p}})^{1,967} \quad (\text{en MPa}) \quad \text{[III.2]}$$

$$w_1 = 0,0661 f_{\text{cap-p}}^{-0,7565} \quad (\text{en } \mu\text{m}) \quad \text{[III.3]}$$

$$w_2 = 17,102 f_{\text{cap-p}}^{1,4863} \quad (\text{en } \mu\text{m}) \quad \text{[III.4]}$$

$$E = 35,931 (1 - f_{\text{cap-p}})^{1,6973} \quad (\text{en GPa}) \quad \text{[III.5]}$$

[BER 12] a étudié trois types de pâtes qui se différencient par leur porosité. Cette dernière est de (17,6% ; 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 [BER 12], ils viennent les caractéristiques mécaniques données au tableau III.4 caractérisant le comportement de la pâte de ciment dans la micro-grave-ciment.

Tableau III.3. Composition de la micro-grave-ciment

Eléments	Quantité (kg/m ³)
Ciment CEM I 42,5	94,66
Micro-Grave (0/6)	1498,8
Eau	347,1

Tableau III.4. 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

III.2.2.2. Les granulats

Les diamètres moyens des granulats considérés dans la modélisation sont :

- 1, 3, et 5 mm dans le VER sub-mesoscopique ;
- 7.5, 12.5, 17.5 et 22.5 mm dans le VER mesoscopique.

Les grains de diamètres 5 mm et plus sont non-connectés ; c'est-à-dire que dans les VER, ils sont enrobés par une matrice cimentaire composée par la pâte de ciment et les granulats les plus petits (1 et 3 mm). Nous avons donné à ces granulats de diamètres 5 mm et plus un comportement basé sur le modèle d'Hillerborg (montré à la figure III.5). Ce comportement est caractérisé par une énergie de fissuration égale à 100 N/m et une résistance à la traction de 8 MPa. Le module d'Young considéré pour les grains de diamètre 5 mm et plus, est dans un premier temps est 80 GPa comme celui des granulats calcaires classiques. Une étude de sensibilité à la valeur du module d'Young des granulats est faite par la suite. Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,3.

Etant donnée la quantité de grains, les particules les plus petites de diamètres 1 et 3 mm, à n'en pas douter, percolent d'une face à l'autre du VER sub-mesoscopique. Il faudrait alors calibrer les propriétés de rupture des granulats. Le modèle d'Hillerborg caractérisé par un comportement post-pic contrainte-déplacement linéaire associé à une technique de « kill element » (Brittle Failure dans Abaqus) est considéré. L'option « Brittle Failure » d'Abaqus permet de renseigner la valeur du déplacement maximal post-pic « u_{ck} » à partir de laquelle l'élément est supprimé. Cela permet de suivre la fissuration et de la visualiser sur le modèle. Sa définition dans un modèle permet aussi de faciliter la convergence lors du calcul. Pour ce faire, nous avons créé des modèles simplifiés (figures III.6 et III.7) permettant de déterminer le comportement des granulats « connectés » équivalent à des granulats « non-connectés » dans une grave routière traitée au ciment. Voici le raisonnement que nous avons tenu pour obtenir le déplacement limite « u_{ck} » à imposer :

- seuls les granulats de diamètre 1 et 3 mm sont connectés ;
- nous avons considéré que dans une direction nous avons un assemblage en série de granulats et de pâte de ciment ;
- dans une direction, les granulats 1 et 3 sont notés $G_{1,3}$ et leur pourcentage se calcule par :

$$\% G_{1,3} = \sqrt[3]{(\% G_{1,3,5} - \% G_5)} \quad [III.6]$$

Avec G_5 : granulats de diamètre 5 mm

- le reste sera la pâte, à savoir (on met de côté les granulats de diamètre 5) :
 $\% \text{ Pâte de ciment} = 100 - \% G_{1,3}$ [III.7]
- le module homogénéisé, E_{hom} , de l'assemblage (pâte+diamètre1+diamètre3) est donné par:

$$\frac{1}{E_{\text{hom}}} = \frac{\% G_{1,3}}{E_{\text{granulats}}} + \frac{\% \text{ Pâte}}{E_{\text{pâte}}} \quad [III.8]$$
- la résistance en traction de l'assemblage est la résistance du maillon le plus faible, c'est à dire: f_0 ;
- nous avons ensuite identifié la valeur du déplacement maximum post-pic « u_{ck} » sur les modèles simplifiés à chaque fois en compression biaxiale car la compression uniaxiale n'est qu'un cas particulier ;
- la fourchette de valeurs de u_{ck} varie entre 0,15 et 0,20 μm pour la compression uniaxiale et entre 0,20 et 0,35 μm pour la compression biaxiale ;
- en moyenne sur la micro-grave-ciment le rapport f_{b0}/f_b est de 1,08 ;
- nous avons enfin calculé la courbe contrainte-déformation en compression uniaxiale avec $u_{ck} = 0,20 \mu\text{m}$ et $u_{ck} = 0,35 \mu\text{m}$ en compression biaxiale.

Pour les trois degrés d'hydratation, les modules homogénéisés obtenus sont donnés au tableau III.5. Ces valeurs sont obtenues pour un module d'Young de 80 GPa.

Tableau III.5. Modules homogénéisés de la phase continue à différents degrés d'hydratation

α	E_{hom} (GPa)
0,83	27
0,64	14,1
0,27	1,274

Une énergie de fissuration égale à 100 N/m est considérée avec une résistance à la traction de 8 MPa. La résistance à la traction est estimée à partir de l'équation III.9. Le déplacement maximum post-pic (u_{ck}) est obtenu en fonction de l'énergie de fissuration G_f et de la résistance à la traction f_t (Equation III.10). Cette formulation est équivalente à celle du déplacement post-pic puisque l'énergie de fissuration est l'aire sous la contrainte post-pic. En faisant en première approximation l'hypothèse que cette courbe est linéaire décroissante, on trouve la valeur du déplacement maximum. Pour la compression uniaxiale, la valeur identifiée est de 0,2 μm . Ici aussi, la résistance obtenue est légèrement supérieure à celle obtenue avec le modèle « non connecté » mais la rupture se produit aussi dans la pâte à partir de cette valeur de 0,2 μm . Les courbes obtenues sont données à la figure III.8. Pour la compression biaxiale, la figure III.9 montre la courbe obtenue pour le modèle « granulats-connectés » avec $u_{ck} = 0,35 \mu\text{m}$, comparée à la courbe obtenue pour le modèle « granulats-non connectés ».

$$f_t = \frac{E}{10000} \quad [III.9]$$

$$u_{ck} = \frac{2G_f}{f_t} \quad [III.10]$$

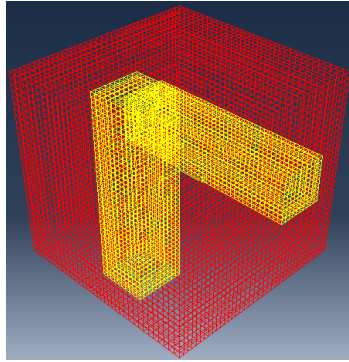


Figure III.6. Modèle à granulats connectés

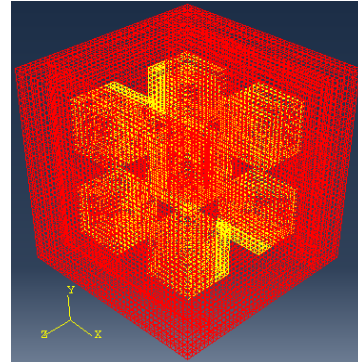


Figure III.7. Modèle à granulats non connectés

Les caractéristiques mécaniques des particules sont données au tableau III.6 et servent ainsi de paramètres d'entrée dans Abaqus.

Tableau III.6. Caractéristiques mécaniques et déplacement maximum post-pic des granulats 1 et 3 mm

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

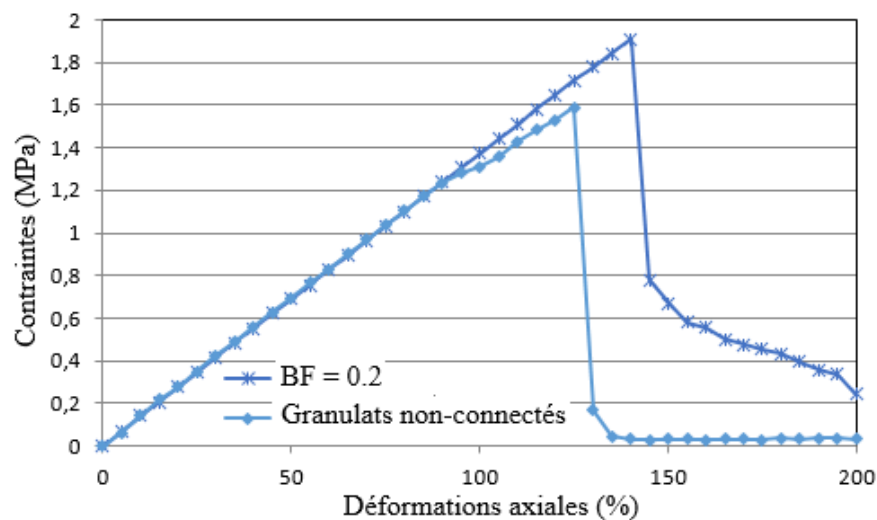


Figure III.8. Courbes contraintes-déformations en compression uniaxiale sur modèles simplifiés

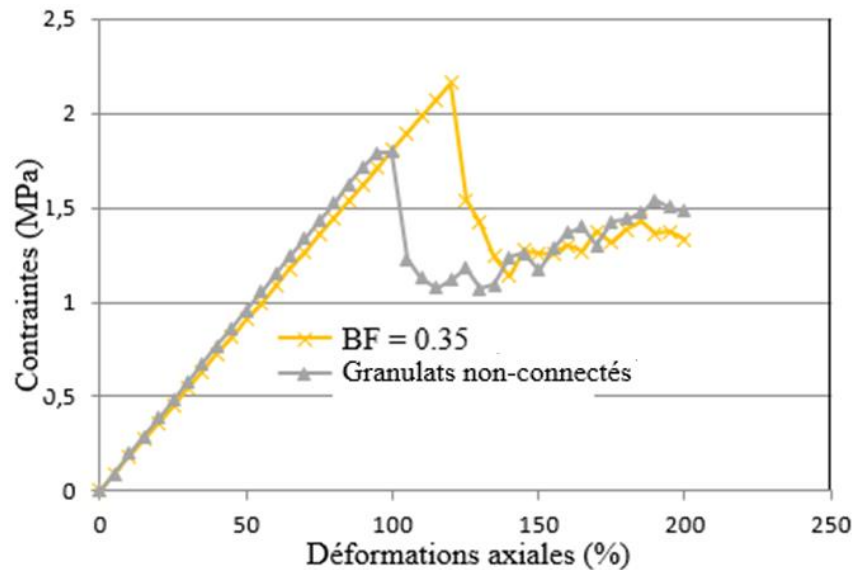


Figure III.9. Courbes contraintes-déformations en compression biaxiale sur modèles simplifiés

Dans l'étude ultérieure de sensibilité à la valeur du module d'Young, la détermination des propriétés des grains connectés est adaptée en suivant le même processus.

III.2.3. Stratégie de modélisation adoptée

A l'échelle mesoscopique, les granulats 6/25 sont enrobés par une matrice cimentaire, la micro-grave-ciment (μ GC) ; un modèle d'endommagement plastique (CDPM) est retenu pour la caractérisation de cette matrice.

Pour un matériau donné, les résultats de la compression uniaxiale et/ou de la traction uniaxiale suffisent pour déterminer le module d'élasticité et le coefficient de poisson dans la zone élastique. La non-linéarité d'un matériau cimentaire soumis à la compression peut, elle, être modélisée par des approches basées sur le concept de plasticité ou d'endommagement ou les deux [KEI 14]. La plasticité est définie comme la déformation irréversible après décharge alors que l'endommagement est caractérisé par la diminution du module d'élasticité, ou encore la diminution de la pente dans la phase de déchargement (figure III.10).

Le modèle d'endommagement plastique CDPM 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. Pour représenter le comportement inélastique du matériau, le CDPM utilise le concept d'endommagement isotrope en combinaison avec la traction isotrope et la plasticité de compression. Les principaux aspects du modèle, à savoir la variable d'endommagement, le seuil de plasticité, la loi d'écrouissage et d'adoucissement du matériau définie par la courbe contrainte-déformation uniaxiale en compression hors de la plage élastique, et la loi d'écoulement sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

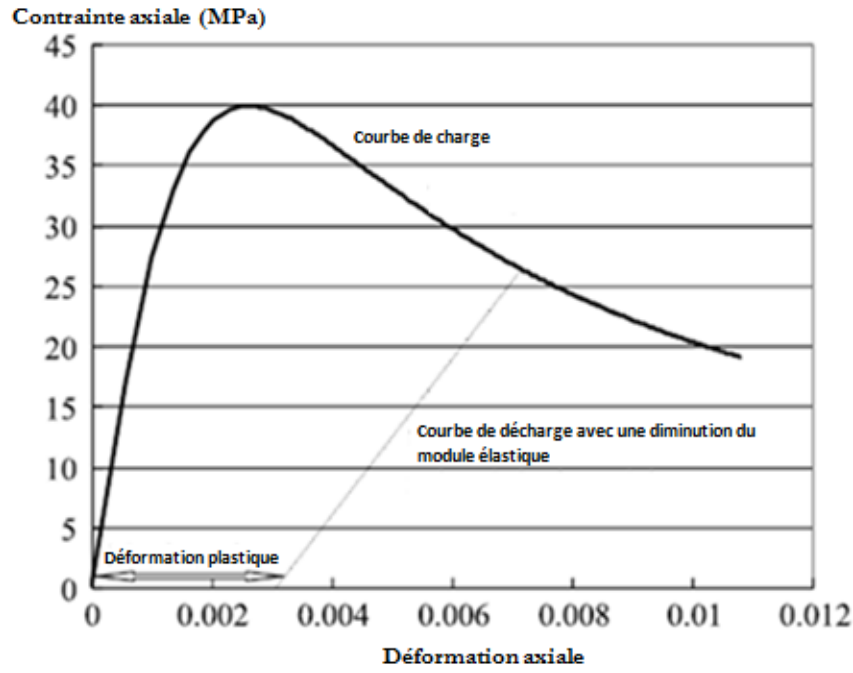


Figure III.10. Exemple de courbe contraintes-déformations d'un matériau cimentaire en compression uniaxiale [KEI 14]

Dans le CDPM, la relation contrainte-déformation utilise une variable d'endommagement scalaire :

$$\underline{\underline{\sigma}} = (1 - d)\underline{\underline{D}}^{el} : (\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}^{pl}) \quad [III.11]$$

Où $\underline{\underline{\sigma}}$ est le tenseur de contrainte, $\underline{\underline{\varepsilon}}$ et $\underline{\underline{\varepsilon}}^{pl}$ sont les tenseurs de déformations totale et plastique, $\underline{\underline{D}}^{el}$ est la matrice d'élasticité non endommagée et « d » est la variable d'endommagement qui caractérise la réduction du module d'élasticité.

Deux coefficients d_t et d_c sont définis pour représenter respectivement l'endommagement en traction et en compression. Quand le matériau cimentaire est soumis à la compression uniaxiale, l'équation III.11 devient :

$$\sigma_u = (1 - d)E * (\varepsilon_u - \varepsilon_p) \quad [III.12]$$

Dans cette relation, σ_u et ε_u sont la contrainte et la déformation du matériau dans la direction du chargement, ε_p est la déformation permanente dans la direction de chargement, et enfin E est le module d'élasticité initial du matériau cimentaire. Le facteur $(1 - d)$ représente le rapport entre la section efficace supportant la charge (section endommagée) et la section totale.

On définit la contrainte effective comme :

$$\bar{\sigma}_u = \frac{\sigma_u}{1-d} \quad [III.13]$$

Le premier invariant du tenseur des contraintes effectives $\bar{I}_1$ et le second invariant $\bar{J}_1$ sont donnés par les expressions suivantes :

$$\bar{I}_1 = \bar{\sigma}_{ii} \quad [III.14]$$

$$\bar{J}_2 = \frac{1}{2} \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \quad [\text{III.15}]$$

Où $\bar{S}_{ij}$ est le tenseur effectif des contraintes déviatoriques

Pour déterminer le coefficient d'endommagement d , il serait nécessaire de procéder à des essais cycliques pour chaque matériau considéré. Dans ce travail, pour simplifier la modélisation, la loi d'endommagement que nous utilisons est de la forme suivante :

$$d_{c,t} = 1 - \frac{\sigma_{c,t}}{f_{c,tm}} \text{ si } \sigma_{c,t} > f_{c,tm} \text{ et si } \dot{\sigma}_{c,t} > 0 \quad [\text{III.16}]$$

A préciser que :

- $d_{c,t} = 0$ si $\sigma_{c,t} < f_{c,tm}$
- Si $\dot{\sigma}_{c,t} < 0$, alors $d_{c,t}$ est égal à la valeur maximal historiquement obtenue.

$\sigma_{c,t}$ est la contrainte axiale du matériau sur la branche descendante de la courbe contrainte déformation et $f_{c,tm}$ la résistance au pic.

La surface de charge adoptée dans notre modélisation est celle proposée par [LUB 89] et [LEE 98]. Elle est de la forme suivante :

$$F = \frac{1}{1-B} (\sqrt{3}J_2 - BI_1 + C(\varepsilon_p) \langle -\sigma_{\min} \rangle - D \langle -\sigma_{\min} \rangle) - \sigma_c(\varepsilon_{pc}) \quad [\text{III.17}]$$

Avec :

$$B = \frac{f_{bo}/f_b - 1}{2f_{bo}/f_b - 1} ; \quad 0 \leq B \leq 0,5$$

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

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

Où :

$\sigma_{\min}$ est la contrainte principale minimale effective ; f_{bo} est la résistance du matériau sous une compression équi-biaxiale ; f_b la résistance du matériau sous compression uniaxiale ; σ_c et σ_t sont respectivement les contraintes cohésives de compression et de traction ; ε_{pc} et ε_{pt} sont respectivement les déformations plastiques équivalentes en compression et en traction ; K définit le degré de déformabilité du matériau. On notera que dans l'espace des contraintes de traction, cette surface de charge se confond avec le critère de Rankine.

L'utilisation du CDPM dans Abaqus/Explicit nécessite la définition des courbes contraintes-déformations en compression uniaxiale et en traction uniaxiale des matériaux. Sous compression uniaxiale, la fonction d'écrouissage et d'adoucissement peut être définie dans le CDPM par :

$$\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_{pc}) \quad [\text{III.18}]$$

Pour notre étude, les courbes contraintes-déformations sont celles obtenues dans les simulations de la micro-grave-ciment en compression uniaxiale et en traction uniaxiale. La loi d'écoulement proposée par Drucker-Prager dans sa forme hyperbolique a été utilisée dans notre modélisation. Le potentiel d'écoulement non associé est défini par la fonction suivante :

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{to} \tan \psi)^2 + 3 \bar{J}_2^2} - \frac{\bar{I}_1}{3} \tan \psi \quad [\text{III.19}]$$

La vitesse de déformation plastique est :

$$d\epsilon_p = \lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_u} \quad [\text{III.20}]$$

Avec :

- ψ : l'angle de dilatance ;
- σ_{to} : contrainte de traction uniaxiale à la rupture noté f_t dans ce travail ;
- ϵ : un paramètre appelé *excentricité*, qui définit la vitesse à laquelle la fonction se rapproche de l'asymptote (le potentiel d'écoulement tend vers une ligne droite quand l'excentricité tend vers zéro).

Les paramètres que requiert le CDPM peuvent être déterminés 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 stratégie de modélisation adoptée est décrite à la figure III.11. On notera que cette stratégie repose sur la mise en place de simulations de tests multiaxiaux, qui sont très peu développées dans la littérature internationale et qui représentent donc une originalité notable de ce travail.

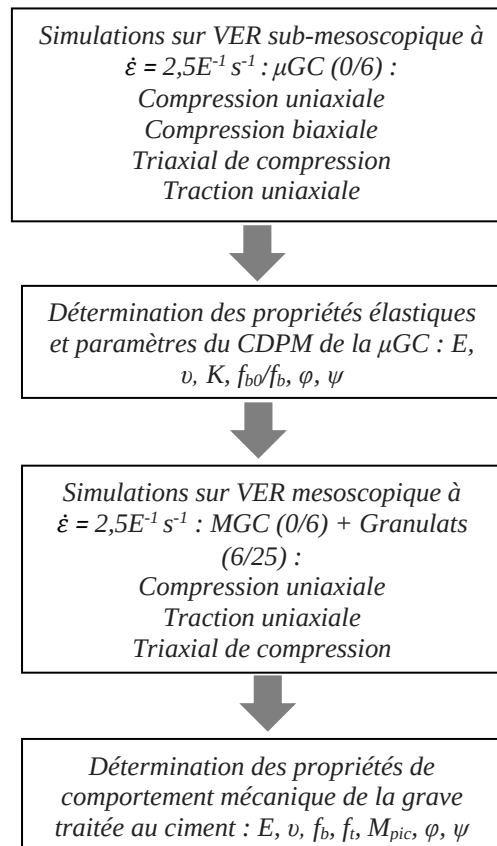


Figure III.11. Stratégie de modélisation multi-échelle hiérarchique développée

Avec :

E : module d'Young

ν : coefficient de Poisson

K : paramètre du CDPM caractérisant sa déformabilité

f_{b0}/f_b : rapport entre compression biaxiale et uniaxiale

ϕ : angle de frottement interne

ψ : angle de dilatance

M_{pic} : rapport en le déviateur au pic de contraintes et la contrainte moyenne

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.

Les figures III.12, III.13, III.14, et III.15 montrent les conditions aux limites relatives aux différents essais simulés.

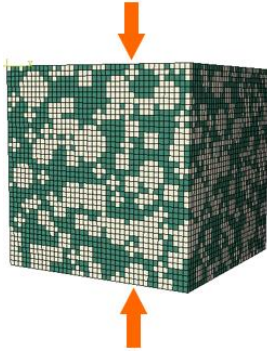


Figure III.12. Conditions aux limites de la compression uniaxiale

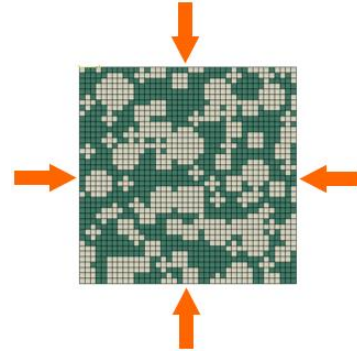


Figure III.13. Conditions aux limites de la compression biaxiale

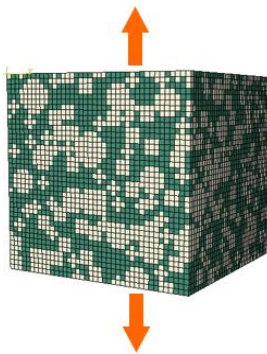


Figure III.14. Conditions aux limites de la traction

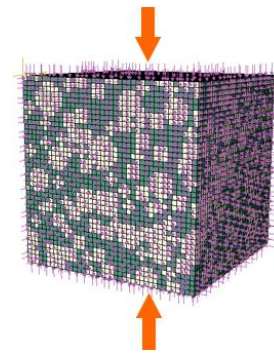


Figure III.15. Conditions aux limites du triaxial

Les équations III.21, III.22 et III.23 décrivent les paramètres mécaniques déterminés avec les courbes de déformations volumiques.

$$\Psi = \arcsin \left(\frac{\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}}{2 + d\varepsilon_v/d\varepsilon_1} \right) \quad [III.21]$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} - 1 \right) \quad [\text{III.22}]$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{3M}{M+6} \right) \quad [\text{III.23}]$$

M : rapport des contraintes déviatoriques (q) et de la contrainte moyenne (p)

Sur le même VER, le coefficient de Poisson obtenu avec l'équation 2 dans un triaxial de compression, doit concorder avec celui obtenu avec la compression uniaxiale ou la traction uniaxiale (Equation III.24) :

$$\frac{\Delta_{AT}}{A_T} = -\nu \frac{\Delta_L}{L} \quad [\text{III.24}]$$

Avec : Δ_{AL} : déformation transversale ; A_L : arête longitudinale ; Δ_{AT} : déformation transversale ; A_T : arête transversale.

La définition du CDPM nécessite la détermination d'un paramètre K compris entre 0 et 1 et dont la valeur par défaut est de 0,666 dans la documentation d'Abaqus. K définit le degré de déformabilité du matériau. On notera que dans l'espace des contraintes de traction, cette surface de charge se confond avec le critère de Rankine. Il peut se déterminer en fonction de l'angle de frottement φ et du paramètre α [JAV 13]. Le coefficient α est tel que :

$$f_b/f_{b0} = \frac{1-\alpha}{1-2\alpha} \quad [\text{III.25}]$$

L'équation III.25 donne :

$$\alpha = \frac{1-A}{-2A+1} \quad [\text{III.26}]$$

Avec :

$A = f_{b0}/f_b$: rapport entre résistance en compression biaxiale et compression uniaxiale

D'après [JAV 13], on peut aussi montrer que :

$$\alpha = \frac{K(3+\sin\varphi) + (\sin\varphi - 3)}{K(6-2\sin\varphi) + (\sin\varphi - 3)} \quad [\text{III.27}]$$

Cette dernière relation conduit à exprimer K en fonction de α :

$$K = \frac{(1-\alpha)(\sin\varphi - 3)}{2\alpha(3 - \sin\varphi) - (\sin\varphi + 3)} \quad [\text{III.28}]$$

III.3. Application aux graves routières à base de MIDND

III.3.1. Valorisation des MIDND en techniques routières

Suite à une expansion démographique importante et une consommation sans cesse croissante des populations, les autorités publiques et notamment les villes, se trouvent confrontées à des problèmes d'urbanisation aigus, qui poussent à revoir les politiques de gestion des déchets. La gestion des déchets est un enjeu majeur qui s'inscrit durablement dans les politiques publiques de tous les pays du monde. Dans un cadre de recyclage et de développement durable, les Mâchefers d'Incineration des Déchets Non Dangereux (MIDND) peuvent représenter un gisement de substitution de granulats classiques stratégiques 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 mâchefers répondant aux exigences de la réglementation en vigueur [ARR 11] peuvent être valorisés en techniques routières [HUN 11]. La connaissance de leur

comportement mécanique s'avère indispensable pour une utilisation rationnelle. [BEC 07] et [HUN 11] ont travaillé expérimentalement sur les graves à base de mâchefers. La figure III.16 montre les mâchefers d'incinération étudiés expérimentalement dans [BEC 07].

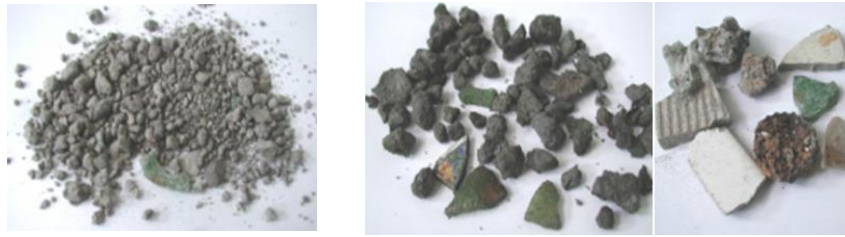


Figure III.16. Granulats de MIDND de [BEC 07]

La figure III.17 montre la répartition granulométrique des mâchefers étudiés dans la modélisation, elle émane de [APP 04].

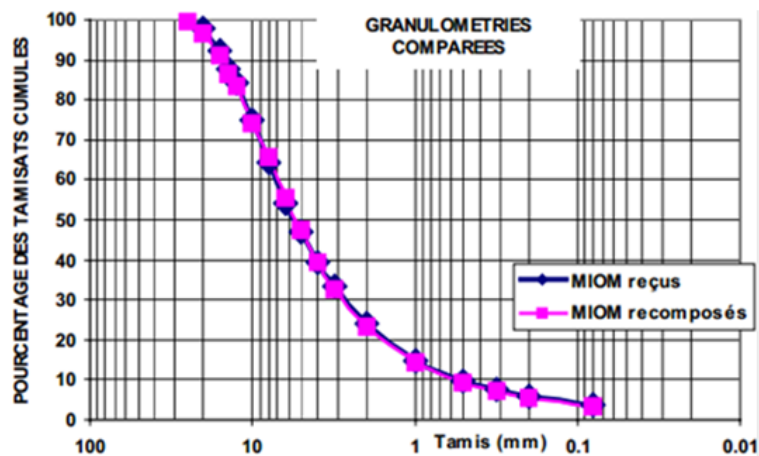


Figure III.17. Granulométrie des MIDND considérée dans la modélisation [APP 04]

III.3.2. Résultats de la modélisation pour un module d'Young égal à 80 GPa

Aussi bien à l'échelle sub-mesoscopique qu'à l'échelle mesoscopique, les simulations sont effectuées en conditions quasi-statiques avec à une vitesse de chargement de $2,5E^{-6} s^{-1}$. Elles ont permis de tracer les différentes courbes de comportement. L'exploitation de ces courbes a permis l'obtention des paramètres du CDPM caractérisant la micro-grave-ciment ainsi que les caractéristiques mécaniques de la grave-ciment habituellement déterminées par le biais d'expérimentations.

III.3.2.1. Echelle sub-mesoscopique

Les paramètres du CDPM caractérisant la micro-grave-ciment (μGC) sont regroupés dans le tableau III.7. Ils serviront à alimenter la modélisation mesoscopique dans laquelle les gros granulats sont noyés dans une matrice cimentaire qui n'est autre que la micro-grave-ciment. Le tableau III.8 regroupe les résistances au pic ainsi que les modules d'Young caractérisant la micro-grave-ciment à différents degrés d'hydratation de la pâte de ciment.

Tableau III.7. Paramètres du CDPM pour la μ GC à différents degrés d'hydratation (α) de la pâte de ciment

Domaines				Elastique		CDPM					
Paramètres				E (GPa)	ν	K	f _{b0} /f _b	B	φ(°)	ψ (°)	M _{pic}
α	0,83	p' en KPa	50	25,29	0,21	0,619	1,075	0,065	56,24	26	2,30
			100		0,21						
			150		0,21						
	0,64		50	15,13	0,21	0,619	1,081	0,070	46,90	16	1,93
			100		0,20						
			150		0,20						
	0,27		50	1,40	0,18	0,619	1,189	0,137	13,34	8	0,50
			100		0,18						
			150		0,17						

Tableau III.8. Résistances au pic et modules de Young de la μ GC pour différents degrés d'hydratation (α)

Simulations effectuées		Triaxial de compression			Compression uniaxiale	Compression biaxiale	Traction uniaxiale
		50 KPa	100 KPa	150 KPa			
α	0,83	E (GPa)	24,052	22,866	21,679	25,289	25,281
		R_{pic} (MPa)	4,72	4,87	5,41	3,95	0,14
	0,64	E (GPa)	13,862	12,676	11,489	15,126	15,115
		R_{pic} (MPa)	2,39	2,71	2,89	2,00	0,079
	0,27	E (GPa)	1,647	1,459	1,137	1,401	1,289
		R_{pic} (MPa)	0,31	0,41	0,49	0,13	0,004

A partir de ces résultats, on remarquera que la plupart des paramètres peuvent s'exprimer sous la forme de fonctions puissance de $(1 - f_{cap})$ où f_{cap} est la porosité capillaire, à l'image des formules historiques de Ferêt et Bolomey. f_{cap} traduit ainsi le degré d'hydratation de la pâte de ciment.

Ces relations sont données aux équations III.29 à III.37.

Déviateur de contraintes au pic :

$$q_{pic} = 25,111(1 - f_{cap})^{1,3523} \text{ (en MPa)} \quad [III.29]$$

Résistance en compression biaxiale :

$$R_{c2} = 39,133(1 - f_{cap})^{1,7994} \text{ (en MPa)} \quad [III.30]$$

Résistance en compression uniaxiale :

$$R_{c1} = 38,415(1 - f_{cap})^{1,8578} \text{ (en MPa)} \quad [III.31]$$

Résistance en traction :

$$R_t = 1,633(1 - f_{cap})^{1,9232} \text{ (en MPa)} \quad [III.32]$$

Module d'Young :

$$E = 188,3(1 - f_{cap})^{1,5949} \text{ (en GPa)} \quad [III.33]$$

Coefficient de Poisson en compression uniaxiale :

$$\nu_{c1} = 0,4048(1 - f_{cap})^2 - 0,0474(1 - f_{cap}) + 0,1863 \quad [III.34]$$

Coefficient de Poisson en triaxial de compression :

$$\nu_{c3} = 0,2504(1 - f_{cap})^2 - 0,0267(1 - f_{cap}) + 0,1827 \quad [III.35]$$

Paramètre K :

$$K = 0,3925(1 - f_{cap})^{-0,293} \quad [III.36]$$

Rapport f_{b0}/f_b :

$$f_{b0}/f_b = 0,9929(1 - f_{cap})^{-0,058}$$

[III.37]

Les courbes de comportement à partir desquels les paramètres du CDPM et les relations des équations III.29 à III.37 sont données dans les figures III.18 à III.28.

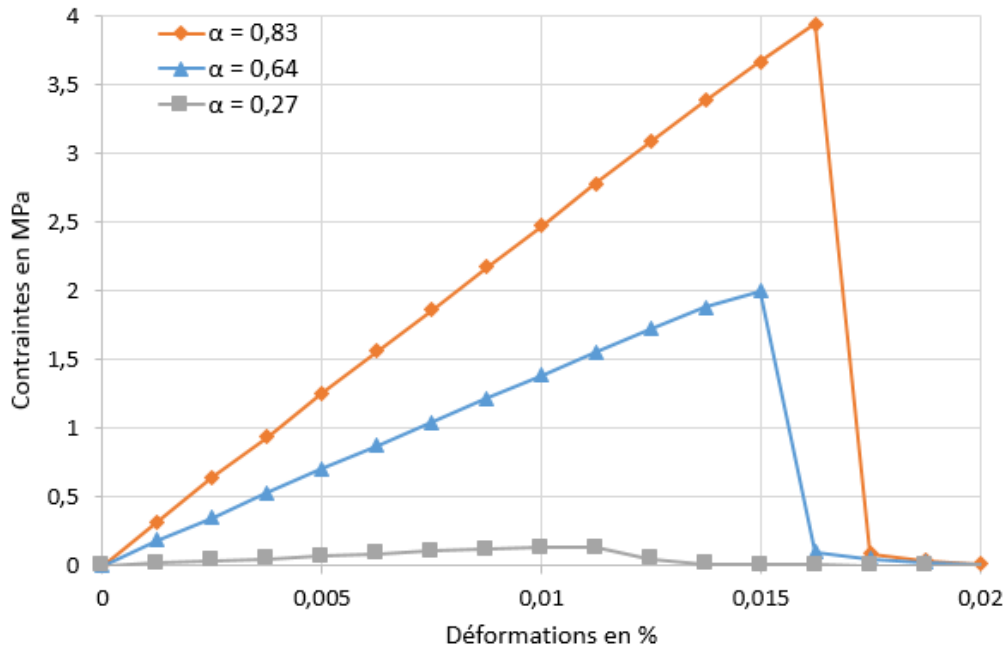


Figure III.18. Contraintes-déformations en compression uniaxiale de la μGC

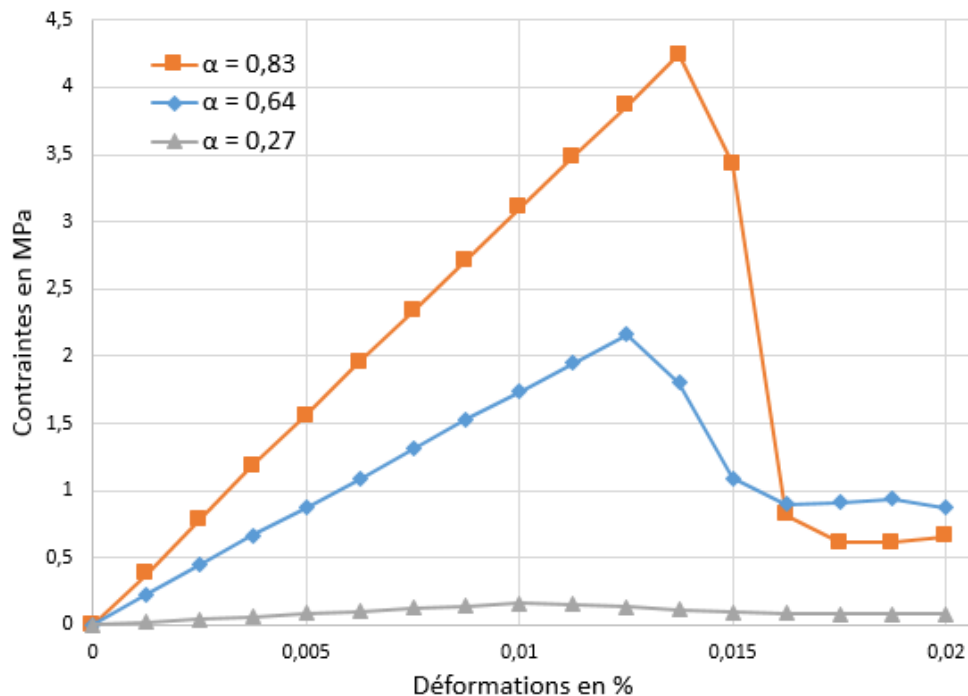


Figure III.19. Contraintes-déformations en compression biaxiale de la μGC

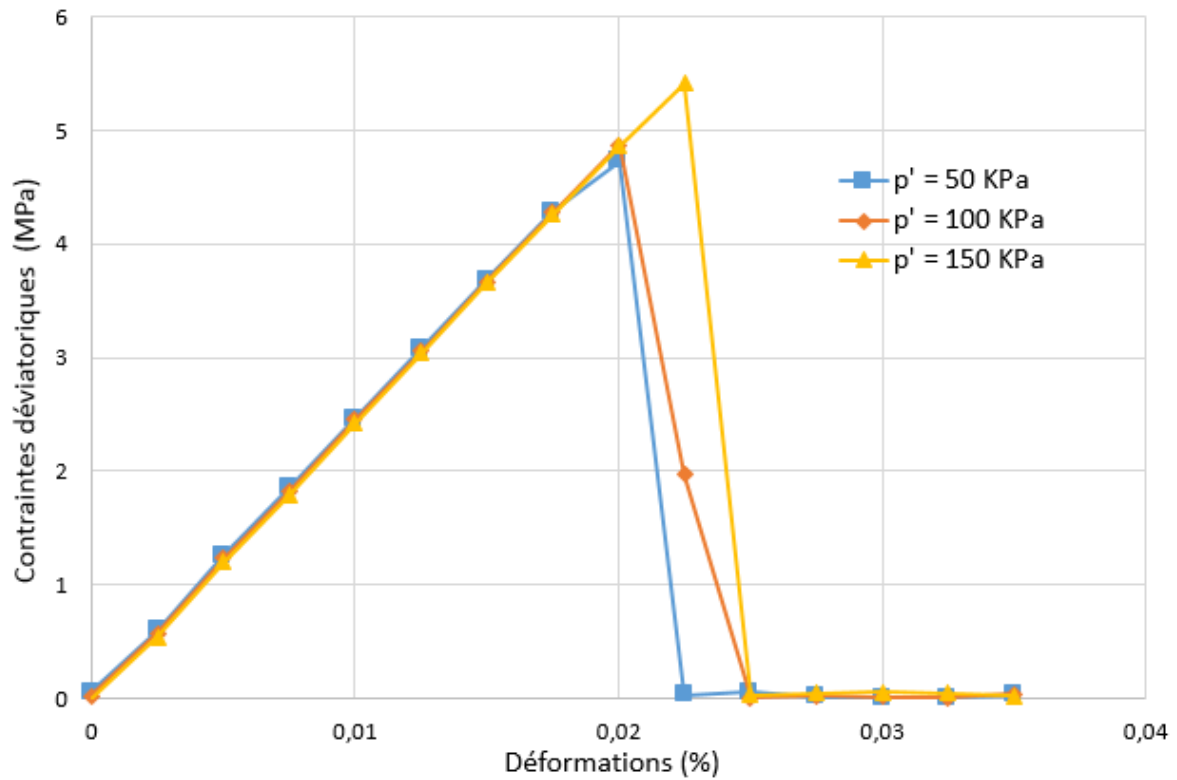


Figure III.20. Contraintes déviatoriques-déformations de la μ GC pour $\alpha = 0,83$

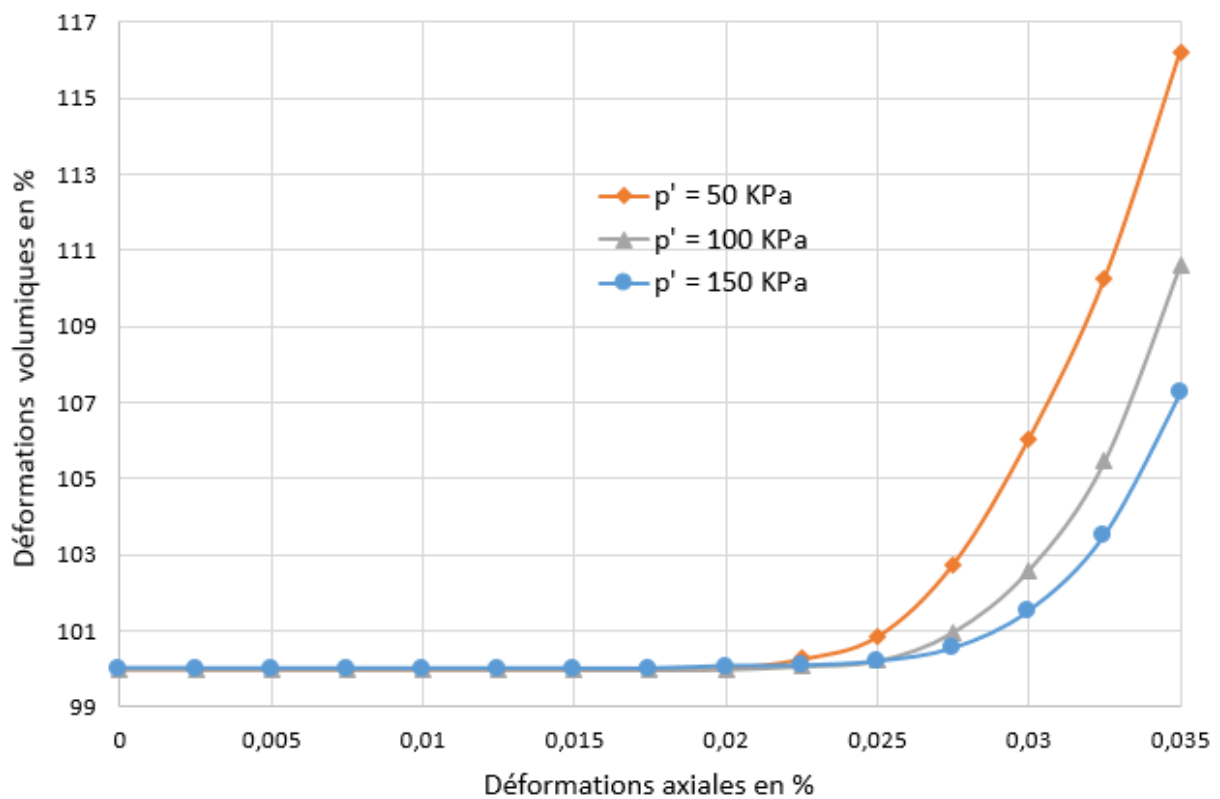


Figure III.21. Courbes de déformations volumiques de la μ GC pour $\alpha = 0,83$

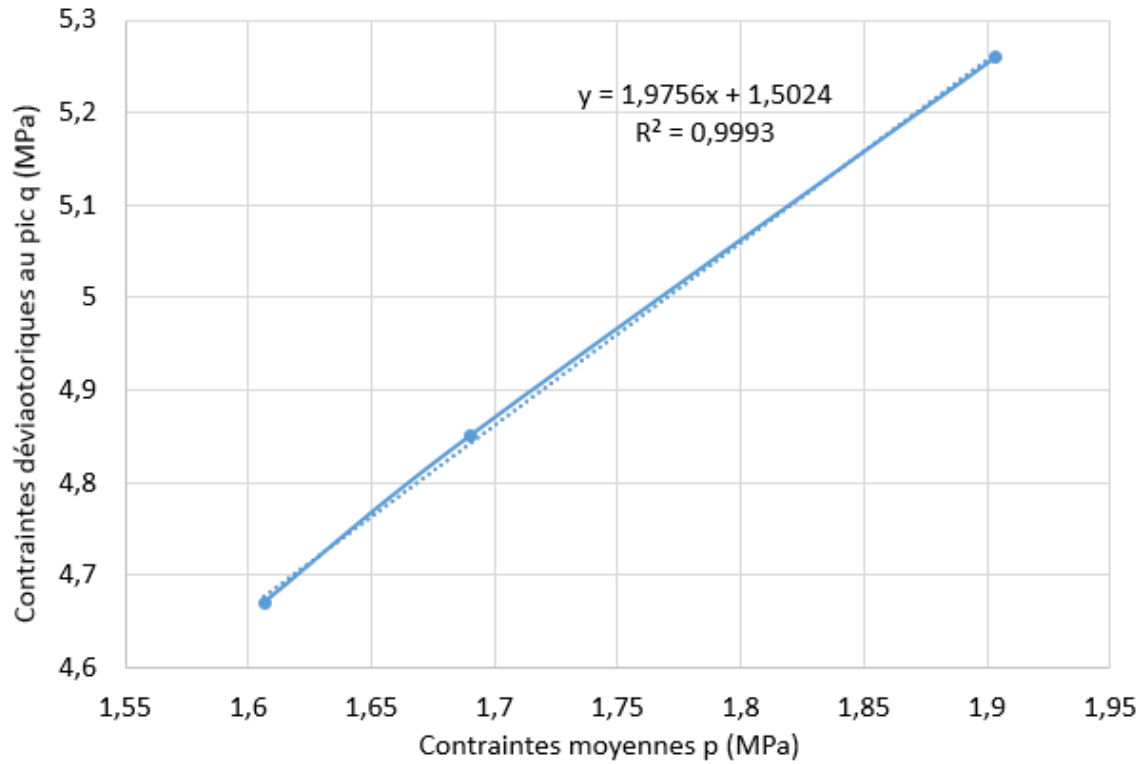


Figure III.22. Plan q, p de la μGC pour $\alpha = 0,83$

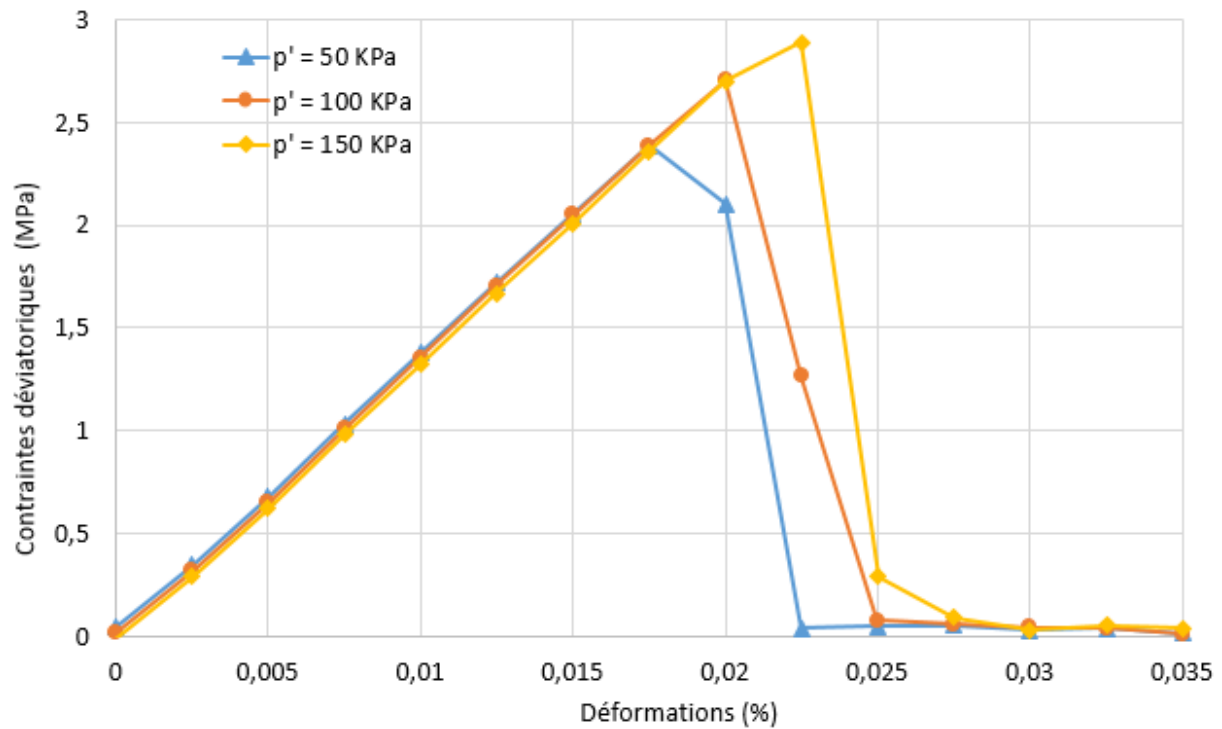


Figure III.23. Contraintes déviatoriques-déformations de la μGC pour $\alpha = 0,64$

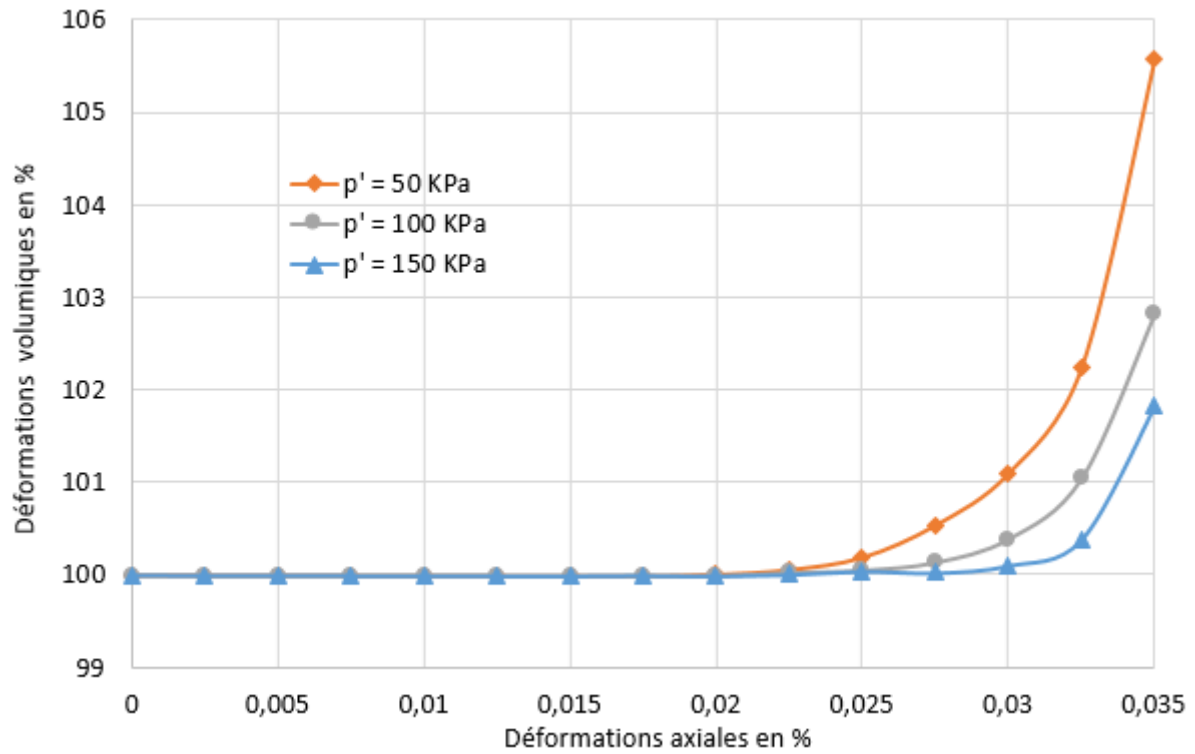


Figure III.24. Courbes de déformations volumiques de la μ GC pour $\alpha = 0,64$

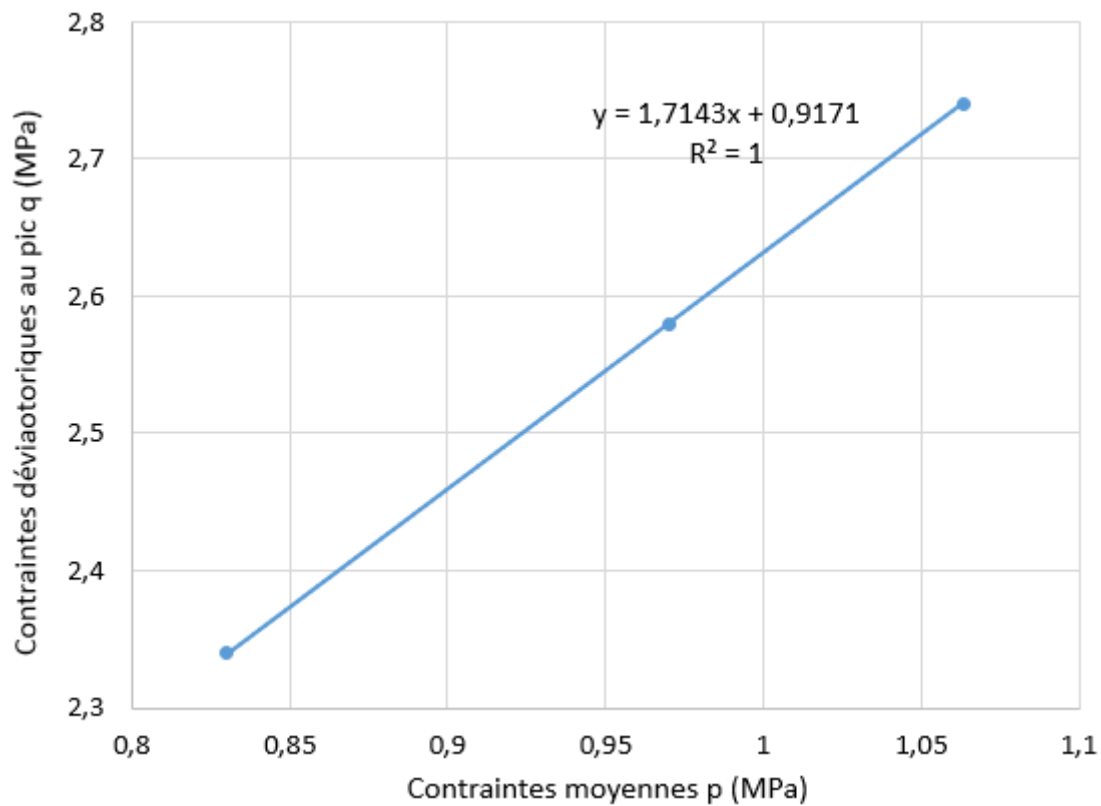


Figure III.25. Plan q, p de la μ GC pour $\alpha = 0,64$

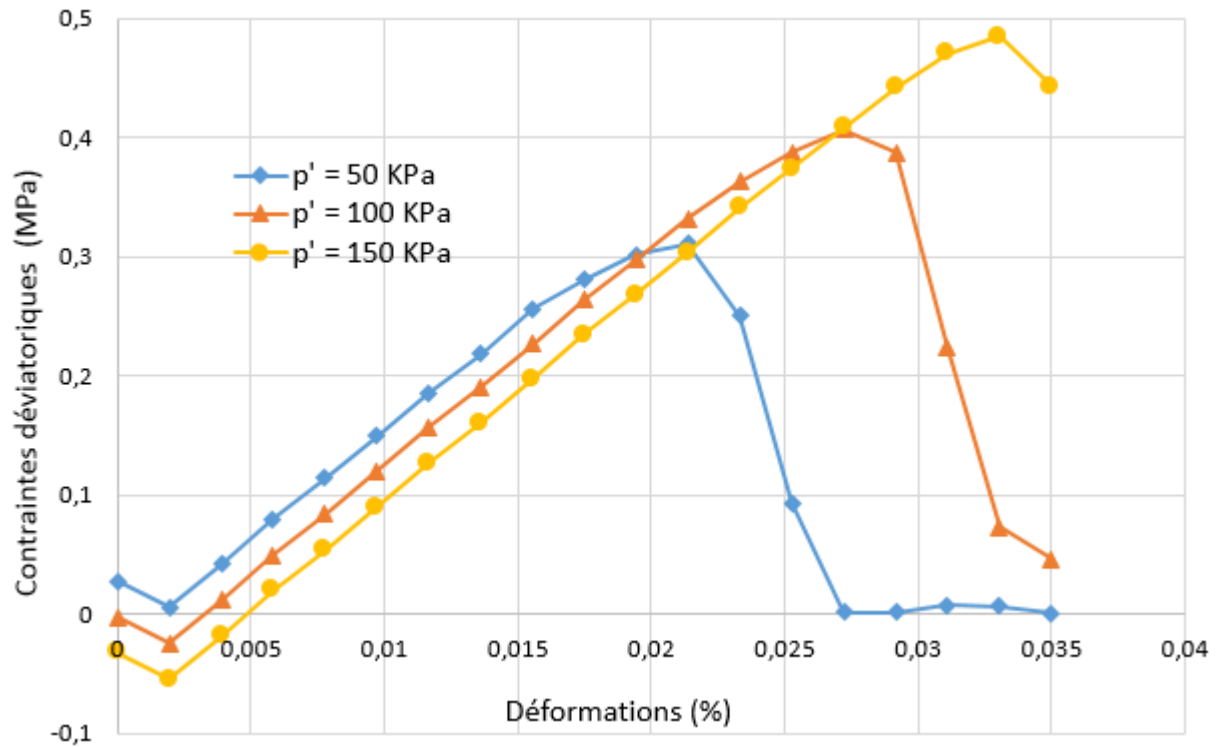


Figure III.26. Contraintes déviatoriques-déformations de la μ GC pour $\alpha = 0,27$

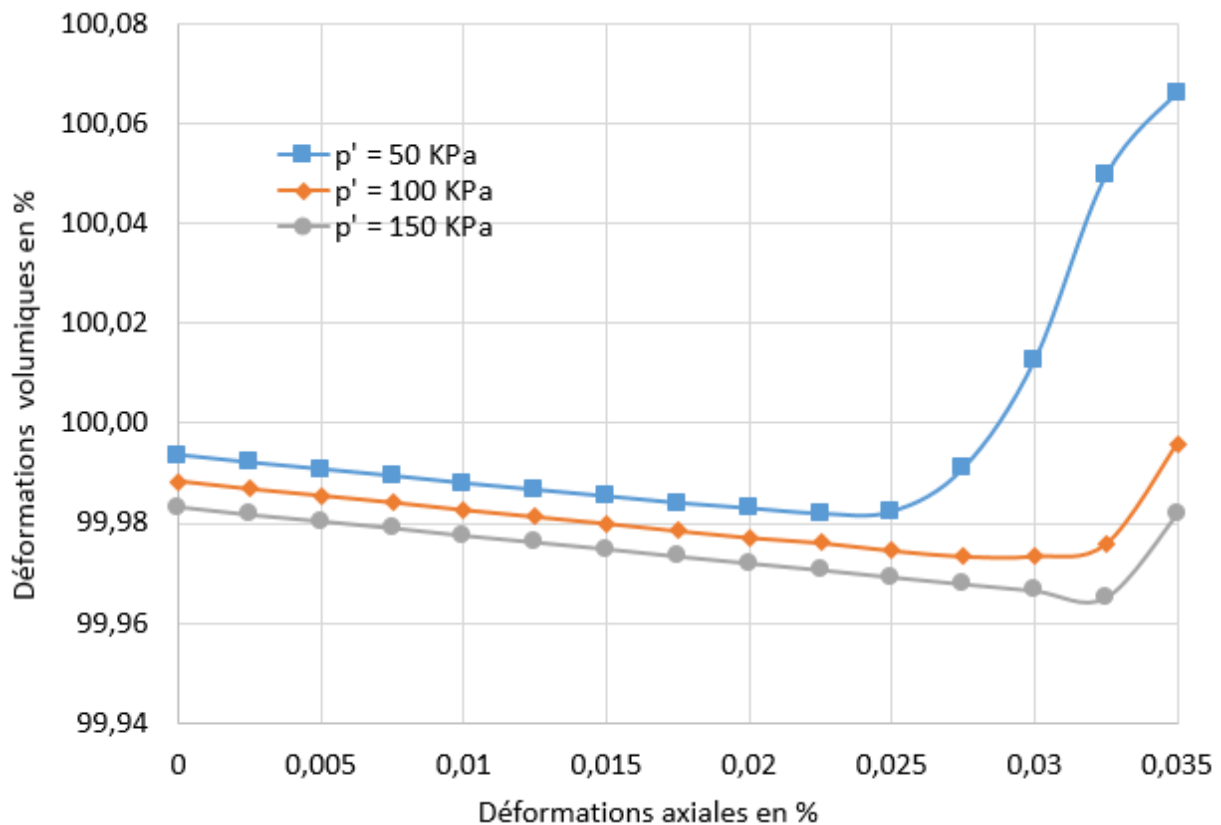


Figure III.27. Courbes de déformations volumiques de la μ GC pour $\alpha = 0,27$

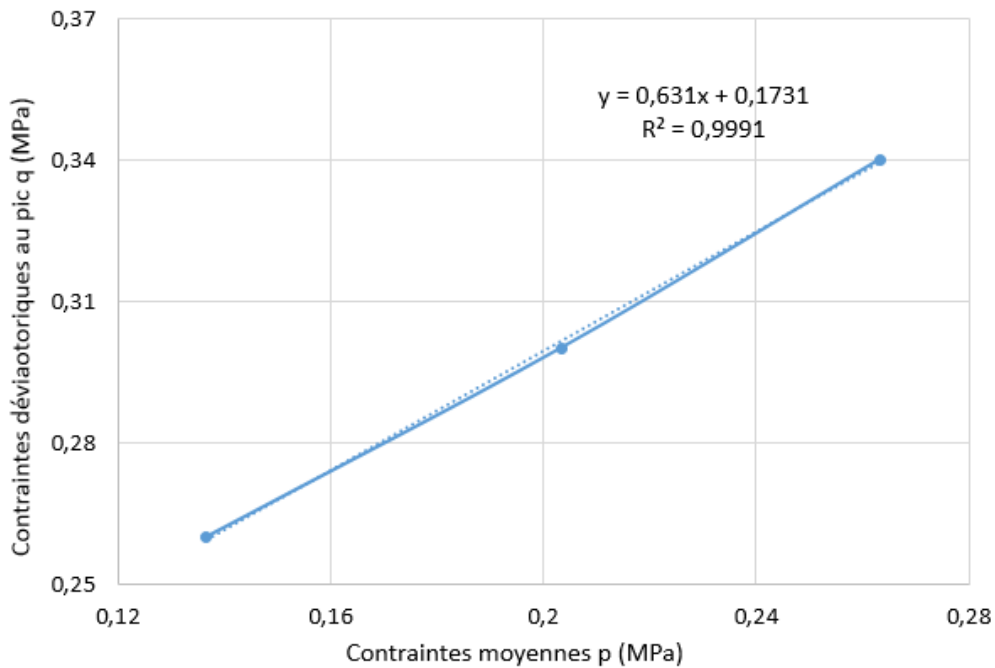


Figure III.28. Plan q, p de la μGC pour $\alpha = 0,27$

III.3.2.2. Echelle mesoscopique

Les paramètres caractérisant le comportement mécanique de la grave-ciment (GC) sont regroupés dans les tableaux III.9 et III.10.

Tableau III.9. Caractéristiques mécaniques de la grave-ciment à différents degrés d'hydratation de la pâte de ciment (α)

Paramètres mécaniques	E (GPa)	ν	ψ (°)	ϕ (°)	M_{pic}
α	0,83	46,59	0,205	9,434	76,07
	0,64	36,50	0,198	7,07	58,36
	0,27	12,71	0,185	6,79	47,38

Tableau III.10. Modules d'Young et résistances au pic de la grave-ciment selon les différentes simulations

Simulations effectuées		Triaxial de compression				Compression uniaxiale	Traction uniaxiale
		50 KPa	100 KPa	150 KPa	200 KPa		
α	0,83						
	E (GPa)	45,905	45,373	44,796	44,203	46,587	46,01
	R_{pic} (MPa)	10,46	10,65	10,78	10,78	10,11	0,61
	0,64						
	E (GPa)	35,439	35,311	34,843	34,259	36,497	33,013
	R_{pic} (MPa)	7,43	7,90	8,33	9,17	6,92	0,528
	0,27						
	E (GPa)	12,442	12,119	11,709	11,167	12,712	10,362
	R_{pic} (MPa)	2,81	3,08	3,31	3,50	2,66	0,403

Les résultats obtenus à l'échelle mesoscopique décrivent le comportement de la grave de mâchefers traités à 3 % de ciment. Ce comportement se caractérise par un ensemble de paramètres mécaniques dont leurs évolutions en fonction du degré d'hydratation de la pâte de ciment ont pu être établies. Ici aussi, on remarquera que la plupart des paramètres peuvent s'exprimer sous la forme de fonctions puissance de $(1 - f_{cap})$. Ces relations sont données aux équations III.38 à III.46.

Déviateur de contraintes au pic :

$$q_{\text{pic}} = 23,743(1 - f_{\text{cap}})^{0,7055} \text{ (en MPa)} \quad [\text{III.38}]$$

Résistance en compression :

$$R_c = 22,941(1 - f_{\text{cap}})^{0,6686} \text{ (en MPa)} \quad [\text{III.39}]$$

Résistance en traction :

$$R_t = 0,7672(1 - f_{\text{cap}})^{0,2115} \text{ (en MPa)} \quad [\text{III.40}]$$

Module d'Young :

$$E = 113,58(1 - f_{\text{cap}})^{0,7131} \text{ (en GPa)} \quad [\text{III.41}]$$

Coefficient de Poisson :

$$\nu = 0,2174(1 - f_{\text{cap}})^{0,0531} \quad [\text{III.42}]$$

Coefficient M_{pic} :

$$M_{\text{pic}} = 17,466(1 - f_{\text{cap}})^2 - 1,8054(1 - f_{\text{cap}}) + 1,9951 \quad [\text{III.43}]$$

Angle de frottement interne :

$$\varphi = 743,97(1 - f_{\text{cap}})^2 - 121,49(1 - f_{\text{cap}}) + 51,404 \text{ (en degrés)} \quad [\text{III.44}]$$

Angle de dilataance :

$$\psi = 459,72(1 - f_{\text{cap}})^2 - 153,38(1 - f_{\text{cap}}) + 16,213 \text{ (en degrés)} \quad [\text{III.45}]$$

Ecart entre φ et ψ :

$$\varphi - \psi = 33,113e^{2,4448(1-f_{\text{cap}})} \text{ (en degrés)} \quad [\text{III.46}]$$

Les courbes de comportement à partir desquelles sont obtenus les paramètres de comportement mécaniques de la grave-ciment et les relations des équations III.38 à III.46 sont données dans les figures III.29 à III.39.

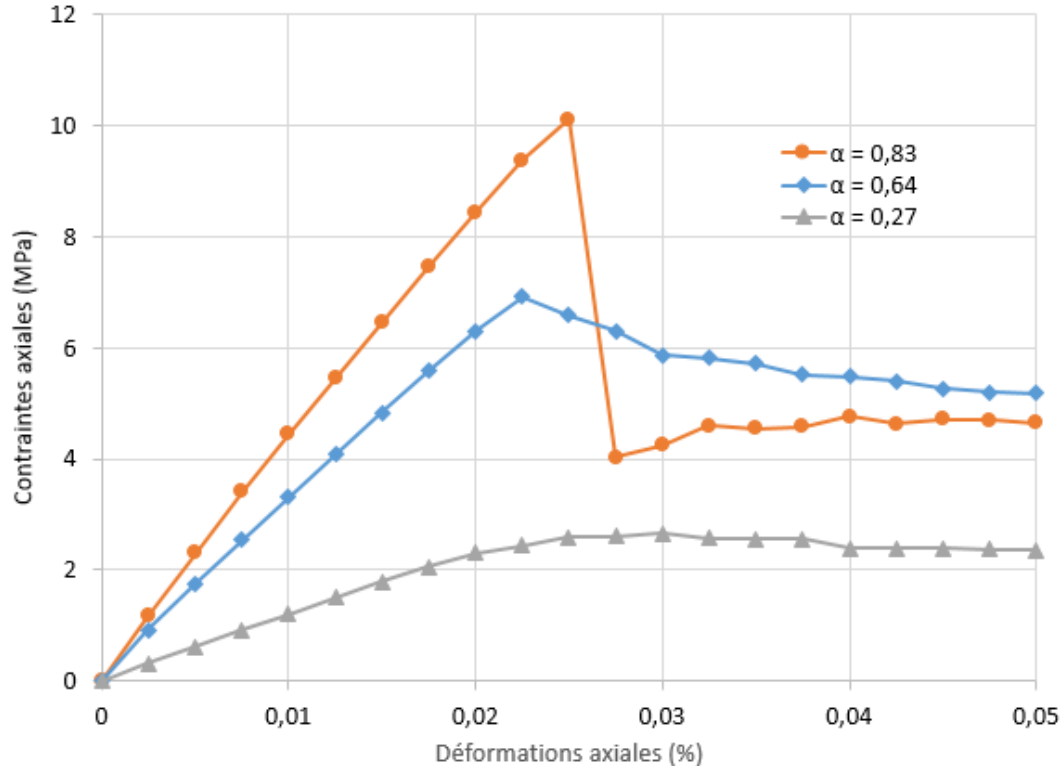


Figure III.29. Contraintes – déformations de la grave-ciment en compression uniaxiale

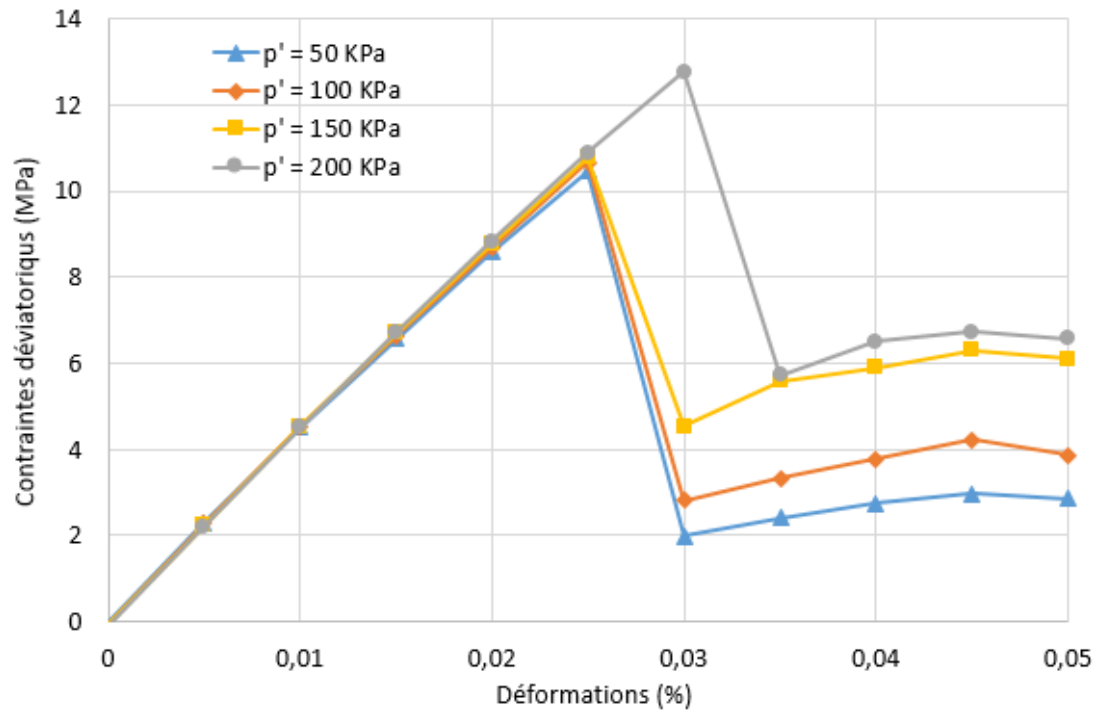


Figure III.30. Contraintes déviatoriques – déformations de la grave-ciment pour $\alpha=0,83$

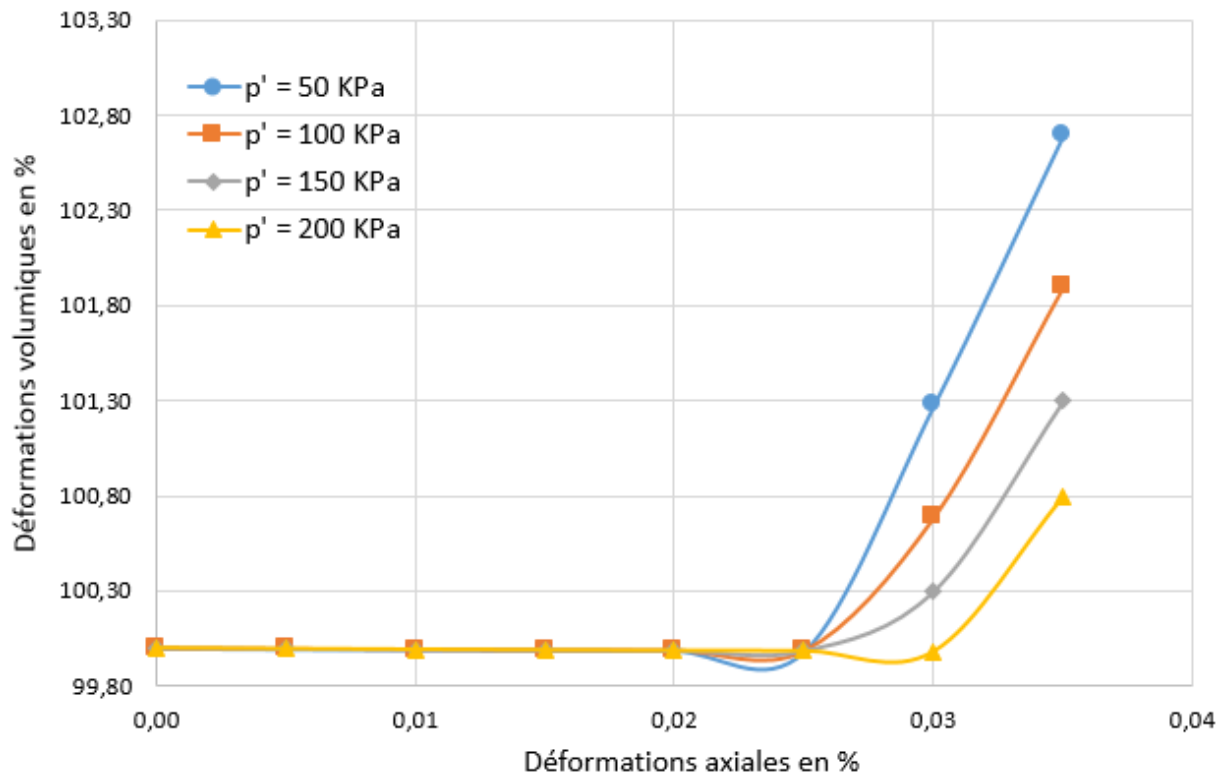


Figure III.31. Courbes de déformations volumiques de la grave-ciment pour $\alpha=0,83$

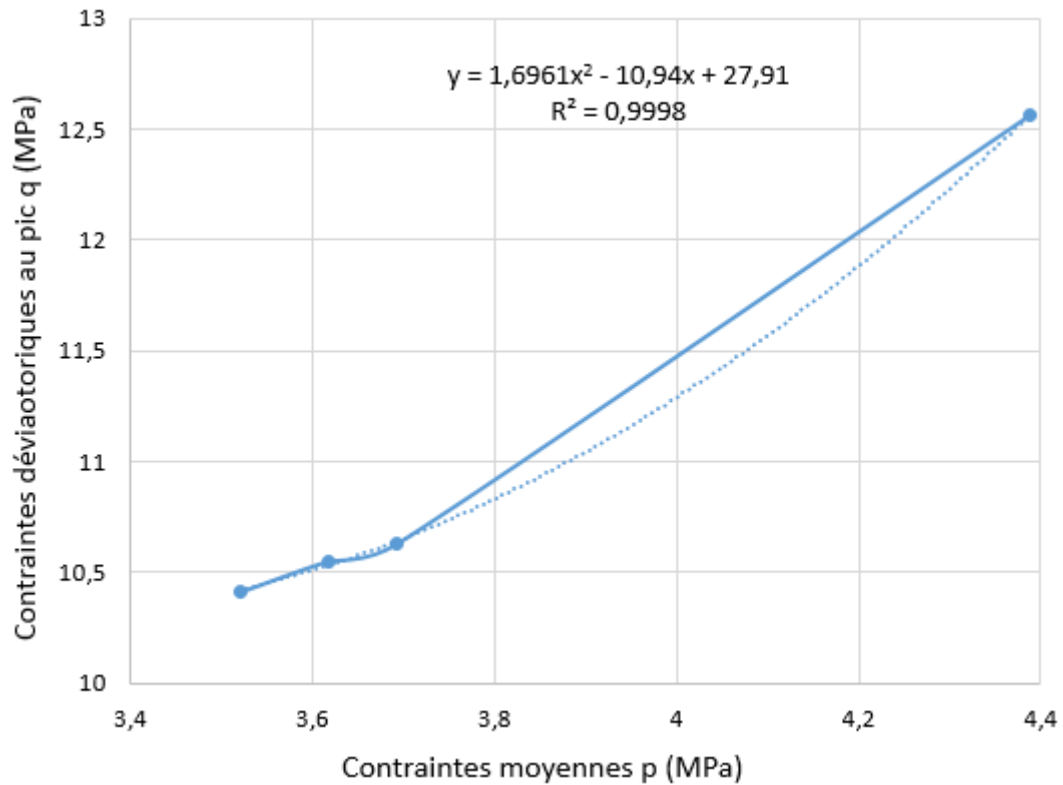


Figure III.32. Plan q, p de la grave-ciment pour $\alpha=0,83$

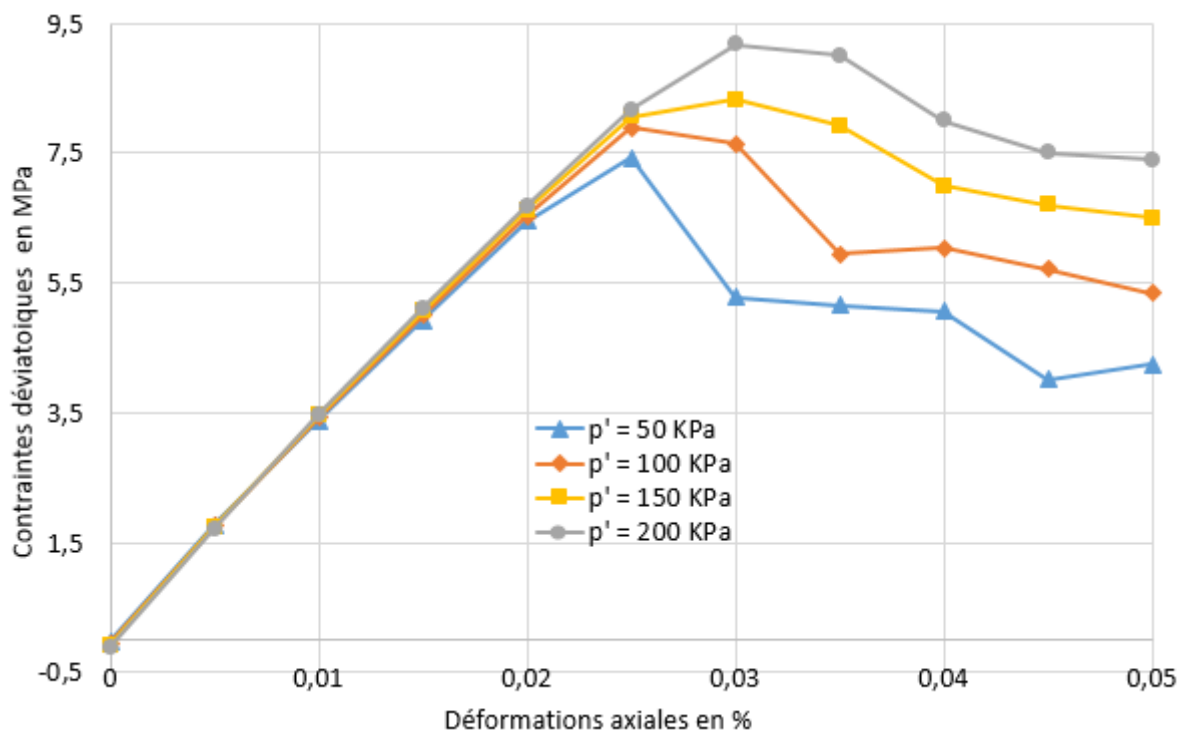


Figure III.33. Contraintes déviatoriques – déformations de la grave-ciment pour $\alpha=0,64$

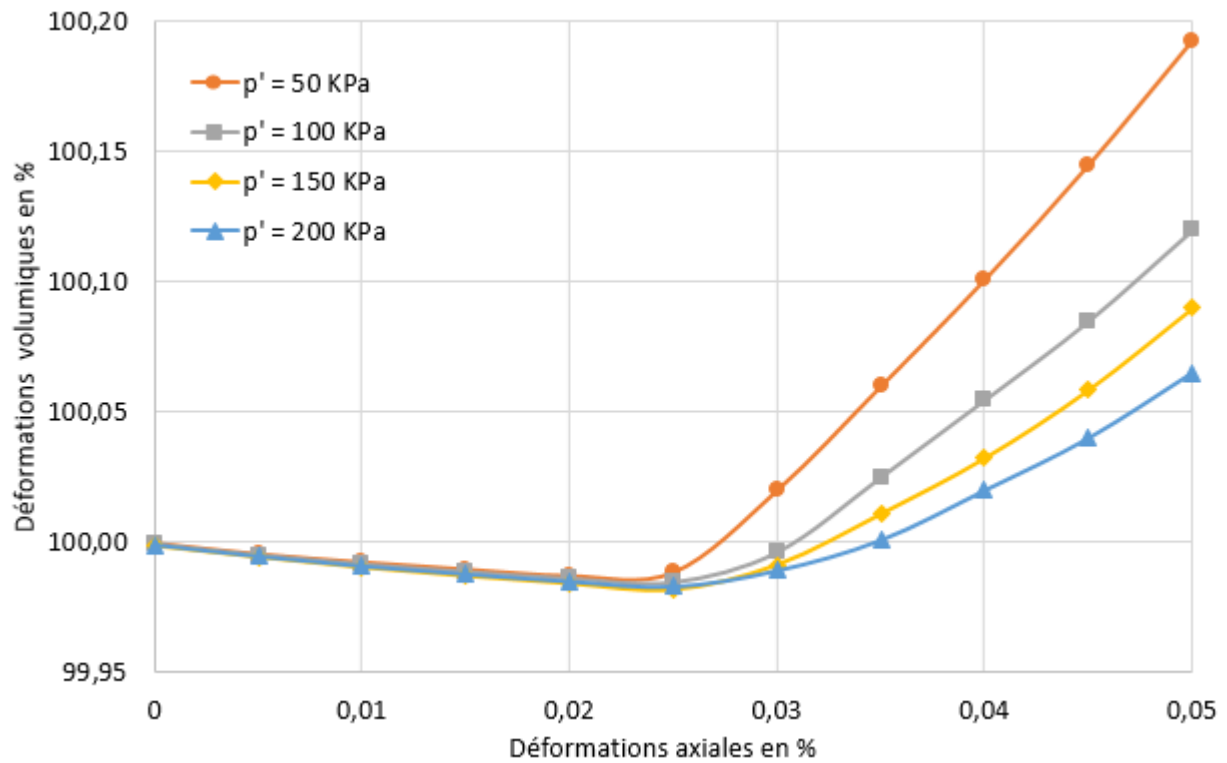


Figure III.34. Courbes de déformations volumiques de la grave-ciment pour $\alpha=0,64$

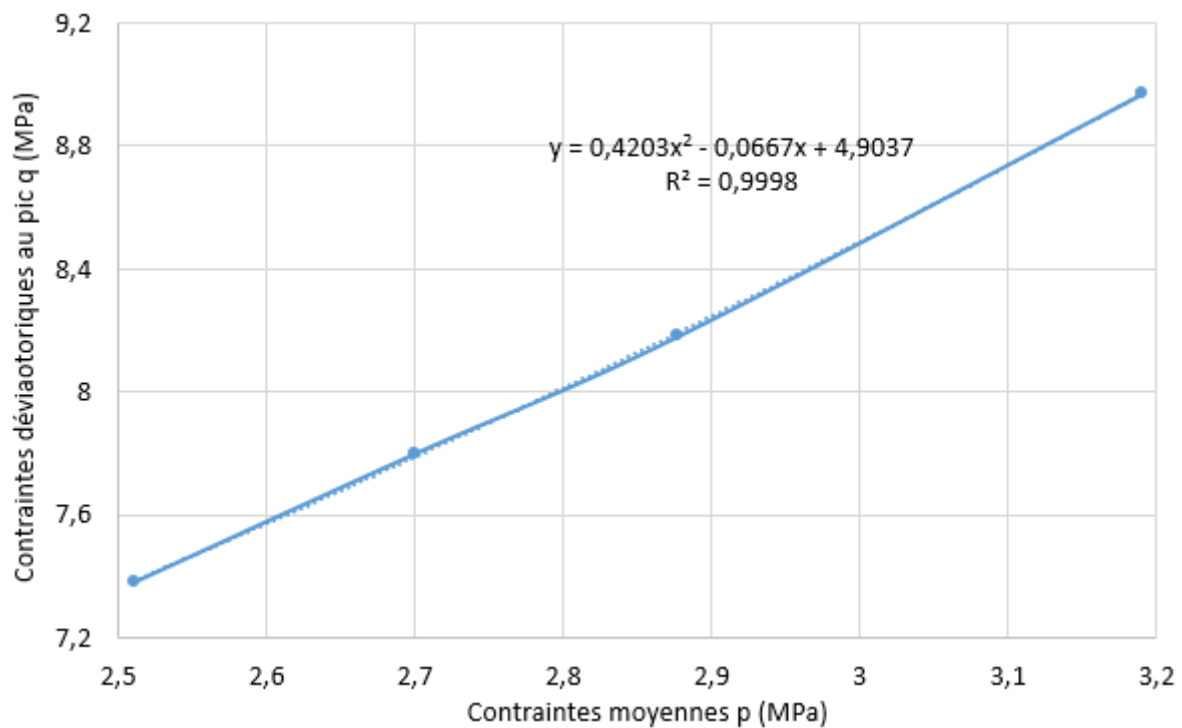


Figure III.35. Plan q, p de la grave-ciment pour $\alpha=0,64$

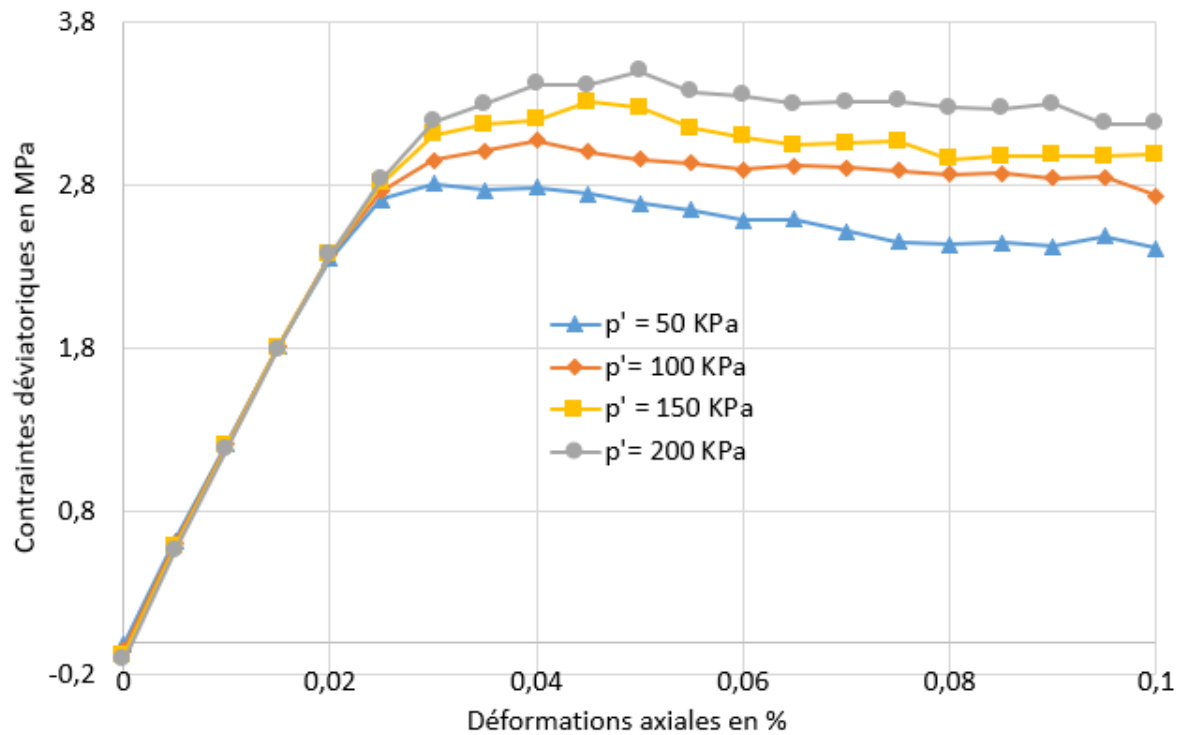


Figure III.36. Contraintes déviatoriques – déformations de la grave-ciment pour $\alpha=0,27$

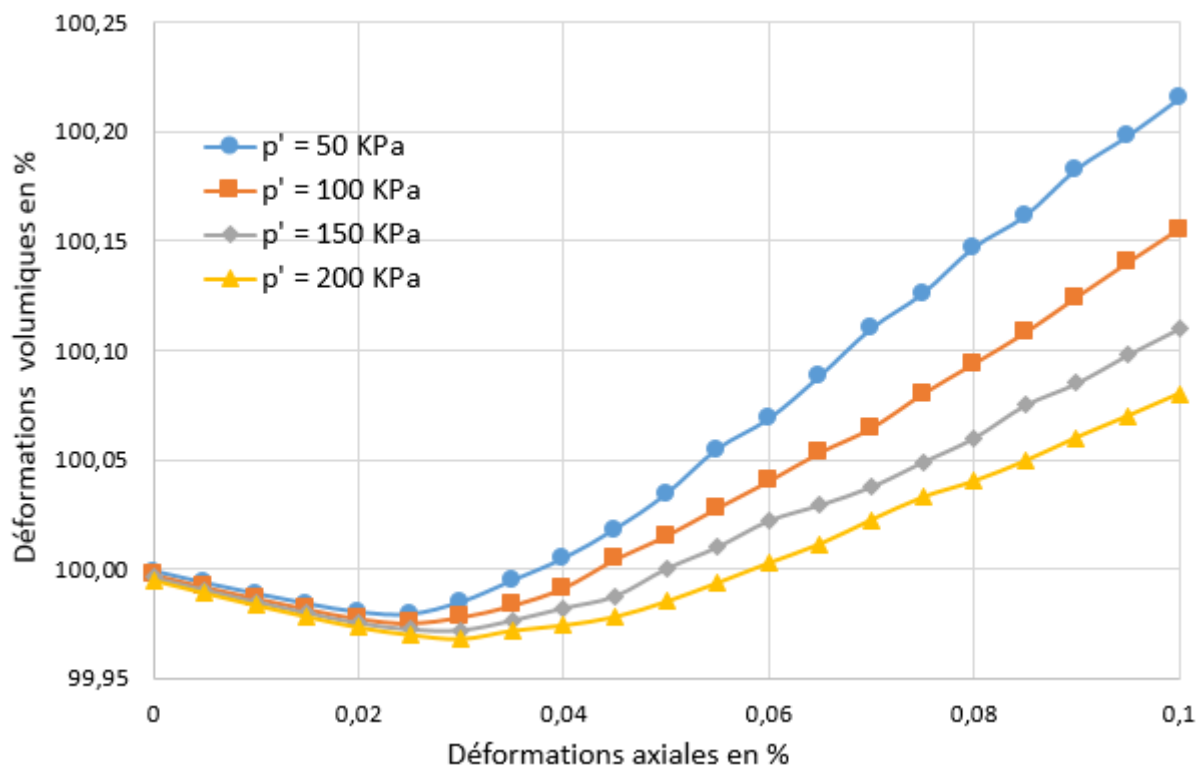


Figure III.37. Courbes de déformations volumiques de la grave-ciment pour $\alpha=0,27$

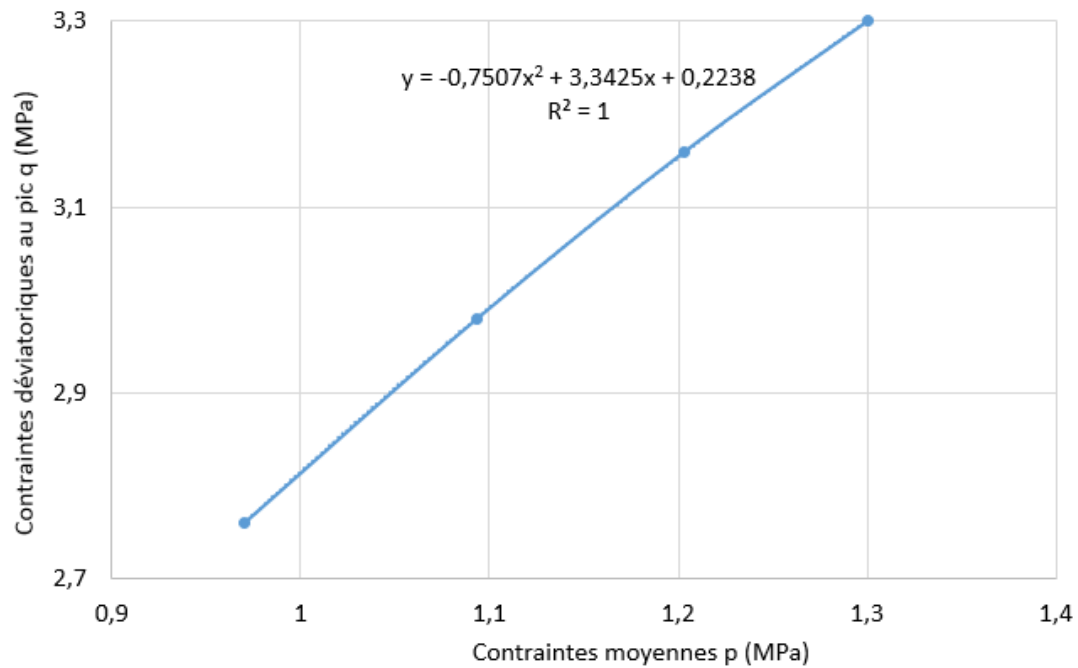


Figure III.38. Plan q, p de la grave-ciment pour $\alpha=0,27$

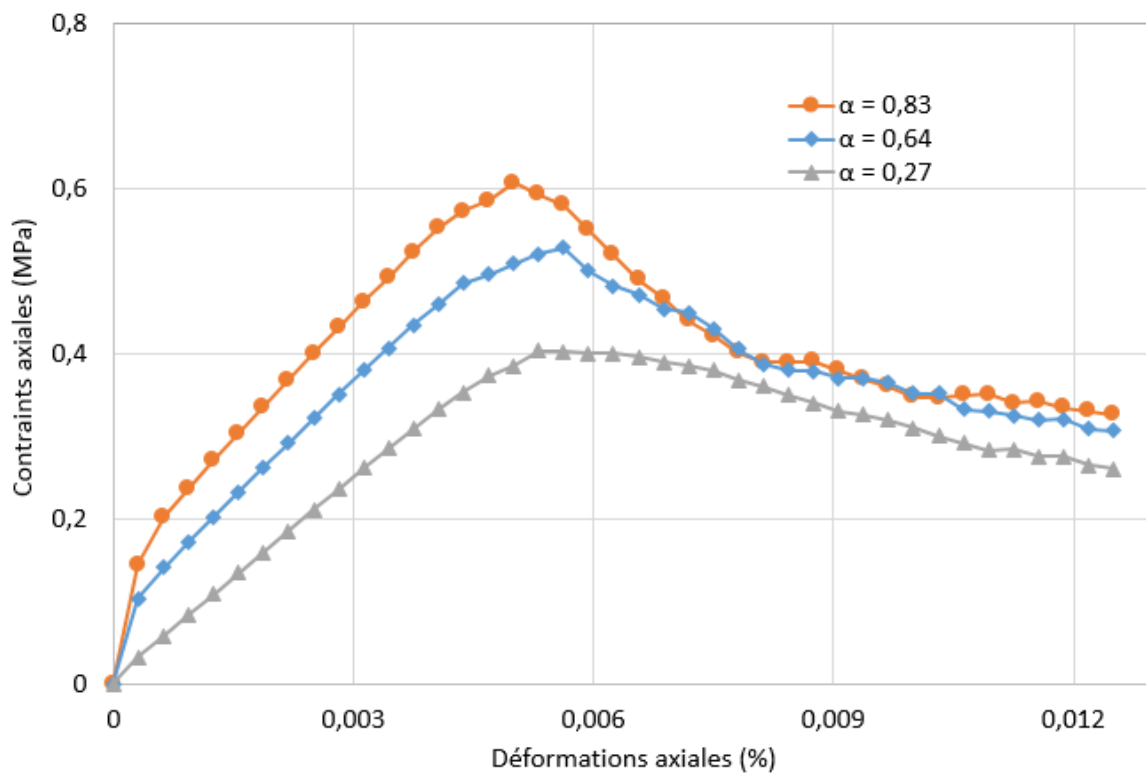


Figure III.39. Contraintes – déformations de la grave-ciment en traction

III.3.3. Etude de sensibilité au module d'Young des particules de MIDND

III.3.3.1. Propriétés des matériaux et description des simulations effectuées

Dans notre travail de modélisation, les caractéristiques élastiques des granulats de mâchefers ont été prises égales à celles de granulats classiques tels que le calcaire. Le module d'Young utilisé jusqu'ici est de 80 GPa.

Dans cette présente partie, nous avons essayé de voir comment une variation des propriétés des mâchefers interfère sur le comportement de la grave routière traitée au ciment. Pour cela, nous avons considéré trois autres valeurs de modules d'Young (60, 40 et 20 GPa) et procédé ensuite à une étude de sensibilité.

Cette étude de sensibilité a tout son sens vu les plages de valeurs obtenus pour les modules élastiques de granulats de MIDND. D'autant plus, 20 GPa est la valeur estimée du module de Young homogénéisé des granulats de MIDND.

Pour un temps d'hydratation long ($\alpha = 0,83$), le tableau III.11 résume les propriétés mécaniques de la pâte de ciment. Le tableau III.12 donne celles des granulats non-connectés et le tableau III.13 donne les modules homogénéisés en fonction des valeurs du module d'Young des granulats de MIDND.

Le module homogénéisé E_{hom} , de l'assemblage (pâte + diamètre 1 + diamètre 3) formant une phase percolante d'une face à l'autre du VER. Sa détermination suit le cheminement suivant :

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

$$\% G_{1,3} = \sqrt[3]{(\% G_{1,3,5} - \% G_5)} \quad [\text{III.47}]$$

Avec G_5 : granulats de diamètre 5 mm

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

$$\% \text{ Pâte de ciment} = 100 - \% G_{1,3} \quad [\text{III.48}]$$

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

$$\frac{1}{E_{\text{hom}}} = \frac{\% G_{1,3}}{E_{\text{granulats}}} + \frac{\% \text{ Pâte}}{E_{\text{Pâte}}} \quad [\text{III.49}]$$

Tableau III.11. Caractéristiques de comportement post-pic de la pâte de ciment ($\alpha=0,83$)

E (GPa)	f_1 (MPa)	f_0 (MPa)	f_1/f_0	w_1 (μm)	w_2 (μm)
4,17	0,13	0,138	0,91	0,09	10,45

Tableau III.12. Caractéristiques mécaniques et déplacement maximum post-pic des granulats de diamètres 1 et 3

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

Tableau III.13. Modules homogénéisés en fonction du module des MIDND

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

Pour chaque valeur du module d'Young des granulats de mâchefers, la stratégie montrée à la figure III.40 a été suivie :

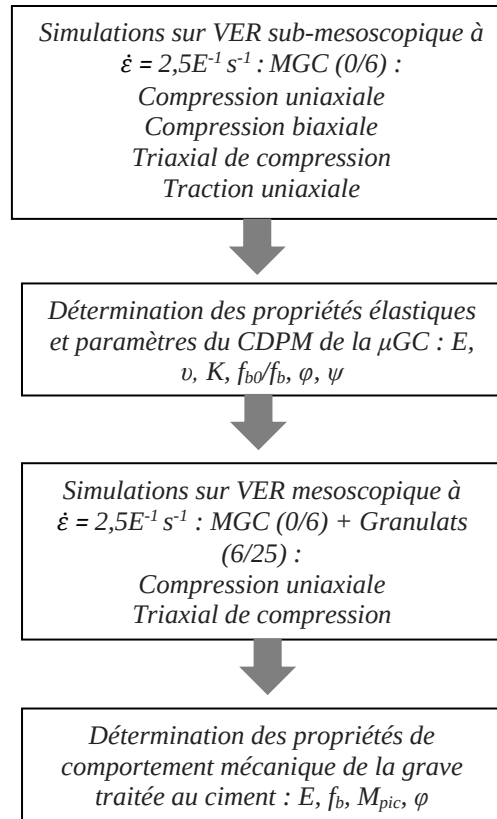


Figure III.40. Stratégie de modélisation multi-échelle hiérarchique développée

III.3.3.2. Résultats obtenus et conclusions

III.3.3.2.1. Echelle sub-mesoscopique

Les courbes de comportement de la micro-grave ciment sont données aux figures III.41 à III.46 pour les différents tests simulés. Le tableau III.14 résume les paramètres élastiques et du CDPM caractérisant la μ GC à différentes valeurs du module d'Young des particules de mâchefers.

Tableau III.14. Paramètres mécaniques de la μ GC pour différents E_{MIDND}

Domaines				Elastique	CDPM					
Paramètres				E (GPa)	K	f _{b0} /f _b	B	φ(°)	M _{pic}	ψ
Module d'Young des MIDND (GPa)	80	p' (KPa)	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							

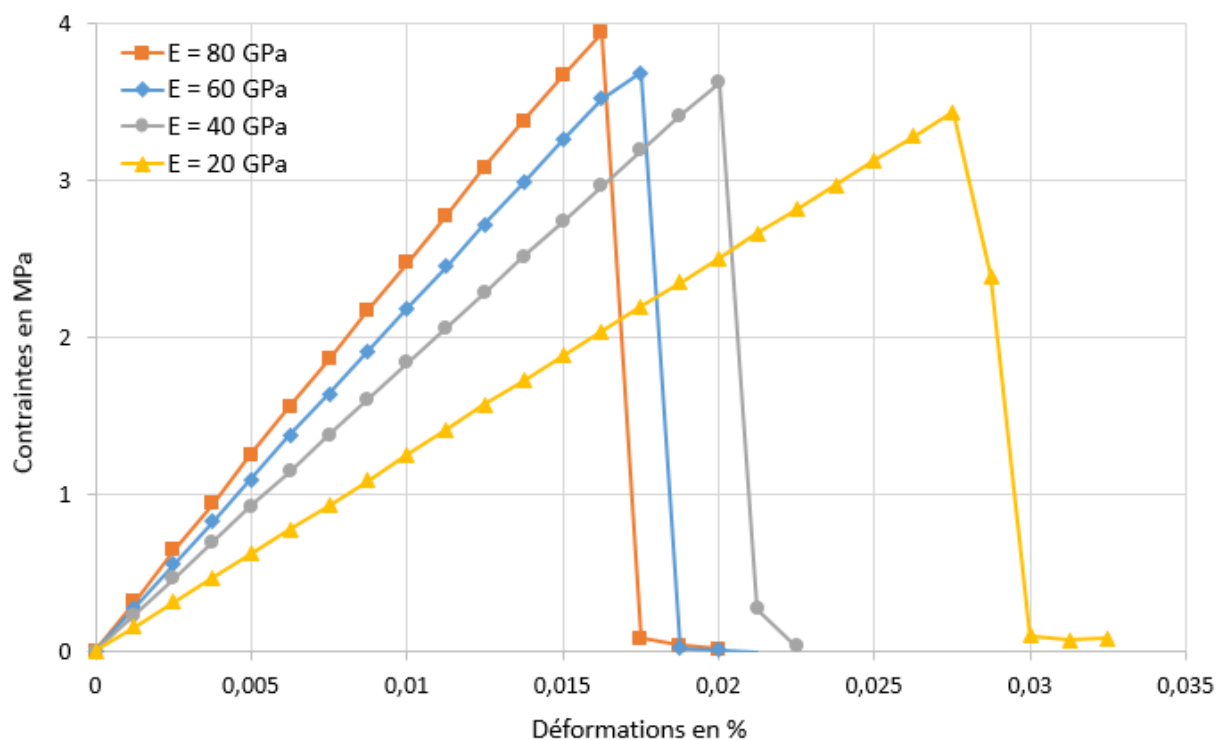


Figure III.41. Courbes contraintes-déformations en compression uniaxiale de la μGC

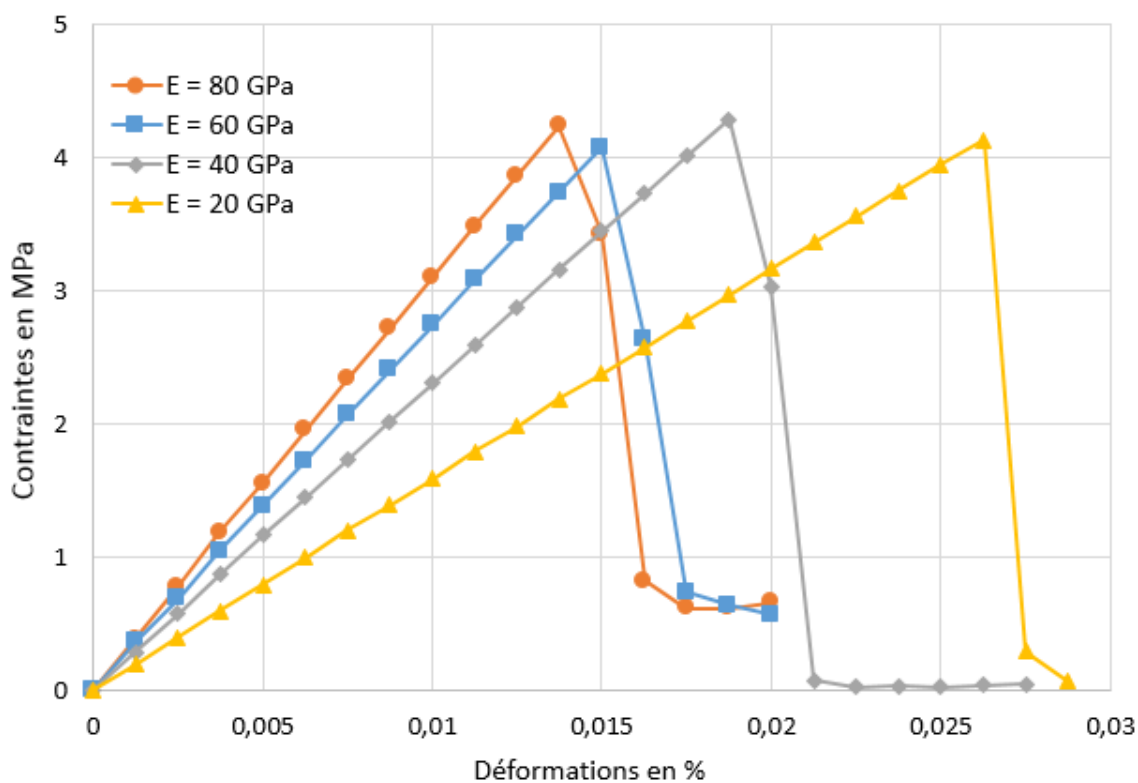


Figure III.42. Courbes contraintes-déformations en compression biaxiale de la μGC

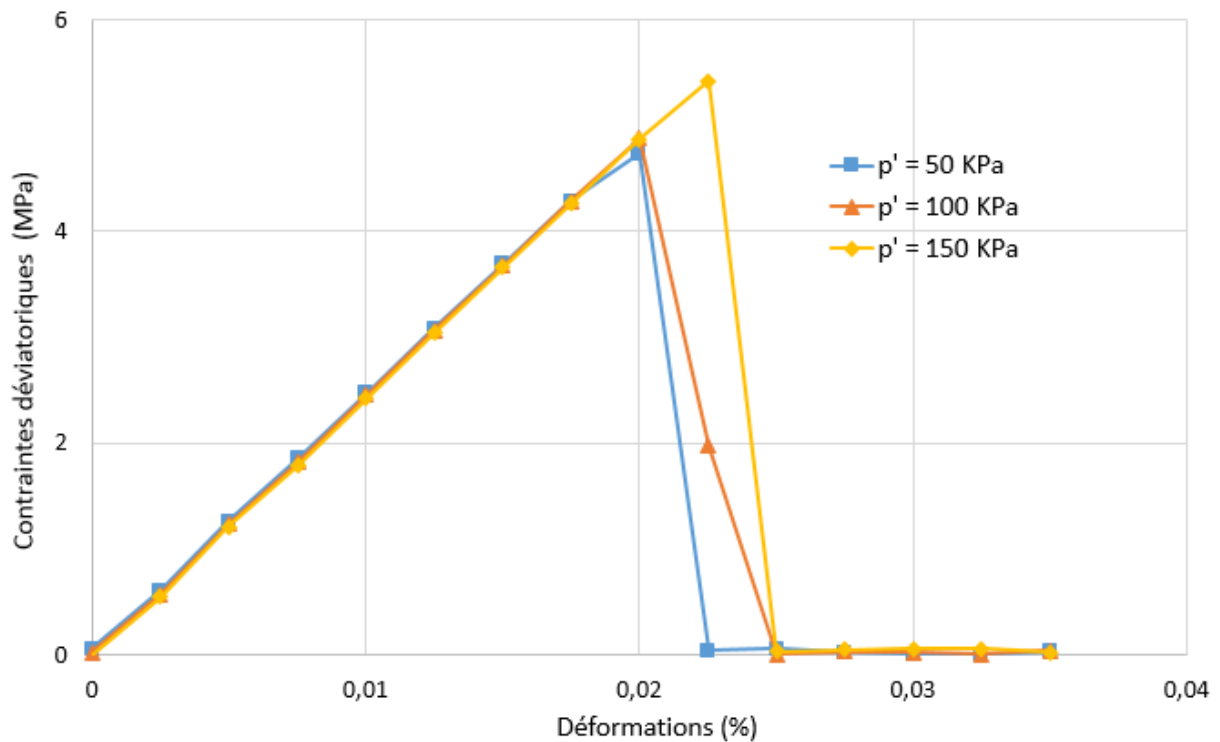


Figure III.43. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 80$ GPa

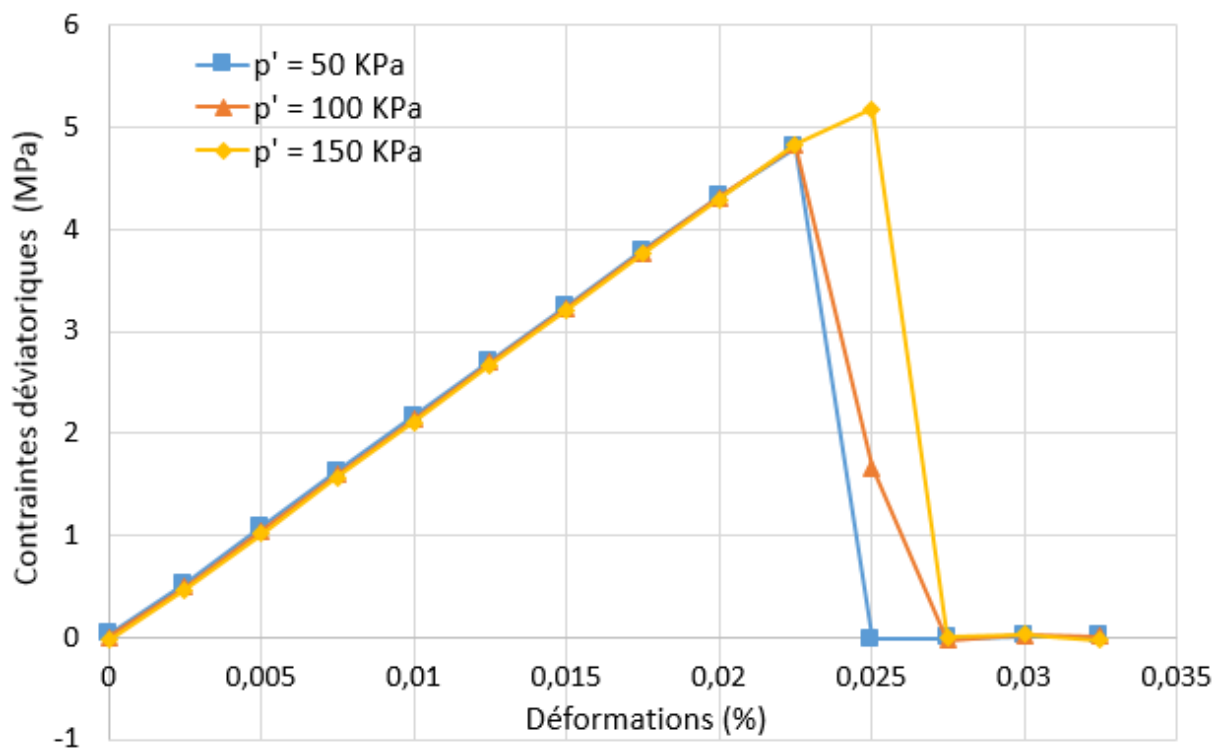


Figure III.44. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 60$ GPa

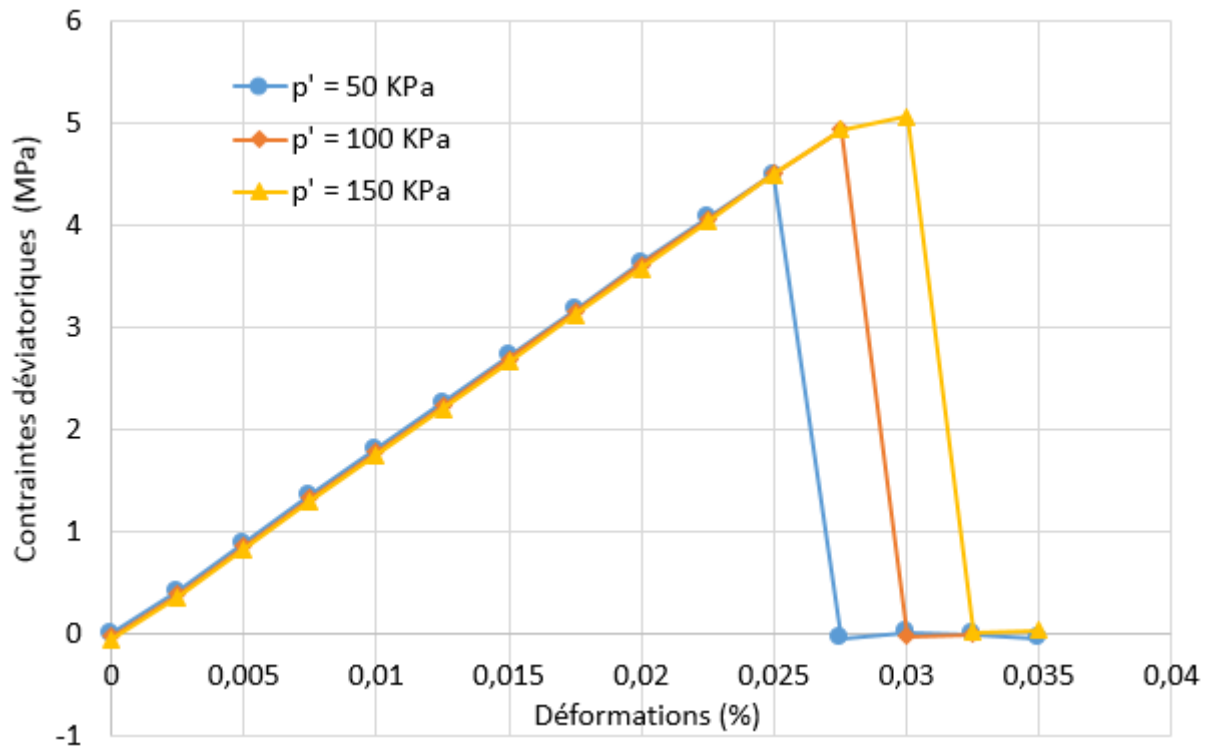


Figure III.45. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 40$ GPa

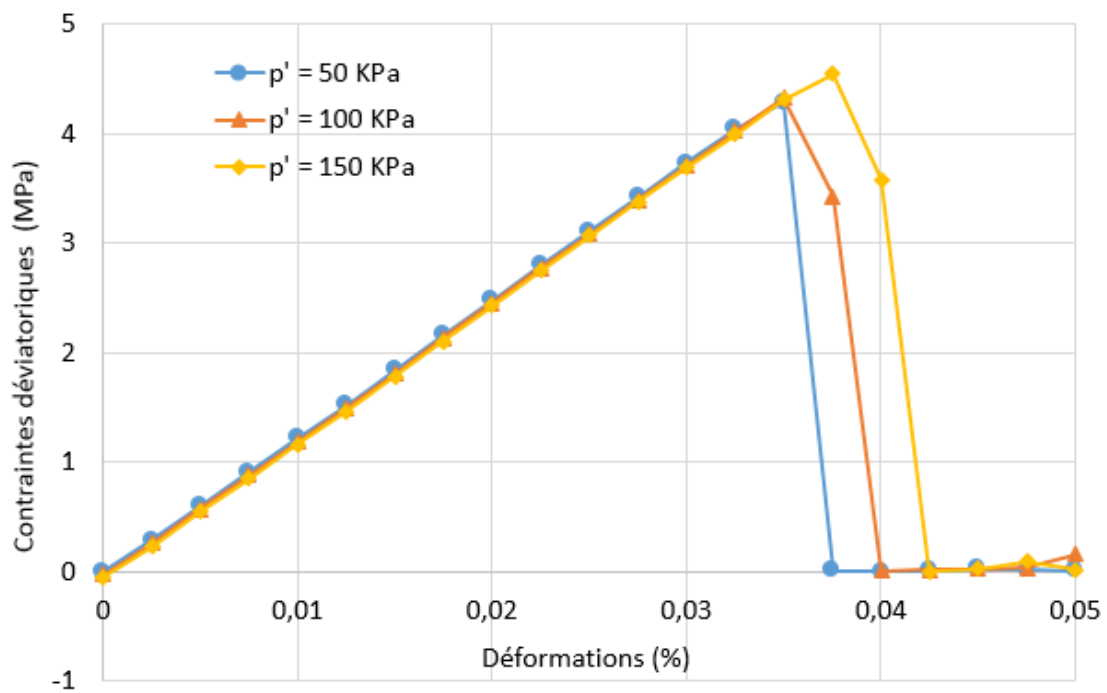


Figure III.46. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la μ GC, $E = 20$ GPa

III.3.3.2.2. Echelle mesoscopique

A l'échelle de la grave routière, le tableau III.15 donne les caractéristiques mécaniques de la grave de mâchefers traitée à 3 % de ciment.

Tableau III.15. Sensibilité des caractéristiques mécaniques de la grave-ciment en fonction du module d'Young des particules de MIDND

E_{MIDND} (GPa)	$E_{\text{Grave routière}}$ (GPa)	Déviateur de contraintes q_{pic} (MPa)	M_{pic}	ϕ (°)	R_c (MPa)	R_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 augmentent 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.

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 la classe mécanique 3 et 4 lorsque le module d'Young des granulats varie de 20 à 80 GPa (cf. figure III.47) et qui prouve la faisabilité d'un réemploi de ce type de Sous-Produits Industriels dans ce secteur d'activités.

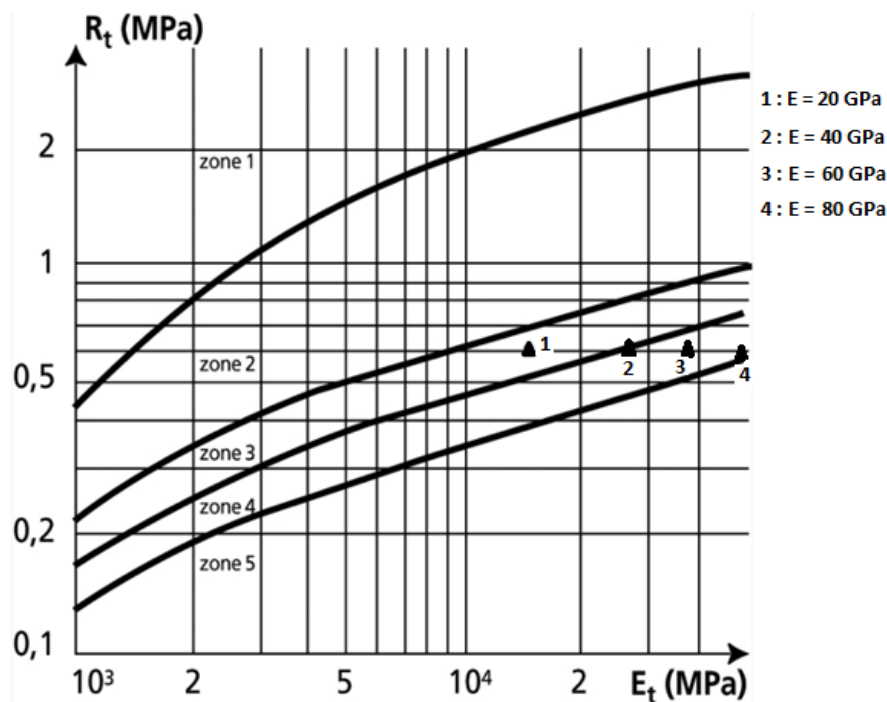


Figure III.47. Classement de la Grave routière à base de MIDND Traitée au Liant Hydraulique (NF EN 14227-1)

Les classes mécaniques 3 et 4 correspondant aux classes de trafic 2 et 3, pouvant supporter jusqu'à 300 PL/jour/sens.

Les courbes de comportement ainsi que les plans (q, p) sont données aux figures III.48 à III.56.

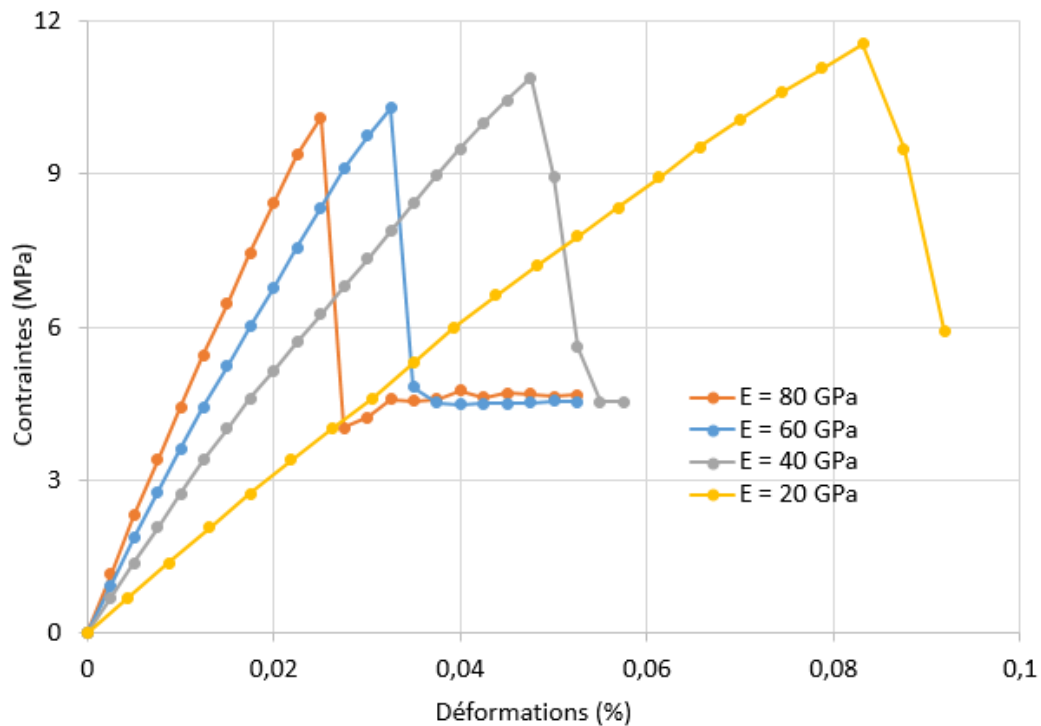


Figure III.48. Courbes contraintes-déformations en compression uniaxiale de la grave-ciment

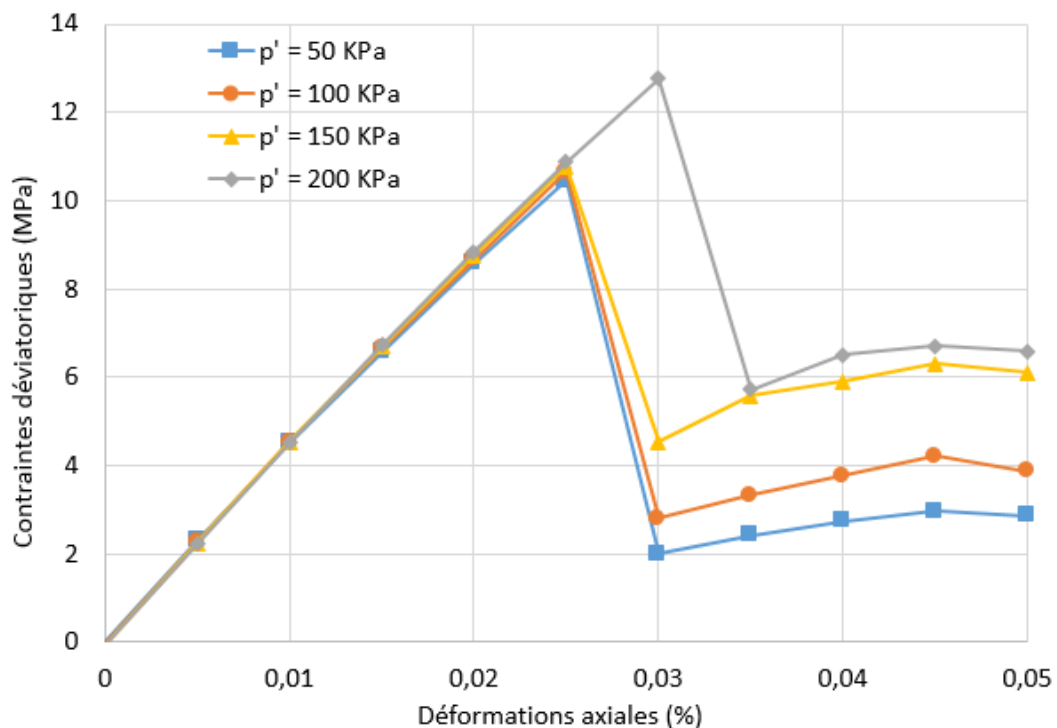


Figure III.49. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 80 \text{ GPa}$

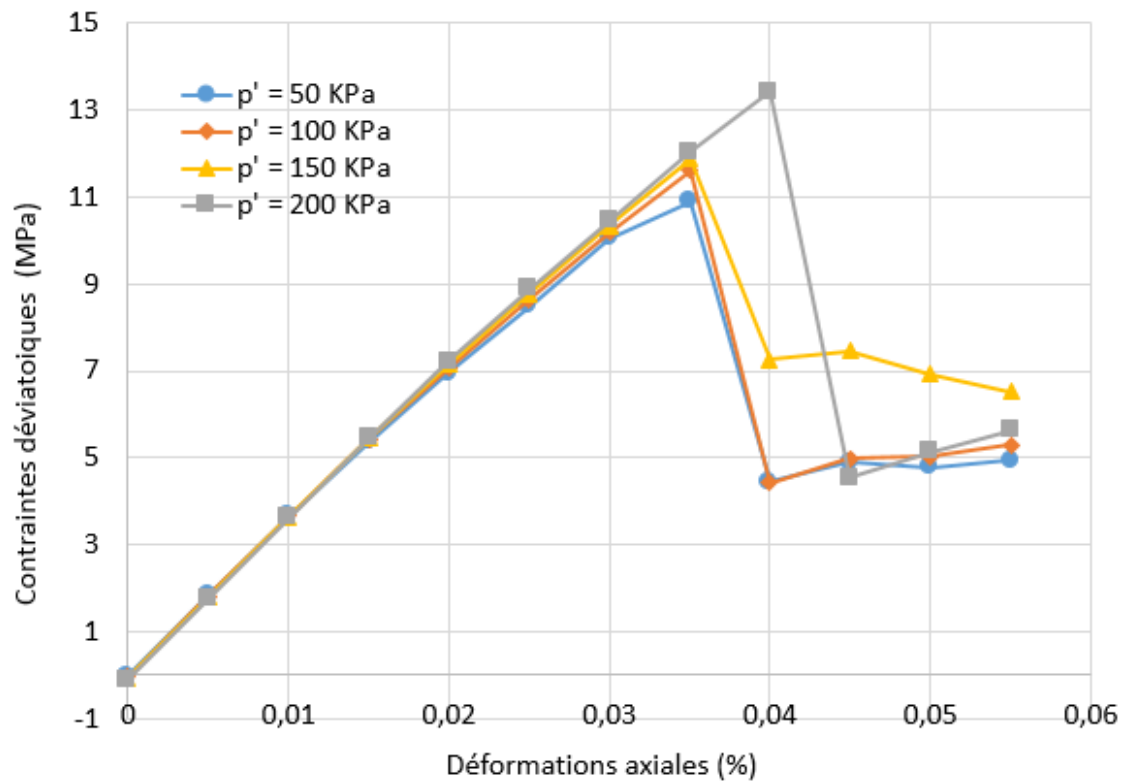


Figure III.50. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 60$ GPa

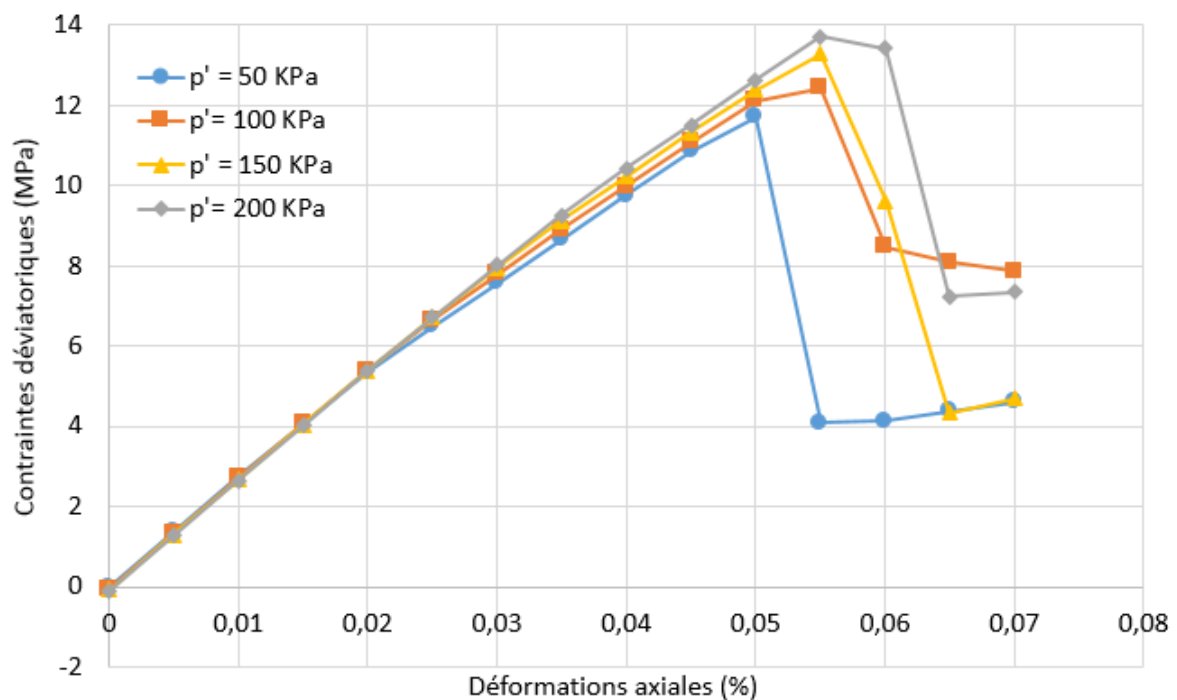


Figure III.51. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 40$ GPa

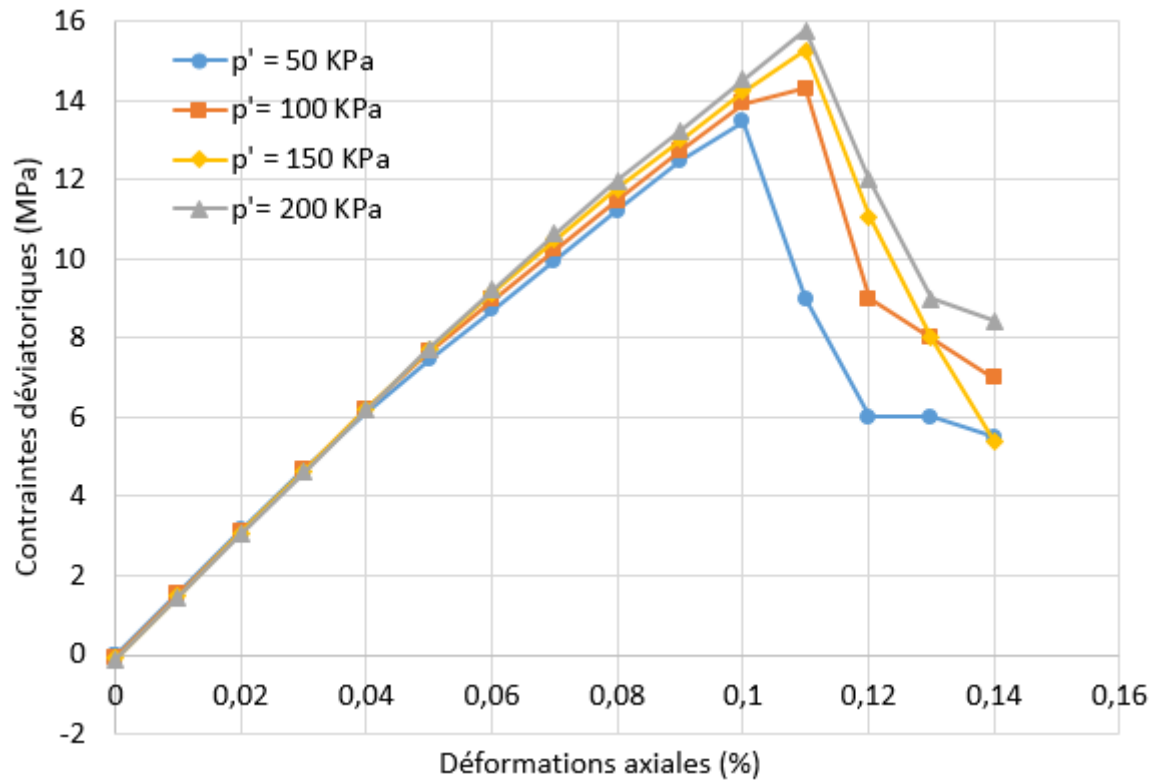


Figure III.52. Courbes contraintes-déformations en triaxial de la grave-ciment, $E = 20$ GPa

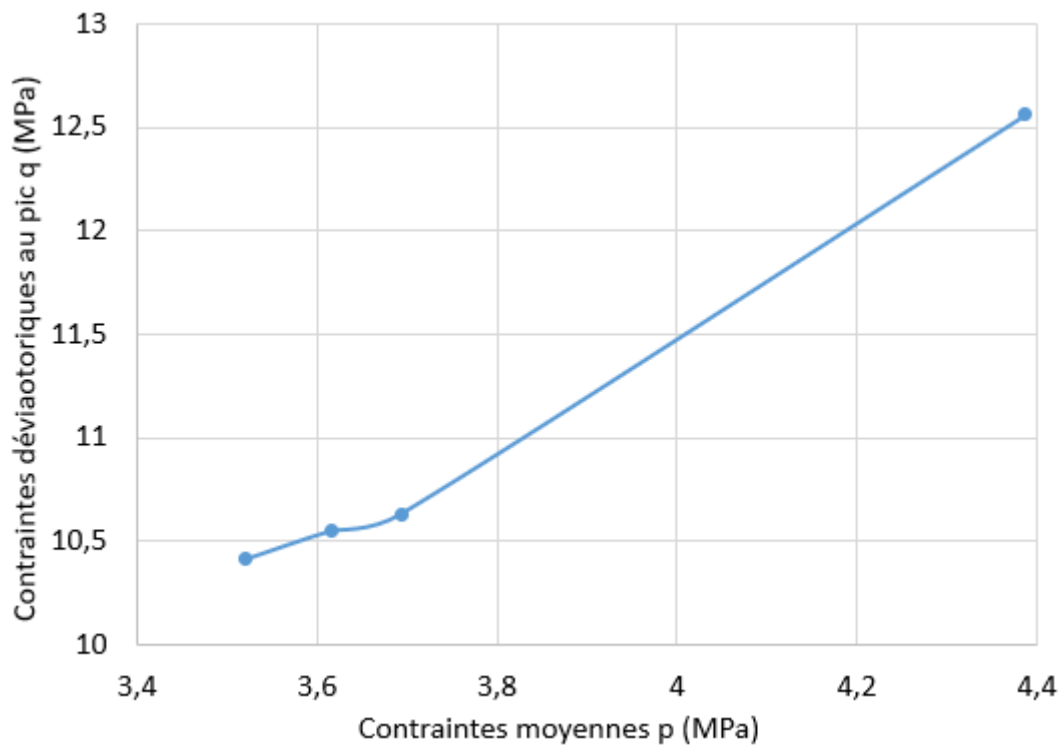


Figure III.53. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 80$ GPa

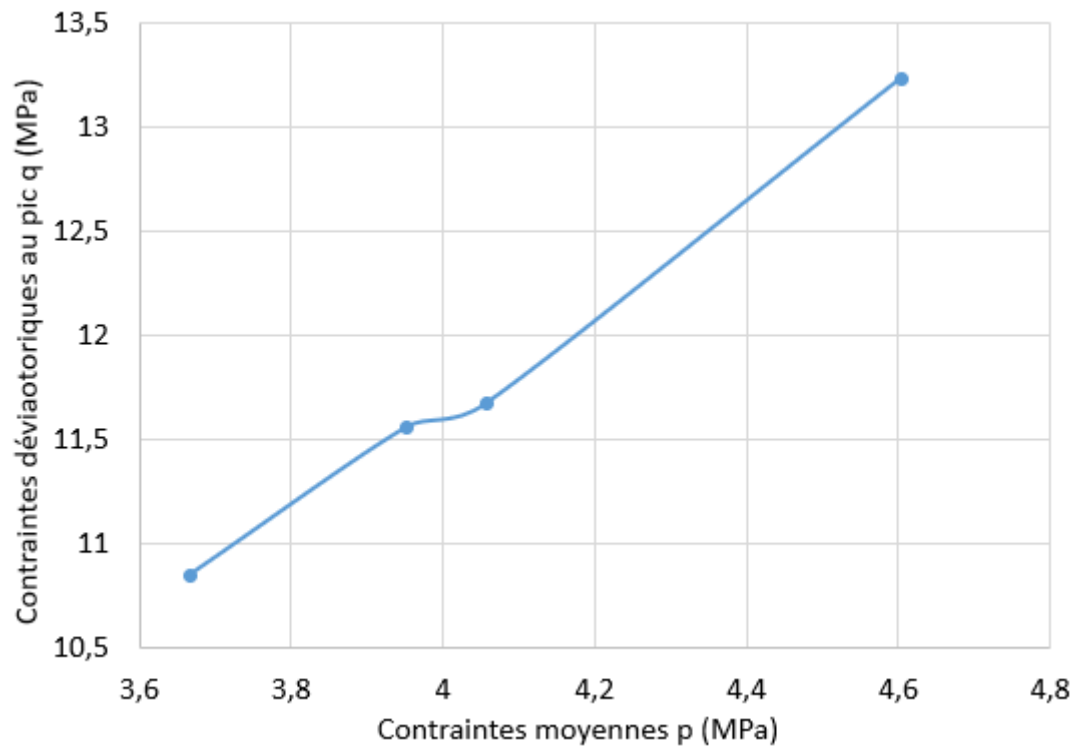


Figure III.54. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 60 \text{ GPa}$

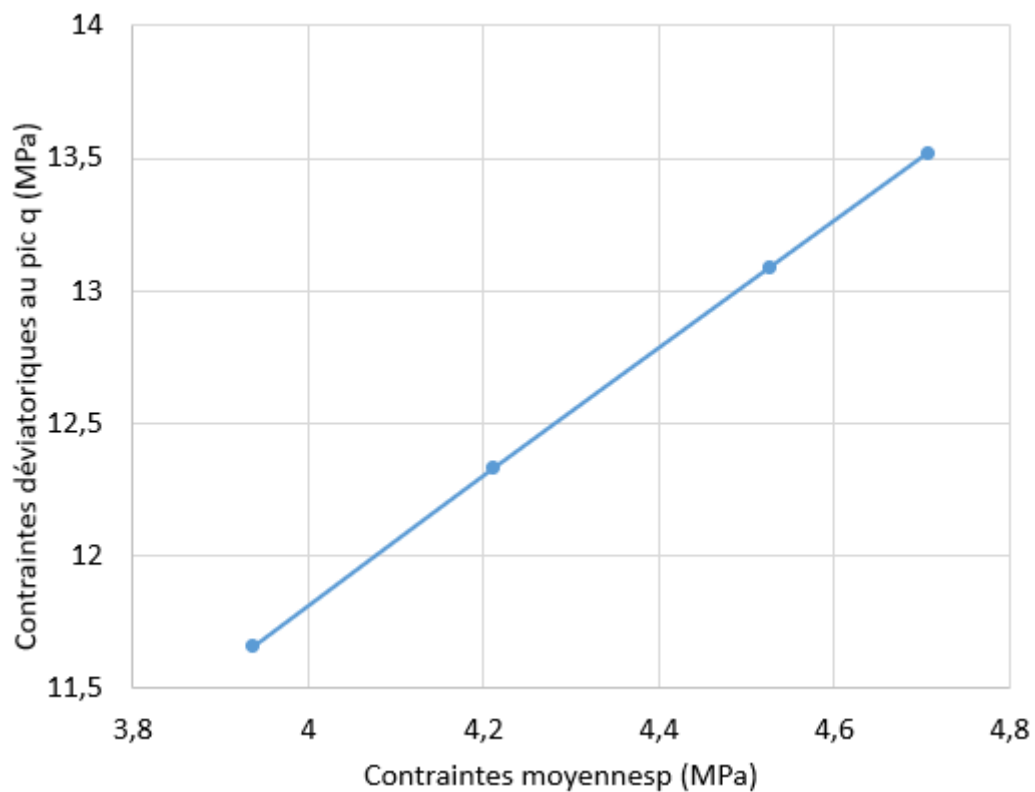


Figure III.55. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 40 \text{ GPa}$

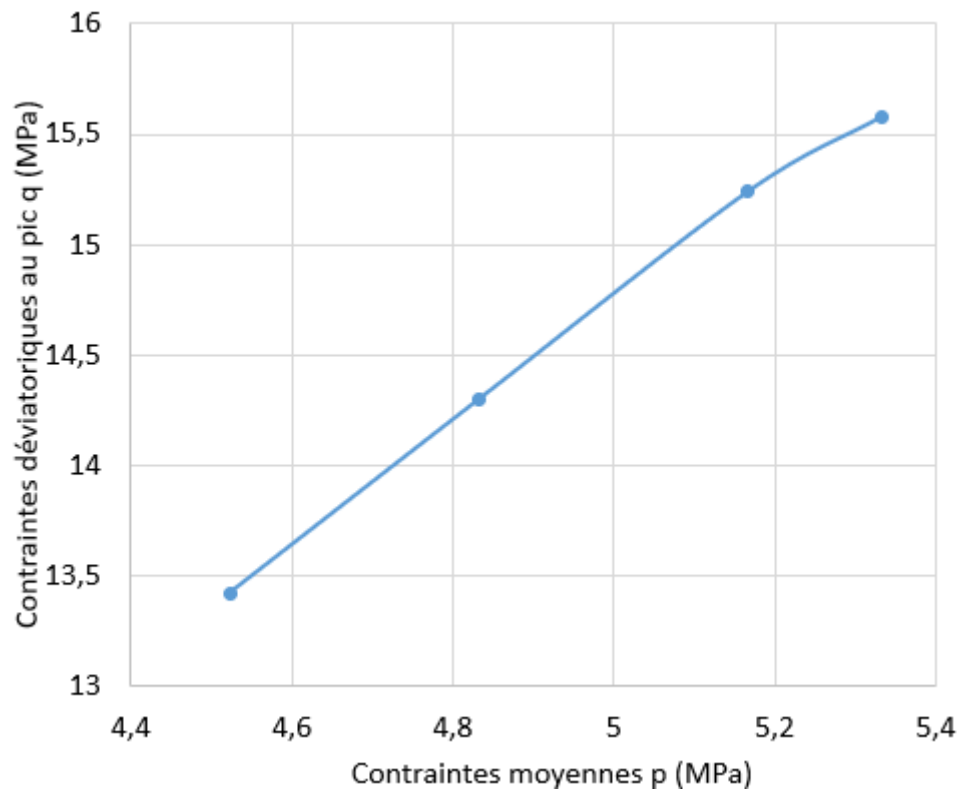


Figure III.56. Plan q, p de la grave-ciment, $E = 20$ GPa

Les figures III.57 à III.60 montrent les variations des propriétés mécaniques de la grave en fonction du module d'élasticité des particules de mâchefers.

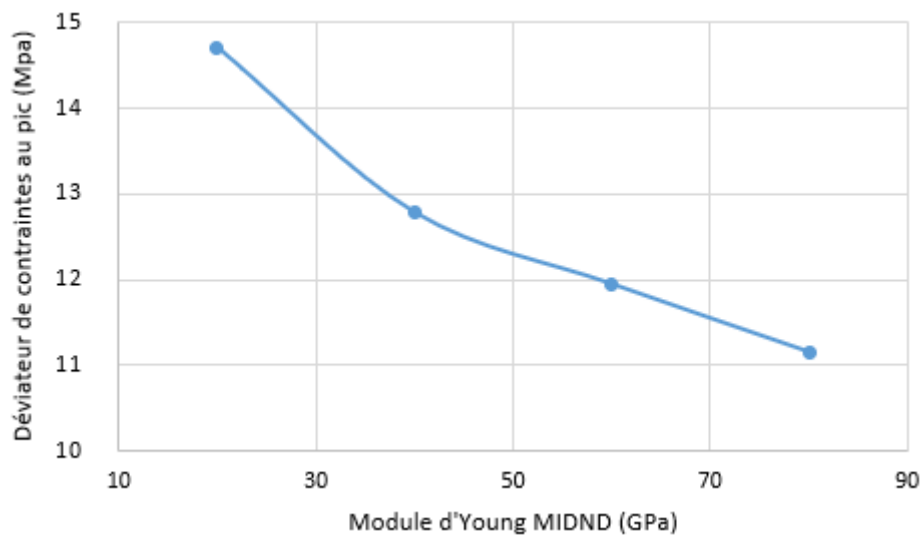


Figure III.57. Déviateur de contraintes au pic de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND

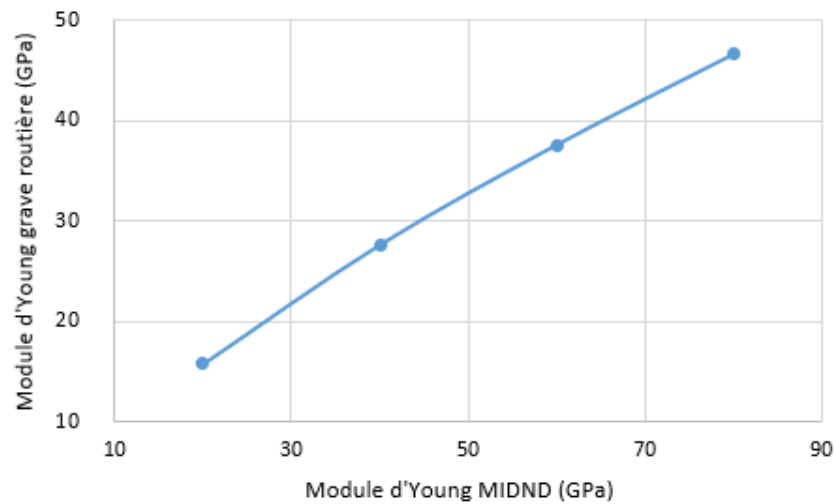


Figure III.58. Module d'Young de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND

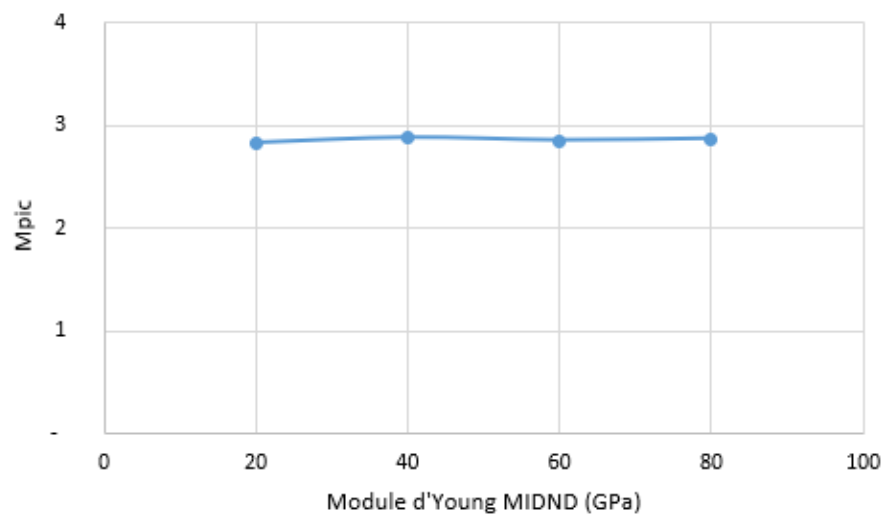


Figure III.59. Facteur M_{pic} de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND

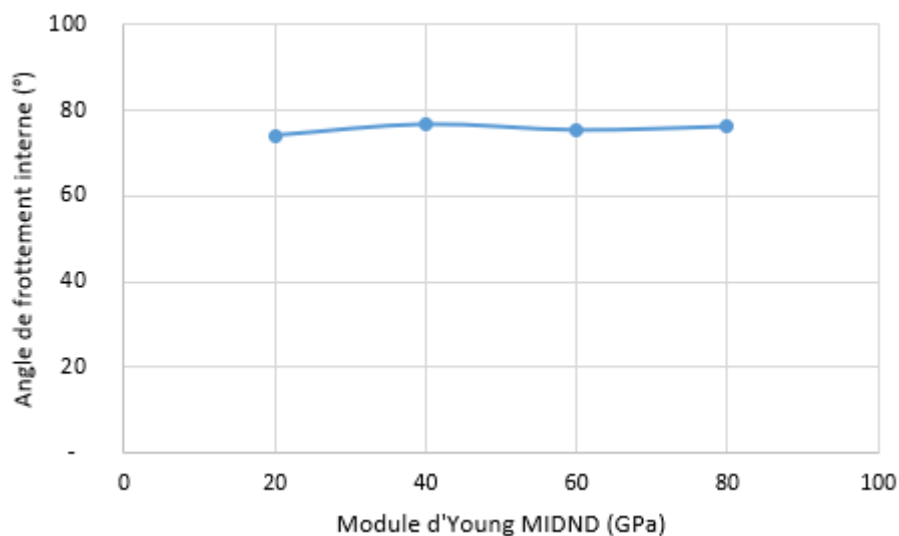


Figure III.60. Angle de frottement interne de la grave routière en fonction du module d'Young des MIDND

III.3.4. Comparaison et validation des résultats de la modélisation avec quelques résultats expérimentaux de [BEC 07]

La répartition granulométrique de la modélisation développée dans cette thèse est celle utilisée par [BEC 07]. 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 [BEC 07] avec l'ensemble des résultats de l'étude de sensibilité ($E_{\text{granulats}} = 20 - 80$ 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 [BEC 07] 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 [BEC 07] en termes de déviateur de contraintes, de coefficient M_{pic} et d'angle de frottement interne. Le tableau III.16 illustre cette comparaison avec des écarts relatifs faibles pour chacun de ces paramètres.

Tableau III.16. Comparaison entre quelques résultats expérimentaux [BEC 07] et issus de la modélisation (Présente thèse)

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

III.4. Etude de l'influence du maillage

A l'échelle sub-mesoscopique, le plus petit élément fini a une arête de 1 mm. Le maillage utilisé à cette échelle est fait avec une résolution de 1 mm. Si le plus petit élément fini est égal au plus petit grain, cela pourrait poser un problème d'influence d'un maillage plus fin qui ferait que chaque diamètre de 1 mm, se voit composé de plusieurs éléments finis (4, 16, 32, etc.). Nous nous sommes proposés alors de raffiner notre maillage en travaillant en 2D avec la même composition que celle utilisée en 3D. L'idée est, à partir d'une modélisation 2D de 40*40 éléments, d'arriver à développer un modèle 2D avec la même structure contenant 80*80 éléments. Les réponses des deux modèles sont ensuite comparées pour voir l'influence du maillage.

III.4.1. Développement d'une modélisation 2D

Nous sommes partis sur la même composition en termes de pourcentages de granulats et de matrice que celle utilisée en 3D. Nous avons donc :

- Matrice : 251 éléments soit 15,68 % ;
- Squelette granulaire : 1349 soit 84,32 %.

L'objectif est de passer de 40*40 à 80*80 éléments finis dans la modélisation 2D. Pour cela, une sous-routine avec Excel a été développée afin de modifier le fichier de données d'entrée du programme Abaqus pour affiner le maillage. Les maillages 40*40 et 80*80 éléments finis sont parfaitement superposables (figures III.61 et III.62).

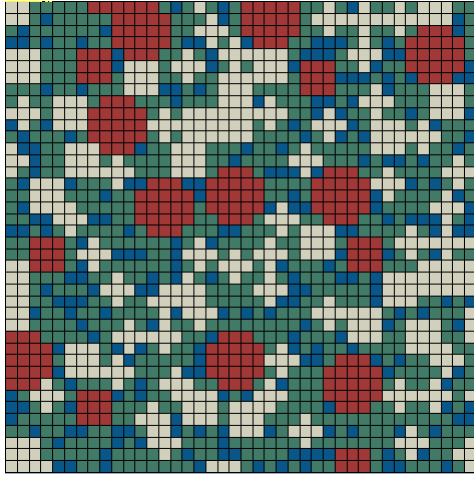


Figure III.61. Maillage hétérogène 2D avec 40*40 éléments finis

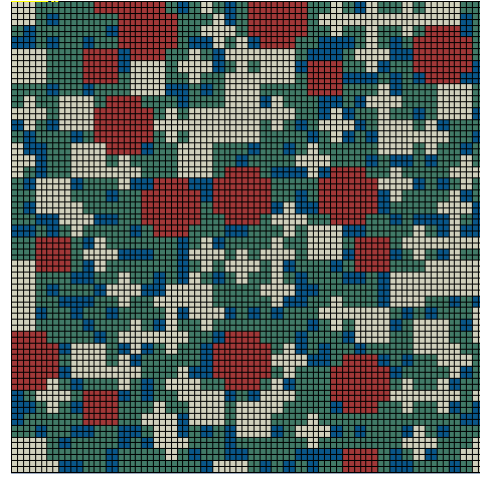


Figure III.62. Maillage hétérogène 2D avec 80*80 éléments finis

III.4.2. Simulations effectuées et comparaison des résultats

Avec les deux maillages obtenus, nous avons simulé une compression uniaxiale avec les mêmes conditions aux limites pour les deux VER. En 2D, concernant les conditions aux limites, nous avons bloqué le déplacement horizontal sur une des arêtes verticales (parallèle à l'axe de la sollicitation). L'autre arête verticale est la seule arête libre. La figure III.63 montre les conditions aux limites affectées au VER de 40*40 éléments finis. Nous avons appliqué les mêmes conditions aux limites sur le VER de 80*80 éléments finis. Les simulations sont effectuées à une vitesse de déformation de $2,5E^{-6} s^{-1}$.

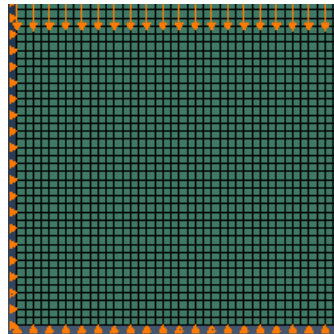


Figure III.63. Conditions aux limites avec 40*40 éléments finis

Le calcul des contraintes peut suivre la logique suivante :

- En 3D, la contrainte se calcule en faisant en divisant la somme des forces par la surface de la face sur laquelle s'applique l'effort. La surface en question est obtenue par $40000 * L$, L étant le nombre d'éléments cubiques linéaires multiplié par l'arête d'un élément cubique linéaire. Les unités de longueur étant prises en compte ici en micromètres.

Ce qui donne, avec RF les forces de réaction nodales :

$$\text{Contrainte} = \frac{\sum RF}{40000 * 40 * 1000} \quad [III.50]$$

- En 2D, la contrainte est calculée de la même manière à la différence que nous n'avons qu'un seul plan (une seule rangée de nœuds), donc : Somme des RF divisée par $(40000 * L)$ avec L est égale à l'unité. Ainsi :

$$\text{Contrainte} = \frac{\sum RF}{40000 * 1} \quad [III.51]$$

Deux types d'éléments finis peuvent être testés pour les simulations :

- éléments finis CPS4R en contraintes planes ;
- éléments finis CPE4R en déformations planes.

Nous présentons ici les résultats obtenus en déformations planes car le critère que nous utilisons étant exprimé en contraintes (modèle de Rankine), nous avons préféré ne pas conserver l'hypothèse de contraintes planes et avons privilégié celle des déformations planes. Les courbes obtenues sont montrées à la figure III.64.

Les modules d'Young et résistances au pic obtenus avec les maillages de 40*40 et de 80*80 éléments finis sont donnés au tableau III.17. Les écarts relatifs y sont donnés également. L'écart entre les maillages 40*40 et 80*80 est assez faible, en tout cas il n'est en rien comparable à l'écart 2D/3D. Par conséquent, le fait qu'en 3D le diamètre de grain le plus petit soit égal au plus petit élément fini ne semble pas être influant.

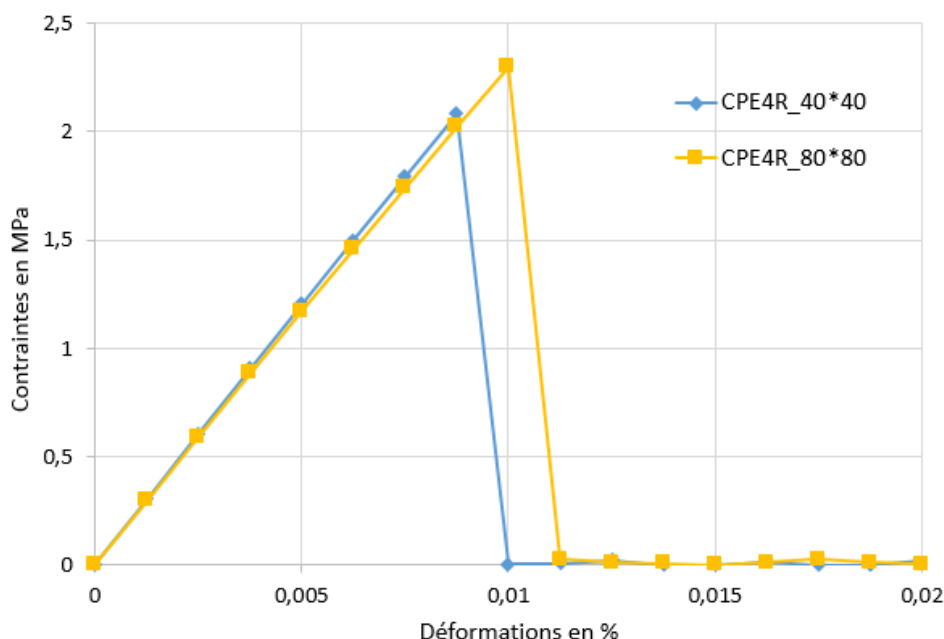


Figure III.64. Courbes contraintes-déformations des maillages 40*40 et 80*80 éléments CPE4R

Tableau III.17. Comparaison entre 40*40 et 80*80 éléments CPE4R en déformations planes

	Module d'Young en GPa	Résistance au pic de contraintes en MPa
40*40 éléments	24,07	2,91
80*80 éléments	23,45	2,87
Ecart relatif (%)	2,60	9,33

III.5. La prise en compte de la porosité dans le VER 2D

III.5.1. Définition d'une porosité explicite

En 3D, les simulations sont effectuées avec une porosité de la matrice prise en compte dans les propriétés mécaniques grâce aux résultats de [BER 12]. Dans ce qui suit, nous avons représenté de façon explicite cette porosité. La porosité estimée pour 3% de ciment dans la grave routière représente 71,88 % de la « matrice » pour un temps d'hydratation long ($\alpha = 0,83$). Si on enlève

de ce pourcentage la porosité initiale de la pâte de ciment de [BER 12], la porosité explicite est de 54 %.

En 2D, la composition initiale du VER est la suivante :

- matrice : 251 éléments finis, soit 15 % ;
- squelette granulaire : 1349 éléments finis, soit 85%.

La porosité externe représente 54% de la matrice c'est à dire que le VER 2D est composé finalement de :

- granulats : 1349 éléments CPE4R soit 84,32% du VER ;
- pâte de ciment : 115 éléments CPE4R soit 7,18% du VER ;
- porosité explicite : 136 éléments CPE4R soit 8,5% du VER.

Pour la porosité, de faibles propriétés élastiques ont été considérées à savoir un module d'Young de 50 MPa et un coefficient de Poisson de 0,495. Les propriétés mécaniques de la pâte de ciment sont obtenues à partir des résultats de [BER 12] avec une porosité initiale de 17,6 % et sont données au tableau III.18.

Tableau III.18. Caractéristiques mécaniques définissant le 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	25,87	0,188	1,139	0,165	0,246	1,293

Pour les propriétés mécaniques des granulats, la démarche suivante a été adoptée :

- seuls les granulats de diamètre 1 et 3 mm sont connectés ;
- nous avons considéré que dans une direction nous avons un assemblage en série de granulats et de pâte de ciment ;
- dans une direction, les granulats 1 et 3 sont notés $G_{1,3}$ et leur pourcentage se calcule par :

$$\% G_{1,3} = \sqrt[3]{(\% G_{1,3,5} - \% G_5)} \quad [\text{III.52}]$$

Avec G_5 : granulats de diamètre 5 mm
- le reste sera la pâte à savoir (on met de côté les granulats de diamètre 5) :

$$\% \text{ Pâte de ciment} = 100 - \% G_{1,3} \quad [\text{III.53}]$$
- le module homogénéisé, E_{hom} , de l'assemblage (pâte+diamètre1+diamètre3) est donné par:

$$\frac{1}{E_{\text{hom}}} = \frac{\% G_{1,3}}{E_{\text{granulats}}} + \frac{\% \text{ Pâte}}{E_{\text{pâte}}} \quad [\text{III.54}]$$

→ $E_{\text{hom}} = 65,57 \text{ GPa}$;
- la résistance en traction de la pâte est la résistance du maillon faible : $f_0 = 1,139 \text{ MPa}$.

III.5.2. Simulations effectuées et résultats obtenus

Nous avons simulé en déformations planes une compression uniaxiale avec les mêmes conditions aux limites pour les deux VER (figure III.63). Les résultats obtenus sont montrés à la figure III.65. Les modules d'Young et résistances au pic obtenus avec les porosités implicite et explicite sont donnés au tableau III.19. Pour les comparaisons porosité explicite/implicite, l'écart est assez faible. Ce qui valide les résultats obtenus en 3D avec une porosité prise en compte de façon implicite dans les propriétés mécaniques de la pâte de ciment.

Tableau III.19. Comparaison des VER avec porosités implicite et explicite en déformations planes

	Module d'Young en GPa	Résistance au pic de contraintes en MPa
Porosité implicite	24,07	2,08
Porosité explicite	24,69	2,35
Ecart relatif (%)	2,49	11,96

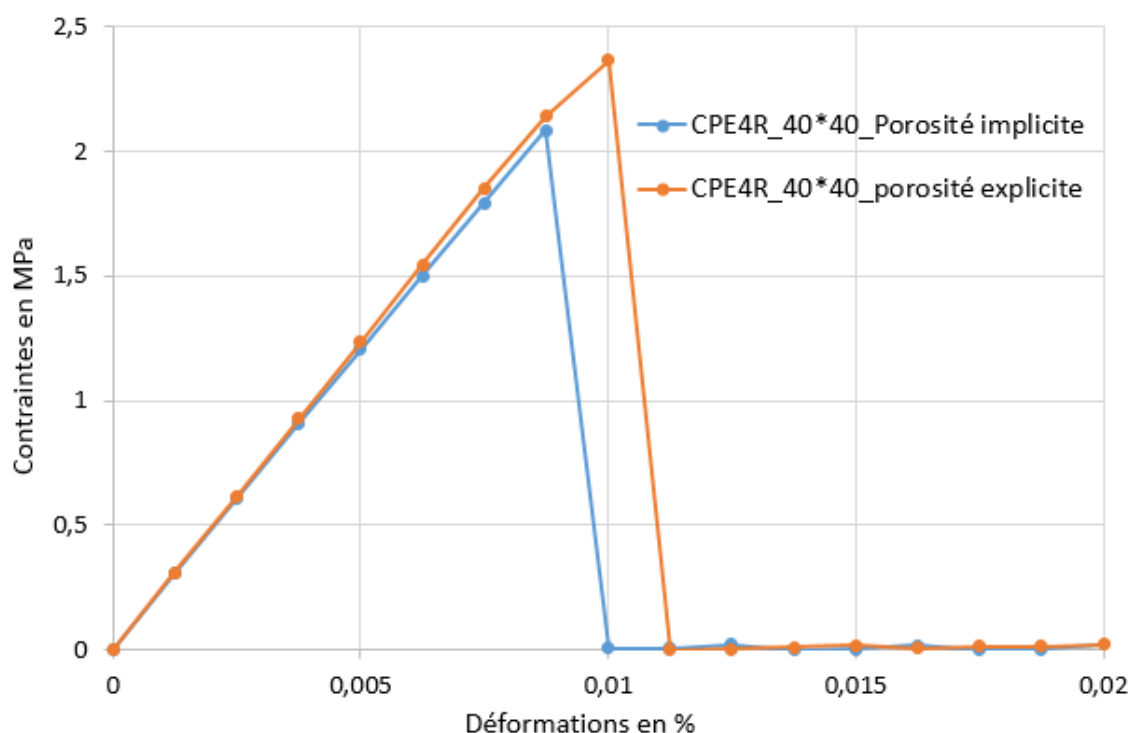


Figure III.65. Courbes contraintes-déformations des VER avec porosités implicite et explicite en déformations planes

III.6. Discussions

La formulation sur laquelle nous sommes partis correspond à la courbe granulométrique moyenne du fuseau retenu pour les graves routières. Cette modélisation est générale et n'est pas valable que pour les MIDND.

La modélisation numérique 3D mise en place a permis de déterminer les paramètres mécaniques caractérisant la grave de MIDND traités avec 3% de ciment. Les simulations numériques ont permis d'avoir un angle de frottement interne de 76,07° correspondant à un facteur M_{pic} de 2,87. [BEC 07] a trouvé un angle de frottement interne de l'ordre de 54° pour les MIDND non traités. [HUN 11] a évalué l'angle de frottement interne des MIDND non-traités à 58,26°. Tous les deux justifient la valeur élevée de l'angle de frottement interne par le fait que le matériau granulaire est composé de grains anguleux bien gradués. Ils sont en phase avec [PRA 95]. La valeur de l'angle de frottement interne trouvé par [BEC 07] a évolué jusqu'à 78,46° avec un traitement à 3 % de ciment. L'écart relatif calculé entre le résultat expérimental de [BEC 07] et celui obtenu en termes d'angle de frottement interne est de 3,04 %, ce qui est acceptable en termes de validation de notre modèle numérique. Le traitement à 3% de ciment a donc influé de façon significative sur la valeur de l'angle de frottement interne des MIDND. L'ordre de grandeur de l'angle de frottement obtenu est comparable aux angles de frottement obtenus sur

des graves routières [HOR 98]. La valeur élevée obtenue confère au matériau une bonne capacité portante, le compactage initial renforçant la stabilité du matériau.

Notre modèle numérique de grave de mâchefers traités au ciment a permis de constater entre autres que les paramètres mécaniques varient sensiblement avec le degré d'hydratation de la pâte de ciment. Qu'il s'agisse du module d'Young, du coefficient de Poisson, de la résistance en compression-traction au pic, et du déviateur au pic de contraintes, les valeurs obtenues décroissent avec le degré d'hydratation.

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. Les effets de serrage et de désenchevêtrement entraînent des phénomènes irréversibles importants. Le phénomène de dilatance que nous avons observé est d'autant plus prononcé que la pression de confinement effective est faible. Ces phénomènes caractérisent les matériaux granulaires denses.

A différentes pressions de confinement effectives (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa et 200 kPa), le comportement de la grave de mâchefers traités à 3% de ciment 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]. Ils sont proches des angles de dilatance du sable et du gravier [PRA 95]. Pour un même degré d'hydratation, les angles de dilatance que nous avons trouvés varient de façon insignifiante avec la pression de confinement. La dilatance diminue lorsque la pression de confinement effective augmente, constat conforté par les essais expérimentaux de [HUN 11]. Des relations importantes entre les paramètres mécaniques et le degré d'hydratation ont été établies aussi bien à l'échelle de la micro-grave-ciment (μ GC), qu'à l'échelle de la grave-ciment (GC) proprement dite. [BEC 07] a effectué plusieurs expérimentations sur mâchefers non traités et sur mâchefers traités au ciment. Pour le cas des mâchefers traités à 3% de ciment, des essais triaxiaux expérimentaux ont été effectués à 28 jours. Nous avons effectué des simulations numériques d'essais triaxiaux sur mâchefers traités à 3% de ciment avec un temps d'hydratation long ($\alpha=0,83$) et nos résultats sont comparables à ceux de [BEC 07].

Selon leurs origines et leurs réelles compositions, les MIDND peuvent avoir des modules d'Young qui varient d'un site de production à un autre. L'étude de sensibilité sur le module élastique montre que lorsque le module des MIDND diminue : le module d'Young de la grave routière diminue, le déviateur de contraintes au pic et la résistance au pic pour la grave routière augmentent. Il a également été constaté que lorsque le module d'Young des MIDND varie : l'angle de frottement interne et le facteur M_{pic} restent quasi-stables. Cela montre que le module d'Young des particules de MIDND n'interfère pas sur les caractéristiques de portance de la grave routière traitée à 3 % de ciment.

III.7. Conclusion

La stratégie de modélisation mise en place a permis de mener des simulations numériques 3D de tests multiaxiaux, ce qui est rare dans la littérature internationale et ainsi de déterminer les paramètres mécaniques caractérisant une grave traitée avec 3% de ciment. Cette modélisation est censée fonctionner pour toute grave routière, elle est donc générale et n'est pas valable que pour les MIDND.

Les caractéristiques mécaniques habituellement déterminées expérimentalement ont été retrouvées avec la modélisation numérique multi-échelle hiérarchique mise en place dans ce

chapitre. La grave routière à base de MIDND traitée à 3% de ciment offre donc des propriétés mécaniques comparables à celles des graves routières conventionnelles traitées au ciment.

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. Finalement on retient plutôt 20 GPa pour les granulats de MIDND étudiés dans ce travail.

L'idée de passer de MIDND-déchets à MIDND-matériaux longuement développée dans les expérimentations sur ces types de matériaux est donc consolidée avec la modélisation mise en place.

Chapitre IV - Détermination du comportement viscoélastique d'une grave routière à base de MIDND traitée au bitume par modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelle

IV.1. Introduction

Les matériaux constitutifs des couches de structures routières doivent présenter des caractéristiques mécaniques leur permettant de remplir pleinement leurs fonctions dans la structure de la chaussée. Pour atteindre un tel objectif, ils doivent être traités par un liant hydraulique (ciment par exemple) ou hydrocarboné (bitume). Le traitement au ciment permet d'obtenir de grandes performances en termes de raideur ou de résistance mais se caractérise par leur fragilité et leur sensibilité à la fissuration.

L'utilisation de liant bitumineux peut réduire ce risque particulier, mais le comportement des matériaux routiers avec ce type de liant doit être connu avec précision dans une procédure de conception basée sur la performance. Plus particulièrement, les liants bitumineux présentent une sensibilité à la température et leur comportement passe de fragile et sensible à la fissuration à basse température, jusqu'à très souple puis sensible à la déformation à haute température.

L'enrobé bitumineux hérite des caractéristiques viscoélastiques du liant qu'il contient. Ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température. Il entre dans la catégorie des matériaux viscoélastiques et thermoplastiques [FRA 77]. Dans la littérature, les matériaux bitumineux sont généralement considérés comme étant homogènes, isotropes, viscoélastiques, linéaires et thermo-susceptibles [BEN 98].

Bien que sa structure composite granulaire confère un caractère hétérogène à l'enrobé utilisé couramment sur chaussées, on peut faire l'hypothèse d'homogénéité macroscopique à l'échelle d'une couche de chaussée.

Lorsque les charges sont appliquées très lentement, le matériau bitumineux présente un comportement à prédominance fluide visqueux. Lorsqu'elles sont appliquées très rapidement, il présente un comportement pratiquement élastique. Entre ces deux cas de figure extrêmes, il présente un comportement viscoélastique dont la linéarité dépend du niveau de déformation. On considère que les enrobés bitumineux présentent un domaine de sollicitation pour lequel leur comportement est linéaire (figure IV.1). C'est dans le domaine de linéarité que sont réalisées les mesures du module des matériaux bitumineux. Ceci nécessite d'appliquer des petites déformations.

L'hypothèse d'un comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux suppose la validité du principe de superposition de Boltzmann. Ce principe suppose que la réponse d'un matériau à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations élémentaires.

La température est un paramètre déterminant sur le comportement du matériau bitumineux. En effet, comme le liant entre dans sa composition, l'enrobé bitumineux est thermo-susceptible, c'est à dire que ses propriétés dépendent fortement de sa température. A température basse, l'enrobé possède sous sollicitation usuelle (trafic routier) une rigidité élevée et il peut se montrer fragile. A température élevée, il présente un module faible et une déformabilité importante. Ces propriétés peuvent être responsables du phénomène d'orniérage qui peut être accentué par une faible vitesse de sollicitation.

Selon le niveau de sollicitation, les matériaux bitumineux présentent trois types de comportements décrits par la figure IV.1.

- Pour un niveau de sollicitations fortes, le comportement est fortement non-linéaire.
- Pour un chargement comprenant quelques centaines de cycles et des déformations faibles ($\leq 10^{-4}$), le comportement est viscoélastique linéaire.
- Lors de chargement de plusieurs milliers de cycles et sous faibles déformations, la fatigue intervient avec l'apparition de phénomènes d'endommagement plastique.

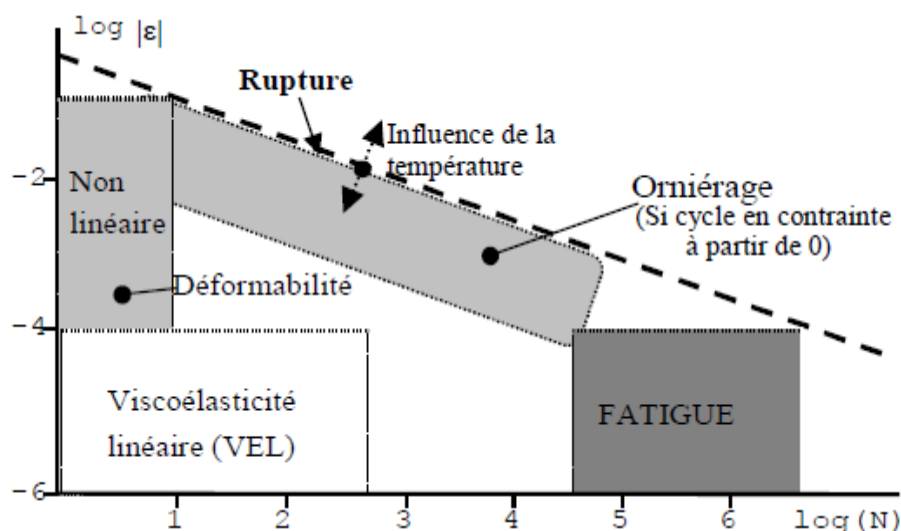


Figure IV.1. Comportement des matériaux bitumineux en fonction du niveau de sollicitation [BAA 02]

Il est développé dans ce chapitre une stratégie de modélisation similaire à celle développée au chapitre 3. C'est une modélisation multi-échelle hiérarchique des graves traitées avec un liant hydrocarboné qui est le bitume pur étudié expérimentalement par [NGU 08]. Il s'agit ici de déterminer les propriétés thermo-rhéologiques de notre VER de grave-bitume à l'échelle mesoscopique en se basant sur les caractéristiques tirées des modélisations sur micro-grave-bitume à l'échelle sub-mesoscopique (Micro-Grave-Bitume : μ GB). Les propriétés thermo-rhéologiques de notre matériau sont déterminées dans le domaine de la viscoélasticité linéaire (VEL) à faibles de déformations par des tests de relaxation de contraintes.

IV.2. Stratégie de modélisation

Notre modélisation se base sur une grave dont la formule de recomposition granulométrique est la suivante :

- classe 0/6: 47,5 % ;
- classe 6/14: 35,5 % ;
- classe 14/25: 17 %.

La fraction granulaire 0/25 des granulats de MIDND est trop étendue pour être considérée dans son intégralité dans une modélisation aux Eléments Finis 3D car cela conduirait à un nombre de grains et de degrés de liberté trop importants. Nous devons donc considérer deux échelles et adopter une stratégie de modélisation hiérarchique : une échelle sub-mesoscopique (classe 0/6 : 47,5%) et une échelle mesoscopique (classe 6/25 : 52,2%). La détermination des propriétés thermo-rhéologiquement simples de la grave-bitume (GB) est l'objectif à atteindre et la stratégie de modélisation adoptée est décrite à la figure IV.2.

La relaxation de contraintes est une des trois méthodes expérimentales d'analyse de la viscoélasticité linéaire, avec le fluage et les techniques dynamiques. La relaxation est une propriété non instantanée : lorsqu'on impose un échelon de déformation, du fait du caractère viscoélastique du matériau, la contrainte met un certain temps à atteindre sa valeur finale. Le matériau retourne progressivement à un état plus stable. La relaxation, comme la viscoélasticité, fait intervenir les notions de résistance à l'écoulement, de viscosité, d'amortissement. L'étude de ce mode de déformation courant, dépendant du temps, peut être réalisée en traction (compression) ou en cisaillement, au moyen d'un visco-analyseur, à différentes températures.

Dans cette thèse, la relaxation de contraintes est simulée en imposant un déplacement de compression sur l'une des faces du VER ; les déplacements sont évités sur la face opposée. Les autres faces sont laissées libres comme illustré sur la figure IV.3.

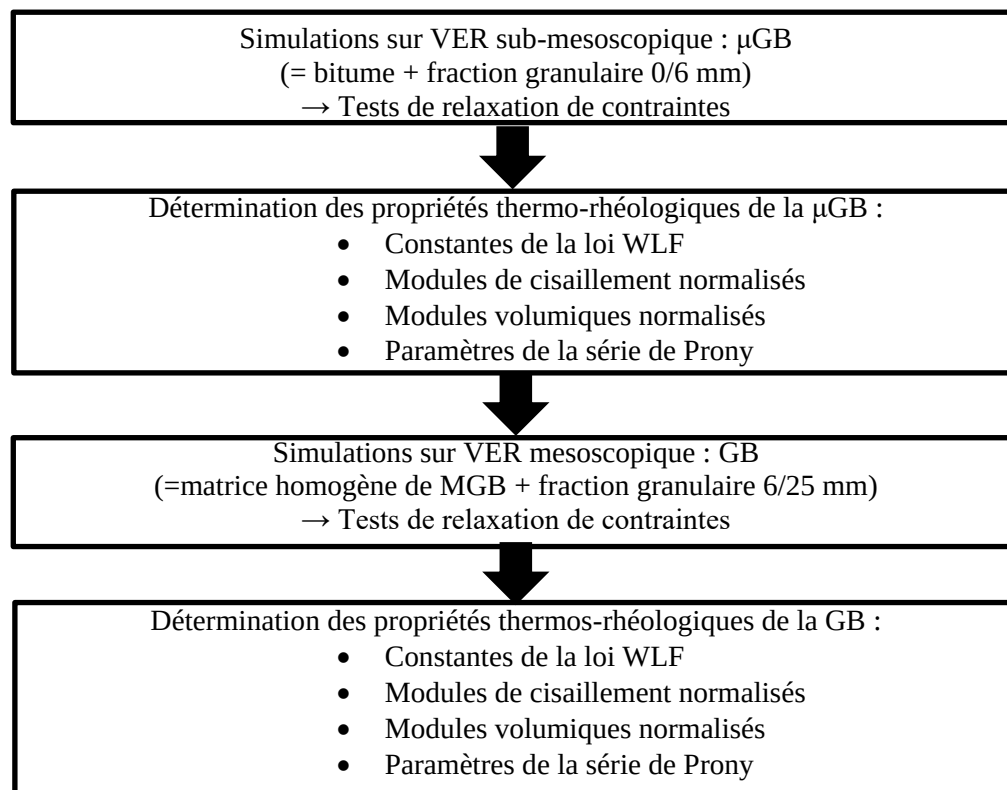


Figure IV.2. Stratégie de modélisation hiérarchique développée

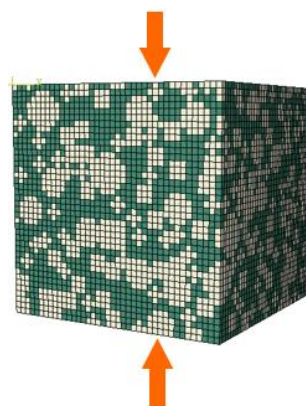


Figure IV.3. Conditions aux limites pour la relaxation de contraintes en compression uniaxiale

IV.2.1. Développement en séries de Prony

Le comportement mécanique des phases viscoélastiques à chaque échelle est pris en compte en développant le module de cisaillement G et le module volumique K sous la forme de séries de Prony :

$$G_R(t) = G_0 \left(1 - \sum_{k=1}^N \bar{g}_k^p (1 - e^{-t/\tau_k}) \right) \quad [IV.1]$$

$$K_R(t) = K_0 \left(1 - \sum_{k=1}^N \bar{k}_k^p (1 - e^{-t/\tau_k}) \right) \quad [IV.2]$$

Ces expressions montrent que le comportement du matériau peut être phénoménologiquement reproduit par des associations en parallèle de ressorts et d'amortissements en séries.

IV.2.2. Constantes de la loi WLF et modules de relaxation

IV.2.2.1. Définition du principe d'équivalence temps-température pour un matériau thermo-rhéologiquement simple

Le principe d'équivalence temps-température permet de préciser la dépendance à la température des fonctions (ou grandeurs) viscoélastiques linéaires. Si on considère le module de relaxation E à deux températures T et T_0 telles que $T > T_0$, à déformation constante, la contrainte relaxe plus vite à la température d'essai la plus élevée.

Ce principe stipule que le passage de T à T_0 (soit un changement de température) revient à multiplier l'échelle du temps par un facteur constant $a_{T \rightarrow T_0}$, que l'on voit aussi noté a_T (c'est le facteur de décalage illustré à la figure IV.4) tel que :

$$P(t, T) = P(t \cdot a_{T \rightarrow T_0}, T_0) \quad [IV.3]$$

Où P est la propriété considérée, par exemple le module d'Young.

Le facteur $a_{T \rightarrow T_0}$ est tel que : si $T > T_0$, alors $a_{T \rightarrow T_0} > 1$; si $T < T_0$ alors $a_{T \rightarrow T_0} < 1$; si $T = T_0$ alors $a_{T \rightarrow T_0} = 1$.

Nous ralentissons le temps à la température d'essai la plus élevée, et accélérons à la température la plus basse. De cette façon, nous pouvons obtenir une courbe maîtresse à une température de référence (égale dans ce travail à 0 °C). La loi WLF permet d'estimer la valeur de $a_{T \rightarrow T_0}$ (réécrit plus simplement a_T) :

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1 (T - T_{\text{réf}})}{C_2 + T - T_{\text{réf}}} \quad [IV.4]$$

Dans cette présente étude, l'expression se simplifie puisque $T_{\text{réf}} = 0$ °C.

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1 T}{C_2 + T} \quad [IV.5]$$

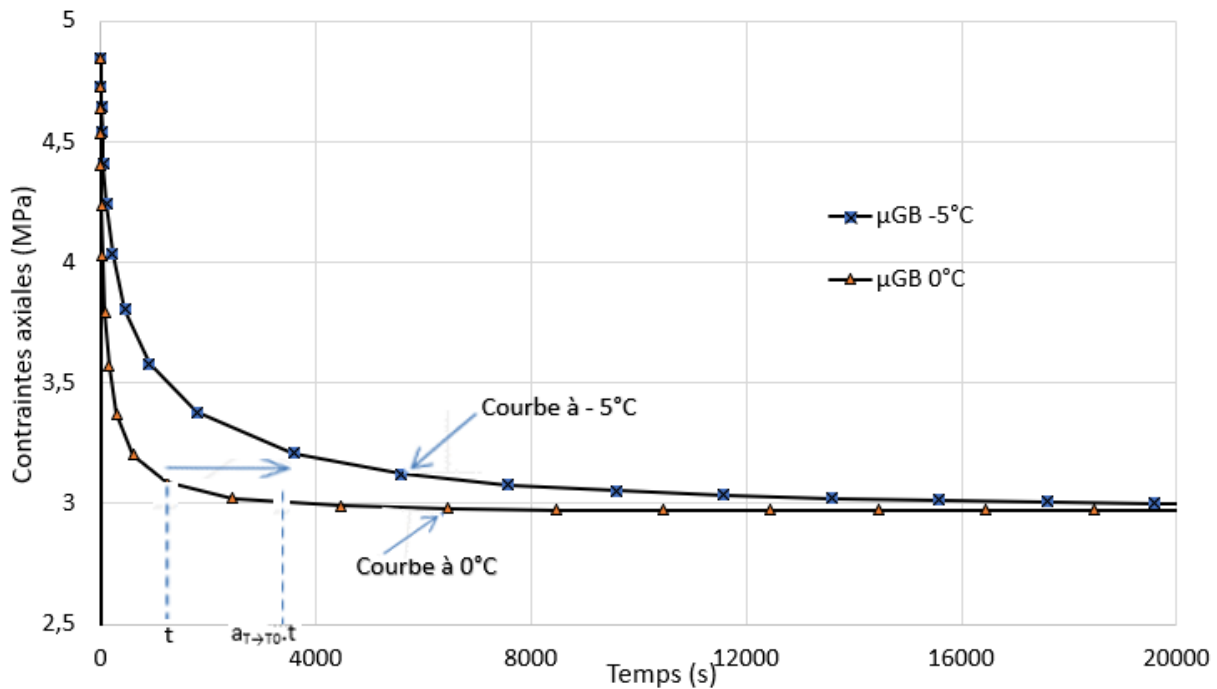


Figure IV.4. Principe d'équivalence temps-température d'essai

IV.2.2.2. Modules de relaxation normalisés

Le comportement de la grave-bitume est viscoélastique, c'est à dire que ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température. Ce comportement est décrit par la série de Prony dont les paramètres peuvent être obtenus avec les résultats de tests de relaxation de contraintes en fonction du temps. En chaque point de la courbe (chaque temps), nous avons la valeur de la contrainte. En divisant par la déformation totale appliquée, nous obtenons le module d'Young. Nous pouvons ainsi calculer la valeur du module de cisaillement et du module volumique normalisé correspondant à chaque temps. Il est requis, dans une simulation par Abaqus l'évolution des modules de relaxation normalisés en fonction du temps. Par ailleurs, les paramètres des séries de Prony peuvent se déterminer à partir des courbes de relaxation de contraintes par une approximation des moindres carrés non linéaires. Normalisé veut dire que chaque module « i » doit être divisé par le module initial. Les équations IV.6 et IV.7 donnent les expressions utilisées pour calculer les modules de relaxation en fonction de la constante du module de Young et du coefficient de Poisson en fonction du temps. Un simple test de relaxation des contraintes peut nous permettre de calculer ce coefficient de Poisson en fonction du temps. Cette évolution a été utilisée pour calculer les modules de relaxation G_R et K_R en fonction du temps. L'équation IV.8 donne l'expression utilisée pour calculer le coefficient de Poisson pour chaque temps de relaxation. La figure IV.5 illustre l'évolution du module élastique en fonction du temps à la température de référence. L'idée est qu'Abaqus comprenne que l'on quitte la valeur unitaire 1 pour atteindre une valeur constante du module de relaxation montrant que la relaxation des contraintes est entièrement réalisée.

$$G_R(t) = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad [IV.6]$$

$$K_R(t) = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad [IV.7]$$

$$\nu(t) = \frac{(l_0 - l)/l_0}{(L_0 - L)/L_0} \quad [IV.8]$$

Avec :

- l_0 et L_0 : Respectivement les arêtes initiales transversale et longitudinale du VER;
- l et L : Respectivement les arêtes finales transversale et longitudinale du VER.

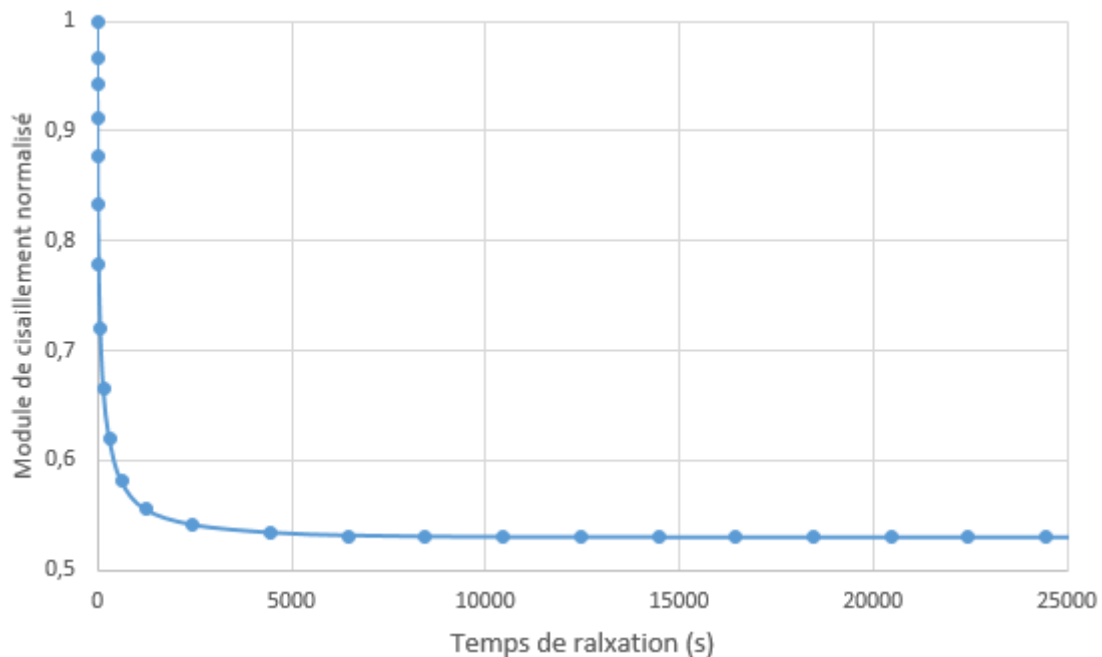


Figure IV.5. Exemple de courbe d'évolution du module de relaxation en fonction du temps à la température de référence de 0 °C

IV.3. Modélisations à l'échelle sub-mesoscopique

IV.3.1. Volume Élémentaire Représentatif sub-mesoscopique

Nous sommes partis sur la même composition du VER sub-mesoscopique que celle considérée au paragraphe III.2.1 (Tableau III.1).

La différence réside au niveau de la matrice qui ici, est bitumineuse. Nous avons donc 85 % de micro-granulats de MIDND et 15 % de bitume poreux en volume. Dans la génération de la structure, les granulats 0/6 mm sont décomposés en trois sous-classes :

- 0/2 : 41 % avec un diamètre moyen de 1 mm ;
- 2/4 : 31 %, avec un diamètre moyen de 3 mm ;
- 4/6 : 13 %, avec un diamètre moyen de 5 mm.

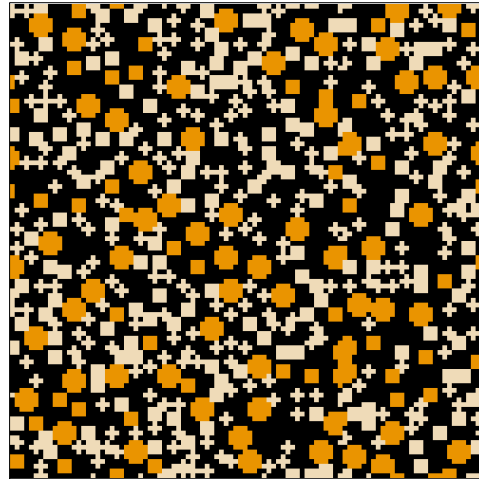


Figure IV.6. Image 2D de la micro-grave-bitume générée par une méthode du « Take and Place »

IV.3.2. Hypothèses sur les propriétés rhéologiques des matériaux

IV.3.2.1. Les granulats de MIDND

On considère que les granulats ont un comportement élastique linéaire isotrope dont les caractéristiques sont : $E = 80$ GPa et $\nu = 0,30$.

IV.3.2.2. La matrice bitumineuse poreuse

Le liant bitumineux considéré est celui de [NGU 08]. Ses caractéristiques sont données aux tableaux IV.1.

Tableau IV.1. Principales caractéristiques du bitume [NGU 08]

Grade du bitume	Nature	% fractions cristallisables	Pénétrabilité (1/10 mm)	TBA	Ip
50/70	Pur	4,61	61	48,4	-1,1

Le bitume est un matériau viscoélastique, c'est à dire que ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température. Dans le domaine élastique linéaire isotrope, les caractéristiques du bitume sont le module d'élasticité « E » et le coefficient de Poisson « ν ».

[TEH 12] a développé une modélisation numérique avec Abaqus d'un béton bitumineux dans laquelle des inclusions sont disposées de façon aléatoire dans une matrice bitumineuse. Le bitume en question est celui de [NGU 08]. Dans cette modélisation, le module d'élasticité du bitume est 37 fois plus faible que celui des inclusions. Partant de cette hypothèse, nous avons considéré dans notre modélisation un module de 2,162 GPa avec des granulats de MIDND de 80 GPa de module.

[NGU 08] a effectué un essai de rupture locale sur le bitume pur que nous considérons dans notre modélisation. En ajustant la courbe expérimentale et numérique force-déplacement qu'il a obtenu, il a déterminé le coefficient de Poisson sur la phase d'étirement et adopte une valeur de 0,49. Dans son essai de fluage sur barreau, [NGU 08] a remarqué ensuite que la déflexion dépend infinitésimalement du coefficient de Poisson. Nous avons donc considéré dans notre modélisation un coefficient de Poisson de 0,49. Les caractéristiques élastiques du bitume à l'échelle sub-mesoscopique sont données au tableau IV.2.

Tableau IV.2. Caractéristiques élastiques isotropes du bitume de l'échelle sub-mesoscopique

Grade du bitume	E (GPa)	ν
50/70	2,162	0,49

Le bitume est un matériau viscoélastique présentant un domaine de sollicitation pour lequel son comportement est linéaire. Le modèle le plus simple pour représenter le comportement viscoélastique linéaire de la matrice bitumineuse est le modèle de Maxwell généralisé. Ce modèle est constitué par l'association en parallèle de « n » éléments de Maxwell. Chaque élément est défini par un module de rigidité « E_i » et par un coefficient de viscosité « η_i » (figure IV.7).

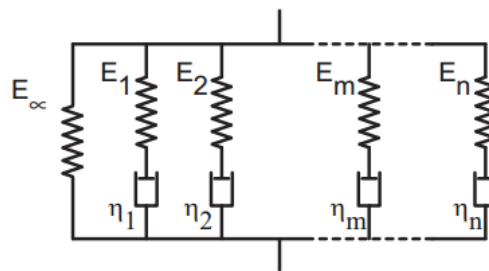


Figure IV.7. Représentation schématique du modèle viscoélastique de Maxwell généralisé

Un groupe d'éléments de Maxwell en parallèle représente un spectre discret de temps de relaxation, chaque temps « τ_i » étant associé à une rigidité spectrale « E_i » ($\tau_i = \eta_i/E_i$). Un ressort peut également être placé en parallèle au groupe de « n » éléments de Maxwell. Le module de relaxation de ce modèle s'écrit alors comme suit :

$$R(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad [IV.9]$$

Avec les $\tau_i = \eta_i/E_i$ qui représentent les temps de relaxation élémentaires

Sur la base des travaux de [NGU 08], les paramètres de la série de Prony considérés pour notre matrice bitumineuse sont donnés au tableau IV.4. Les constantes de la loi WLF utilisées dans notre modélisation sont déterminées par [NGU 08]. Elles sont données au tableau IV.3.

La modélisation de la micro-grave-bitume (μ GB) doit représenter explicitement les différentes phases caractéristiques de l'échelle sub-mesoscopique : bitume pur et squelette granulaire.

Tableau IV.3. Constantes de la loi WLF du bitume à 0 °C

Grade du bitume	C_1 (°C ⁻¹)	C_2 (°C)
50/70	32,5	213,3

Tableau IV.4. Série de Prony du bitume à 0 °C
Le module $E_\infty = 0,0623684 \text{ MPa}$ et $E_0 = 1924,96 \text{ MPa}$ [NGU 08]

i	g_i	k_i	τ_i (s)
1	0,1088	9,492E-11	4,52E-7
2	0,0882	4,709E-10	2,77E-6
3	0,1255	5,4692E-09	2,26E-5
4	0,0945	1,5743E-08	8,65E-5
5	0,1878	1,76529E-07	4,89E-4
6	0,1369	1,00584E-06	0,00381
7	0,1125	5,642E-06	2,6E2
8	0,0795	2,5857E-05	1,69E-1
9	0,0427	9,864E-05	1,2
10	0,0167	0,00033384	10,4
11	0,0045	0,00034365	39,5
12	0,002	0,000860468	221,2
13	0,0003	0,0089925	1650

IV.3.3. Tests de relaxation de contraintes en fonction du temps

IV.3.3.1. Détermination des courbes de relaxation de contraintes pour la micro-grave bitume

Les simulations sont menées sous Abaqus/Standard en conditions quasi-statiques. Pour des tests de relaxation de contraintes à des niveaux de déformations très bas (de l'ordre de 10^{-4}), la méthode implicite est souhaitable. Dans de tels cas Abaqus/Standard invoque le schéma d'intégration implicite automatiquement. Cette analyse est utilisée très souvent pour étudier les comportements dépendant du temps tels que la relaxation de contraintes, le fluage, le gonflement, la viscoélasticité et la viscoplasticité.

Il est possible de spécifier des incréments de temps fixes mais nous avons choisi l'incrément automatique. Dans ce cas, la taille de l'incrément de temps est limitée par la précision de l'intégration. Le paramètre de tolérance de précision spécifiée limite la variation du taux de déformation inélastique maximum autorisé sur un minimum donné par la relation ci-dessous :

$$\text{Tolérance} \geq (\dot{\epsilon}^{cr} | (t + \Delta t) - \dot{\epsilon}^{cr} | t) \Delta t \quad [\text{IV.10}]$$

Où « t » est le temps au début de l'incrément, « Δt » est l'incrément de temps, « $t + \Delta t$ » est le temps à la fin de l'incrément, et « $\dot{\epsilon}^{cr}$ » est la vitesse de relaxation de contrainte équivalente.

Nous avons simulé des tests de « relaxation de contraintes » sur la micro-grave-bitume. Ces tests permettront de déterminer les caractéristiques thermo-rhéologiques de la micro-grave-bitume (poids de la série de Prony, constantes de la loi WLF). Ces dernières sont les éléments caractéristiques de la matrice bitumineuse à l'échelle mesoscopique. Le même VER est utilisé avec non plus une force imposée, mais ici un déplacement imposé constant. Nous sortirons ensuite l'évolution de la contrainte dans la même direction en fonction du temps. Les tests de relaxation de contraintes sont effectués à différentes températures d'essais de sorte à avoir le même module pour chaque température (égal au module à 0°C). La figure IV.8 montre les courbes de relaxation de contraintes à -10, -5, 0, 5 et 10 °C.

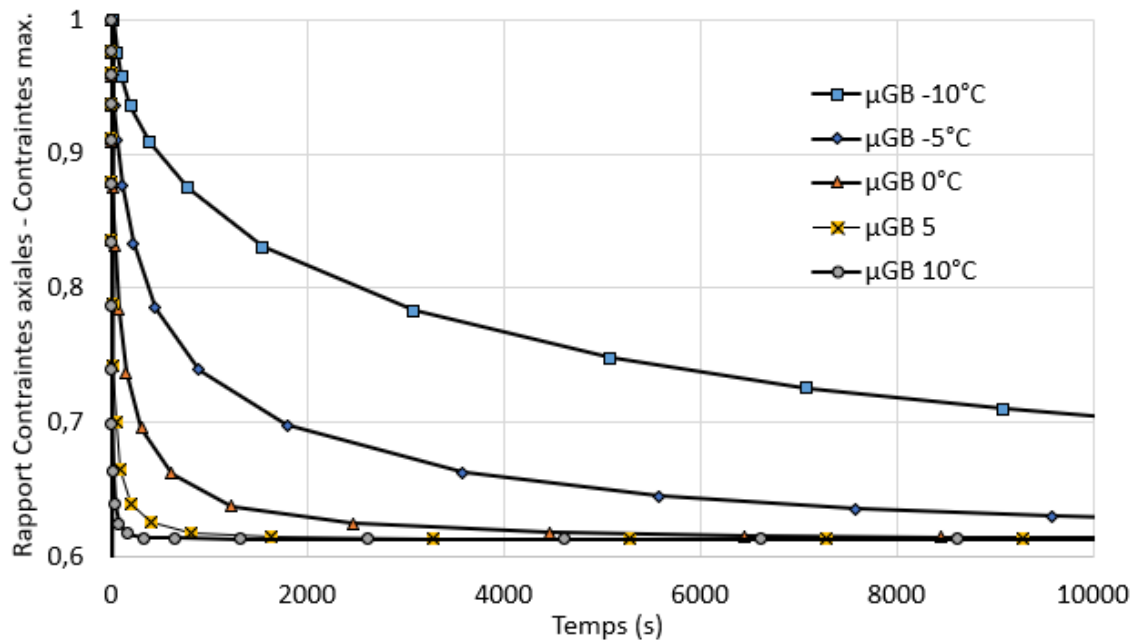


Figure IV.8. Courbes de relaxation de contraintes de la μ GB à différentes températures d'essais en fonction du temps

IV.3.3.2. Détermination des constantes de la loi WLF de la micro-grave bitume

A partir des courbes de relaxation de contraintes de la figure IV.8, nous pouvons estimer la valeur du coefficient a_T en regardant simplement le temps au pic de chaque courbe contrainte-temps (temps à la fin de la montée de la charge) puisque les simulations ont été réalisées de telle sorte que les modules d'Young à chaque température soient les mêmes, et égaux au module à la température de référence (0 °C). Ce coefficient identifié (a_T) permet de construire la courbe maîtresse. Connaissant le temps au pic de chaque simulation à une température d'essai donnée, le coefficient a_T peut être calculé selon l'équation IV.11.

$$a_T = \frac{T_{pic,i}}{T_{pic,réf}} \quad [IV.11]$$

Avec :

$T_{pic,i}$: temps au pic à une température d'essai « i »

$T_{pic,réf}$: temps au pic à une température d'essai égale à la température de référence

Le tableau IV.5 ci-dessous donne les valeurs de a_T :

Tableau IV.5. Valeurs de a_T issues des simulations de relaxation de contraintes à différentes températures d'essai

Température (°C)	Contrainte au pic (MPa)	Temps au pic (s)	a_T	Log (a_T)
-10	4,84113	24	40	1,60206
-5	4,84365	3,5	5,8333	0,7659
0	4,84162	0,6	1	0
5	4,84639	0,1	0,1667	-0,77815
10	4,8447	0,02	0.0333	-1,47712

Les valeurs de a_T du tableau IV.5 permettent de calibrer les constantes C_1 et C_2 de la loi WLF. Le meilleur calibrage est présenté dans le tableau IV.6. La figure IV.9 présente la comparaison entre les valeurs de $\log a_T$ obtenues.

Les valeurs des constantes sont donc calibrées sur les résultats des simulations au pic en contrainte et validées sur le restant de la courbe.

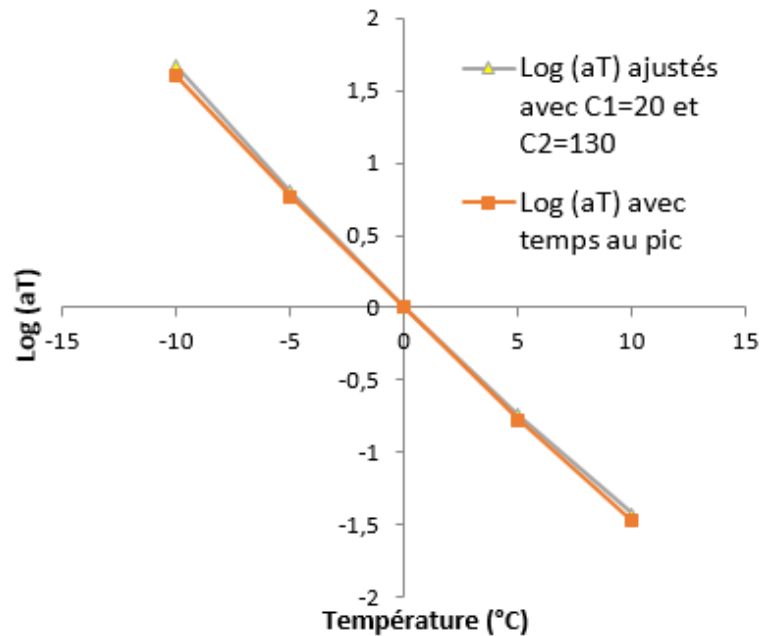


Figure IV.9. Comparaison des $\text{Log}(a_T)$

Tableau IV.6. Constantes ajustées de la loi WLF de la μGB à une température de référence de 0°C

$C_1 (^\circ\text{C}^{-1})$	$C_2 (^\circ\text{C})$
20	130

Les poids de la série de Prony et les temps de relaxation sont donnés au tableau IV.7.

Tableau IV.7. Série de Prony de la μGB à 0°C

i	g_i	k_i	τ_i (s)
1	0,22105	0	13,671
2	0	5,054E-02	132,05
3	0,24879	0	315,54

La figure IV.10 décrit les évolutions des modules de cisaillement normalisés en fonction du temps pour chaque température. Les modules de relaxation en fonction du temps sont décrits par les courbes d'évolution des figures IV.10 et IV.11. A partir de ces courbes, les paramètres des séries de Prony peuvent être identifiées par analyse inverse en utilisant une méthode des moindres carrés non linéaires.

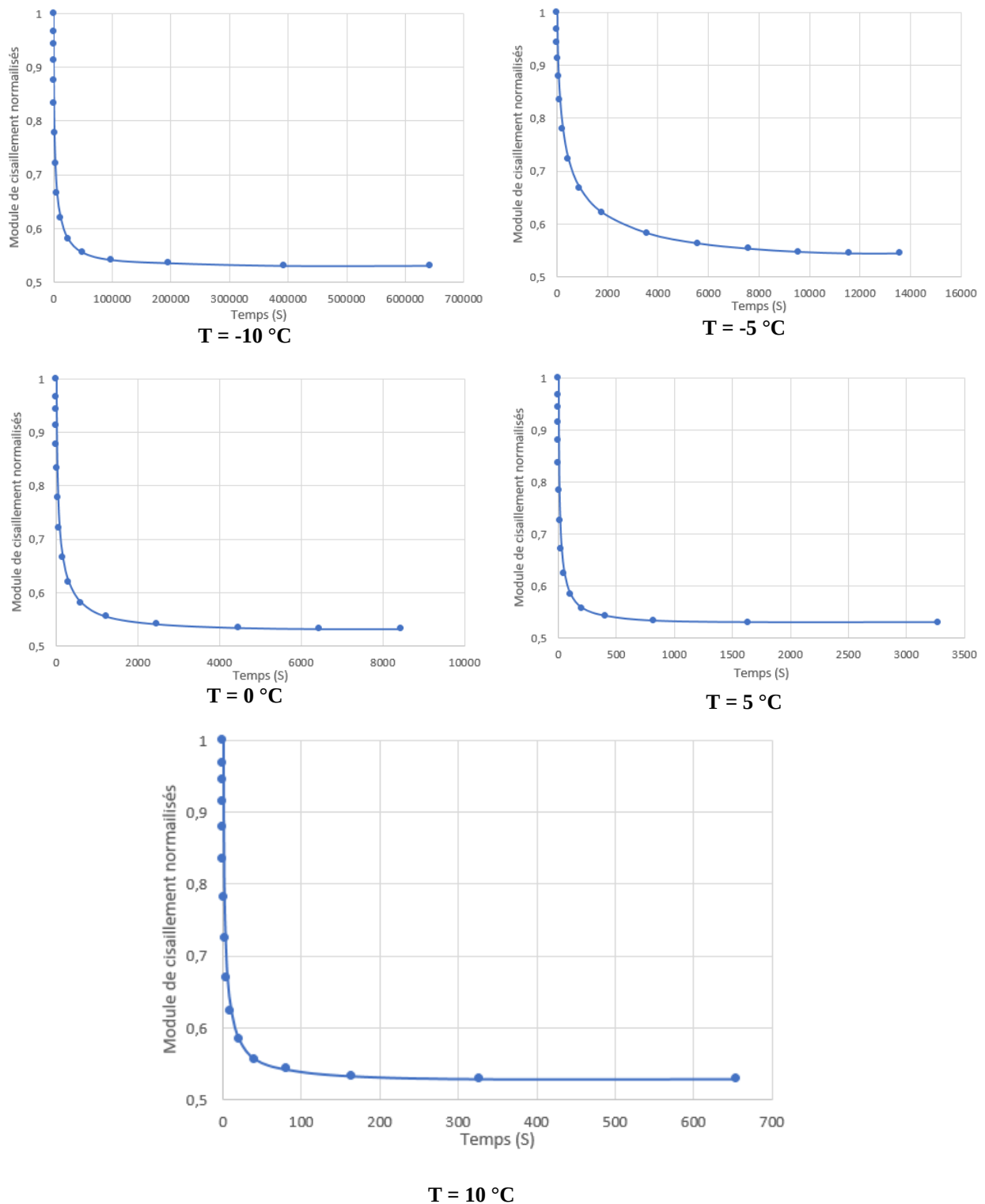


Figure IV.10. Modules normalisés de cisaillement de la μ GB à différentes températures

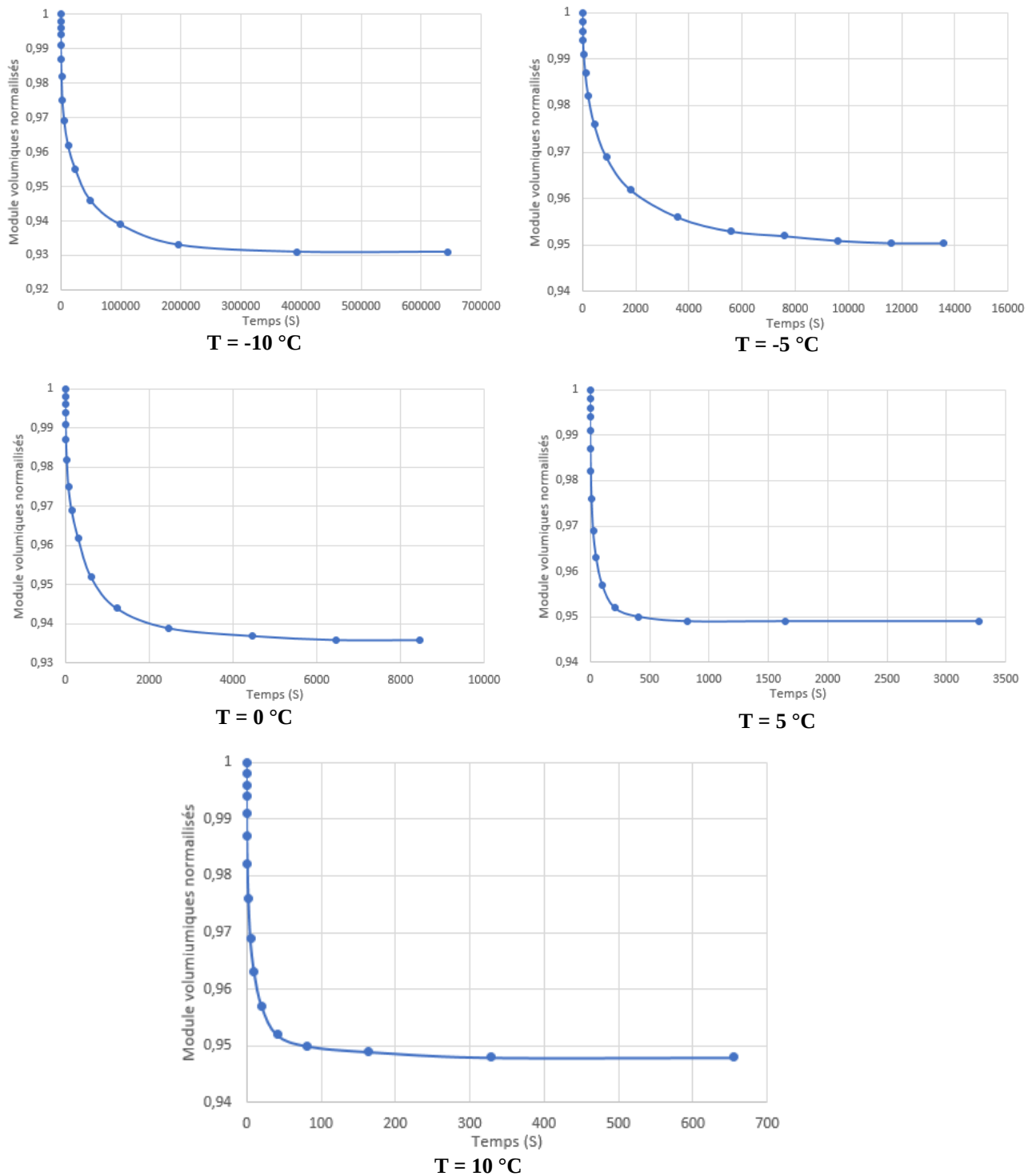


Figure IV.11. Modules volumiques de la μ GB à différentes températures

Nous parvenons finalement à vérifier qu'avec le facteur de décalage a_T utilisé pour toutes les températures et sur une échelle complète de temps, on obtient une seule et même courbe, la courbe maîtresse (figure IV.12).

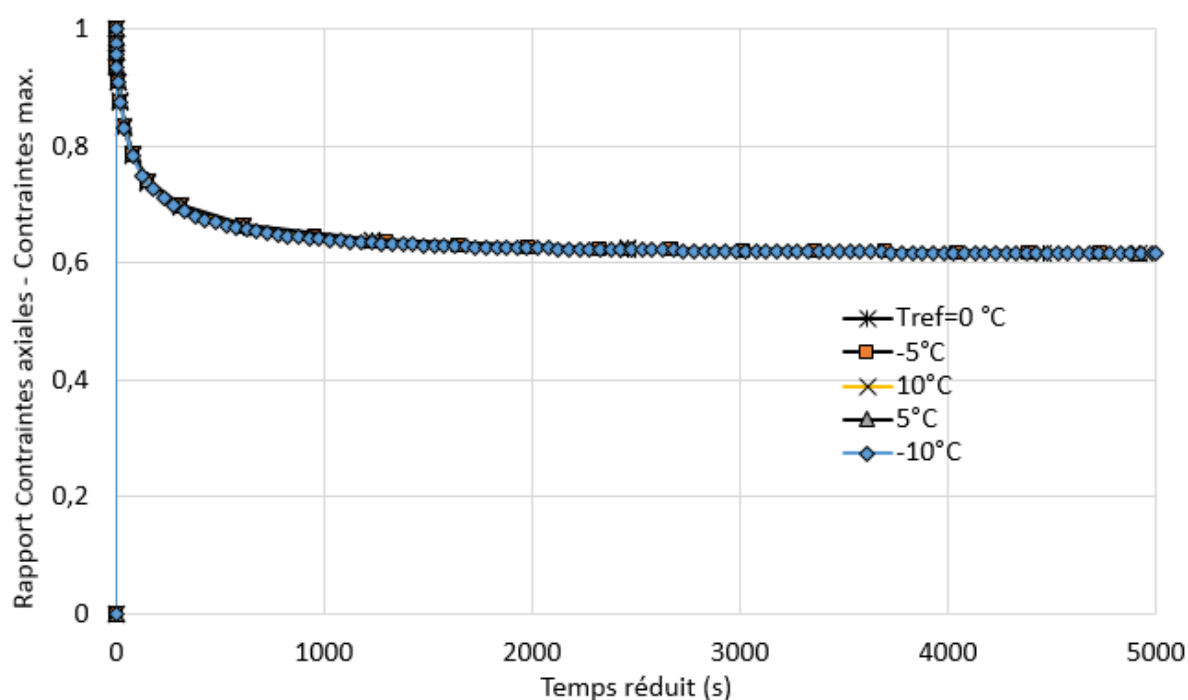


Figure IV.12. Courbe maîtresse de la μ GB à toutes les températures d'essai

IV.3.3.3. Validation des caractéristiques thermo-rhéologiques de la μ GB

Pour vérifier et valider la méthodologie d'identification des paramètres thermo-rhéologiques de la micro-grave-bitume, nous avons fait une comparaison entre la réponse du VER hétérogène et celle d'un VER homogène de mêmes dimensions. Nous avons donné au VER homogène les caractéristiques obtenues à partir de la relaxation de contraintes du VER hétérogène. Il s'agit des modules de relaxation normalisés. Au VER homogène, nous avons également donné les constantes de la loi WLF obtenue.

Le temps de relaxation de contraintes utilisé pour calculer les écarts relatifs dépend du temps mis pour que la contrainte (calculée sur le VER hétérogène) atteigne son asymptote. Pour le VER homogène, nous avons considéré un temps de relaxation égal à trois fois le temps nécessaire pour atteindre l'asymptote en contrainte sur le VER hétérogène.

Le tableau IV.8 donne les écarts relatifs moyens entre la réponse du VER hétérogène et celle du VER homogène.

Tableau IV.8. Ecarts moyens relatifs entre la réponse du VER homogène et le VER hétérogène de μ GB - Avec les modules de relaxation normalisés

Température d'essai (°C)	-10	-5	0	5	10
Ecart relatif moyen (%)	7,88	4,17	0,41	5,34	11,83

La figure IV.13 montre la comparaison des courbes entre VER hétérogène et VER homogène à +10 °C de température d'essai où l'écart est le plus grand.

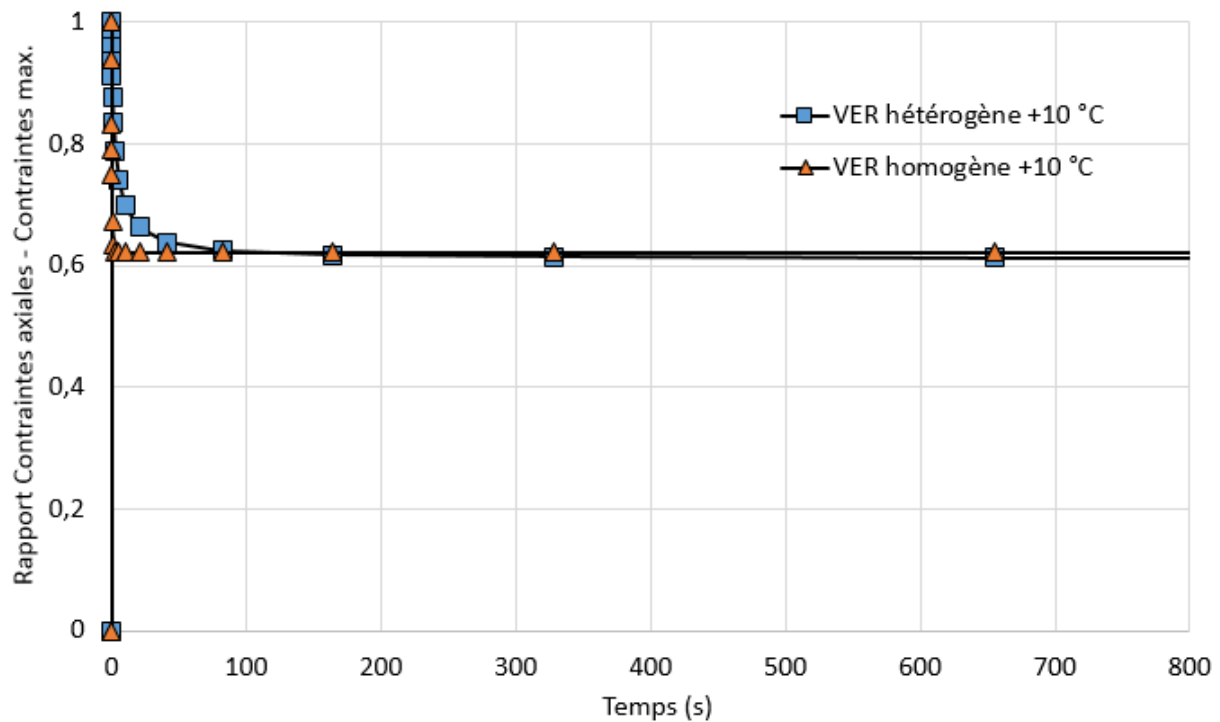


Figure IV.13. Comparaison entre VER homogène et hétérogène de μ GB à +10 °C

IV.4. Modélisations à l'échelle mesoscopique

IV.4.1. Volume Élémentaire Représentatif mesoscopique

A l'échelle mesoscopique, la modélisation deux phases comporte des granulats de MIDND enrobés dans une matrice bitumineuse. Le volume élémentaire représentatif à l'échelle mesoscopique est un cube ($100 \times 100 \times 100$) mm³. Dans un volume cubique composé de granulats de MIDND et d'une matrice qui est ici la micro-grave-bitume, nous avons :

- micro-grave-bitume : 47,5 % ;
- la fraction 6/25 mm : 52,5% :
 - classe 6/10 : 22 % avec comme diamètre représentatif 7,5 mm ;
 - classe 10/15 : 14,5 % avec comme diamètre représentatif 12,5 mm ;
 - classe 15/20 : 11 % avec comme diamètre représentatif 17,5 mm.
 - classe 20/25 : 5 % avec comme diamètre représentatif 22,5 mm.

La structure mesoscopique générée a donné l'image 2D de la figure IV.14. La couleur noire représente la micro-grave-bitume, et le reste représente les granulats de mâchefers. Dans cette génération, chaque voxel correspond à 2,5 mm, ce qui donne un maillage régulier avec $40 \times 40 \times 40$ éléments cubiques linéaires.

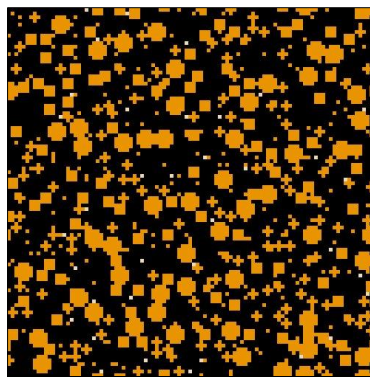


Figure IV.14. Image 2D de la micro-grave-bitume

IV.4.2. Propriétés thermo-rhéologiques des phases de la modélisation mesoscopique

IV.4.2.1. Les granulats de MIDND

On considère que les granulats de mâchefers ont un comportement élastique linéaire isotrope dont les caractéristiques sont : $E = 80 \text{ GPa}$ et $\nu = 0,30$.

IV.4.2.2. La matrice bitumineuse : μGB

A l'échelle mesoscopique, les granulats sont enrobés par une matrice bitumineuse qui n'est autre que la μGB . Les figures IV.10 et IV.11 ainsi que le tableau IV.6 donnent les caractéristiques de cette matrice. Elles servent de données d'entrée à la modélisation mesoscopique.

IV.4.3. Tests de relaxation de contraintes en fonction du temps

IV.4.3.1. Détermination des courbes de relaxation de contraintes pour la grave-bitume

Les tests de relaxation de contraintes sont effectués à différentes températures d'essais de sorte à avoir le même module pour chaque température (égal au module à 0°C). La figure IV.15 montre les courbes de relaxation de contraintes à -10 , -5 , 0 , 5 et 10°C .

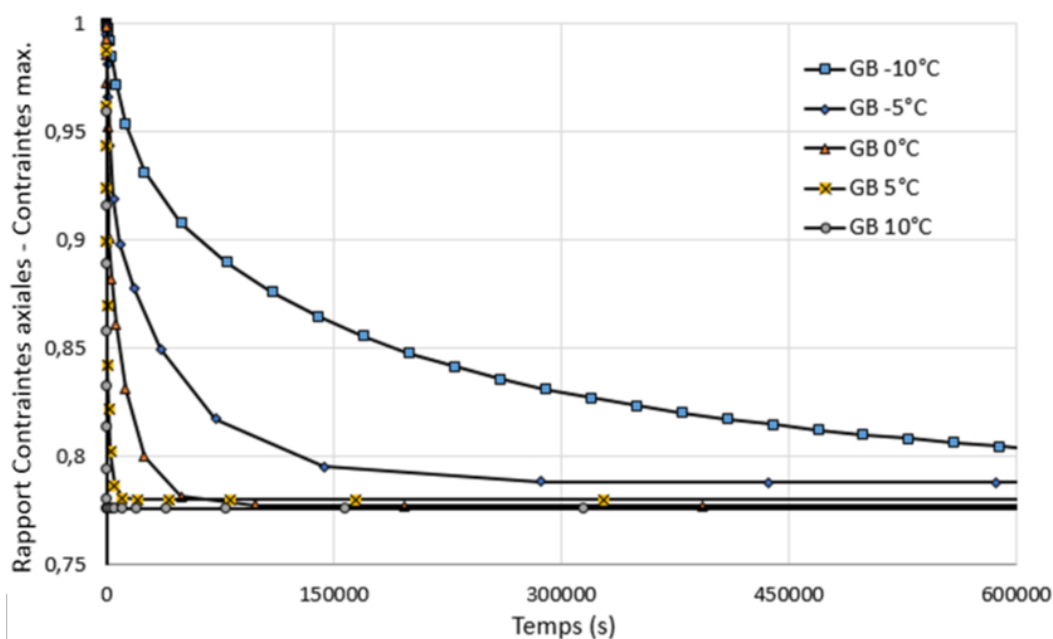


Figure IV.15. Courbes de relaxation de contraintes de la grave-bitume à différentes températures d'essais en fonction du temps

IV.4.3.2. Détermination des constantes de la loi WLF de la grave-bitume

A partir des courbes de relaxation de contraintes de la figure IV.15, nous pouvons estimer la valeur du coefficient a_T en regardant simplement le temps au pic de chaque courbe contrainte-temps (temps à la fin de la montée de la charge) puisque les simulations ont été réalisées de telle sorte que les modules d'Young à chaque température soient les mêmes, et égaux au module à la température de référence (0 °C). Ce coefficient identifié (a_T) permet de construire la courbe maîtresse. Connaissant le temps au pic de chaque simulation à une température d'essai donnée, le coefficient a_T peut être calculé selon l'équation IV.11. Le tableau IV.9 donne les valeurs de a_T .

Tableau IV.9. Valeurs de a_T issues des simulations de relaxation de contraintes à différentes températures d'essai

Température (°C)	Contrainte au pic (MPa)	Temps au pic (s)	a_T	Log (a_T)
-10	4,41444	24	40	1,60206
-5	4,41473	3,5	5,8333	0,7659
0	4,40839	0,6	1	0
5	4,38472	0,1	0,1667	-0,77815
10	4,28775	0,02	0.0333	-1,47712

Les valeurs de a_T du tableau IV.9 permettent de calibrer les constantes C_1 et C_2 de la loi WLF. Les valeurs des constantes sont donc calibrées sur les résultats des simulations au pic en contrainte et validées sur le restant de la courbe.

Le meilleur calibrage est présenté dans le tableau IV.10 ; il correspond à la comparaison montrée à la figure IV.16.

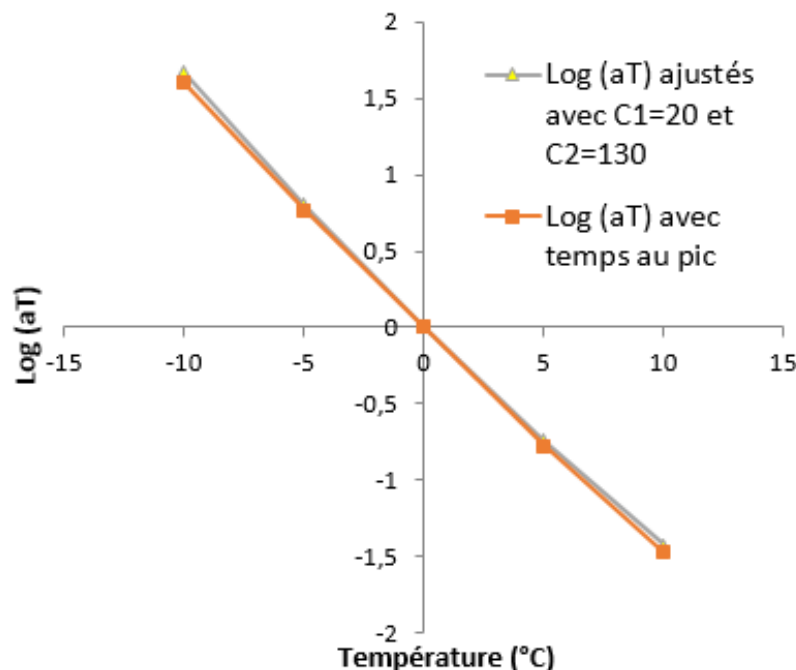


Figure IV.16. Comparaison des Log (a_T)

Tableau IV.10. Constantes ajustées de la loi WLF de la grave de MIDND à une température de référence de 0 °C

C_1 (°C ⁻¹)	C_2 (°C)
20	130

La micro-grave-bitume (μGB) et la grave-bitume à base de MIDND suivent la même loi WLF du moment qu'elles ont les mêmes constantes C_1 et C_2 .

Nous parvenons à vérifier qu'avec le facteur de décalage a_T utilisé pour toutes les températures et sur une échelle complète de temps, on obtient une seule et même courbe, la courbe maîtresse (figure IV.17).

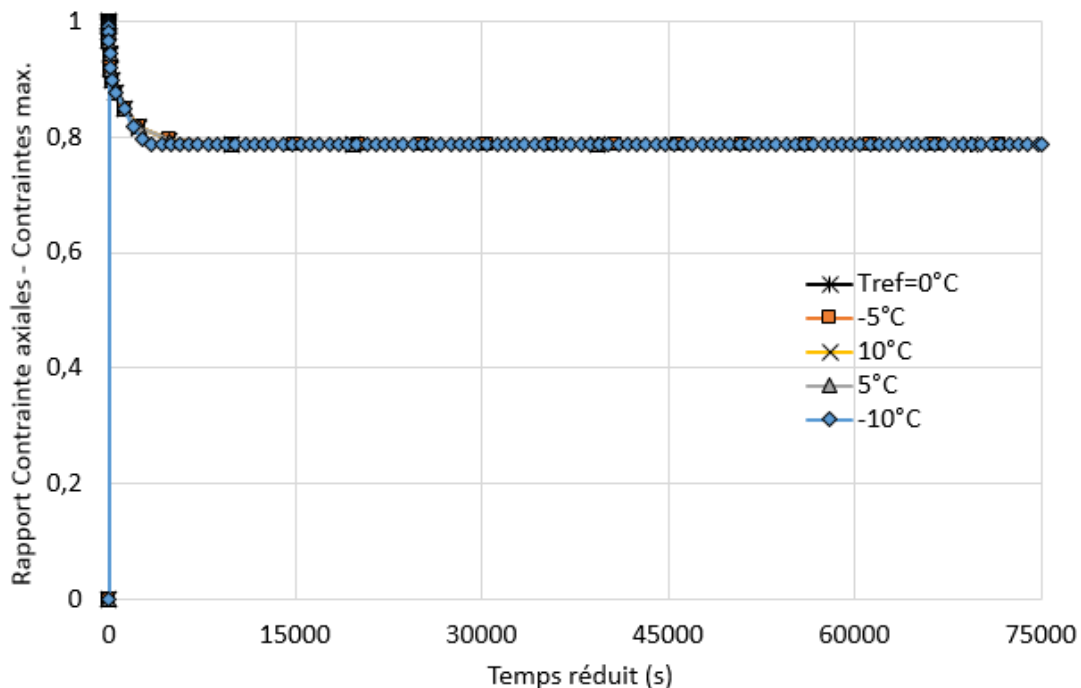


Figure IV.17. Courbe maîtresse de la GB à toutes les températures d'essai

Les poids de la série de prony et temps de relaxation de la grave-bitume sont donnés au tableau IV.11.

Tableau IV.11. Série de Prony de la GB à 0 °C

i	g_i	k_i	τ_i (s)
1	0,11265	0	16,367
2	0	2,546E-02	124,28
3	0,14593	0	357,97

IV.4.3.3. Données déduites des courbes de relaxation de contraintes

A partir des courbes de relaxation de contraintes de la grave-bitume, la série de Prony et les constantes de la loi WLF peuvent être déterminées. Pour déterminer la série de Prony, la simulation sous Abaqus demande l'évolution des modules de relaxation normalisés en fonction du temps (modules de cisaillement et modules volumiques). Les modules de relaxation

normalisés se déterminent à partir des résultats de la relaxation de contraintes et en fonction du coefficient de Poisson. Les tableaux IV.12 et IV.13 regroupent les modules de cisaillement et volumiques en fonction du temps pour les différentes températures d'essais.

Tableau IV.12. Modules de cisaillement normalisés caractérisant la GB

-10 °C		-5 °C		0 °C		5 °C		10 °C	
Gi	Temps	Gi	Temps	Gi	Temps	Gi	Temps	Gi	Temps
1,000	24	1,000	3,5	1,000	0,6	1,000	0,1	1,000	0,02
1,000	60	0,999	8,75	0,993	1,5	0,968	0,25	0,947	0,05
0,999	108	0,997	15,75	0,984	2,7	0,945	0,45	0,914	0,09
0,999	204	0,994	29,75	0,969	5,1	0,922	0,85	0,877	0,17
0,998	396	0,988	57,75	0,944	9,9	0,893	1,65	0,848	0,33
0,995	780	0,977	113,75	0,912	19,5	0,858	3,25	0,825	0,65
0,991	1548	0,958	225,75	0,883	38,7	0,827	6,45	0,802	1,29
0,983	3084	0,931	449,75	0,861	77,1	0,803	12,85	0,786	2,57
0,969	6156	0,902	897,75	0,837	153,9	0,780	25,65	0,781	5,13
0,950	12300	0,878	1793,75	0,803	307,5	0,762	51,25	0,780	10,25
0,928	24588	0,854	3585,75	0,767	614,7	0,755	102,45	0,780	20,49
0,904	49164	0,822	7169,75	0,746	1229,1	0,754	204,85	0,780	40,97
0,875	98316	0,785	14337,8	0,742	2457,9	0,754	409,65	0,780	81,93
0,840	196620	0,760	28673,8	0,741	4915,5	0,754	819,25	0,780	163,85
0,810	393228	0,752	57345,8	0,741	9830,7	0,754	1638,45	0,780	327,69
0,810	786444	0,752	87345,8	0,741	19661,1	0,754	3276,85	0,780	655,37

Tableau IV.13. Modules volumiques normalisés caractérisant la GB

-10 °C		-5 °C		0 °C		5 °C		10 °C	
Ki	Temps	Ki	Temps	Ki	Temps	Ki	Temps	Ki	Temps
1,000	24	1,000	3,5	1,000	0,6	1,000	0,1	1,000	0,02
1,000	60	1,000	8,75	1,000	1,5	0,999	0,25	0,995	0,05
1,000	108	1,000	15,75	1,000	2,7	0,997	0,45	0,990	0,09
0,999	204	1,000	29,75	0,999	5,1	0,995	0,85	0,984	0,17
0,999	396	1,000	57,75	0,998	9,9	0,991	1,65	0,979	0,33
0,998	780	0,999	113,75	0,996	19,5	0,986	3,25	0,976	0,65
0,995	1548	0,999	225,75	0,993	38,7	0,980	6,45	0,976	1,29
0,990	3084	0,997	449,75	0,988	77,1	0,977	12,85	0,976	2,57
0,982	6156	0,995	897,75	0,982	153,9	0,976	25,65	0,976	5,13
0,967	12300	0,991	1793,75	0,977	307,5	0,976	51,25	0,976	10,25
0,946	24588	0,986	3585,75	0,974	614,7	0,976	102,45	0,976	20,49
0,923	49164	0,980	7169,75	0,974	1229,1	0,976	204,85	0,976	40,97
0,903	98316	0,976	14337,8	0,975	2457,9	0,976	409,65	0,976	81,93
0,883	196620	0,976	28673,8	0,975	4915,5	0,976	819,25	0,976	163,85
0,857	393228	0,976	57345,8	0,975	9830,7	0,977	1638,45	0,976	327,69
0,828	786444	0,976	87345,8	0,975	19661,1	0,977	3276,85	0,976	655,37

IV.4.3.4. Validation des paramètres thermo-rhéologiques de la grave-bitume

Afin de vérifier si les paramètres thermo-rhéologiques identifiés pour la grave-bitume sont corrects, une comparaison est faite entre la réponse du VER hétérogène de grave-bitume et celle d'un VER homogène de mêmes dimensions. Nous avons donné au VER homogène les caractéristiques tirées du VER hétérogène de grave-bitume (tableaux IV.10, IV.12, IV.13). La figure IV.18 montre la comparaison entre VER hétérogène et VER homogène pour une température d'essai de +10 °C où l'écart relatif est le plus grand.

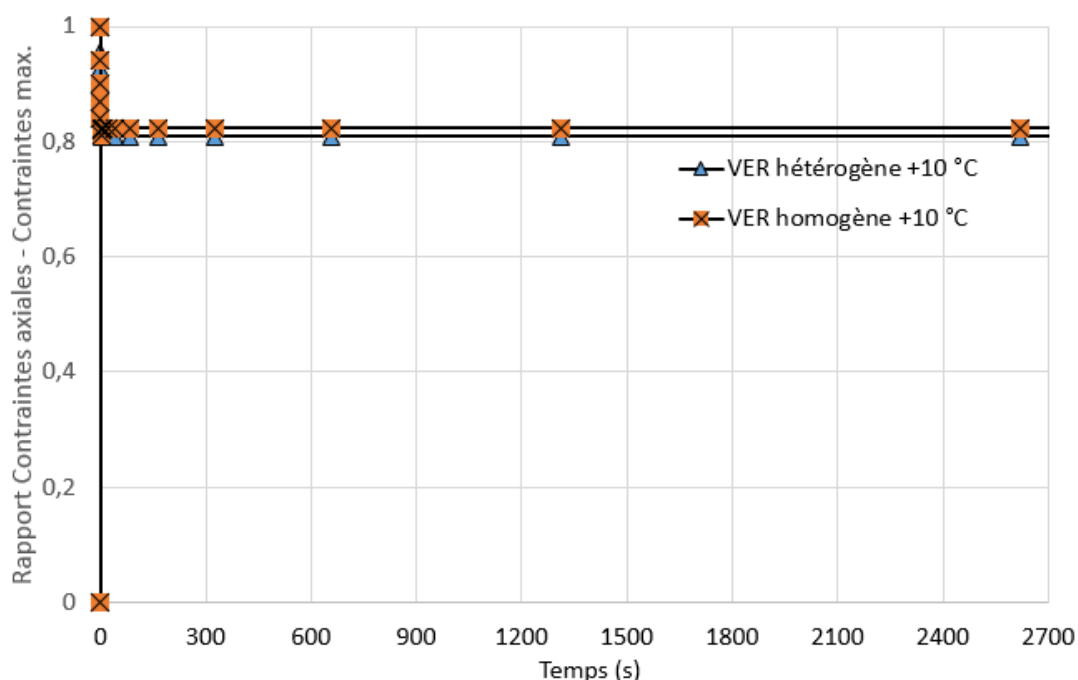


Figure IV.18. Comparaison entre VER homogène et hétérogène de grave-bitume à une température d'essai de +10 °C

Le tableau IV.14 donne les écarts relatifs moyens entre la réponse du VER hétérogène et celle du VER homogène à l'échelle mesoscopique.

Tableau IV.14. Ecarts relatifs moyens pour les différentes températures d'essai entre réponse VER homogène de grave-bitume et VER hétérogène de grave-bitume

Température d'essai (°C)	-10	-5	0	5	10
Ecart relatif moyen (%)	7,07	2,56	0,52	3,59	3,82

IV.5. Influence du module d'Young des particules de MIDND sur les propriétés thermo-rhéologiques de la grave-bitume

Dans le travail de modélisation présenté dans les paragraphes précédents, le module d'Young utilisé jusqu'ici est de 80 GPa.

Dans cette présente partie, nous avons essayé de voir comment une variation des propriétés des MIDND interfère sur le comportement de la grave routière traitée au bitume. Nous avons procédé à une étude de sensibilité en déterminant le comportement viscoélastique de la grave routière si les particules de mâchefers ont un module d'Young de 20 GPa. Cette étude de sensibilité a tout son sens si on voit l'étendue des valeurs de modules élastiques obtenues dans la campagne d'indentation. D'autant plus qu'un module de Young homogénéisé de 20 GPa a été estimé à partir de cette campagne expérimentale. La stratégie de modélisation et de changement d'échelle adoptée est la même que celle utilisée pour un module de 80 GPa et donnée au paragraphe IV.2.

IV.5.1. Relaxation de contraintes pour un module d'Young des grains, $E_{\text{grains}} = 20 \text{ GPa}$

En effectuant des tests de relaxation de contraintes en compression uniaxiale et en appliquant la stratégie de modélisation donnée au paragraphe IV.2, les courbes données aux figures IV.19

et V.20 ont été obtenues aux deux échelles d'étude. Les courbes maîtresses données aux figures IV.21 et IV.22 ont tracées.

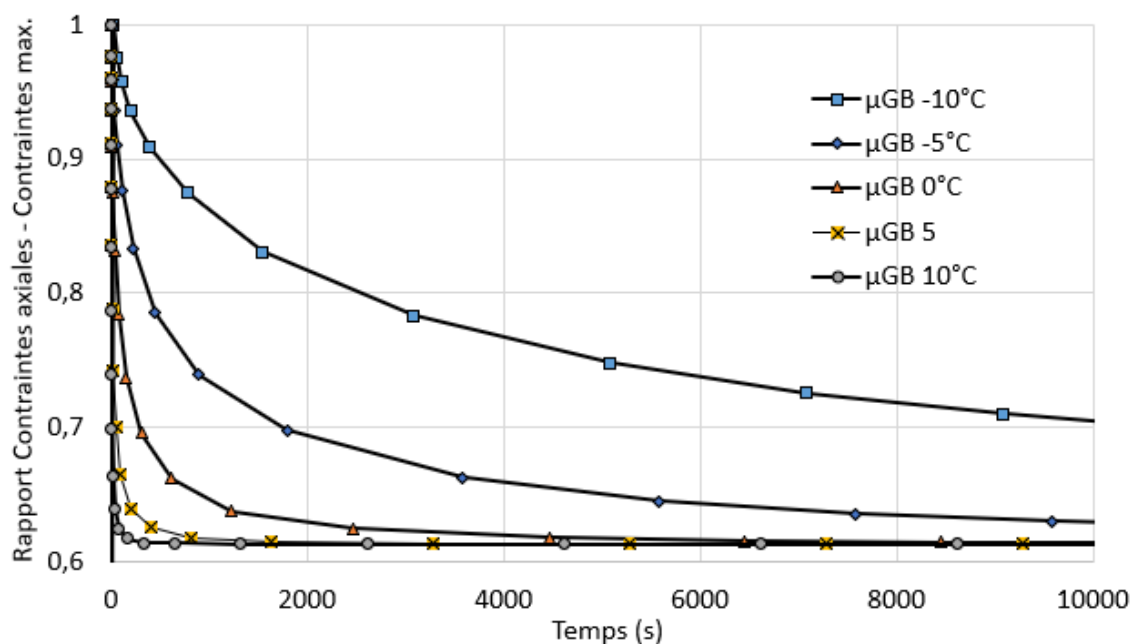


Figure IV.19. Courbes de relaxation de contraintes de la μ GB pour Egrains = 20 GPa

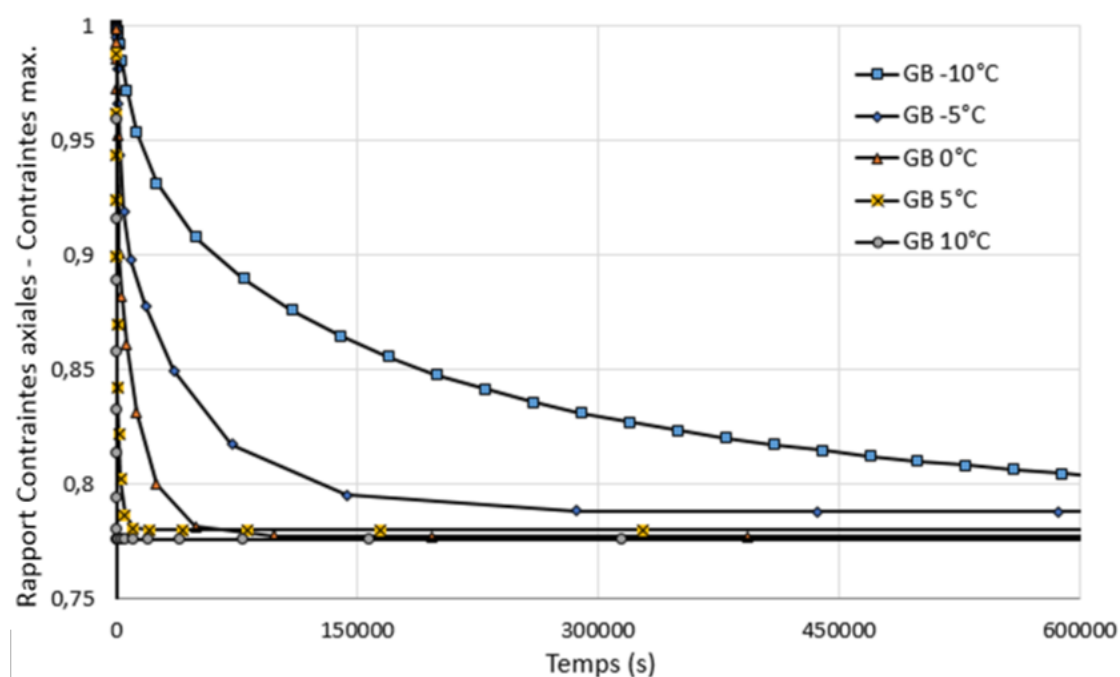


Figure IV.20. Courbes de relaxation de contraintes de la GB pour Egrains = 20 GPa

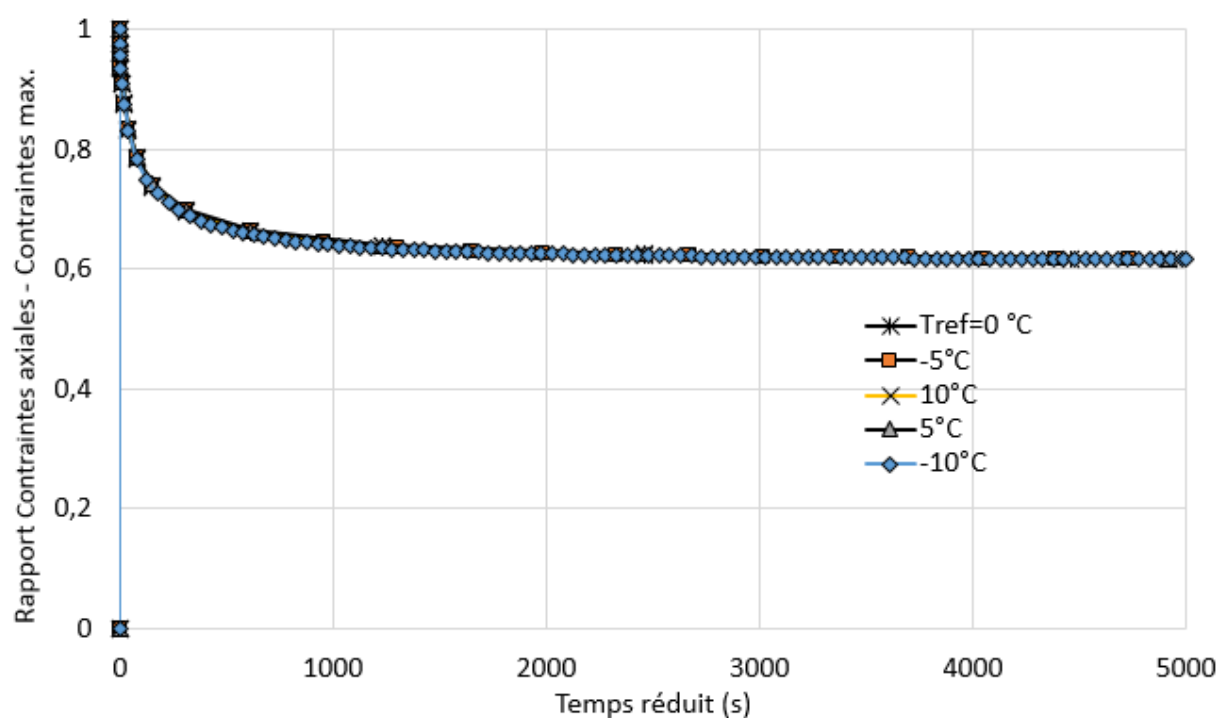


Figure IV.21. Courbe maîtresse de la μ GB pour $E_{\text{grains}} = 20 \text{ GPa}$

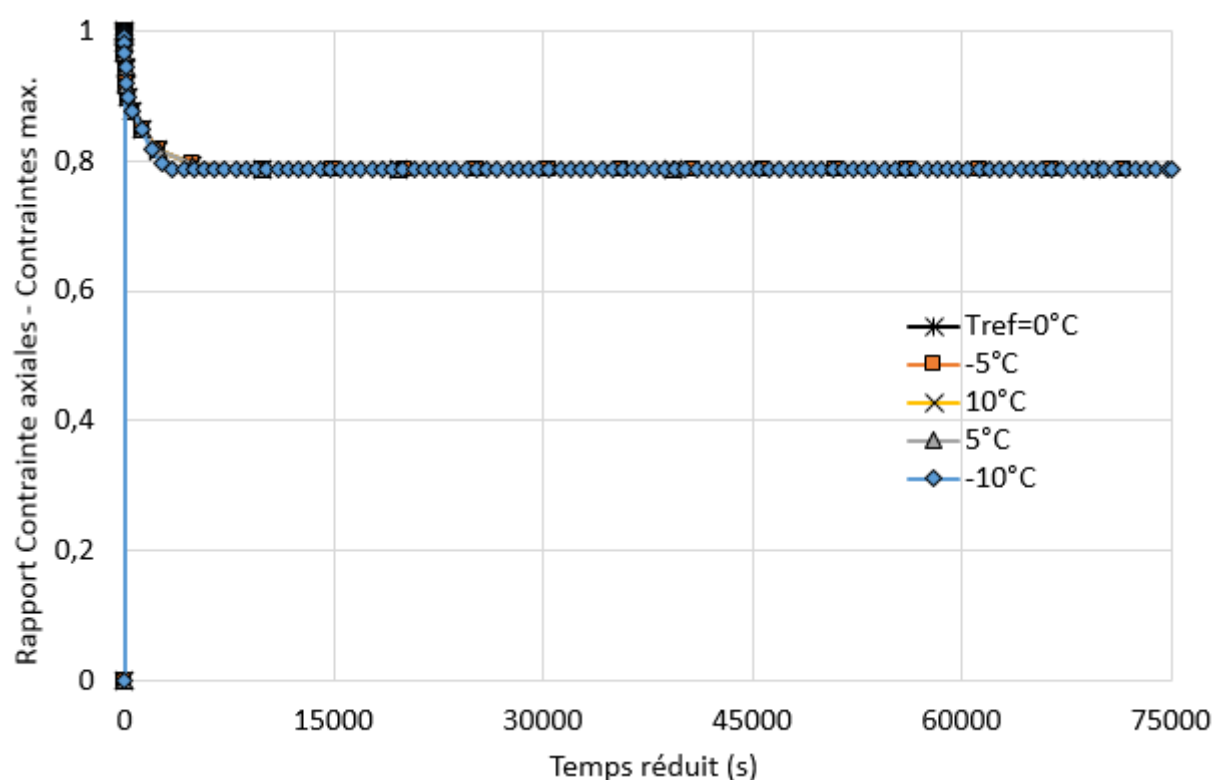


Figure IV.22. Courbe maîtresse de la GB pour $E_{\text{grains}} = 20 \text{ GPa}$

IV.5.2. Comparaison des propriétés thermo-rhéologiques lorsque le module d'Young des grains varie

Les propriétés thermo-rhéologiques de la grave-bitume obtenues pour les deux valeurs de E_{grains} sont résumées aux tableaux IV.15, IV.16 et IV.17. Le grave bitume suit la même loi WLF et les séries de Prony sont pour les deux cas, à trois ressorts avec deux termes chacun. Les modules de cisaillement et volumiques obtenus en fonction des temps de relaxation sont sensiblement proches pour les deux cas de modules d'Young étudiés ($E_{\text{grains}} = 20$ GPa et 80 GPa).

Tableau IV.15. Loi WLF pour $E_{\text{grains}} = 20$ GPa et 80 GPa à une température de référence de 0°C

$C_1 (^\circ\text{C}^{-1})$	$C_2 (^\circ\text{C})$
20	130

Tableau IV.16. Série de Prony de la GB pour $E = 20$ GPa

i	g_i	k_i	τ_i (s)
1	0,11655	0	18,392
2	0	2,395E-02	108,56
3	0,13579	0	352,90

Tableau IV.17. Série de Prony de la GB pour $E = 80$ GPa

i	g_i	k_i	τ_i (s)
1	0,11265	0	16,367
2	0	2,546E-02	124,28
3	0,14593	0	357,97

A la température de référence de 0°C , les figures IV.23 et IV.24 montrent les comparaisons en rapport de contraintes pour les deux valeurs de modules d'Young des particules de mâchefers.

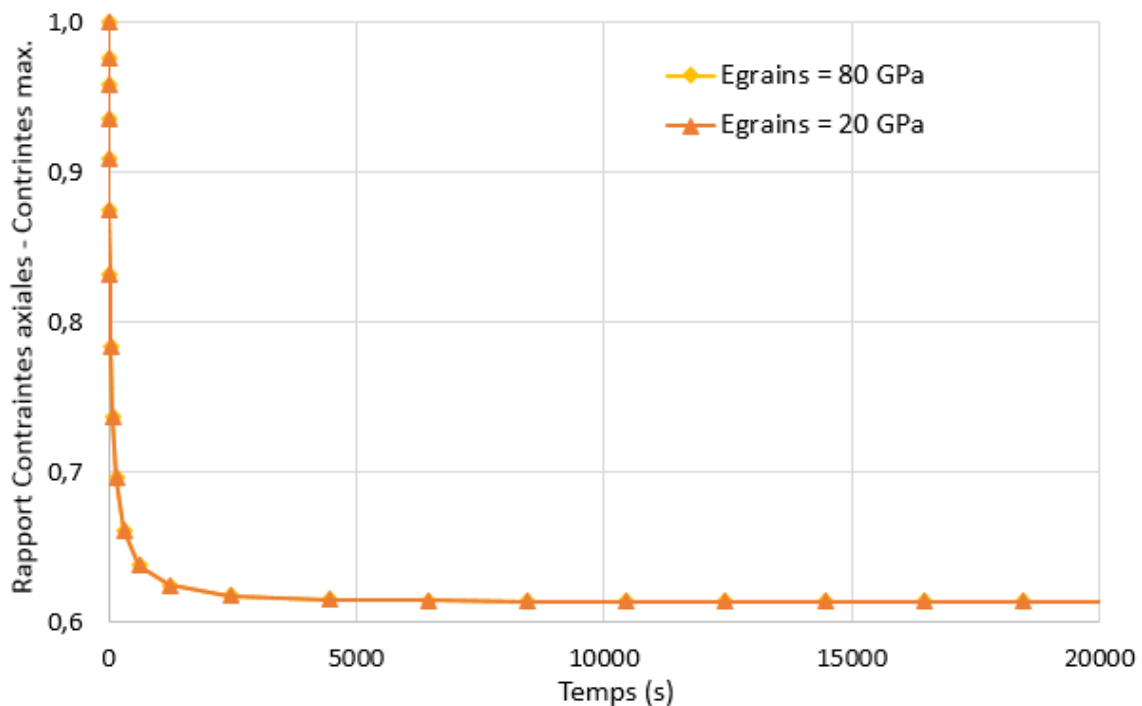


Figure IV.23. Comparaison en termes de rapport de contraintes pour $E_{\text{grains}} = 20$ et 80 GPa à l'échelle de la μGB et à la température de référence

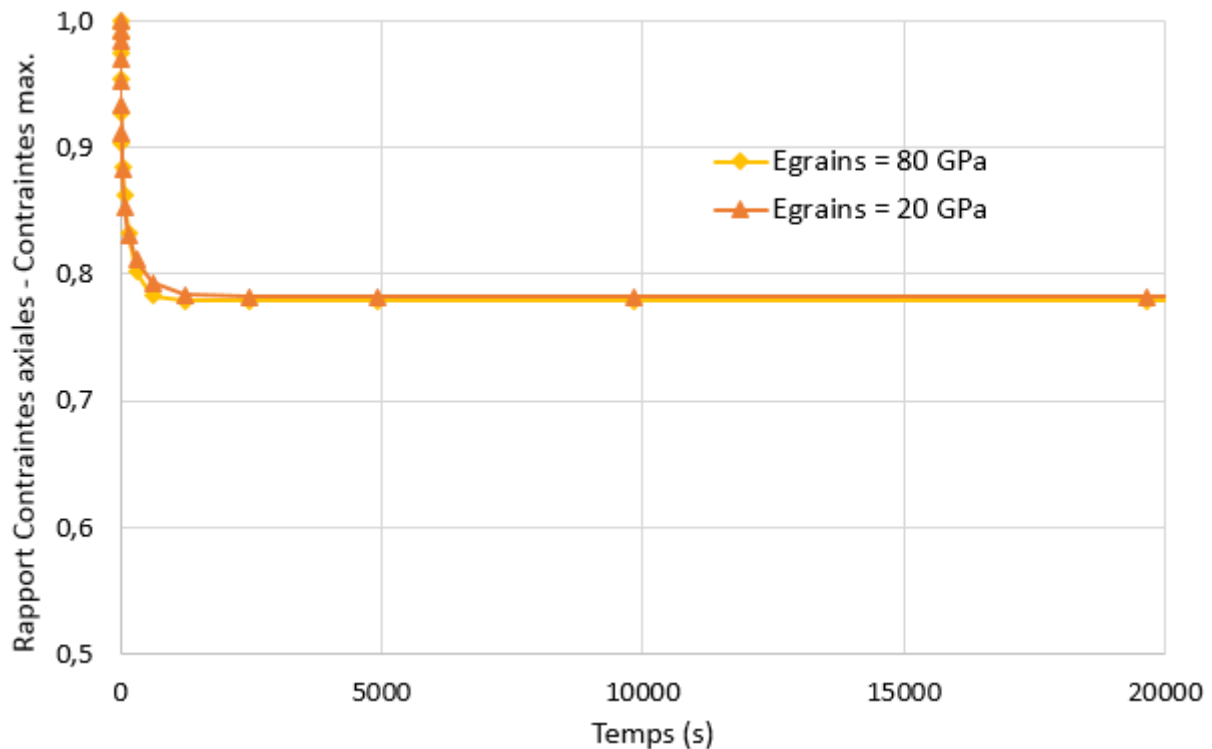


Figure IV.24. Comparaison en termes de rapport de contraintes pour $E_{grains} = 20$ et 80 GPa à l'échelle de la GB et à la température de référence

En comparant les courbes de relaxation de contraintes des figures IV.23 et IV.24, on constate qu'en termes de rapport de contraintes, les courbes de relaxation obtenues sont quasi-superposées.

On peut déduire de ces différents constats que la variation du module d'Young des particules a peu d'influence sur la variation des propriétés thermo-rhéologiques de la grave routière traitée au liant hydrocarboné.

IV.6. Conclusion

Un modèle numérique 3D de grave-bitume a été mis en place. Une méthodologie de détermination des propriétés thermo-rhéologiques a été établie et validée aussi bien à l'échelle de la micro-grave-bitume (μ GB) qu'à l'échelle de la grave-bitume (GB). Nous sommes parvenus à déterminer la série de Prony de la grave-bitume par l'intermédiaire des modules de cisaillement normalisés en fonction du temps. Les constantes de la loi WLF ont été déterminées par le biais de la relaxation de contraintes en fonction du temps. Avec ce modèle numérique 3D, une stratégie de changement d'échelles avec une méthode de détermination des paramètres thermo-rhéologiques a pu être testée et validée. L'étude de sensibilité sur le module d'Young des particules de mâchefers a peu d'influence sur la variation des propriétés thermo-rhéologiques de la grave.

En outre, d'autres conclusions peuvent être tirées :

- en comparaison avec le liant bitumineux, les comportements viscoélastiques aux deux échelles du VER hétérogène apparaissent moins complexes puisque deux termes de la série Prony semblent suffire pour les décrire avec assez de précision ;

- le comportement thermo-rhéologiquement simple de la grave-bitume est entièrement défini par celui de la micro-grave-bitume et donc les deux paramètres constants de la loi WLF sont les mêmes pour chaque échelle ;
- le comportement viscoélastique est légèrement différent pour chaque échelle et la micro-grave-bitume (μ GB) se relaxe plus rapidement que le grave-bitume (GB).

Enfin, une telle approche de modélisation multi-échelle joue le rôle de « laboratoire virtuel » et ouvre de nombreuses perspectives d'applications pour étudier des problématiques communes en ingénierie routière et plus particulièrement les dégradations des chaussées (telles que l'ornièrre, fissuration ...).

Conclusion générale et perspectives

Suite à une expansion démographique importante et une consommation sans cesse croissante des populations, il se pose des problèmes d'urbanisation aigus et de gestion des déchets. Dans les pays développés, il existe plusieurs méthodes de traitement des ordures ménagères. L'incinération (traitement thermique) est un mode de traitement des déchets non dangereux qui consiste à les brûler à haute température. Ce procédé de traitement des déchets produit une quantité importante de mâchefers qu'il convient de valoriser.

Dans un cadre de recyclage et de développement durable, les Mâchefers d'Incinération des Déchets Non Dangereux (MIDND) peuvent représenter un gisement de substitution stratégique de granulats routiers classiques pour faire face à l'impossibilité de mise en décharge continue des déchets et aux difficultés d'ouverture de nouvelles carrières de matériaux routiers.

Dans ce travail de thèse, nous nous étions fixés comme objectifs principaux :

- ☐ Mener une campagne originale et jamais menée jusqu'à maintenant sur des granulats de MIDND afin d'avoir leurs propriétés élastiques intrinsèques ;
- ☐ Développer une modélisation à l'échelle mésoscopique, basée sur la Méthode des Eléments Finis, de graves routières traitées au ciment d'une part et au bitume d'autre part ;
- ☐ Mettre en place des VER montrant de façon explicite les phases caractéristiques de la modélisation (liant, squelette granulaire, porosité) ;
- ☐ Etudier la faisabilité d'une valorisation des MIDND en techniques routières.

Les valeurs de masse volumique obtenues sur particules isolées de MIDND montrent qu'ils sont des granulats légers en comparaison avec les granulats naturels dont les masses volumiques sont supérieures à 2 g/cm^3 . La campagne expérimentale sur des particules de MIDND a permis de cartographier les particules au MEB et d'obtenir leurs compositions chimiques. Elle a également permis l'obtention de valeurs de modules d'élasticité de ces particules provenant de la Garenne (Vignoc, Bretagne, France). Les premiers résultats obtenus pour le module élastique réduit du mâchefer non traité montrent une faible rigidité homogénéisée lorsque la porosité et les phases solides sont pris en compte lors du test avec un indenteur à gros rayon ($R=140\text{mm}$). Les phases solides seules présentent toutefois de bonnes rigidités avec un indenteur de rayon beaucoup plus petit ($R=0,5\text{mm}$) permettant de tester de façon localisée la phase solide.

Une étude statistique serait intéressante pour avoir une idée plus précise de l'ordre de grandeur du module élastique de ces types de matériaux du moment que leurs zones de production sont diverses.

Les deux liants utilisés dans la modélisation sont le ciment et le bitume. Pour les deux cas de traitement, nous sommes partis d'une granulométrie de particules de MIDND 0/25 mm. Nous avons mis en place deux modèles numériques tridimensionnels dans des volumes élémentaires représentatifs (VER) représentant explicitement le squelette granulaire, le liant ainsi que la porosité. Ces modèles numériques sont basés sur une stratégie de modélisation dite « multi-échelles » hiérarchique.

Avec un traitement au ciment, la campagne de simulations numériques « Laboratoire virtuel » a permis d'obtenir les résultats suivants :

- ☐ A l'échelle sub-mésoscopique :

- les courbes de comportement : uniaxial, biaxial et triaxial de la μ GC pour différents degrés d'hydratation ($\alpha = 0,83 ; 0,64 ; 0,27$) ;
- la détermination des paramètres permettant d'alimenter le CDPM utilisé à l'échelle mesoscopique ($E, \nu, f_b, f_{b0}, \phi, \psi$ et K) pour différents degrés d'hydratation.

□ A l'échelle mesoscopique :

- les courbes de comportement : uniaxial (compression et traction) et triaxial de la grave routière ;
- l'obtention des caractéristiques mécaniques de la grave routière habituellement déterminées par le biais d'expérimentations : $E, \nu, f_b, f_t, q_{pic}, M_{pic}, \phi, \psi$.

Pour les MIDND traités au bitume, une méthodologie de détermination des propriétés thermo-rhéologiques a été établie et validée aussi bien à l'échelle de la micro-grave-bitume (μ GB) qu'à l'échelle de la grave-bitume (GB). Nous sommes parvenus à déterminer les séries de Prony aux deux échelles d'étude par l'intermédiaire des modules élastiques normalisés en fonction du temps. Les constantes de la loi WLF ont été déterminées par le biais de la relaxation de contraintes en fonction du temps. On constate que la micro-grave-bitume (μ GB) et la grave-bitume (GB) à base de mâchefers suivent la même loi WLF du moment qu'elles ont les mêmes constantes. Avec ce modèle numérique 3D, une stratégie de changement d'échelles avec une méthode de détermination des paramètres thermo-rhéologiques a pu être testée et validée. Une étude de sensibilité sur le module d'Young des granulats a montré par ailleurs que la variation de ce paramètre matériau a peu d'influence sur la variation des propriétés thermo-rhéologiques de la grave-bitume.

Au terme de ces travaux de thèse, on peut dire que les Mâchefers d'Incinération des Déchets Non Dangereux (MIDND) peuvent bel et bien représenter un gisement stratégique de substitution de granulats classiques pour faire face à l'impossibilité de mise en décharge continue des déchets et aux difficultés d'ouverture de nouvelles carrières de matériaux routiers. Leur classification en classes mécaniques 3 et 4 lorsque leur module d'Young varie entre 20 et 80 GPa montre bien leur possibilité d'emploi en couche de fondation, de forme et en remblai.

Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives, tant d'un point de vue socio-économique que scientifique.

Il serait ainsi très intéressant de faire une étude technico-économique pour voir dans quelles conditions les mâchefers peuvent faire l'objet de remplacement des matériaux conventionnels. Cette étude pourrait prendre en compte le coût de production de ces mâchefers englobant la collecte, l'incinération, la maturation et le traitement.

Cela permettrait de comparer le coût d'un kilomètre de route conventionnelle avec celui d'un kilomètre de route avec des couches réalisées avec des granulats de MIDND.

La démarche peut être utilisée pour d'autres granulats, par exemple les graveleux latéritiques ou concassés de basalte du Sénégal.

Si l'auréole de transition est supposée ne pas avoir d'influence, il n'en est pas de même pour l'adhérence granulat/matrice [KEI 14]. L'introduction d'une adhérence non parfaite pourrait être une perspective dans la construction de la démarche de modélisation.

Par ailleurs, le caractère hétérogène et tridimensionnel de la modélisation hiérarchique développée dans ce travail, quel que soit la nature et le comportement de la matrice, et ainsi sa

précision dans la détermination des états de contraintes locaux et de l'endommagement / des déformations permanentes, conduit à offrir de nombreux débouchés scientifiques :

- l'étude du retrait et de la fissuration consécutive des graves traitées aux liants hydrauliques pourrait ainsi être une application intéressante ;
- l'influence du squelette granulaire sur la fissuration pourrait être quantifiée ;
- la simulation de tests de chargement alterné serait également à envisager ; on sait en effet que ce type de modélisation hétérogène est pertinent lorsque le nombre de cycles est important.

Il conviendrait également d'étendre la modélisation des graves-bitume à d'autres types de comportement :

- le comportement viscoplastique permettrait en particulier d'étudier le phénomène d'orniérage apparaissant à grand nombre de cycles ;
- des traitements mixtes liants hydraulique et hydrocarboné se sont également développés afin d'associer les bonnes caractéristiques de chacun : absence de retrait pour les graves-bitume et bonne rigidité permettant une répartition homogène des contraintes provenant du trafic routier pour les graves-ciment. Les deux liants pourraient être représentés explicitement, ce qui permettrait de mener une modélisation de leur comportement la plus réaliste et la plus fine possible.

Enfin, les tests de micro-indentation sur les particules de MIDND mériteraient d'être poursuivis en vue d'une analyse statistique de la répartition du module élastique réduit. Cette répartition pourrait même être explicitement prise en compte dans la modélisation tridimensionnelle en donnant aux éléments du maillage représentant les particules, des propriétés élastiques différentes.

Conférences/Publications

❑ **Articles dans des journaux internationaux à comités de lecture à bases de données indexées :**

1. [Experimental estimation of the elastic modulus of non-hazardous waste incineration bottom ash aggregates by indentation tests - Microanalysis of particles by Scanning Electron Microscopy.](#)

Libasse Sow, Siham Kamali-Bernard, Olivier Bartier, Gérard Mauvoisin, Fabrice Bernard.

Publié dans le journal “Advanced Materials Research, Trans Tech Publications”.

DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMR.1145.80

2. [Mesoscale modeling of the temperature-dependent viscoelastic behavior of a Bitumen-Bound Gravels.](#)

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard, Cheikh M. Fadel Kébé. Soumis en Décembre 2017 à “Coupled Systems Mechanics (Techno Press), an International Journal”.

❑ **Articles dans des Proceedings de conférences internationales à bases de données indexées :**

1. [Experiment-based modelling of the mechanical behaviour of non-hazardous waste incineration bottom ashes treated by hydraulic binder.](#)

[Approche couplée modélisation-expérimentation pour étudier le comportement mécanique de Mâchefers d’Incineration des Déchets Non Dangereux traités avec un liant hydraulique.](#)

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard, Cheikh M. Fadel Kébé. Presented in the *2nd International Congress on Materials & Structural Stability (2nd CMSS), Rabat (Morocco), 22-25 November 2017.*

Publié dans le journal “MATEC Web of Conferences”.

DOI : 10.1051/mateconf/201814901038

❑ **Communications dans des conférences nationales :**

1. [Comportement mécanique de graves à base de MIOM traitées au ciment par une modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelle.](#)

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard, Cheikh M. Fadel Kébé.

Oral Session, *35èmes Rencontres de l’AUGC, ECN/UN, Nantes (France), 22 au 24 mai 2017.*

HAL id : hal-01579046, version 1

2. [Détermination du comportement viscoélastique d’une grave routière à base de MIOM traitée au bitume par modélisation numérique 3D hiérarchique multi-échelle.](#)

Libasse Sow, Fabrice Bernard, Siham Kamali-Bernard, Cheikh M. Fadel Kébé.

Poster Session, *35èmes Rencontres de l’AUGC, ECN/UN, Nantes (France), 22 au 24 mai 2017.*

HAL id : hal-01579074, version 1

Références et sources

A

- [ABS 09] B. Qi, J. Absi, N. Tessier-Doyen, *Comput. Mater. Sci.* 46, (2009) 996–1001.
- [ADE 15] Agence de l’Environnement et de la Maitrise de l’Energie (ADEME). Chiffres-clés : Déchets. ADEME Editions 2015 96 pages.
- [ADE 12] Agence de l’Environnement et de la Maitrise de l’Energie. L’incinération des déchets ménagers et assimilés. Technical Report 6 pages (Décembre 2012).
- [AMO 12] AMORCE. Etat des lieux de la gestion des mâchefers en France. Rapport technique DT 50, (Octobre 2012).
- [APP 04] Rapport APPIA. Valorisation des MIOM dans les infrastructures routières. Ecole des mines de Douai, Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille (2004).
- [ARR 11] 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).
- [AUG 15] Augusto C. F. and Ki H. M. Micromechanical–analogical modelling of asphalt binder and asphalt mixture creep stiffness properties at low temperature. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, Issue 1, (2015) 111-137.

B

- [BAA 02] BAAJ H. Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés. PhD thesis. Institut National des Sciences Appliquées de Lille, (2002).
- [BAD 08] Badreddine R., François D., 2008. Assessment of the PCDD/F fate from MSWI residue used in road construction in France. *Chemosphere* (2008).
- [BAN 08] Bandyopadhyaya R., Das A., Basu S. *Constr. Build. Mater.* 22, (2008) 1051– 1058.
- [BEC 05] Becquart F., Zentar R., Bernard F., Abriak N.E. (2005) « Mechanical characterization of behavior 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.
- [BEC 07] Becquart F. 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, (2007).
- [BEC 09] Becquart F., Bernard F., Abriak N. E., Zentar R. Monotonic aspects of the mechanical behaviour of bottom ash from municipal solid waste incineration and its potential use for road construction. *Waste Management*, (2009) 1320-1329.
- [BEL 01] Le Bellégo C., Couplage chimie mécanique dans les structures en béton armé attaquées par l’eau, Thèse de doctorat, LMT-ENS de Cachan, (2001).

- [BEN 97]** Bentz D.P. Three-Dimensional Computer simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development. *Journal of American Ceramic Society*, 80, (1997) 3-21.
- [BEN 98]** Di Benedetto H., De La Roche C. State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue Bituminous Mixtures. *RILEM, Bituminous Binders and Mixtures*, (1998).
- [BER 10]** Bernard F., Kamali-Bernard S. Performance simulation and quantitative analysis of cement-based materials subjected to leaching. *Computational Materials Science*, (2010).
- [BER 12]** Bernard F., Kamali-Bernard S. 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, (2012) pp 106-115.
- [BER 18]** Bernard F., Fu J., Kamali-Bernard S. Multiscale modeling approach to determine the specific heat of cementitious materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1080/19648189.2018.1443157
- [BET 02]** Bethanis S., Cheeseman C. R., Sollars C. J. Properties and microstructure of sintered incinerator bottom ash. *Ceramics International*, 28, (2002) pp 881-886.
- [BIA 90]** Biarez J., Hicher P. Y. Lois de comportement des sols remaniés et des matériaux granulaires : approche expérimentale modélisation mécanique. Notes de cours pour le DEA « mécanique des sols et structures », École centrale de Paris, (1990).
- [BIR 07]** Birgisdottir H., Bhander G., Hauschild M. Z., Christensen T. H. 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) pp 75-84.
- [BRA 17]** Brahim K.V., Malekabadi M.V., Rezaei A., Roshani M.M. and Roshani G.H. Modeling of mechanical properties of roller compacted concrete containing RHA using ANFIS. *Computers and Concrete*, Techno Press, 19, 4 (2017) pp 435-442.
- [BUT 96]** Buttlar W.G., R. Roque, *Asph. Pav. Technol*, 65, (1996) 99–141.
- [BUT 99]** W.G. Buttlar, D. Bouzkurt, G. Al-khateeb, A.S. Waldhoff, *Trans. Res. Rec.*, 1681, (1999) pp 157–169.

C

- [CEB 90]** CEB-FIP Model code, Design code. Thomas Telford services, (1990).
- [CEW 16]** (CEWEP) Confederation of European Waste-to Energy Plants, (22 Septembre 2016).
- [CHI 99]** Chimenos J. M., Segarra M., Fernandez M., Espiell F. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials A*, 64, (1999) 211-222.
- [CHI 00]** Chimenos J. M., Fernandez A. I., Nadal R., Espiell F., 2000. Short-term natural weathering of MSWI bottom ash. *Journal of Hazardous Materials B*, 79, (2000) 287-299.

[CHI 03] Chimenos J. M., Fernandez A. I., Mirailles 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.

[CIR 94] Ministère de l'Environnement Français. Circulaire dppr/sei/bsied n°94-iv-1 du 09/05/94 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains, (9 Mai 1994).

[CLU 15] CLUSTER ECO-CHANTIERS. 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 (Octobre 2015).

[CNR 01] Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne. Les graves issues des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux. Centre National de Recyclage, (2001).

D

[DAB 08] Dabo D. Impact environnemental des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) valorisés en technique routière : Caractérisation, expérimentations multi-échelles et modélisation hydro-géochimique. PhD thesis, Ecole des mines ParisTech, (2008).

[DAI 11] Dai Q., *Constr. Build. Mater.*, 25, (2011) 1102–1114.

[DIA 86] Diamond S., The microstructure of cement paste in concrete, in proceeding of the 8th international of the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brazil, vol. 1, 1986, 122-147.

[DIA 04] Diamond S. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. *Cement and Concrete Composites*, 26 (8), (2004) 919-933.

E

[EVE 00] Evesque P. *Eléments de mécanique quasi-statique des milieux granulaires mouillés ou secs. Mécanique des milieux granulaires*, Livre 157 pages, (2000).

F

[FER 80] Ferry J., *Viscoelastic Properties of Polymers*, John Wiley and sons, New York, (1980).

[FER 08] Fernandes M. H. V. Characterization of MSWI bottom ashes towards utilization as glass raw material. *Waste Management*, 28, (2008) 1119-1125.

[FRA 77] Francken L. Module complexe des mélanges bitumineux. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des ponts et chaussées*, n° Spécial 5, (1977) 181-198.

[FU 17] Fu J., Bernard F., Kamali-Bernard S. Assessment of the elastic properties of amorphous Calcium Silicates Hydrates (I) and (II) structures by Molecular Dynamics Simulation. *Molecular Simulation*, 39(14-15), (2017) 1 – 15.

G

[GRO 11] Mario Grosso, Laura Biganzoli, and Lucia Rigamonti. A quantitative estimate of potential aluminium recovery from incineration bottom ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12), (2011) 1178 – 1184.

H

[HAD 16] Hadi H. and Vahab S. Numerical simulation of tensile failure of concrete using Particle Flow Code (PFC). *Computers and Concrete*, Techno Press ,18 No. 1, (2016) 39-51.

[HIL 76] Hillerborg A., Modeer M., Petersson P.E., « Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements », *Cement and Concrete Research*, n°6, (1976) 773–782.

[HOR 98] Horny P., Kazai A., Quibel Q. Study of the resilient behaviour of unbound granular materials, *Proc. 5th Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim, Norway, 3, (1998) 1277-1287.

[HUN 11] Hung L. N. 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, (2011).

[HUU 07] Mo L.T., Huurman M., Wu S.P., Molenaar A.A.A., *Finite Elem. Anal. Des.* 44, (2007) 333–343.

[HUU 08] Mo L.T., Huurman M., Wu S.P., Molenaar A.A.A., *Finite Elem. Anal. Des.* 44, (2008) 186-196.

I

[IOA 17] Ioana M. A., Chazallon C., Duchez J. L. and Mouhoubi S. Modelling of the fatigue damage of a geogrid-reinforced asphalt concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 18 Issue 1, (2017) 250-262.

J

- [JAN 05]** Jankowiak T., Łodygowski P. T. Identification of parameters of concrete damage plasticity consecutive model. University of Technology, Institute of Structural Engineering (ISE) ul. Piotrowo, Poznan, Poland. Foundations of civil and environment engineering, 6, (2005) 60-975.
- [JAV 13]** Javier R., Martínez F., and Martí J. Concrete Constitutive Model, Calibration and Applications, SIMULIA Community Conference (2013).
- [JEA 94]** Jean L. P, Marignier J., Vidal B. Le triaxial à chargements répétés LPC pour l'étude des graves non traitées. Bull, liaison Labo. P. et Ch., 190, Réf. 3815, (1994).
- [JEA 98]** Jean B., Gomes A. C., Jouve P., Hornych P., Paute J. L. Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées, Dernières avancées. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussée, 216, Réf. 4182, (1998) 3 – 18.
- [JEN 01]** Jensen O.M. and Hansen P.F. Water entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background, Cem. Con. Res., 31, (2001) 647–654.

K

- [KAI 04]** Sonia Kaibouchi. Mâchefers d'Incineration d'ordures Ménagères : Contribution a l'étude des mecanismes de stabilisation par carbonatation et influence de la collecte sélective. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquees de Lyon (2004).
- [KAM 99]** Kamali S., Identification de la loi de comportement mécanique d'un mortier lixivié par du nitrate d'ammonium, Rapport de DEA, Ecole Normale Supérieure de Cachan (1999).
- [KAM 04]** Kamali S., Moranville M., Garboczi Ed., Prené S., Gérard B., Hydrate dissolution influence on the Young's modulus of cement pastes, Conférence Internationale FraMCoS / Vail, Colorado/USA/12-16 Avril, (2004) 631-638.
- [KAM 07]** Kamali-Bernard S., Bernard F., Prince W., Hjiat M. Modélisation tridimensionnelle et multi-échelle du comportement des matériaux cimentaire, application à la lixiviation. 25e rencontre de l'AUGC, 23-25 Mai Bordeaux, (2007).
- [KAM 09]** Kamali-Bernard S., Bernard F. Effect of tensile cracking on diffusivity of mortar: 3D numerical modelling. Computational Materials Science, (2009).
- [KEI 14]** Keinde D. Etude du béton à l'échelle mesoscopique : simulation numérique et tests de micro-indentation. PhD thesis. INSA de Rennes, (2014).
- [KEU 17]** Keun-Hyeok Y., Ju H. C. and Seung-Jun K. Modeling of chloride diffusion in concrete considering wedge-shaped single crack and steady-state condition. Computers and Concrete, Techno Press, 19, No. 2 (2017) 211-216.
- [KIM 04]** Kim Y., Little D.N., J. Mater. Civil Eng. 16 (2), (2004).
- [KUP 69]** Kupfer H., Hilsdorf HK. Rusch H. behavior of concrete under biaxial stresses. ACI J, 66, (1969) 656-666.

L

- [LEF 98]** Lefebvre. J. Etude du gonflement des mâchefers traités aux liants hydrauliques. DEA- Douai : école des mines de Douai, (1998).
- [LEE 98]** Lee J, Fenves G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. J Eng Mech, ASCE, 124 (8), (1998) 892-900.
- [LIA 17]** Liang M., Balaji R., Olivier B., Xavier H., Gérard M., Piotr B. An objective meta-modelling approach for indentation-based material characterization, Mechanics of Materials, Elsevier, 107, (2017) 31-44.
- [LUB 89]** Lubliner J, Oliver J, Oller S, Onate E.A A plastic-damage model for concrete. Int J Solid Struct, 25, (1989) 299-329.
- [LUO 80]** Luong M. P. Phénomène cyclique dans les sols pulvérulents. Revue Française de Géotechnique, 10, (1980) 39-53.
- [LYT 90]** Lytton R. Strategy High. Resolution Progress, Washington DC, (1990).

M

- [MAS 05]** Massad A., Saadeh S., Al-Rousan T., Garboczi E., Little D., Comput. Mater. Sci., 34, (2005) 406–424.
- [MED 08]** Meddah A. Étude du comportement d'un sable de dune sous sollicitations triaxiales. Thèse de doctorat de l'Université de M'SILA. (2008) 130 pages.
- [MES 00]** Mestat P., Arafati N. Modélisation des sables avec la loi de Nova : détermination des paramètres et influence sur les simulations. Bulletin de LPC, Réf. 4315, 225, (2000) 21-40.
- [MET 99]** Li G., Li Y., Metcalf J. B., Pang S. S., J. Mater. Civil Eng., 11 (3), (1999) 236–241.
- [MIN 17]** Minane J. R. Contribution à l'élaboration de sables de mâchefers améliorés en vue d'une valorisation dans la formulation de matériaux cimentaires. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille, (2017).

N

- [NAR 17]** Narayan S. P. A., Little D. N. and Rajagopal K. R. Modelling the nonlinear viscoelastic response of asphalt binders. Road Materials and Pavement Design, 17 Issue 2, (2016) 123-132.
- [NEO 14]** Mines Douai Département Génie Civil & Environnemental. Etude de granulats de mâchefers améliorés & suivis mécanique et environnemental d'une route expérimentale à base de mâchefers améliorés. Rapport d'étude 30 pages, NEO ECO RECYCLING (Décembre 2014).
- [NGU 08]** Nguyen H. N. Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume. PhD thesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, (2008).

[NOU 11] Noulin F. Mâchefers : un nouvel arrêté au service des intérêts de la filière Incinération – la nature comme substitut à la décharge, (2011).

O

[ODI 12] Lionel Odie. Mâchefers d’Incinération d’Ordures Ménagères. Laboratoire régional des ponts et chaussée de St Brieuc, SYMEED (22 Mars 2012).

[OLI 92] Oliver W.C., Pharr G.M., An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, Journal of Materials Research, 7, (1992) 1564-1583.

P

[PER 99] Perraton D., Aïtcin P, Carles-Gilbergues A., Mesures de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque. Parti II-étude de l’influence de la taille des éprouvettes et de la variabilité des résultats dans le cas d’un BHP, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 221, (1999) 79-87.

[PRA 95] Prat M. La modélisation des ouvrages AFPC. Emploi des éléments finis en génie civil, (1995).

R

[REC 15] RECORD. Qualité et devenir des mâchefers d’incinération de déchets non dangereux - état des lieux et perspectives. Rapport technique 134 pages, n 13-0241 1A (Octobre 2015).

[REN 07] Eva Rendek, Gaëlle Ducom, and Patrick Germain. Influence of waste input and combustion technology on {MSWI} bottom ash quality. Waste Management, 27(10), (2007) 1403 – 1407.

[ROU 08] Rougelot T. Etude expérimentale multi-échelles des couplages hydriques, mécaniques et chimiques dans les matériaux cimentaires. PhD thesis. Université des Sciences et Technologies de Lille, (2008).

S

[SET 92] Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme du SETRA, GTR, (1992).

[SET 97] Note d'information CD 103 sur l'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en technique routière, SETRA, (1997).

[SET 98] Guide Technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France (GTIF) – Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (Préfecture d'Ile-de-France, Conseil Régional d'Ile-de-France, UNICEM, SPRIR Ile-de-France, Contrat de Plan interrégional du Bassin parisien, SYCTOM, SVDU, (1998).

[SHA 02] Shashidhar N., Shenoy A., Mech. Mater., 34, (2002) 657–669.

[SHU 08] Shu X., Huang B., J. Mater. Civil. Eng., 20 (8), (2008) 530–538.

[SMI 05] Smilauer V., Elastic properties of hydrating cement paste determined from hydration methods, Ph-D thesis, University of Prague, Czech Republic, (2005).

T

[TAZ 95] Tazawa E., Miyazawa S. and Kasai T., Chemical shrinkage and autogeneous shrinkage of hydrating cement paste. Cem. Con. Res., 25, (1995) 288–292.

[TEH 11] Tehrani F., Allou F., Absi J., Petit C. Modélisation numérique des enrobés bitumineux en tant que biphasés matrice-inclusions. XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai, (2011).

[TEH 12] Tehrani F., J. Absi, Allou F., Petit C. Heterogeneous numerical modeling of asphalt concrete through use of a biphasic approach: Porous matrix/inclusions. Computational Materials Science, (2012).

[TZI 00] Chen Tzikang, U.S. Army Research Laboratory Vehicle Technology Directorate Langley Research Center, Hampton, Virginia. Determining a Prony Series for a Viscoelastic Material From Time Strain Data. NASA / TM-2000-210123 ARL-TR-2206.

V

[VAL 13] R. Del Valle-Zermeño, J. Formosa, J.M. Chimenos, M. Martínez, and A.I. Fernández. Aggregate material formulated with {MSWI} bottom ash and {APC} fly ash for use as secondary building material. *Waste Management*, Special Thematic Issue: Urban Mining Urban Mining 33(3), (2013) 621 – 627.

W

[WEI 16] Wei She, Guotang Zhao, Guotao Yang, Jinyang Jiang, Xiaoyu Cao and Yi Du. Numerical analysis of the thermal behaviors of cellular concrete. *Computers and Concrete*, Techno Press, 18 (3), (2016) 319-336.

Y

[YUR 03] Yurtdas I. Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : étude expérimentale sur mortiers. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille, école centrale de Lille, (2003).

Z

[ŽEL 17] Željko S. and Joško O. Mesoscale model for fiber-reinforced-concrete: Microplane based approach. Computers and Concrete, Techno Press, 19 (4), (2017) 375-385.

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse:

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

Nom Prénom de l'auteur : SOW LIBASSE

Membres du jury :

- Monsieur BERNARD Fabrice
- Madame KAMALI-BERNARD Siham
- Monsieur ABRIAK Nor-Edine
- Monsieur CISSE Ibrahima Khalil
- Monsieur PETIT Christophe
- Monsieur KEBE Cheikh Mouhamed Fadel

Président du jury : ABRIAK Nor-Edine

Date de la soutenance : 06 Avril 2018

Reproduction de la these soutenue

- ☒ Thèse pouvant être reproduite en l'état
☐ Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées

Fait à Rennes, le 06 Avril 2018

Signature du président de jury



ABRIAK-NE

Le Directeur

M'hamed DRISSI



Dans ce travail, il est question d'étudier la faisabilité d'une valorisation en techniques routières de granulats de Mâchefers d'Incinération des Déchets Non Dangereux (MIDND). Cette étude se base en premier lieu sur une analyse expérimentale ayant permis d'obtenir leurs propriétés élastiques. Ces propriétés servent de données d'entrée à une modélisation multi-échelle hiérarchique développée pour étudier le comportement mécanique de graves à base de MIDND traitées aux liants (ciment et bitume).

La campagne expérimentale originale sur des particules de mâchefers a permis de les cartographier au Microscope Electronique à Balayage (MEB). Pour ces particules, des modules d'élasticité moyens réduits variant de 15 à 68 GPa ont été trouvés par le biais de tests d'indentation en appliquant la méthode de « Olivier and Pharr » [OLI 92]. Les analyses chimiques ponctuelles qualitatives (EDS) effectuées ont permis d'obtenir la composition chimique des granulats de mâchefers.

Partant d'une granulométrie de particules de MIDND 0/25 qui a fait l'objet d'une étude expérimentale [BEC 07], nous avons mis en place deux modèles numériques 3D de grave routière traitée aux liants dans des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER). Ces modèles sont basés sur une stratégie de modélisation dite « multi-échelle » hiérarchique. Deux types de liant sont étudiés : le ciment CEM I 42,5R et le bitume de [NGU 08]. Pour les deux types de liant, les agrégats traités ont été décomposés en deux VER : sub-mesoscopique (0/6) et mesoscopique (6/25). Une application à la valorisation des MIDND en techniques routières est faite dans les deux cas.

Avec un traitement à 3% de ciment, une campagne de simulations numériques « Laboratoire virtuel » a été menée. A l'échelle sub-mesoscopique, des simulations multiaxiales menées sur le VER, ont conduit à l'obtention des 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. La modélisation développée a ensuite été validée en comparant nos résultats numériques et quelques résultats expérimentaux de [BEC 07].

Avec un traitement à 5% de bitume, des tests de relaxation de contraintes ont été effectués aux deux échelles et ont permis d'obtenir les propriétés thermo-rhéologiques de la grave de mâchefers traités au bitume : les modules de relaxation sont exprimés sous la forme de séries de Prony à une température de référence de 0°C ; par ailleurs, les constantes de la loi Williams-Landel-Ferry (WLF) pour décrire le comportement thermo-rhéologiquement simple sont identifiées. Les séries de Prony sont obtenues par l'intermédiaire des modules élastiques normalisés. Les constantes de loi WLF obtenues sont $C_1 = 20^\circ\text{C}-1$ et $C_2 = 130^\circ\text{C}$. La validation des paramètres identifiés a été faite en comparant les réponses du matériau hétérogène de grave-bitume et celles d'un matériau homogène à qui nous avons donné les propriétés identifiées tirées du matériau hétérogène.

In this work, the feasibility of a valorisation in road engineering of non-hazardous waste incineration bottom ash aggregates (NHWI) is investigated. This study is first based on an experimental determination of the elastic properties of the bottom ash particles. These properties serve as input data for a hierarchical multi-scale modelling developed to study the mechanical behaviour of aggregates treated with binders (cement and bitumen).

The original experimental campaign on the bottom ash particles allowed them to be mapped to the Scanning Electron Microscope (SEM). For these particles, a mean reduced modulus of elasticity in between 15 and 68 GPa was found by means of indentation tests and applying the «Olivier and Pharr» method [OLI 92]. The chemical analysis of the aggregates was obtained using qualitative point chemical analyzes (DHS).

Based on a 0/25 particle size distribution of NHWI, which was the subject of an experimental study [BEC 07], we have implemented two 3D models of road materials treated with binders in Representative Elementary Volumes (REV). These models are based on a hierarchical multi-scale modelling strategy. Two types of binder are studied: cement CEM I 42.5R and bitumen of [NGU 08]. For both types of binder, the treated aggregates were divided into two REV, at respectively the submesoscale (0/6 mm) and the mesoscale (6/25 mm). An application to the valorisation of NHWI bottom ashes in road engineering is studied in both cases.

With a 3% cement treatment, a numerical simulation campaign «Virtual Laboratory» was conducted. At the sub-mesoscale, the input parameters for the Concrete Damaged Plasticity Model used at the mesoscale are determined. At the mesoscale, the mechanical characteristics of the road materials usually determined through experiments have been found. The developed simulation strategy has been validated by comparing our numerical results and some experimental results of [BEC 07].

With a 5% bitumen treatment, stress relaxation tests carried out at the two scales enable one to obtain the thermo-rheological properties of the Bitumen-Bound Gravel. These properties are the Prony series at a reference temperature of 0°C and the Williams–Landel–Ferry (WLF) law constants. Prony series are obtained by means of standardized elastic moduli. The obtained WLF law constants are $C_1 = 20^\circ\text{C}-1$ and $C_2 = 130^\circ\text{C}$. The numerical simulations have been validated by comparing the responses of heterogeneous and corresponding homogeneous materials.