Comportement local des enrobés recyclés : apport des mesures de champs cinématiques

Mohamed Cheikh Teguedi

▶ **To cite this version:**

Mohamed Cheikh Teguedi. Comportement local des enrobés recyclés : apport des mesures de champs cinématiques. Génie civil. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2017. Français. NNT : 2017CLFAC032 . tel-01721345

HAL Id: tel-01721345
https://theses.hal.science/tel-01721345v1

Submitted on 2 Mar 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.

E D S P I C : 808

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE

ÉCOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée par

Mohamed Cheikh TEGUEDI

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL

Comportement local des enrobés recyclés : apport des mesures de champs cinématiques

Soutenue publiquement le 26 septembre 2017 devant le jury :

M. B. BLAYSAT, MCF, UCA	Co-Encadrant
M. D. BREYSSE, Professeur, Université Bordeaux 1	Rapporteur
M. H. DI BENEDETTO, Professeur, ENTPE	Rapporteur
M. M. GRÉDIAC, Professeur, UCA	Co-Directeur
M. F. HAMMOUM, Directeur de recherche, IFSTTAR	Examinateur
M. S. LIANDRAT, Chef d'unité adjoint, Cerema, CE\DLCF	Co-Encadrant
M. S. MOREIRA, directeur adjoint, Cerema CE\DLCF	Co-Encadrant
Mme E. TOUSSAINT, Professeure, UCA	Directrice

Dédicaces

"À ma mère

À mon père

À ma femme Khadi et ma fille Tveg

À toute ma famille et mes amis"

Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.
Tout d'abord, j'aimerais exprimer ma sincère gratitude à mes directeurs de thèse Prof. Evelyne Toussaint et Prof. Michel Grédiac pour le soutien continu durant et après ma thèse, pour leur patience, leur motivation et leur immense savoir. Leurs conseils m'ont aidé tout au long de la recherche et de l'écriture de cette thèse. Je n'aurais pas pu imaginer avoir une meilleure équipe encadrante pour mon travail doctoral.
Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à Benoît Blaysat qui était pour moi un ami plutôt qu'un encadrant de thèse.
Du coté Cerema, j'exprime tous mes remerciements aux Sylvain Moreira, Sebstien Liandrat et Eric Crégut pour ces 3 années de collaboration.
En plus, de mes directeurs de thèse, j'aimerais remercier le reste de mon comité de thèse : Prof. Hervé Di-benedetto, Prof. Denys Breyss et Dr. Ferhat Hammoum, pour leurs commentaires, mais aussi pour les questions difficiles qui m'ont incité à élargir mes investigations et proposer des nouveaux perspectives.
Je remercie également Gaël Godi ingénieur responsable du Hall GC pour son aide dans la manipulation et l'utilisation des machines d'essais ainsi que le technicien Dannyl Chanal pour son aide précieuse lors des travaux expérimentaux.
Je dédie une mention spéciale à tous mes compagnons de laboratoire pour les longues pauses café. Vous étiez un maillon incontournable pour le bon déroulement de cette thèse. Je mentionne en particulier Mathilde, Bernard, Edouard, Augustin, Maitham, Taher, Yassia, Elodie, César et Claude. J'adresse Un remerciement spécial à Mathilde Vernay pour avoir organisé le pot de la thèse.
Je souhaiterais exprimer ma gratitude à mes parents, à ma femme Khadi et à ma fille Tveg pour m'avoir soutenu spirituellement tout au long de l'écriture de cette thèse et de ma vie en général.
Pour finir, je remercie sincèrement la région Auvergne-Rhône-Alpes pour avoir financé ce travail de thèse.

Résumé

Les enrobés bitumineux sont des matériaux composites complexes constitués de plusieurs phases : granulats, liants bitumineux et vides. L'assemblage de ces phases définit une microstructure très complexe qui pilote la réponse macroscopique des enrobés. Classiquement, les réponses mécanique et thermique des enrobés sont caractérisées par des essais à l'échelle macroscopique en supposant que le matériau est homogène et isotrope. À l'échelle des constituants, la caractérisation de ces matériaux nécessite d'utiliser une technique de mesure disposant simultanément d'une bonne résolution spatiale et d'une bonne résolution de mesure. L'enjeu de ce travail est d'une part d'évaluer les possibilités d'utilisation de la méthode de la grille (MG) pour l'analyse des propriétés thermo-mécaniques des enrobés bitumineux, et d'autre part de caractériser, grâce à l'apport de cette méthode, l'effet de l'introduction d'agrégats d'enrobés (AE). L'étude expérimentale comprend des essais de compression et de traction ainsi que des essais de gel-dégel. Les champs cinématiques issus de la MG ont permis d'étudier la réponse de ces matériaux à des échelles allant de l'échelle du constituant jusqu'à celle de l'éprouvette. Les résultats obtenus ont également permis de valider une approche expérimentale innovante pour l'analyse des enrobés en permettant d'accéder à des informations fiables et riches à l'échelle de la microstructure. Certains aspects liés à l'impact du recyclage sur le comportement local de l'enrobé sont également fournis.
Mots clés : *enrobé, agrégats, méthode de la grille, corrélation d'images numériques, gel-dégel, comportement local.*

Abstract

Asphalt mixtures are complex composite materials constituted of several phases, namely aggregates, bituminous binder and voids. The assembly of these phases defines a highly complex microstructure, which drives the macroscopic response of asphalt mixtures. Classically, both the mechanical and the thermal responses of asphalt materials are characterized by using experiments at the scale of the mixture assuming that the material is homogeneous. At the scale of their constituents, these materials require a measurement technique featuring simultaneously both a good spatial resolution and a good strain resolution. To date, there are only few experimental studies available in the literature that describe the thermal and mechanical behavior of bituminous mixes at the scale of the constituent. The aim of this work is, on the one hand, to evaluate the possibilities of using the grid method (GM) for the analysis of the thermo-mechanical properties of asphalt mixtures and, on the other hand, to characterize the effect of the recycled asphalt pavement (RAP) inclusion on the local behavior of these materials. Full-field measurements provided by GM allow to study the response of these materials at scales ranging from the component to the mixture itself. These results enable us to validate an innovative experimental approach for the analysis of asphalts. It gives access to reliable and rich information at the scale of the microstructure. Some aspects related to the impact of RAP on the local behavior of asphalt were also provided.
Keywords : *Asphalt, Recycled, RAP, full-field measurement, grid method, Digital image correlation, DIC, freeze-thaw, local behavior.*

Table des matières

Remerciements **iii**

Résumé **v**

Table des figures **xiii**

Liste des tableaux **xix**

Introduction Générale **1**

1 État de l'art sur les enrobés bitumineux **5**
1.1 Généralités sur les enrobés bitumineux 5
1.1.1 Composants minéraux 5
1.1.2 Liant bitumineux 6
1.1.3 Mastic 9
1.1.4 Concepts de base de fonctionnement structurel des mélanges bitumineux 9
1.1.5 Aspect multi-échelle des enrobés bitumineux 11
1.1.6 Sollicitations externes et dégradations des enrobés bitumineux 11
1.2 Caractérisation des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux 14
1.2.1 Grandes classes de comportement 14
1.3 Caractérisation du comportement thermique des enrobés en laboratoire . . . 16
1.3.1 Introduction 16
1.3.2 Méthodes expérimentales pour la caractérisation du comportement thermique des enrobés 16
1.3.3 Effet de cycles de gel-dégel sur l'enrobé sous conditions saturées . . . 21
1.3.4 Critique de la bibliographie sur le comportement thermique des enrobés 23
1.4 Les enrobés bitumineux recyclés 24
1.4.1 Recyclage des agrégats d'enrobé 24
1.4.2 Caractéristiques d'agrégats d'enrobé 25
1.4.3 Challenges inhérents au recyclage 28
1.4.4 Mélange entre le liant d'apport et le liant d'agrégats d'enrobé 29
1.4.5 Caractérisation du degré de mélange entre les matériaux d'apport et les agrégats 29
1.4.6 Phénomène de groupement des granulats dans un enrobé recyclé . . . 34
1.4.7 Critique de la bibliographie existante sur les enrobés recyclés 35
1.5 Conclusion 37

2 Méthodes expérimentales pour la caractérisation de champs de déformation hétérogènes 39
2.1 Introduction . . . 39
2.2 Principales notions de métrologie . . . 40
2.3 Méthode de mesure se basant sur l'analyse d'images . . . 42
2.4 Méthode de corrélation d'images numériques 2D (CIN) . . . 45
2.4.1 Principe de la méthode de corrélation . . . 45
2.4.2 Application de la CIN à l'étude des enrobés bitumineux . . . 50
2.4.3 Critique de la bibliographie existante . . . 59
2.5 Méthode de la grille (MG) . . . 61
2.5.1 Principe de la MG . . . 61
2.5.2 Application de la MG à l'étude des enrobés bitumineux . . . 66
2.5.3 Critique de la bibliographie existante . . . 66
2.6 Conclusion . . . 69

3 Comportement des enrobés recyclés en compression 71
3.1 Introduction . . . 71
3.2 Matériaux testés . . . 71
3.3 Le montage expérimental et la méthode de la grille . . . 75
3.3.1 Essais de faisabilité et définition du protocole expérimental . . . 75
3.3.2 Mesure de déplacement et déformation en utilisant la méthode de la grille . . . 76
3.4 Réponse à l'échelle macroscopique . . . 80
3.5 Réponse à l'échelle microscopique . . . 81
3.5.1 Introduction . . . 81
3.5.2 Champs de déplacement et déformations . . . 83
3.5.3 Distribution des déformations à l'échelle du mastic . . . 84
3.5.4 Comportement local des agrégats dans le mélange 40% AE . . . 90
3.6 Comparaison du comportement mécaniques des différents mélanges . . . 97
3.6.1 Phase de chargement . . . 97
3.6.2 Phase de recouvrance . . . 101
3.7 Conclusion . . . 104

4 Vers une mesure de la dilatation/contraction locale des enrobés soumis à des cycles gel/dégel 105
4.1 Introduction . . . 105
4.2 Montage expérimental et méthodes . . . 106
4.2.1 Matériaux testés . . . 106
4.2.2 Essai de faisabilité et montage expérimental . . . 106
4.2.3 Protocole expérimental . . . 113
4.2.4 Méthodes de mesures des champs . . . 113
4.3 Analyse globale . . . 115
4.4 Réponse à l'échelle des constituants . . . 118
4.4.1 Champs de déplacement . . . 118
4.4.2 Champs de déformation . . . 120

4.5 Interaction entre granulats et liant . . . 122
4.6 Coefficient de contraction thermique du liant . . . 124
4.7 Cycle gel-dégel supplémentaire sous condition saturée . . . 128
4.8 Conclusion . . . 132

5 Étude du comportement en traction des enrobés recyclés dans le domaine des petites déformations 133
5.1 Introduction . . . 133
5.1.1 Matériaux testés et préparation des échantillons . . . 134
5.1.2 Dispositif expérimental . . . 135
5.2 Résultats préliminaires . . . 136
5.2.1 Revue des méthodologies pour la compensation OPM . . . 139
5.2.2 Compensation des OPM pour les enrobés bitumineux . . . 142
5.2.3 Mise en œuvre sur les données expérimentales . . . 142
5.2.4 Filtrage temporel . . . 145
5.3 Analyse des résultats expérimentaux . . . 148
5.3.1 Observations générales . . . 148
5.3.2 Effet d'AE sur la répartition locale des déformations . . . 151
5.4 Conclusion . . . 154

Conclusion Générale 155

Bibliographie 161

A Formulation des mélanges d'enrobé recyclé 175

B Résultats supplémentaires pour le chapitre 3 181
B.1 Cartes de déformation . . . 181
B.2 Microstructure de l'échantillon 100% AE testée sans la grille . . . 183

C Résultats supplémentaires pour le chapitre 5 185
C.1 Exemples des régions de compensation (ROC) . . . 185
C.2 Exemples de la compensation des OPM . . . 187
C.3 Comparaison entre la déformation compensée issue de la MG et celle issue des capteurs MAER . . . 190
C.4 Exemple des cartes de taux de déformation . . . 191

Table des figures

1.1 Exemple de la constitution de l'enrobé. 6
1.2 Essai de caractérisation du bitume, (a) essai de pénétration, (b) point de ramollissement et (c) RTFOT. 8
1.3 Image montrant le mastic, obtenue par microscopie électronique à balayage sur un échantillon d'enrobé. 9
1.4 Concepts de base pour le fonctionnement structurel des mélanges bitumineux. 10
1.5 Exemple des différentes structure d'enrobés, (a) asphalte coulé, (b) béton bitumineux dense et (c) Enrobé SMA (Stone Mastic Asphalt). 10
1.6 Dépendances d'échelles impliquées dans une interprétation multi-échelle des enrobés bitumineux. 12
1.7 Schématisation des sollicitations induites par le trafic. 13
1.8 Schématisation des sollicitations induites par la température. 13
1.9 Comportements types des enrobés bitumineux à température fixée, ε *vs* le nombre des cycles (N). 15
1.10 (a) Illustration du principe de l'ATCA ; (b) l'éprouvette à retrait empêché, (c) l'éprouvette libre, et (d) l'éprouvette libre après la rupture. 17
1.11 Résultats expérimentaux typiques issus de l'ATCA, (a) mesure de la température de transition vitreuse de l'enrobé, (b) la mesure de l'accumulation de contraintes et la rupture, (c) le cyclage thermique et (d) la réponse en contrainte durant le conditionnement isotherme. 18
1.12 Résultats de l'ATCA et calcul de la courbe du module de relaxation. 19
1.13 Anneau ACCD placé à l'intérieur d'un échantillon d'enrobé entaillé. 20
1.14 Anneau ACCD soumis à une pression externe P et (b) échantillon d'enrobé à soumise à une réaction de l'anneau (une pression interne P). 20
1.15 Contraction des éprouvettes avec différents degrés de saturation en fonction du temps. Une expansion de la phase liquide peut être observée dans l'échantillon saturé à 51%. 22
1.16 Comparaison des tranches d'image d'un échantillon SMA, avant et après gel-dégel. (Rouge = vide existant, vert = incrément de vides après 15 cycles de gel-dégel par rapport aux vides existants, violet = incrément de vides après 30 cycles par rapport à l'état précédent) 23
1.17 Composition d'un enrobé recyclé et répartition de la participation des agrégats d'enrobé au liant et aux granulats de l'enrobé recyclé. 26
1.18 Séparation d'un amas d'agrégats. 27

1.19 Éprouvette après 8 min de malaxage, les amas d'agrégats non mélangé avec le reste du mélange sont visibles. 31
1.20 (a) Photo prise sous lumière blanche et (b) photo prise sous UV : distinction du liant d'apport (fluorescent) et celui d'agrégats d'enrobé (foncé). 31
1.21 Interface fissurée entre les matériaux d'apport (virgin) et les agrégats (RAP) 31
1.22 Système composite en couches au sein d'un enrobé recyclé. 32
1.23 Couches récupérées autour d'un granulat d'agrégats d'enrobé. 32
1.24 Distribution statistique de l'épaisseur du film LAE autour de GAE (le chiffre après la lettre « A » désigne la température de production) et (b) Illustration de la distribution non uniforme du liant en fonction de la courbure locale de GAE. 34
1.25 Représentation schématique de (a) la situation de référence (pas de formation d'amas et pas de migration du LAE) et (b) formation d'un amas d'agrégats qui réduit la surface spécifique total. 35
1.26 Exemple de la réactivation d'une couche de LAE au cours du mélange avec les GA. 36

2.1 Méthode de mesure basée sur l'analyse d'images : (a) configuration de référence et (b) déformée. 43
2.2 Illustration de la cinématique des particules. 44
2.3 (a) Déformation moyenne normale dans le mastic representée sous forme des fleches et (b) déformation moyenne tangentielle. 45
2.4 Principe de l'appariement des imagettes. 46
2.5 La base de l'ensemble des transformations 2D. 46
2.6 Principe de la jauge virtuelle. 48
2.7 Champs de déformation à la fin d'un essai à un essai de traction monotone sur l'enrobé. 49
2.8 Résolution théorique de la CIN pour un capteur de 1300 × 1000 pixels . . . 49
2.9 Évolution de la déformation au cours de l'essai IDT à différents niveaux du chargement. 52
2.10 (a) Exemple de la propagation des fissures suivant l'épaisseur de la plaque ; le passage de la roue est dans le plan perpendiculaire à celui-ci, (b) la propagation des fissures dans le plan de passage de la roue ; (c) et (d) illustrent respectivement la déformation de traction et de cisaillement dans l'épaisseur de la plaque 53
2.11 Localisation de la déformation dans une éprouvette à double entaille et procédure du calcul de déformation moyenne dans cette zone, (b) Courbe contrainte en fonction des déformations issue du capteur LVDT et CIN. 54
2.12 Essais de caractérisation ; la région d'intérêt est colorée en jaune. 55
2.13 Cartes de déformation pour l'essai de flexion semi-circulaire, (a) Mélange non modifié, (b-c) Mélange avec differents degrés de modification. 55
2.14 Modèle de zone cohésive et la détermination de l'énergie à partir d'un essai de traction sur des granulats noyés dans le mastic 56

2.15 (a) Essai en mode I, échantillon DC(T), (b) essai en mode II, échantillon DST et (c) la disposition des jauges virtuelle pour estimer l'avancée de la fissure à l'interface. 57
2.16 Configuration Arcan avec le montage correspondant aux différents modes. . . 58
2.17 Exemple de la concertation de la déformation pour les certains modes 58
2.18 Comparaison entre les résultats de simulation et ceux issus de la CIN. 60
2.19 Déplacement d'un point physique. 62
2.20 Champs de déplacement (en pixel) et déformation longitudinaux dans une éprouvette d'enrobé soumise à une compression. 67

3.1 (a) Agrégats d'enrobé (noir) et les granulats d'apport (blanc), (b) les granulats d'agrégats d'enrobé dépourvus de leur enrobage. 72
3.2 Les différentes étapes de fabrication des éprouvettes Duriez. (a)-(b) malaxage des matériaux dans un malaxeur, (c) moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes cylindriques, (d) compactage des éprouvettes avec une presse, (e) forme finale de l'éprouvette après l'élaboration du méplat qui correspond à la région d'intérêt. 73
3.3 Dimension de l'éprouvette testée. 74
3.4 Exemples de surfaces étudiées avec différents pourcentages d'agrégats d'enrobé. 74
3.5 Configuration de l'essai. 76
3.6 (a) Déplacement vertical U_y et (b) déformation verticale ε_{yy}. 77
3.7 (a)-(b) Les composants de la colle avant le mélange, (c) aspect final de la colle après le mélange des composants, (d) mis en place de la colle sur la surface à étudier, (e) collage de la grille et (f) décollement de la feuille polymère. . . . 78
3.8 Coupe transversale dans une éprouvette d'enrobé équipée d'une grille. 79
3.9 Courbe force-déplacement. 81
3.10 Déformation moyenne ε_{yy}^{moy} en fonction du temps. 82
3.11 Méthode de calcul de la déformation moyenne ε_{yy}^{moy} à partir du champ de déplacement vertical (en pixel, 1 pixel = $400\mu m$). 82
3.12 Déformation moyenne normalisée ($\frac{\varepsilon_{yy}^{moy}}{\varepsilon_{yy}^{max}}$) en fonction du temps. 83
3.13 Champs de déplacement (en pixel, 1 pixel = $400\mu m$) superposés à la microstructure des échantillons à force maximale. 85
3.14 Champs de déformation superposés à la microstructure de la région d'étude de l'éprouvette correspondante 86
3.15 (a) Bande de mastic entre deux gros granulats A et B situés dans la zone Z1 de la Fig. 3.14f, les flèches blanches indiquent le sens de rotation des granulats (b) déplacement vertical et horizontal le long de la ligne blanche (en pixel, 1 pixel = 40 μm) et (c) distribution de déformation entre les granulats A et B. 88
3.16 (a) Champ de rotation (en rad) et directions principales à force maximale. ε_1 en noire (positive) et ε_2 en rouge (négative) 89
3.17 Champ de déplacement représenté sous forme d'un maillage déformé. Les granulats A et B sont mis en évidence en vert. La taille du maillage est égale à 10 pixels (400 μm), et l'amplification du déplacement est égale à 18. 90
3.18 Séparation d'un morceau d'agrégat. 92

3.19 Déformation équivalente pour l'échantillon 40% AE sur laquelle les régions R1-R8 ont été mise en évidence par des rectangles. 93
3.20 Les détails des régions R1-R4. 94
3.21 Les détails des régions R6-R8. 95
3.22 Analyse de la déformation dans la région R8. (a) Trois lignes sélectionnées dans la zone R5. La ligne rouge est située au-dessus de la couche du liant foncé alors que les lignes bleue et verte la traversent (b) la distribution des déformations suivant ces ligne. 96
3.23 Distribution de r_{eq} pour différents mélanges. 98
3.24 Microstructures de l'échantillon 100% AE observé avec un microscope optique. (a) zone A1, (b) zone A2 99
3.25 Microstructures de l'échantillon 100% AE testé sans la grille, (a) et (b) exemples de fissures à l'interface de certains granulats. 99
3.26 Microstructure de l'échantillon 0% AE testé sans la grille et observé avec un microscope optique. (a) Image mettant en évidence l'existence d'une fissure au sein du liant et (b) image de niveaux des gris de la même zone permettant une meilleure visualisation de la fissure. 100
3.27 Histogramme de la distribution r_{eq}. 101
3.28 Distribution du taux de récupération pour les différentes éprouvettes. 102
3.29 Histogramme de la répartition en pourcentage de récupération. 103

4.1 Méplat correspondant à la région d'étude pour les différents échantillons testés dans ce chapitre. 107
4.2 Dispositif expérimental. 109
4.3 Image de référence à $T = 20°C$. L'image déformée à $T = -10°C$ montrant une couche de givre couvrant la grille, celle-ci reflète l'éclairage sur la partie supérieure de l'échantillon. À $T = 0°C$, début de la fonte du givre couvrant la grille. 109
4.4 Emplacement des thermocouples : 3 thermocouples collés sur la surface de l'éprouvette et 1 thermocouple placé au cœur de l'éprouvette. 110
4.5 (a) Franges parasites sur la carte de déformation ε_{xx} où la grille alignée sur les pixels du capteur et (b) le même échantillon avec la caméra inclinée avec 18° (absence des franges). 110
4.6 (a) Illustration du spectre continu d'une grille qui est supposée générer trois harmoniques le long de chaque axe. (b) Spectre discret d'une image de grille alignée avec les pixels du capteur. (c) Même figure que (b), mais pour une grille tournée. 112
4.7 Évolution typique de la température à la surface et au cœur de l'échantillon pendant un essai. Les instants de prise de l'image de référence et des images déformées sont indiqués. 112
4.8 Comparaison entre les cartes de déformations obtenues à partir de la CIN et MG pour l'échantillon 100% AE à $T = -6°C$. 116
4.9 Déformation isotrope moyenne (déformation moyenne) en fonction de la température. 117
4.10 Déformation déviatorique moyenne en fonction de la température. 118

4.11 Champs de déplacements typiques pour l'échantillon 40% AE à $T = -10°C$ (en pixels, 1 pixel = 40μm). (a) et (b) représentent les champs de déplacement suivant x et y dans la configuration de référence. Le champ de déplacement est superposé à la microstructure de l'échantillon. (c) illustre le champ de déplacement représenté comme un maillage déformé amplifié (amplification = 350, pas = 10 pixels). 119
4.12 Champs de déformation typiques pour chacun des échantillons testés à $T = -10°C$ (1 pixel= 40μm). Les cartes de déformation sont superposées sur la microstructure de l'échantillon. 121
4.13 Exemple de la déformation (a) isotrope et (b) déviatoriques pour l'échantillon 40% AE à $T = -10°C$. Les déformations sont superposées sur la microstructure de l'échantillon. 122
4.14 (a) Déformation principale majeure et (b) déformation principale mineure pour l'échantillon 40% AE à $T = -10°C$. Les cartes de déformation sont superposées sur la microstructure de l'éprouvette. 123
4.15 Déformation principale majeure pour des pixels où $\varepsilon_1 > -0.0005$. 124
4.16 Déformations principales (a, c, e) majeures et (b, d, f) mineures dans les régions R1-R3. L'orientation de la base principale de déformation est tracée sous forme de lignes. 125
4.17 La distribution du CTC dans l'échantillon 40% AE (en m/m°C). (a) α_x et (b) α_y 127
4.18 Histogramme de la distribution de α^{moy} pour tous les échantillons 127
4.19 Saturation de l'éprouvette. 129
4.20 Évolution typique de la température à la surface et au cœur de l'échantillon avec des agrandissements montrant les températures lors du changement de phase du liquide ou du solide. 130
4.21 Expansion globale de l'échantillon 40% AE suivant les directions verticale et horizontale. 130
4.22 Carte de différence de déformation avant et après la fusion de la glace dans les pores du matériau (ε_M). La contraction due à la fusion de la glace est principalement concentrée au centre de la surface d'étude. 131

5.1 Domaines de comportement des mélanges bitumineux. 134
5.2 Extension de la hauteur de l'échantillon. 135
5.3 Procédure de collage des casques, (a) préparation de la colle Araldite tri-composante, (b)-(c) mise en place des casques, la colle et l'échantillon sur le banc de collage et (c) échantillon final à tester. 136
5.4 Méplat correspondant à la région d'étude pour les différents échantillons testés dans ce chapitre. 137
5.5 Dispositif expérimental. 137
5.6 Cycles de chargement (mesures MAER). 138
5.7 Comparaison entre les déformations moyennes imposées par MAER et celles calculées avec la MG pour l'échantillon 0% AE. 139
5.8 Comparaison entre les déformations moyennes imposées par MAER et celles calculées avec la MG pour l'échantillon 40% AE. 140

5.9 Cartes de déformations pour les échantillons 0% AE et 40% AE. 140
5.10 Exemple d'un essai de traction sur un échantillon équipé d'une région de compensation sous forme d'un cadre. (a) Déplacement de la région de compensation, (b) déplacement de la région d'intérêt, celui-ci inclut les déplacements virtuels induit par les OPM et (c) déplacement après la compensation des OPM 141
5.11 (a) Microstructure de l'échantillon 0% AE (b) ROC (en rouge) considérée au centre des gros granulats afin d'éviter les effets de bord qui peuvent être induits par la déformation dans le liant. 143
5.12 (a, d, g) Champs de déformation bruts pour l'échantillon 0% AE, (b, e, h) champs de déformation induits par OPM et (c, f, i) champs de déformation corrigés. 144
5.13 Histogrammes de la distribution de la déformation au sein des granulats avant et après la compensation des OPM. 145
5.14 (a) Comparaison de la déformation moyenne issue des capteurs MAER et de la MG avant et après la correction, (b) déformation horizontale avant et après la correction pour l'échantillon 0% AE. (c)-(d) Mêmes courbes pour l'échantillon 40% AE. 146
5.15 (a) ε_{yy} avec l'emplacement des points P1-P3 choisis dans le liant, (b) évolution de la déformation verticale au cours de l'essai et (c) résidus. 147
5.16 Carte de vitesse de déformation A_y^1 suivant la direction y, (b) carte de résidu et (c) histogramme correspondant de la distribution du résidu sur la ROI à t=16s. 148
5.17 Répartition de r_{eq} pour l'échantillon 0% AE 149
5.18 Répartition de r_{eq} pour les échantillons testés dans ce chapitre à la fin de phase de chargement (t=16s). 150
5.19 Répartition de r_{eq} pour les échantillons testés dans ce chapitre à la fin de phase de chargement (t=16s). 151
5.20 Exemple des amas non déformés dans l'échantillon 40% AE. 152
5.21 (a) Amas de granulats et (b) déformation suivant les lignes choisies dans la figure (a). 153
5.22 (a) Amas de granulats et (b) déformation suivant les lignes choisies dans la figure (a). 153

B.1 Champs de déformation pour les éprouvettes 0% AE, 20% AE et 100% AE. . 182
B.2 Microstructures de l'échantillon 100% AE testé sans la grille. 184

C.1 ROC pour les échantillons 20% AE et 40% AE 186
C.2 Correction des OPM suivant la direction x. 188
C.3 Correction des OPM suivant la direction y. 189
C.4 Comparaison entre la déformation compensée et celle issue des capteurs MAER. 190
C.5 Cartes de vitesse de déformation suivant la direction y la distribution du résidu dans la ROI à t=16s. 191

Liste des tableaux

2.1 Conditions de l'essai et le choix des paramètres utilisée dans le traitement des images des grilles 67

3.1 Composition des mélanges. 73

4.1 Coefficients de dilatation-contraction linéique (CTE/CTC) pour tous les échantillons dans l'intervalle de température de -10°C à 20°C. 119
4.2 Moyenne et l'écart type relatif à la distribution de α^{moy} dans le liant. 127

Introduction Générale

L'enrobé bitumineux est un matériau multiphasé constitué de trois principaux composants : les granulats, le liant bitumineux et les vides. L'enrobé bitumineux se caractérise par une complexité élevée aussi bien au niveau de sa structure qu'au niveau de son comportement mécanique et thermique. Bien que la plupart des liants proviennent des résidus de raffinerie de pétrole, différentes ressources pétrolières et procédures de raffinage aboutissent généralement à l'obtention des liants présentant une structure et des compositions moléculaires différentes. De leur côté, les granulats contiennent une variété de minéraux qui ont des réactions différentes avec des liants. Par ailleurs, une partie des matériaux constituant l'enrobé peut également provenir d'agrégats d'enrobé (AE). Ceux-ci sont principalement issus du fraisage de couches de roulement en enrobé, de concassage de plaques d'enrobés, des déchets, de morceaux de plaques d'enrobé ou de surplus de production d'enrobé [1]. L'incorporation d'AE dans de nouveaux enrobés est devenue courante au cours des dernières années. En effet, la substitution d'une partie des matériaux d'apport par les AE permet la réalisation d'économies substantielles sur le coût de construction des nouvelles routes tout en contribuant à la préservation des ressources naturelles. Le principal challenge inhérent à l'utilisation des pourcentages élevés d'AE est lié au nombre très limité des informations dont la communauté dispose concernant l'interaction entre les matériaux d'apport et les agrégats au sein d'un enrobé recyclé [2]. Plus particulièrement, la question de l'homogénéité « finale » entre les matériaux d'apport et les AE est au cœur du débat et de nombreux chercheurs se penchent sur cette question. Par conséquent, les problèmes rencontrés dans les enrobés recyclés comprennent non seulement ceux trouvés dans les mélanges conventionnels, mais aussi ceux qui sont liés aux différents mécanismes régissant l'interaction entre les matériaux d'apport et recyclés.

Qu'il soit composé d'AE ou pas, la réponse mécanique de l'enrobé est pilotée par l'assemblage des constituants qui définit une micro-structure très complexe. En effet, les granulats sont généralement considérés comme étant des corps élastiques très rigides qui procurent à l'enrobé la rigidité structurelle, alors que le liant qui sert d'agent de liaison, est à l'état semi-solide dans la plupart des conditions en service. Il affiche également des comportements viscoélastoplastiques non-linéaires [3]. En effet, la rigidité des trois constituants présente des différences énormes donnant lieu à des fortes localisations et à des gradients de propriétés importants. En raison de l'hétérogénéité de l'enrobé bitumineux, son champ de déformation est très hétérogène même s'il est soumis à un champ de contrainte uniforme. La raison est que les granulats ne se déforment pas sous chargements mécaniques. La conséquence est que la déformation est exclusivement supportée par les bandes du liant localisées entre les granulats. Par ailleurs, le comportement thermique de l'enrobé est marqué par une incompatibilité

thermique causée par la différence considérable du coefficient de dilatation thermique des granulats et du liant.
En général, l'enrobé bitumineux est caractérisé à travers sa réponse macroscopique. Celle-ci se réfère à la mesure qui suppose l'enrobé bitumineux comme homogène et isotrope. Étant donné les nombreuses lacunes relatives à une telle approche, l'intérêt à l'utilisation de techniques de mesure et de la modélisation multi-échelles pour comprendre la réponse des enrobés bitumineux a pris de l'ampleur au cours des dernières années.
Les techniques de mesure de champs cinématiques telle que la corrélation d'images numériques (CIN), sont des outils qui sont maintenant répandus en mécanique expérimentale pour caractériser le comportement des matériaux et des structures [4]. Au cours des dernières années, l'utilisation de la CIN pour étudier le comportement des enrobés bitumineux est devenue de plus en plus fréquente. Cependant, parmi les défis associés à l'application de la CIN pour la mesure des déformations dans les enrobés figure principalement la difficulté de capturer des fortes localisation de déformation dans le liant. Ceci est d'autant plus vrai dans le cadre d'essai de module qui s'effectuent à des faibles niveaux de déformation (environ $50\mu\varepsilon$). Dans ce cas l'utilisation de la CIN pour obtenir la distribution de la déformation n'est souvent pas possible en raison des perturbations se produisant au cours des essais réels.
Les résultats récemment publiés dans [5, 6] ont suggéré que l'utilisation d'un système basé sur un marquage régulier de la surface étudiée (la méthode dite de la grille) était plus adapté que la CIN pour estimer les gradients de déformations très localisés observés dans ces matériaux. Ainsi cette méthode est susceptible d'améliorer les connaissances sur les matériaux bitumineux dans un objectif d'une application appropriée et fiable dans le réseau des chaussées.
Pour les raisons susmentionnées, l'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement des enrobés bitumineux sous sollicitations mécanique et thermique en utilisant la méthode de la grille (MG). L'effet de l'inclusion d'agrégats d'enrobé sur la distribution des champs locaux sera également examiné. Le travail est effectué sous forme d'une collaboration entre deux laboratoires : l'Institut Pascal pour son savoir-faire en termes de caractérisation mécanique des matériaux par mesures de champs, et le Département Laboratoire de Clermont-Ferrand du Cerema pour son expertise et sa connaissance du matériau étudié. Ce travail s'articule autour de cinq chapitres.
Le premier chapitre présente une revue bibliographique concernant les enrobés bitumineux. D'abord, une revue générale du matériau et des grandes classes de son comportement est effectuée. Ensuite le comportement des enrobés vis-à-vis de changements de température est discuté. Par ailleurs, la problématique d'homogénéité des enrobés recyclés est également abordée et analysée. Enfin, les différents axes d'amélioration des résultats disponibles sont identifiés.
Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des différentes méthodes optiques utilisées pour la caractérisation de champs de déformation hétérogènes des enrobés. Ce chapitre présente et analyse également les résultats de différentes études visant à caractériser des enrobés avec ces méthodes.
Le troisième chapitre vise à étudier le comportement mécanique des enrobés en compression avec la MG. Les matériaux testés et le dispositif expérimental sont présentés. Ensuite, les réponses mécaniques locale et globale sous forme de cartes de déformation sont présentées et analysées. En particulier, l'incidence du recyclage sur la répartition de champs locaux est évaluée. Finalement, les réponses de plusieurs échantillons contenant des AE sont comparées.

Le quatrième chapitre est dédié aux mesures de dilatation-contraction locales des enrobés sous changements de température. La distribution des déformation locales est mesurée à la fois avec la CIN et la MG à des fins de comparaison entre ces deux techniques. Une description détaillée de la réponse locale des enrobés sous sollicitation thermique est apportée.
Le cinquième chapitre explore l'applicabilité de la MG à la mesure des déformations dans le domaine des petites déformations en utilisant un matériel d'essais classiquement utilisé pour déterminer le module des enrobés bitumineux. Des améliorations des mesures de déformation avec la MG sont introduites. Enfin l'incidence du recyclage sur la répartition des champs locaux est évaluée.

Chapitre 1

État de l'art sur les enrobés bitumineux

1.1 Généralités sur les enrobés bitumineux

Les utilisations actuelles de l'enrobé pour les revêtements routiers ont commencé à la fin du XIXe et au début du XXe siècle. Avec l'évolution des matériaux et du trafic au XXe siècle, la technologie des enrobés a fait des progrès considérables et les routes modernes et les équipements utilisés pour leur pose ont beaucoup évolué.
Un enrobé bitumineux est composé principalement des granulats qui constituent typiquement environ 94-95% de la masse d'un enrobé, tandis que le liant constitue les 5-6% restants (voir Fig. 1.1). En termes de volume, un mélange d'enrobé typique est d'environ 85% des granulats, un liant à 10% et des vides d'air à 5%. Les vides d'air constituent un aspect important dans la performance de l'enrobé bitumineux [7].
Les granulats sont la structure de l'enrobé et le bitume joue le rôle du liant qui tient toutes les particules ensemble.

1.1.1 Composants minéraux

Environ 85% du volume (95% de la masse) d'un enrobé est constitué par les composants minéraux (granulats). En conséquence, les granulats jouent un rôle primordial dans les performances des enrobés bitumineux et contrairement à certaines opinions, le liant n'est pas le seul facteur influençant ses performances.
En outre, pour produire un enrobé de qualité, des granulats de qualité possédant les caractéristiques mécaniques et physiques adéquates doivent être utilisés. Les granulats doivent également être exempts de poussière, des saletés, d'argile et d'autres matières nuisibles. Pour la stabilité du mélange, il est nécessaire d'avoir une granulométrie, une résistance, une propreté et une forme appropriées. Pour former un squelette minéral résistant, les granulats doivent avoir de préférence un taux élevé des particules cubiques. Des particules sphériques et plates sont également autorisées dans un mélange d'enrobé mais en moindre quantité. Le rôle du squelette granulaire est de transmettre et redistribuer les charges dans les couches inférieures de la chaussée à travers le contact entre les grains. Ainsi, les granulats doivent posséder une dureté, une résistance à l'usure, une résistance à l'abrasion et aux chocs éle-

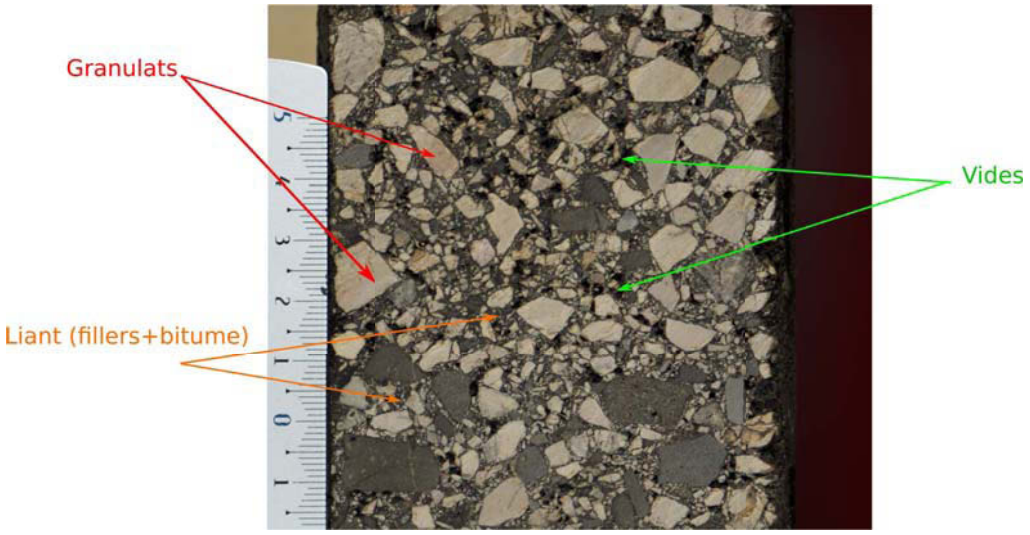


FIGURE 1.1 – Exemple de la constitution de l'enrobé.

vées [7].
Les granulats sont désignés par leur plus petite et plus grande dimension d et D respectivement, l'intervalle d/D étant appelé classe granulaire. La constitution des différentes classes granulaires est effectuée en appliquant aux granulats différentes transformations (criblage, concassage, tamisage, dépoussiérage et lavage). La combinaison de différentes classes granulaires permet d'obtenir un squelette granulaire qui est caractérisé par une courbe granulométrique.
Outre le rôle concernant la performance mécanique de la chaussée, les granulats doivent également répondre à un cahier des charges strict concernant la sécurité de l'usager (assurer des bonnes caractéristiques antidérapantes). La qualité de la macrotexture de la surface routière fait intervenir la granularité, la forme et l'angularité des granulats. D'autre part la résistance au polissage des granulats intervient dans la qualité de la microtexture de la surface routière [8].
Les fillers sont composés de particules minérales très fines et inertes qui sont ajoutées au mélange d'enrobé pour améliorer la densité et la résistance du mélange. Le diamètre supérieur des fillers est conventionnellement admis inférieur à 63 microns. Les fillers se mélangent avec le liant avec lequel ils constituent le mastic. Le pouvoir rigidifiant du filler associé au liant donne sa stabilité au mélange et participe à sa résistance à l'orniérage [9]. Ils participent également à réduire le contraste important entre les propriétés mécaniques (rigidité) et thérmo-volumétrique (coefficient de contraction thermique) des granulats et du bitume.

1.1.2 Liant bitumineux

Le bitume est un mélange complexe de différentes structures de molécules de carbone et hydrogène, dites molécules hydrocarbonées. Bien que dans un enrobé bitumineux, le bitume constitue un faible pourcentage d'environ 5%, il a un effet fort et significatif sur son comportement dans la mesure où il lie les granulats ensemble.
Les propriétés physiques du liant varient énormément en fonction de la température, ce qui

traduit une forte « susceptibilité thermique ». En effet, à des températures élevées, le liant est un fluide ayant une consistance similaire à celle de l'huile lubrifiante alors qu'à température ambiante, la plupart des liants ont la consistance d'un liquide ou semi-solide très visqueux. À basse température le bitume est caractérisé par une température appelée la température de transition vitreuse. C'est la température à laquelle la mobilité moléculaire au sein du bitume se réduit et le bitume se comporte comme un solide fragile. La température de transition vitreuse du liant bitumineux est comprise entre -40°C et 0°C. L'autre caractéristique du bitume est la variation de ses propriétés avec la durée d'application des charges, c'est la « susceptibilité cinétique ». Ces durées d'application varient de plusieurs heures à quelques fractions de seconde sous les véhicules en mouvement [7, 9].

Principales caractéristiques du bitume

Pénétrabilité à l'aiguille [10] La mesure de la pénétrabilité sert à quantifier la dureté d'un bitume. L'essai consiste à mesurer la profondeur de l'enfoncement d'une aiguille normalisée de 1 mm de diamètre, sous une charge de 100 g, appliquée pendant 5 s sur un échantillon de bitume maintenu à 25°C (*cf* Fig. 1.2a). La profondeur est exprimée en dixièmes de millimètre. La pénétrabilité est une des deux caractéristiques fondamentales qui permettent de définir un bitume. Plus la valeur absolue de la pénétrabilité est grande plus le bitume est mou. En Europe, les bitumes sont définis par leur classe de pénétrabilité dont l'appellation correspond à sa borne inférieure et à sa borne supérieure. En France, les classes les plus utilisées sont : 20/30 – 35/50 – 50/70 – 70/100 – 160/220, pour les bitumes classiques. Pour les bitumes de grade dur, les classes considérées sont : 10/20 et 15/25. La détermination de la pénétrabilité peut se faire à d'autres températures mais en conservant identiques tous les autres paramètres. Dans ce cas, il est possible de tracer l'évolution de la pénétrabilité en fonction de la température et de calculer un indice de pénétrabilité très utile pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume [11].

Point de ramollissement bille et anneau [12] Une petite bille en acier de 3,5 g et de 9,5 mm de diamètre est posée sur un disque de bitume préalablement coulé dans un anneau de 19,8 mm de diamètre intérieur, lui-même placé sur un support normalisé. L'ensemble est installé dans un bain d'eau dont la température initiale est stabilisée à 5°C (*cf* Fig. 1.2b). La face inférieure de l'anneau de bitume se trouve à 25,4 mm de la surface supérieure de la plaque du dessous du support, ce qui correspond à la distance de chute de la bille au cours de l'essai. Le bain est chauffé à une vitesse constante de 5°C/min, sous agitation, et le point de ramollissement bille et anneau (souvent noté TBA) est la température à laquelle la poche de bitume, formée pendant la chute de la bille, touche la plaque de référence placée à 25,4 mm sous l'anneau de bitume [11].

Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air [13] Le RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) permet de mesurer les effets combinés de la chaleur et de l'air sur un film mince de bitume en renouvellement permanent. En pratique, une petite quantité de bitume est coulée dans un flacon à ouverture réduite placé horizontalement sur un disque rotatif disposé verticalement au fond d'une étuve ventilée. La température est régulée à 163°C et à chaque tour, c'est-à-dire toutes les 4 secondes, l'ouverture

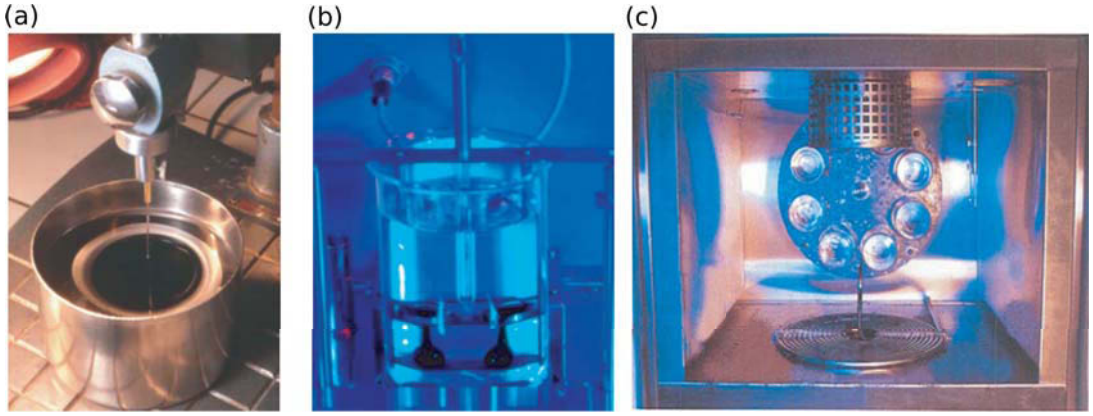


FIGURE 1.2 – Essai de caractérisation du bitume, (a) essai de pénétration, (b) point de ramollissement et (c) RTFOT [11].

du flacon passe devant un jet d'air chaud (*cf* Fig. 1.2c). Le test dure 75 minutes. Après l'essai, toutes les caractéristiques du bitume peuvent être évaluées. En générale, l'évolution de la pénétrabilité, celle du point de ramollissement et celle de la masse du bitume, sont prises en considération [11].

Détermination des performances vis-à-vis de la déformation permanente et la fissuration par fatigue Les paramètres des performances du liant vis-à-vis des déformations permanentes et de la fatigue peuvent être évalués en utilisant le Dynamic Shear Rheometer (DSR). Des échantillons de bitume neuf ou issu de l'essai RTFOT sont placés entre deux plaques. L'une des plaques est à base fixe et l'autre plaque est oscillante [14]. Tous les tests DSR Superpaves [1] sont effectués à 10 rad/s (1.59 Hz ou cycles/s). Il existe deux types d'essais DSR : essai à déformation contrôlée et essai à contrainte contrôlée. Le DSR à contrainte contrôlée fonctionne en appliquant un couple fixe pour faire osciller la plaque tandis que le DSR à déformation contrôlée fait osciller la plaque à une fréquence spécifiée et mesure le couple correspondant. En fonction de la rigidité du liant, le couple nécessaire pour déplacer la plaque à la fréquence recommandée variera. Le DSR permet de caractériser le comportement viscoélastique du bitume à travers le module de cisaillement (G^*) et l'angle de phase (δ).
La déformation permanente est contrôlée par la maximisation de la quantité $G^*/\sin(\delta)$ appelée le facteur d'orniérage. À titre d'exemple la spécification Superpave nécessite que la valeur minimale du facteur d'orniérage soit supérieure à 1 kPa pour les liants neufs et à 2,2 kPa pour les liants provenant du test RTFOT.
En outre, afin de résister à la fissuration par fatigue, le liant doit avoir une part élastique élevée. Cela revient à minimiser la partie visqueuse du module de cisaillement complexe $G^* \times \sin(\delta)$.

1. Superior Performing asphalt Pavements : est un système de conception et d'analyse des performances des enrobés bitumineux, mis en place par Strategic Highway Research Program.

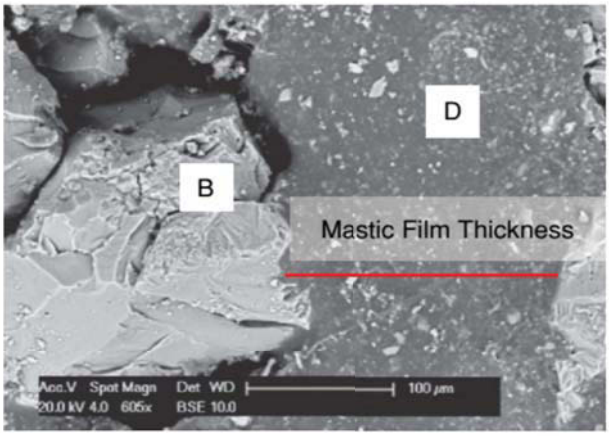


FIGURE 1.3 – Image montrant le mastic, obtenue par microscopie électronique à balayage sur un échantillon d'enrobé [15] .

1.1.3 Mastic

Le mastic est un mélange de bitume et de particules fines dont la taille est inférieure à 63 μm essentiellement présentes dans les fillers. Un exemple de mastic est illustré sur la Fig. 1.3 au point D. Les propriétés du bitume et du mastic sont souvent caractérisées en utilisant les mêmes théories et méthodes d'essais. En effet, dans un enrobé, le bitume pur n'existe pas comme une entité distincte et il est combiné aux fillers pour former le mastic [15]. Ainsi, c'est le mastic qui lie les granulats ensemble et constitue la phase qui se déforme sous les sollicitations mécaniques et thermiques.

1.1.4 Concepts de base de fonctionnement structurel des mélanges bitumineux

En fonction de la granulométrie du squelette minéral et le pourcentage de liant et des vides, trois concepts de base du fonctionnement structurel des chaussées bitumineuses peuvent être distingués (*cf* Fig. 1.4) [16] :

— Concept de mastic (principe du liquide congelé) : teneur en liant élevée et il n'y a pratiquement pas de vides d'air ; les granulats « nagent » dans la matrice bitumineuse ; les chargements sont supportés principalement par le liant. Cette catégorie comprend l'asphalte coulé qui est utilisé pour l'étanchéité dans les bâtiments, pour les revêtements en voirie et pour les dallages industriels (*cf* Fig. 1.5a).

— Concept de Packing (principe du béton) : un empilement dense des granulats et une épaisseur minimale de bandes du liant ; les chargements sont supportés par les granulats et le liant (*cf* Fig. 1.5b). Cette catégorie comprend les enrobés à granulométrie dense (ED).

— Concept de squelette (principe de Macadam) : contact côte à côte entre des gros granulats ; les chargements sont principalement supportés par le squelette minéral. Cette catégorie regroupe particulièrement le béton bitumineux grenu à forte teneur en mastic

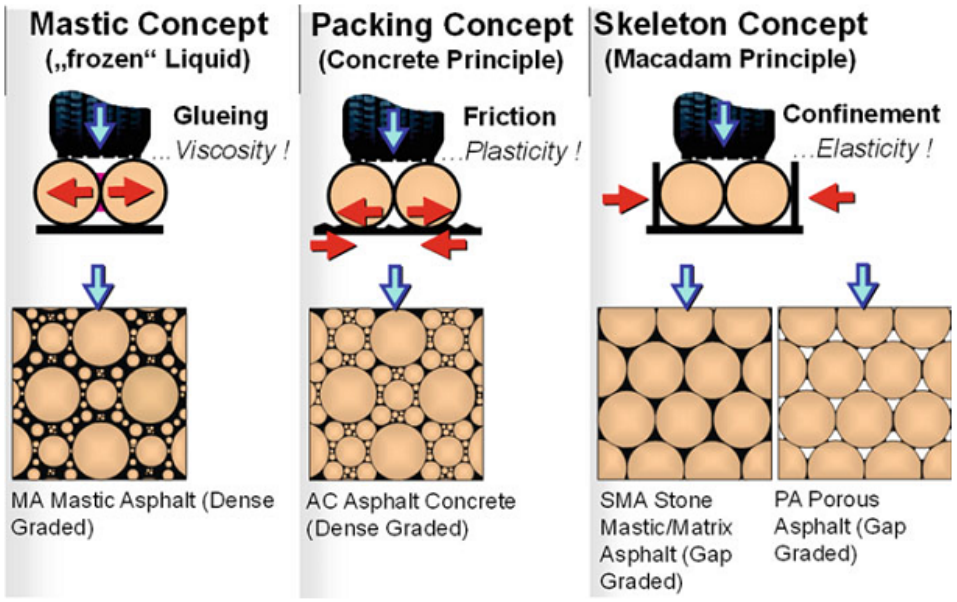


FIGURE 1.4 – Concepts de base pour le fonctionnement structurel des mélanges bitumineux [16].

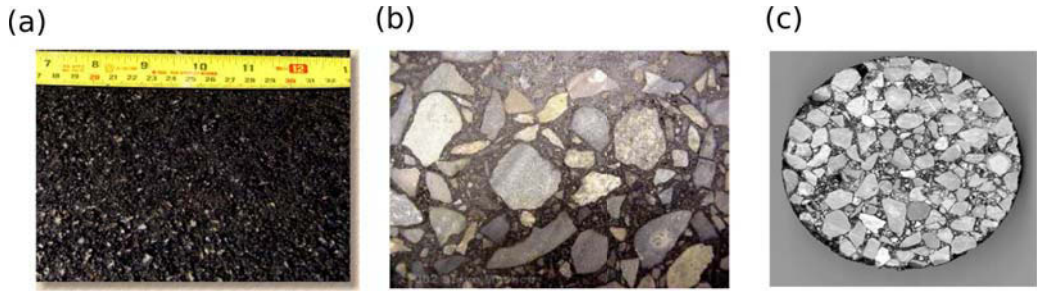


FIGURE 1.5 – Exemple des différentes structure d'enrobés, (a) asphalte coulé, (b) béton bitumineux dense et (c) Enrobé SMA (Stone Mastic Asphalt).

(Stone Mastic Asphalt, SMA) qui est un matériau de revêtement durable fournissant une résistance aux déformations permanentes et adapté aux routes à forte circulation (*cf* Fig. 1.5c).

En France, les enrobés fonctionnent principalement sur le concept de squelette avec des distinctions fortes sur la teneur en liant et la courbe granulaire. L'enrobé de structure ou de surface épais présente une courbe granulaire continue (répartition graduée des petits aux plus gros éléments) et des variations des teneurs en liant. L'enrobé de surface le plus fin présentant pour sa part une discontinuité de la courbe granulaire faisant « disparaitre » les éléments moyens du squelette pour ne laisser que du mastic et des gros éléments qui s'empilent directement les uns sur les autres dans un BBTM [2].

2. Bétons Bitumineux Très Minces

1.1.5 Aspect multi-échelle des enrobés bitumineux

Comme il a été évoqué dans les sections précédentes, l'enrobé bitumineux est un matériau multi-échelle qui est constitué de plusieurs phases. Le comportement mécanique de ce matériau est généralement interprété dans le cadre d'un système à une échelle (l'échelle macroscopique) et sous l'hypothèse d'un matériau homogène et isotrope. Mais en réalité le comportement macromécanique est le résultat des multiples mécanismes qui se manifestent à différentes échelles. En se basant sur les constituants de l'enrobé, une représentation multi-échelle de ce matériau est proposée dans [17] et schématiquement présentée sur Fig. 1.6.
La plus petite échelle est **l'échelle nanoscopique**. Le bitume est considéré à cette échelle comme un composite complexe de différentes structures des molécules de carbone, d'hydrogène et d'autres éléments. À cette échelle les propriétés du matériau sont caractérisées à travers une analyse chimique pour déterminer la proportion des différentes fractions ainsi que la masse moléculaire moyenne de chacune d'entre elles.
À l'échelle suivante (**l'échelle microscopique**), le bitume est considéré comme un semi-solide noir possédant des propriétés visqueuses. Par conséquent, le comportement à cette échelle est caractérisé dans un contexte plutôt rhéologique.
La prochaine échelle (**échelle mésoscopique**) est d'un intérêt pratique. L'enrobé à cette échelle est composé du liant hydrocarboné, de fraction granulaire et d'air confiné dans les espaces entre les granulats. Ces composants ont un impact significatif sur la performance et la durabilité des mélanges dans les chaussées. Les comportements mécanique et thermique de l'enrobé à cette échelle ne sont pas suffisamment étudiés et constituent donc un territoire scientifique largement inconnu. Ceci est en partie dû aux outils de mesure expérimentale utilisés par la communauté concernée par la caractérisation du comportement des enrobés. La mesure des grandeurs cinématiques est souvent effectuée dans des endroits ponctuels et sur une échelle spatiale large. Ces mesures ont une utilité limitée en raison de l'existence de mécanismes multiples qui se manifestent à différentes échelles.
La dernière échelle est **l'échelle macroscopique**. À cette échelle et moyennant un certain nombre d'hypothèses sur la taille de l'échantillon et le diamètre maximal des granulats, les enrobés bitumineux sont considérés comme des milieux continus, homogènes et isotropes. C'est à cette échelle que la plupart des spécifications et des guides de construction des chaussées se sont concentrés sans considérations des autres échelles plus petites. Cependant, la majorité des mécanismes qui gouvernent le comportement de l'enrobé se produisent à l'échelle mésoscopique, à travers une interaction entre les différents constituants.

1.1.6 Sollicitations externes et dégradations des enrobés bitumineux

Sollicitations de trafic

Il s'agit plus particulièrement des sollicitations induites par les passages des véhicules lourds qui engendrent des effets dynamiques en mouvement (trafic fluide) ou des effets quasi-statiques (parkings ou trafic lent). La Fig. 1.7 illustre schématiquement le principe du fonctionnement d'une chaussée et les effets induits d'un passage d'une charge dans les différentes couches de la structure routière [9]. Dans cette figure, la chaussée est assimilée à un assemblage

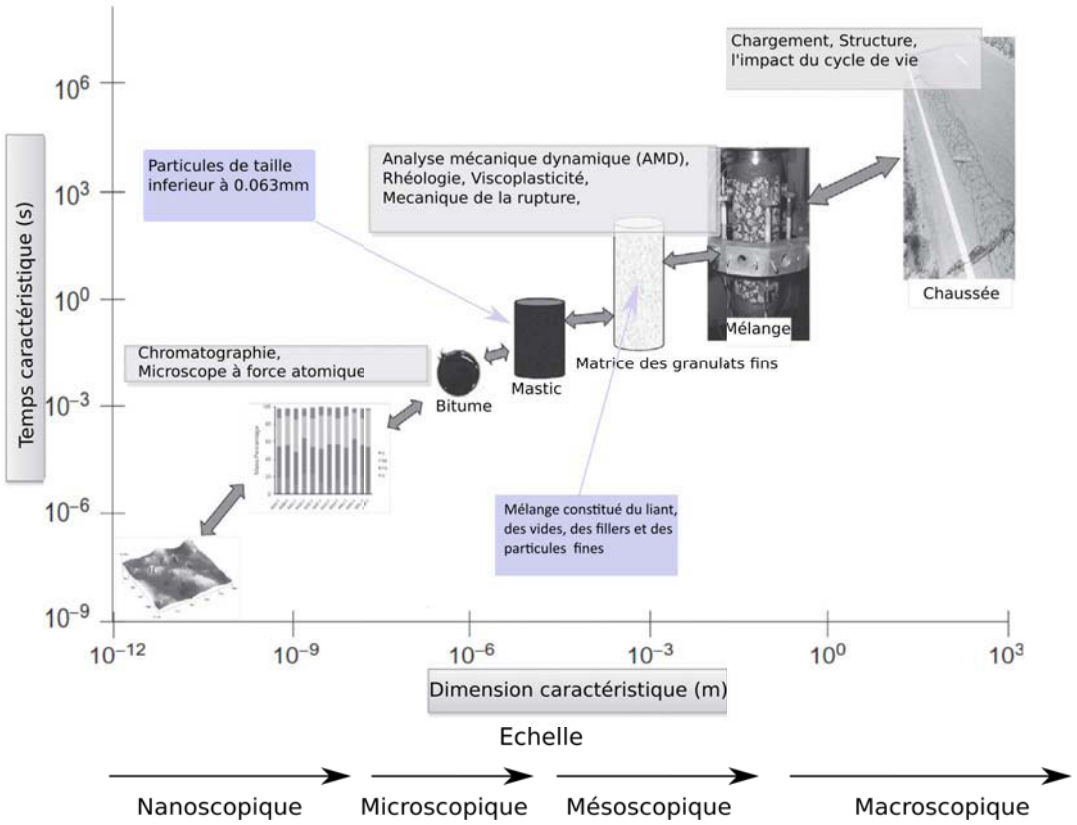


FIGURE 1.6 – Dépendances d'échelles impliquées dans une interprétation multi-échelle des enrobés bitumineux (adapté à partir de [17]).

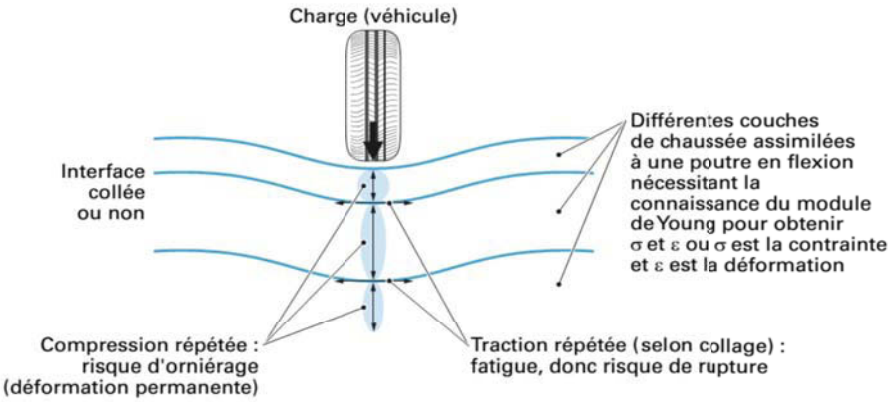


FIGURE 1.7 – Schématisation des sollicitations induites par le trafic [9].

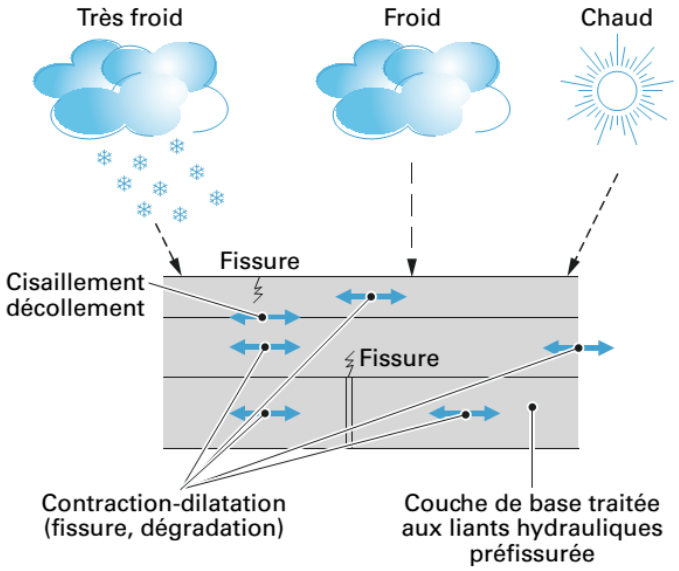


FIGURE 1.8 – Schématisation des sollicitations induites par la température [9].

de poutres, qui peuvent être collées ou non, et qui subissent des efforts dans plusieurs directions. Les couches bitumineuses reprennent des efforts de véhicules sous forme de contrainte de traction à leurs bases. L'accumulation des sollicitations de traction induit l'amorçage des fissures à la base des couches liées. Également, les sollicitations du trafic peuvent mener à des pathologies structurelles comme l'accumulation de déformations permanentes dues aux compressions répétées à la surface de la chaussée (orniérage), mais aussi à des pathologies superficielles comme le polissage des granulats en couche de roulement, à la perte de granulats (arrachement) ou à l'apparition de trous dans le revêtement (nid de poule) [18].

Sollicitations thermiques

La chaussée subit, durant sa durée de vie, des conditions climatiques différentes et variées et sans aucune protection (*cf* Fig. 1.8). La température joue un rôle prépondérant dans

le comportement de la chaussée et son effet peut se manifester de deux manières qui sont détaillées ci-dessous [18] :

— Impact sur la rigidité : le comportement de l'enrobé bitumineux est affecté à plusieurs niveaux par le comportement du bitume bien que ce dernier soit présent en faible pourcentage (4 à 7 %). Par conséquent le comportement de l'enrobé est caractérisé par la dépendance du module de rigidité à la fois à la température (thermo-susceptibilité) et à la vitesse de chargement (susceptibilité cinétique). Le module de l'enrobé varie de quelques centaines de MPa à haute température et basse vitesse à plus de trente GPa à très basse température .

— Fissuration thermique : dans les régions caractérisées par un climat froid et sous l'effet des variations de température, des contraintes thermiques apparaissent au sein de l'enrobé. Elles sont causées par le retrait thermique empêché de la chaussée dans la direction longitudinale. Ces contraintes ne peuvent pas se relaxer car, à basse température, l'enrobé se comporte comme un solide élastique fragile. Lorsque l'accumulation des contraintes thermiques dépasse la résistance en traction de l'enrobé, elle crée des fissures transversales quasiment parallèles et très régulières. Ce phénomène impacte les couches de surface en enrobés bitumineux lorsque des températures très froides persistent et lorsque le bitume utilisé n'est pas adapté aux conditions climatiques sévères.

1.2 Caractérisation des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux

1.2.1 Grandes classes de comportement

Afin de fonctionner d'une façon satisfaisante dans la chaussée, les mélanges bitumineux doivent présenter : (a) une capacité à répartir les contraintes ; (b) une résistance aux déformations permanentes ; (c) une résistance à la fissuration (en particulier la fissuration induite par la fatigue et remontée de fissures) ; (d) une résistance au gel-dégel et aux endommagements causés par l'humidité.
La capacité à répondre à ces exigences est liée aux propriétés mécaniques fondamentales du mélange. Celles-ci sont influencées par de nombreux facteurs liés aux matériaux constitutifs (liants, granulats, adjuvants et leurs proportions), les sollicitations (le niveau de chargement, la durée de chargement et de repos, le niveau de chargement, l'état de contrainte, etc.), les conditions environnementales (température, humidité, etc) et la méthode de construction (compactage, contrôle de la qualité, etc) [19]. Il y a trois propriétés mécaniques qui sont particulièrement importantes pour caractériser les performances d'un enrobé :

— Rigidité (dans le domaine viscoélastique linéaire) ;

— Résistance à la fissuration par fatigue ;

— Résistance aux déformations permanente ;

L'examen de tracé de Fig. 1.9, proposé par Di-benedetto [20], permet d'identifier les domaines correspondant aux différents aspects présentés précédemment et le comportement « typique » de l'enrobé correspondant. Les limites des différents domaines, représentées en

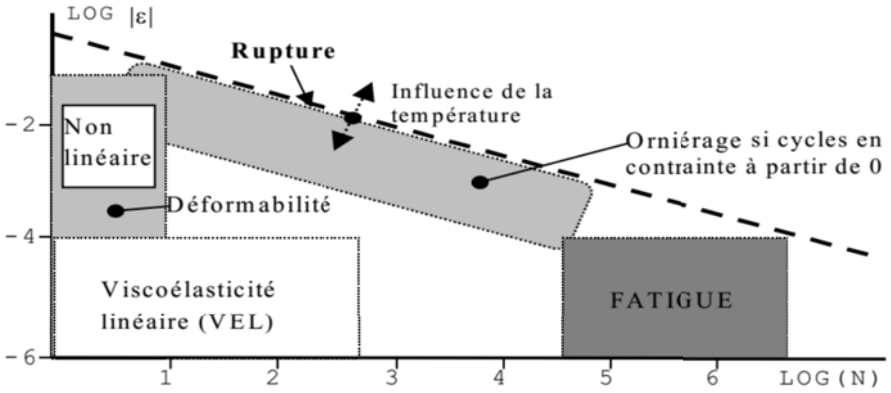


FIGURE 1.9 – Comportements types des enrobés bitumineux à température fixée, ε *vs* le nombre des cycles (N) [20].

coordonnées bilogarithmiques, sont des indications et le passage d'un domaine à un autre est réalisé d'une manière lisse et continue.
Il existe une variété d'essais de laboratoire normalisés (normes européennes) qui ont pour objectif la détermination des performances de l'enrobé dans chacun des domaines cités ci-dessus. La plupart de ces essais sont réalisés lors la phase de la formulation et permettent de choisir la composition optimale de l'enrobé qui sera mis en œuvre sur un chantier donné. Quelques exemples des essais mécaniques sont présentés ci-dessous.

Essai Duriez

Il permet de vérifier la compatibilité entre les liants et les granulats. Cet essai a été développé en France au début des années 1950. Son objectif principal est la détermination de la résistance mécanique à la compression et la tenue à l'eau de l'enrobé. Actuellement cet essai est utilisé pour estimer la résistance de l'enrobé au désenrobage en présence d'eau. Encadré par la norme NF EN 12697-12 [21], il est pratiqué sur des éprouvettes de diamètre 80 mm (ou 120 mm si D>14 mm) préparées par compactage statique sous une pression de 12 MPa. Au total, 12 éprouvettes sont fabriquées : 2 destinées à mesurer la masse volumique à la pesée hydrostatique et 10 éprouvettes sont conservées pendant une semaine (5 à l'air et 5 sous l'eau). La résistance en compression simple est déterminée à 18°C pour une vitesse de chargement de 1 mm/s sur ces éprouvettes [8]. On détermine alors :

— La résistance en compression à l'air R et à l'eau r ;

— Le rapport r/R, qui traduit la résistance au désenrobage (ou la tenue à l'eau) de l'enrobé.

Détermination du module de rigidité

La mesure du module complexe est réalisée dans le domaine viscoélastique linéaire donc dans le cadre des petites déformations. En France, le calcul du module se pratique principalement suivant deux modalités décrites et encadrées par la norme NF EN 12697-26 [22]. L'essai de module complexe est pratiqué sur des éprouvettes de formes trapézoïdales encastrées à leur base, et sollicitées en tête en flexion sinusoïdale. Réalisé à 6 températures (entre -10 et

+40°C), cet essai permet une approche très complète des caractéristiques rhéologiques du matériau.
La détermination du module en traction directe est pratiquée sur des éprouvettes cylindriques de diamètre compris entre 50 et 160 mm (supérieur ou égal à 4D) et d'élancement 2 à 3 fois le diamètre de l'éprouvette. Les éprouvettes, maintenues à température constante, sont sollicitées en traction directe suivant une loi de déformation donnée [8].

1.3 Caractérisation du comportement thermique des enrobés en laboratoire

1.3.1 Introduction

Dans les régions caractérisées par un climat froid, les chaussées sont sujettes à des fissurations thermiques qui contribuent à leur détérioration prématurée. En effet, la diminution de la température de la chaussée induit une augmentation du module de rigidité de l'enrobé constituant la couche de roulement, le rendant ainsi fragile et par conséquent plus sensible aux chargements dus au trafic. Cela s'accompagne également par une diminution de la capacité de l'enrobé à relaxer les contraintes thermiques qui s'accumulent et provoquent des fissurations thermiques.
En effet, les enrobés bitumineux qui sont des matériaux visco-élastiques ont la capacité de relaxer des contraintes à travers l'écoulement visqueux. Or à faible température cette capacité est entravée et l'enrobé a tendance à se comporter comme un solide élastique fragile. En plus, au sein d'une structure de chaussée, la contraction de l'enrobé est restreinte dans la direction longitudinale. La couche de roulement subit donc une accumulation des contraintes thermiques. En conséquence, dans les régions froides, la capacité d'un enrobé à relaxer les contraintes thermiques pour une température donnée est fondamentale pour résister à la fissuration thermique [23, 24]. Cette propriété est exprimée à travers le module de relaxation qui est l'un des paramètres fondamentaux pour caractériser les performances des enrobés vis-à-vis de la fissuration thermique [25]. D'autres facteurs sont également primordiaux dans les performances thermiques des enrobés tels que : le coefficient de dilatation-contraction thermique qui exprime le taux d'accumulation des déformations thermiques ; la forme de la courbe maîtresse et la résistance en traction.
Dans la littérature, plusieurs études visant à caractériser le comportement thermique des enrobés bitumineux sont décrites. Les principales méthodes sont présentées dans la section suivante.

1.3.2 Méthodes expérimentales pour la caractérisation du comportement thermique des enrobés

Cette section passe en revue les principales méthodes expérimentales utilisées pour caractériser les performances des enrobés vis-à-vis des sollicitations thermiques.

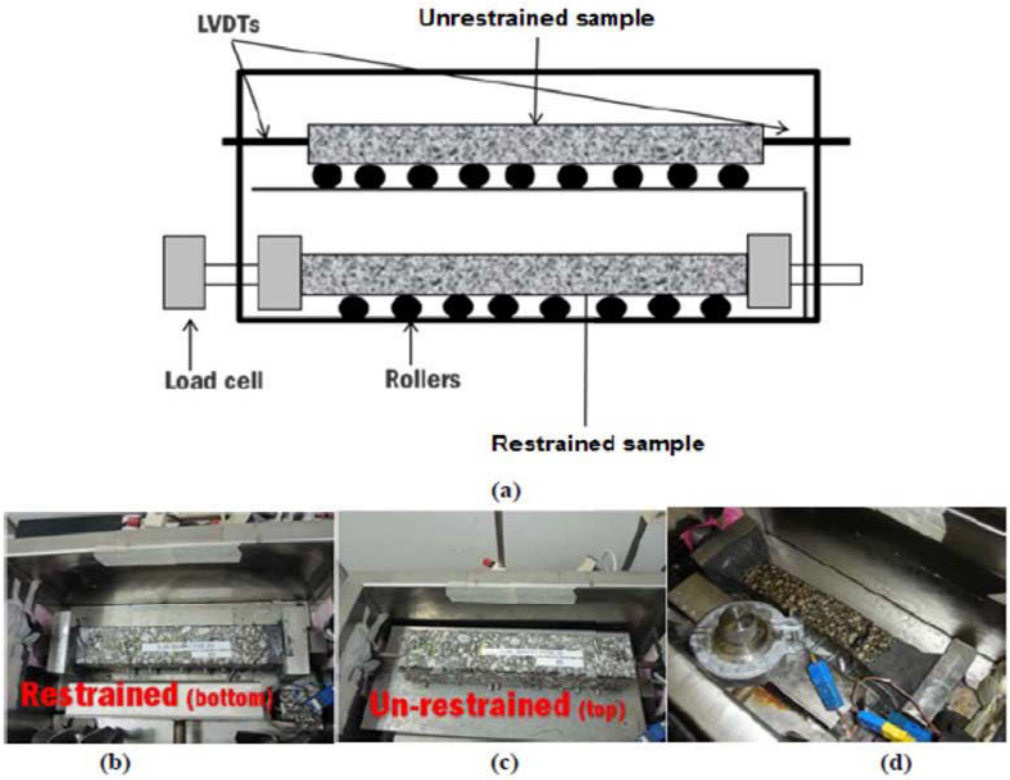


FIGURE 1.10 – (a) Illustration du principe de l'ATCA ; (b) l'éprouvette à retrait empêché, (c) l'éprouvette libre, et (d) l'éprouvette libre après la rupture [27].

Asphalt Thermal Cracking Analyser (ATCA)

Ce dispositif représente une version améliorée de l'essai classique du retrait thermique empêché TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test) dont l'idée de l'élaboration remonte à l'année 1965 [26]. La version améliorée de cet essai est développée par Bahia et al. [27] et désignée comme l'analyseur de la fissuration thermique des enrobés (en anglais Asphalt Thermal Cracking Analyser ATCA).
L'essai sert à étudier les performances des enrobés vis-à-vis des fissurations à basses températures. Il consiste à tester simultanément deux échantillons d'enrobé ; un échantillon à retrait empêché et l'autre avec des extrémités libres. L'échantillon libre est utilisé pour mesurer la variation des propriétés volumiques en fonction de la température, comme la température de transition vitreuse (T_g) et les coefficients de contraction thermique (α_l) et (α_g) au-dessus et dessous de T_g respectivement. L'échantillon à déformation empêchée est utilisé pour mesurer l'accumulation des contraintes thermiques induites en raison de la contraction empêchée.
Dans ce dispositif, les deux éprouvettes sont issues du même échantillon, et toutes les deux sont exposées au même régime de température. Le dispositif est représenté schématiquement sur Fig. 1.10a et des photos prises en cours d'essai sont présentées sur Fig. 1.10b-d. La figure 1.11 montre des résultats de sortie typiques obtenus à partir du système ATCA lorsque la température est diminuée à une vitesse de 1°C/min de 30 à -70°C. Le système ATCA permet la mesure de la déformation (Fig. 1.11a) et la contrainte thermique (Fig. 1.11b) durant la

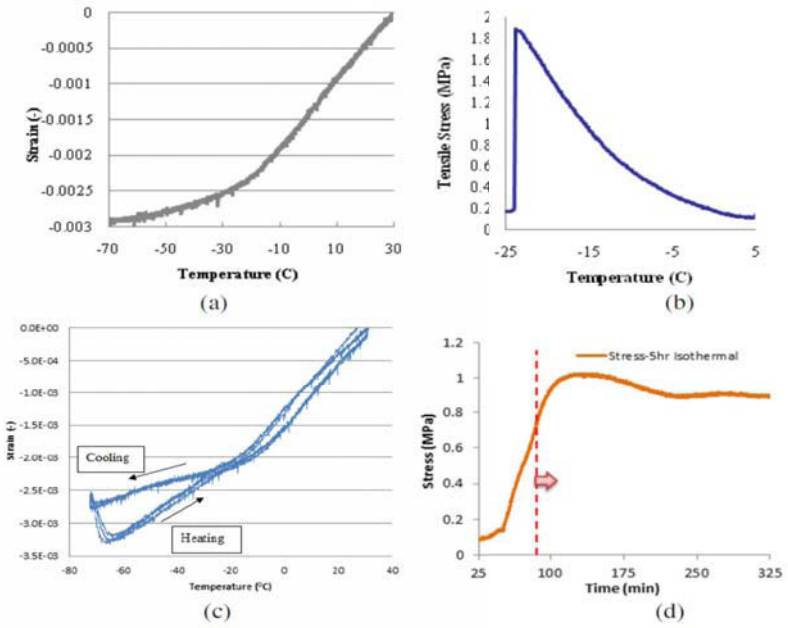


FIGURE 1.11 – Résultats expérimentaux typiques issus de l'ATCA, (a) mesure de la température de transition vitreuse de l'enrobé, (b) la mesure de l'accumulation de contraintes et la rupture, (c) le cyclage thermique et (d) la réponse en contrainte durant le conditionnement isotherme [27].

diminution de la température. Le système permet également d'effectuer plusieurs variétés d'essais tels que le cyclage thermique (Fig. 1.11c) et la mesure de la relaxation de contrainte thermique (Fig. 1.11d).
L'essai le plus couramment effectué avec ce système est l'essai de relaxation des contraintes thermiques [28, 29, 30] qui consiste à diminuer la température de la chambre climatique avec un taux de refroidissement contrôlé (0.1 à 1°C/min), pour atteindre un palier de température donné. La température de la chambre climatique et de l'échantillon sont rigoureusement contrôlées à l'aide des thermocouples placés dans la chambre climatique et à l'intérieur des éprouvettes. Lorsque la température cible est atteinte, celle-ci est maintenue constante pour une durée de 2h à 10h, et l'accumulation des contraintes et les déformations thermiques sont mesurées continuellement. Les résultats sont ensuite utilisés pour tracer les courbes de contrainte thermique comme fonction de la température du cœur, ainsi qu'en fonction du temps durant la partie isotherme de la courbe (Fig. 1.11d).
Les résultats de l'ATCA peuvent également être utilisés pour calculer d'autres propriétés pertinentes des enrobés à basse température, notamment le module de relaxation. L'intégrale de convolution de module de relaxation peut être résolue numériquement en utilisant les mesures de l'ATCA. Les deux côtés de l'équation sont différenciés dans le domaine temporel pour éliminer l'intégrale. Les données de contrainte thermique (provenant de l'éprouvette à déformation empêchée) et de déformation thermique (provenant de l'éprouvette libre) sont utilisées pour retrouver le module de relaxation. La Fig. 1.12 illustre un exemple de la courbe d'évolution du module de relaxation en fonction de la température, calculée à partir des

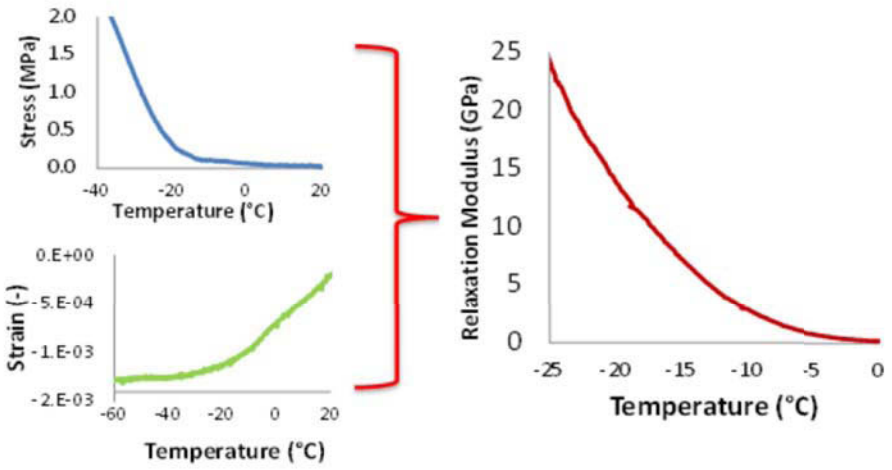


FIGURE 1.12 – Résultats de l'ATCA et calcul de la courbe du module de relaxation [27].

mesures issues ATCA.

Asphalt Concrete Cracking Device (ACCD)

Le système ACCD a été développé comme alternative au dispositif TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test) qui présente un certain nombre de limitations : un coût élevé, une complexité de la mise en œuvre, un nombre limité d'échantillons qui peuvent être testés à la fois et une durée importante du processus de préparation de l'essai et des échantillons. L'essai ACCD fournit des informations similaires sur la performance de fissuration à basse température des enrobés bitumineux que celle de TSRST. L'essai est relativement récent et les résultats initiaux ont montré une très bonne corrélation avec ceux du TSRST ([31] cité dans [32]).
Un exemple d'un tel dispositif, utilisé dans [33], est illustré sur Fig. 1.13. Les échantillons testés ont une forme annulaire présentant une encoche pour maîtriser l'emplacement de la fissure. Le principe de l'essai se base sur le fait que le coefficient de contraction thermique de l'acier invar est inférieur au coefficient de contraction thermique de l'échantillon de l'enrobé. Ainsi un anneau d'acier invar qui est placé au centre de l'échantillon d'enrobé à 20°C subit des contraintes de la part de celle-ci lorsque la température diminue (l'échantillon enserre l'anneau *cf* Fig. 1.14). L'ensemble (l'échantillon et l'anneau invar) est placé dans une enceinte climatique et la température est baissée graduellement avec un taux bien défini. L'échantillon est équipé avec des thermocouples qui enregistrent continuellement la température. La pression radiale exercée par l'échantillon sur l'anneau induit des déformations radiales et tangentielle dans l'anneau. Une jauge de déformation est placée sur l'anneau (agencée de sorte que l'emplacement de la jauge de déformation coïncide avec l'emplacement de l'encoche) pour mesurer la déformation tangentielle (*cf* Fig. 1.13a). Connaissant les propriétés mécaniques de l'anneau, on peut remonter à la valeur de la pression exercée par l'échantillon sur celui-ci.
La pression exercée par l'anneau augmente avec la diminution de la température et exerce

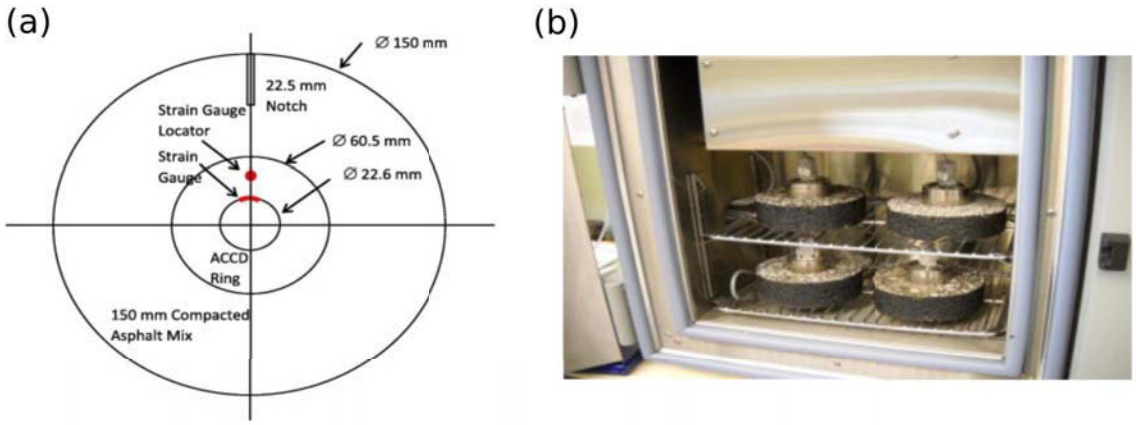


FIGURE 1.13 – Anneau ACCD placé à l'intérieur d'un échantillon d'enrobé entaillé [33].

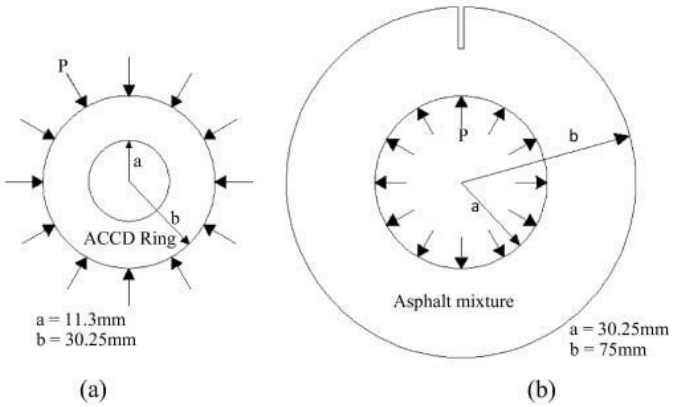


FIGURE 1.14 – (a) Anneau ACCD soumis à une pression externe P et (b) échantillon d'enrobé à soumise à une réaction de l'anneau (une pression interne P) [33].

des contraintes de traction sur le disque d'enrobé jusqu'à ce qu'il rompe à l'endroit correspondant à l'encoche.
Pour une éprouvette sans entaille, la contrainte de tangentielle varie selon l'épaisseur de l'échantillon, le maximum se produisant à la surface intérieure du l'échantillon et le minimum se produisant à sa surface extérieure. Cependant, la présence de l'encoche a entraîné une concentration des contraintes à la pointe de l'encoche. Ainsi les contraintes générées à l'encoche ne peuvent pas être déterminées expérimentalement car le facteur de concentration de contrainte n'est pas connu. Un modèle d'éléments finis de la géométrie du mélange anneau-enrobé permet de déterminer le facteur de concentration des contraintes à la pointe de l'encoche (égale à 1,8 pour la géométrie illustrée sur Fig. 1.13).

1.3.3 Effet de cycles de gel-dégel sur l'enrobé sous conditions saturées

Les essais précédents mettent particulièrement l'accent sur les performances des enrobés vis-à-vis des contraintes thermiques et le couplage thermo-mécanique. Or en réalité, ces actions sont souvent combinées aux conditions sévères qui prévalent sur la chaussée pendant la période hivernale et qui sont à l'origine des dommages prématurés des chaussées dans les régions froides. Ces conditions comprennent : (1) les averses de pluie et la neige fondante, qui conduisent à une saturation partielle des mélanges bitumineux et de la structure routière, (2) l'entretien hivernal nécessitant l'utilisation de sel de dégivrage, (3) les chargements mécaniques (déplacement de véhicules lourds) et (4) les changements de température avec des cycles de gel-dégel créant des contraintes thermiques, un couplage thermo-mécanique et une pression interne due à la transformation de l'eau en glace dans les pores du matériau.
Les dégradations prématurées résultant de ces conditions prennent souvent la forme de nids de poule et de pelades (i.e. arrachement par plaque de l'enrobé). Ces dégradations ont la particularité d'apparaître très rapidement et sans signes précurseurs spécifiques [34, 35].
Dans cette optique Mauduit et al. [36] ont mesuré les déformations thermiques induites par les cycles gel-dégel sur des échantillons d'enrobés secs et partiellement saturés. Des échantillons cylindriques ont été équipés avec des jauges de déformation et soumis à des cycles de gel-dégel en laboratoire. Pour simuler le gradient de la température à travers l'épaisseur de la chaussée, les cycles de gel-dégel sont appliqués en surface des éprouvettes par contact avec un piston métallique réfrigéré. Les auteurs ont mesuré les propriétés thermo-volumétriques telles que la variation de la déformation avec la température et le coefficient de dilatation-contraction thermique des mélanges. Particulièrement pour l'éprouvette avec le taux de saturation de 51%, une expansion importante due à la transformation en glace de l'eau piégée dans les pores du matériau a été observée (voir la courbe en rouge sur Fig. 1.15). Cette expansion est suspectée d'être à l'origine des soudaines dégradations observées sur les chaussées en ambiance hivernale. L'effet d'une telle expansion serait plus préjudiciable dans le cas d'une structure de chaussée multicouches, où ce gonflement serait empêché, générant ainsi des contraintes internes aptes à décohésionner les matériaux au voisinage de leurs interfaces [35].

Une étude similaire a été également effectuée par Lamothe et al. [37]. Les auteurs ont mené une étude expérimentale sur des échantillons cylindriques dans des conditions sèches

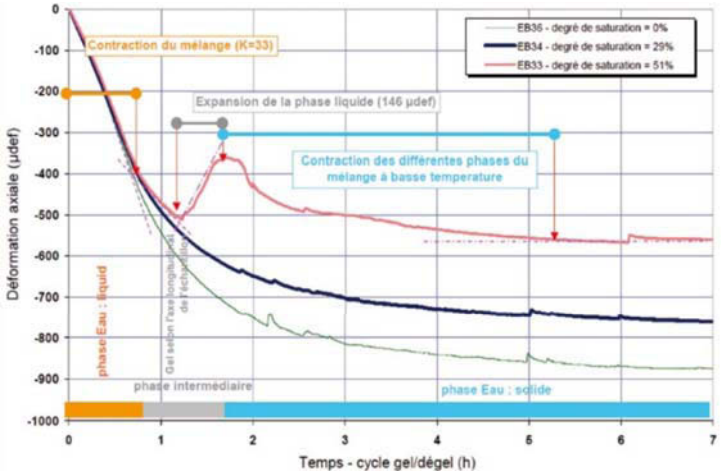


FIGURE 1.15 – Contraction des éprouvettes avec différents degrés de saturation en fonction du temps. Une expansion de la phase liquide peut être observée dans l'échantillon saturé à 51% [36].

et partiellement saturées dans la plage de température de -10°C à 23°C. La saturation a été effectuée avec de l'eau et de la saumure à différentes concentrations de sel. Les mêmes paramètres thermo-volumétriques que dans [36] ont également été mesurés (en utilisant des jauges de déformations) pour différents degrés de saturation et de teneur en sel dans la saumure. Les auteurs ont observé que dans l'intervalle de basse température de -18°C à +10°C, les échantillons saturés avec de l'eau présentaient une plus grande déformation (dilatation et contraction) que les échantillons saturés avec de la saumure. De plus, les auteurs ont observé que l'expansion due à la formation de glace dans les pores des échantillons saturés en saumure était plus faible que celle observée dans les échantillons saturés avec de l'eau.
Ensuite, dans [38], les auteurs ont évalué l'effet de ces cycles sur le module complexe. Ils ont trouvé que le module complexe des éprouvettes saturées évolue sous l'action des cycles de gel-dégel alors qu'il reste relativement stable pour les éprouvettes sèches. Ils ont également observé que la formation de la glace au sein de l'éprouvette cause des dommages dans la microstructure de l'enrobé. Après 100 cycles de gel-dégel, les échantillons saturés avec de l'eau ont montré une perte de rigidité de l'ordre de 65% à 4,7°C.
À l'échelle des constituants de l'enrobé, l'impact des cycles de gel-dégel n'a pas été suffisamment inspecté et très peu d'études ont exploré l'évolution de sa structure interne au cours d'un tel type de chargement. Le principal obstacle est la difficulté d'effectuer des mesures quantitatives à de telles échelles. Des études préliminaires telles que [39, 40] ont exploré cette problématique en utilisant la tomographie à rayon X.
En particulier, Xu et al. [39] ont comparé l'évolution de la microstructure des échantillons d'enrobés saturés avant et après des cycles de gel-dégel. Ils ont utilisé trois types de mélanges, à savoir : mélange ouvert (i.e. mélange avec une teneur en vides élevée de 20,5%), mélange à granulométrie dense (ED) (avec 4,8% de vides) et un béton bitumineux grenu (SMA). Ceci afin d'étudier l'impact de la granulométrie et du pourcentage de vides sur les mécanismes d'évolution de la microstructure des enrobés soumis à des cycles de gel-dégel. Avant le début de l'essai, les échantillons ont été scannés et une technique d'analyse d'images basée sur le

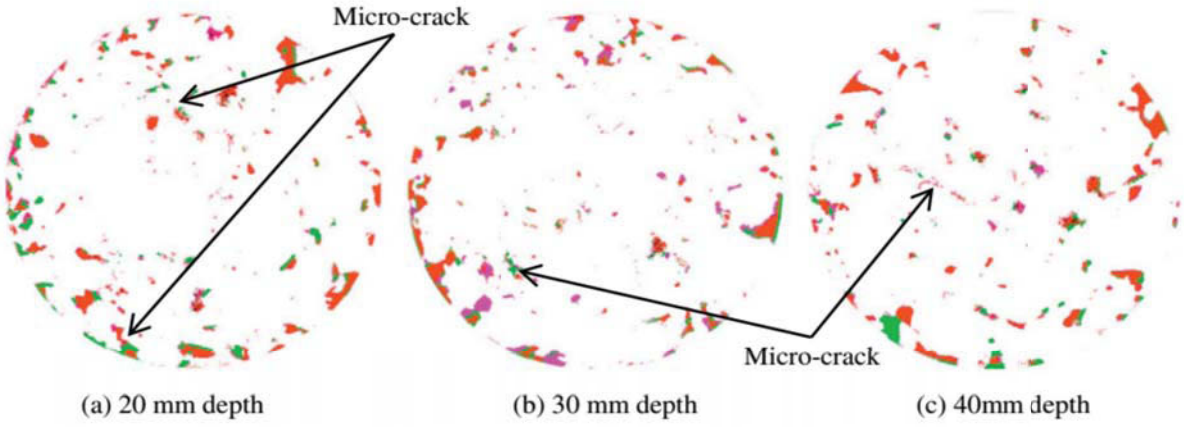


FIGURE 1.16 – Comparaison des tranches d'image d'un échantillon SMA, avant et après gel-dégel. (Rouge = vide existant, vert = incrément de vides après 15 cycles de gel-dégel par rapport aux vides existants, violet = incrément de vides après 30 cycles par rapport à l'état précédent)

seuillage des niveaux de gris a été utilisée pour déterminer le pourcentage et la forme des vides à l'état de référence. Ensuite les échantillons ont été soumis à 30 cycles de gel-dégel et l'état de la microstructure des échantillons est vérifié tous les 5 cycles. La Fig. 1.16 montre un exemple de la distribution des vides dans plusieurs coupes selon la position en hauteur dans l'échantillon SMA. Les changements dans le pourcentage des vides à 15 et 30 cycles de gel-dégel sont également indiqués. La multiplication des vides et l'apparition des micro-fissures sont clairement visibles. Les auteurs ont observé principalement trois mécanismes gouvernant l'évolution de la microstructure des échantillons, à savoir : (1) expansion des vides individuels existants, (2) coalescence des vides séparés et (3) formation de nouveaux vides. La contribution de chaque mécanisme varie selon la microstructure et le pourcentage de vides du mélange considéré. À titre d'exemple, dans le mélange SMA, c'est la coalescence des vides qui affecte principalement l'évolution de la structure interne.

Les auteurs ont également conclu que le pourcentage de vides et le taux de saturation affecte négativement la stabilité de la structure interne de l'enrobé et aggrave sa dégradation sous l'action de cycles de gel-dégel. Ainsi, les échantillons avec une teneur en vides et un taux de saturation élevés tendent à subir une microfissuration importante et la formation des réseaux de fissures sous l'action du gel-dégel.

1.3.4 Critique de la bibliographie sur le comportement thermique des enrobés

Dans la section précédente, les principaux outils expérimentaux développés par la communauté pour l'étude du comportement thermique des enrobés bitumineux ont été présentés. Le comportement thermique et les dégradations associées sont typiquement étudiés à une échelle

spatiale élevée (échelle macroscopique). Le matériau est considéré à cette échelle comme homogène et isotrope. Cela est tout à fait normal dans la mesure où les mécanismes d'endommagement responsables de la fissuration thermique des chaussées sont principalement attribués au retrait global de la surface de la chaussée. Cependant, l'hypothèse d'homogénéité néglige entièrement le rôle que peut avoir la microstructure du matériau. Cette hypothèse induit une sous-estimation de l'accumulation réelle des contraintes thermiques et pourrait provoquer une dégradation prématurée de la chaussée.
Bien que le retrait global empêché de la couche de roulement puisse être partiellement responsable de la fissuration transversale observée sur les routes, d'autres mécanismes d'endommagement graves peuvent également exister. En effet, le processus de contraction et fissuration thermique est fortement lié au caractère hétérogène de l'enrobé et ce dernier s'étend de l'échelle du mastic à l'échelle du plus gros granulat. Ainsi une prise en compte de l'aspect multi-échelle de l'enrobé s'avère pertinente pour mieux cerner les mécanismes à l'œuvre à des échelles plus petites dans les enrobés.
En outre, à l'échelle mésoscopique, le comportement de l'enrobé résulte de l'interaction entre ses constituants (mastic et granulats) qui sont thermiquement incompatibles car le coefficient de contraction thermique du mastic est beaucoup plus important que celui des granulats. En conséquence, le mastic aura tendance à se contracter davantage que les granulats durant le refroidissement thermique [41]. Or, le retrait local du mastic est empêché par les granulats, impliquant ainsi des concentrations des contraintes thermiques et éventuellement la fissuration à l'interface entre les mastic et les granulats [42, 43].
Par ailleurs, l'étude effectuée par Xu et al. [39] met clairement en évidence l'influence de la microstructure sur la forme et l'ampleur des dégradations à l'intérieur du matériau. Cependant à notre avis, l'utilisation de l'analyse d'images pour comparer les coupes à différents cycles de gel-dégel n'est pas pertinente. En particulier, la phase de seuillage est accompagnée d'une importante perte d'information. Une méthode se basant sur la comparaison des niveaux de gris (corrélation d'images volumiques par exemple) aurait pu apporter des informations plus précises et plus complètes sur l'évolution de la structure interne des différents échantillons.

Aujourd'hui et à notre connaissance, au niveau des enrobés bitumineux le suivi et la quantification des déformations thermiques à l'échelle des constituants (échelle mésoscopique) n'ont jamais été effectués. La difficulté consiste essentiellement à adapter les moyens de mesure de champs cinématiques à ce type de sollicitation. En conséquence, l'étude du comportement thermique local des enrobés bitumineux est un travail de recherche novateur, et constituera l'un des objectifs de la présente thèse.

1.4 Les enrobés bitumineux recyclés

1.4.1 Recyclage des agrégats d'enrobé

Les chantiers d'entretien et de réhabilitation des routes génèrent des sous-produits présentant un fort potentiel de recyclage. Les **agrégats d'enrobé** sont obtenus lorsque les routes en fin de durée de vie sont fraisées, concassées, fractionnées et stockées pour être utilisées en tant que composants supplémentaires dans les mélanges d'enrobé « neufs ». L'utilisation

des agrégats d'enrobé (RAP [3] en anglais) permet non seulement la réduction du coût de fabrication des nouvelles chaussées mais aussi de contribuer à la préservation des ressources naturelles.
Les enrobés recyclés sont produits en incorporant des agrégats d'enrobé dans le cycle de fabrication des enrobés bitumineux. Il existe deux méthodes principales de recyclage des agrégats d'enrobé : à chaud et à froid, qui peuvent encore être subdivisées en recyclage en usine ou *in situ* [44]. C'est le recyclage à chaud en usine qui est le plus couramment utilisé. Cette méthode consiste à mélanger, dans une centrale, les agrégats avec les matériaux d'apport (le bitume et les granulats) et si nécessaire, des additifs.

Composition d'un enrobé recyclé terminologie

Un enrobé bitumineux recyclé est un mélange entre les matériaux neufs dits d'apport (granulats d'apport GA et le liant d'apport LA) et des agrégats d'enrobé (AE). D'un point de vue normatif, il est désigné par le terme Enrobé de Recyclage (ER) [45], mais le terme communément employé est l'enrobé recyclé.
Les agrégats d'enrobé contiennent un liant âgé dit Liant d'Agrégats d'Enrobé (LAE) et de Granulats d'Agrégats d'Enrobé (GAE).
En résumé, l'enrobé recyclé est composé des Granulats d'Enrobé Recyclé GER (mélange de GA et de GAE) et de Liant d'Enrobé Recyclé LER (mélange de LA et LAE) [46]. Les différentes dénominations sont résumées schématiquement sur Fig. 1.17.
La part massique des agrégats dans un enrobé recyclé est appelée « pourcentage de recyclage », et la valeur de celle-ci permet de définir un enrobé recyclé [45]. L'enrobé est dit à faible taux de recyclage lorsque le pourcentage de recyclage est inférieur ou égal à 10%. Le taux de recyclage est dit moyen lorsque le pourcentage de recyclage est compris entre 10 et 30%. Finalement, pour des taux de recyclage supérieurs à 30%, l'enrobé est dit fortement recyclé.

1.4.2 Caractéristiques d'agrégats d'enrobé

Les agrégats d'enrobé subissent durant leur premier usage plusieurs changements physiques et rhéologiques qui doivent être considérés dans le processus de conception afin de garantir des performances égales à celles des enrobés neufs. L'utilisation des enrobés fortement recyclés est souvent restreinte aux couches inférieures et intermédiaires de la chaussée [47, 48, 49] et leur utilisation dans la couche de roulement reste relativement moins fréquente.

Propriétés des granulats d'agrégats d'enrobé

D'une manière générale, les propriétés techniques des matériaux recyclés doivent répondre au même cahier des charges que les matériaux neufs. Les GAE doivent être considérés dans la détermination de la granulométrie ainsi que les propriétés géométriques des GER [50]. Les dispositions normatives actuelles en Europe concernant les propriétés des granulats sont regroupées dans le recueil suivant [51].

3. Reclaimed Asphalt Pavement

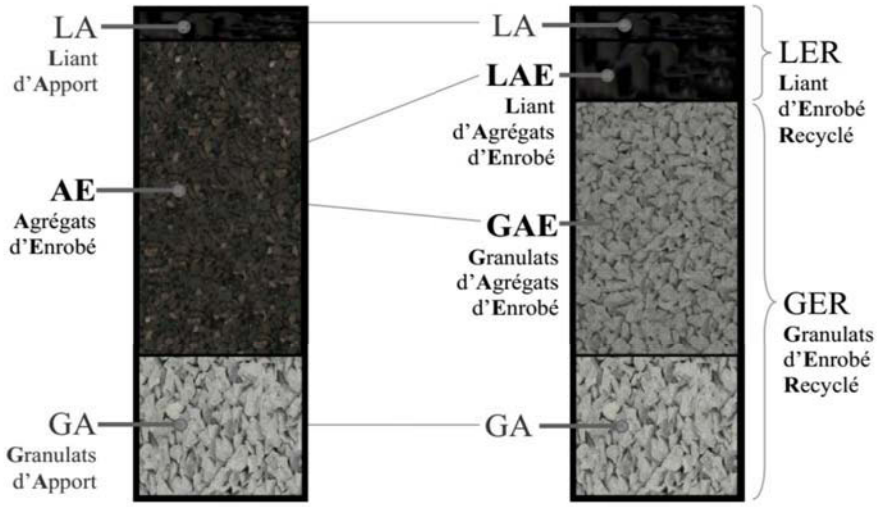


FIGURE 1.17 – Composition d'un enrobé recyclé et répartition de la participation des agrégats d'enrobé au liant et aux granulats de l'enrobé recyclé [46].

Une préoccupation liée à l'utilisation des GAE dans les enrobés destinés à des couches de roulement concerne ses effets potentiels sur l'adhérence de la chaussée (forces de frottement entre l'enrobé et le pneumatique). En effet, les GAE ont déjà subi un polissage au cours de leur vie précédente et par conséquent sont susceptibles compromettre la rugosité de la surface de la chaussée. Ainsi Kowalski et al. [52] ont estimé que l'utilisation des pourcentages élevés des granulats d'agrégats d'enrobé dans les routes à forte circulation n'est pas recommandé. Au-delà de 10% d'agrégats et pour une utilisation en couche de roulement un essai de caractérisation du coefficient de polissage doit être réalisé sur les GAE utilisés.
Watson et al. [53] ont exploré l'utilisation des agrégats dans un mélange de béton bitumineux grenu (SMA). La transmission des efforts et ultérieurement la dégradation dans ces types d'enrobés s'effectue principalement par contact côte à côte entre les gros granulats (voir le paragraphe 1.1.4). En conséquence SMA nécessite l'utilisation d'un taux élevé des granulats cubiques. Il a été trouvé qu'en matière d'aplatissement et d'élongation, les granulats d'agrégats d'enrobé présentent des performances intéressantes, car certains bords irréguliers se sont déjà cassés au cours de la durée de vie initiale ainsi qu'au cours du processus de recyclage. Cependant, ils ont échoué dans cette étude à remplir les spécifications en termes de la résistance à la fragmentation (essai Los Angeles).
Par ailleurs, le processus de récupération et le malaxage des agrégats dans les mélanges neufs ne garantissent pas la séparation totale des granulats et certaines particules fines restent collées sur les grosses particules recyclées (*cf* Fig. 1.18). Ainsi les GAE ont tendance à avoir des quantités plus élevées des grosses particules et des quantités inférieures de particules fines [54]. En outre, dans [2], les auteurs ont également remarqué que les granulats d'agrégats d'enrobé ont tendance à former des agglomérations (amas) dans le mélange neuf. Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences sur la granulométrie effective et la distribution des vides dans le mélange. Le phénomène de formation des amas est abordé en détail dans la section 1.4.6.

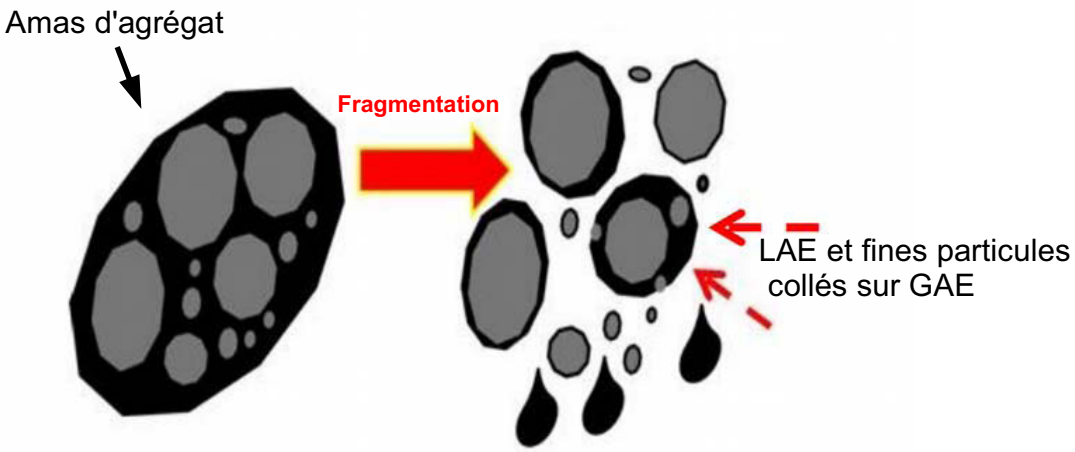


FIGURE 1.18 – Séparation d'un amas d'agrégats [54].

Propriétés du liant d'agrégats d'enrobé (LAE)

Le liant d'agrégats d'enrobé a subi durant son premier usage au sein d'un enrobé deux types de vieillissement [55] :

- Le vieillissement à court terme : ce type de vieillissement se produit généralement lors des travaux de construction et la mise en place de l'enrobé. L'exposition du liant à de l'air chaud et à la température de construction élevée cause une dégradation dans ses propriétés rhéologiques et physicochimiques telles que le module de cisaillement complexe et l'adhésion.
- Le vieillissement à long terme : ce type de vieillissement se produit progressivement tout au long de la durée de vie du liant et est causé par les phénomènes d'oxydation, de polymérisation, etc [56].

Ainsi, en conséquence du vieillissement, le liant d'agrégats d'enrobé est généralement plus dur et rigide comparé au liant d'apport. Or la rigidité de l'enrobé est impactée à plusieurs niveaux par celle du liant. Ainsi l'incorporation des agrégats induit l'augmentation de la rigidité du mélange résultant [53]. Ceci étant, on estime que l'enrobé recyclé présente une meilleure aptitude vis-à-vis des déformations permanentes. Plusieurs études corroborent cette affirmation. Mohamed et al. [57] ont observé une corrélation entre le facteur d'orniérage du liant homogénéisé $G^*/\sin(\delta)$ et les propriétés du mélange correspondant vis-à-vis de l'orniérage. Un liant d'agrégats d'enrobé a été récupéré à partir d'une couche de roulement d'une chaussée en service depuis 8 ans. Des enrobés contenant différents pourcentages de ce liant ont été fabriqués et testés vis-à-vis des déformations permanentes. Une bonne corrélation a été trouvée entre le facteur d'orniérage du liant $G^*/\sin(\delta)$ et la résistance du mélange vis-à-vis des déformations permanentes. Le risque d'orniérage a augmenté quand le pourcentage du LAE est passé de 0% à 20% de la quantité totale du liant, puis a diminué progressivement à mesure que le pourcentage est passé de 20% à 60%.
Cependant, l'augmentation de rigidité du liant peut impacter la compactabilité du mélange.

West et al. [58] ont observé une diminution de la maniabilité des mélanges contenant du LAE. L'auteur a mesuré *in situ* les changements de densité en un point de la surface de roulement après chaque passage du rouleau de compactage. Il a ainsi constaté que les mélanges contenant 20% d'agrégats sont plus facilement compactables que ceux avec 45% d'agrégats. Il a également remarqué que parmi les mélanges incorporant 45% d'agrégats, ceux qui étaient fabriqués avec un liant d'apport plus mou ont nécessité moins d'efforts de compactage. Or, Stimilli et al. [30] ont trouvé qu'en optimisant la conception globale du mélange avec une méthode de conception optimisée de la structure des granulats (la méthode de Bailey [59]), la compactabilité du mélange recyclé pourrait être sensiblement améliorée.
L'augmentation de la rigidité du mélange pourrait être également néfaste vis-à-vis de l'accumulation des contraintes thermiques dans l'enrobé. En effet, pour une contraction thermique et un taux de refroidissement donnés, l'augmentation de la contrainte thermique est proportionnelle à la rigidité du mélange d'enrobés qui est à son tour fonction de la rigidité du liant. Akentuna et al. [33] ont étudié l'effet de l'incorporation des agrégats sur le comportement thermique des enrobés recyclés. Ils ont remarqué que l'incorporation des agrégats a induit une augmentation dans l'accumulation des contraintes thermiques au sein de l'enrobé.

1.4.3 Challenges inhérents au recyclage

L'incorporation des agrégats dans un mélange d'enrobé bitumineux modifie les propriétés mécaniques du mélange et affecte ses performances. Les propriétés mécaniques changent principalement à cause de l'incorporation du LAE contenu dans les agrégats. Le LER a une composition chimique et des propriétés différentes de celles du LA ajouté pendant le processus de mélange.
Actuellement, la tendance qui émerge dans le milieu industriel consiste à la fois à la maximisation du taux de recyclage et à la réduction de la température de production. Cependant, pour faire face à cette tendance, le procédé de fabrication associé doit être adapté et contrôlé techniquement, pour assurer que les caractéristiques mécaniques de ce produit soient équivalentes à celles d'un produit neuf (un enrobé neuf). La satisfaction de cette exigence doit passer par un contrôle soigné de l'homogénéité du liant bitumineux, en d'autres termes il faut s'assurer que le LA et le LAE sont capables de s'homogénéiser au sein du même mélange. À noter que le niveau de l'interaction entre les deux liants n'est pas encore totalement compris [55] et très peu d'informations sont disponibles dans la littérature sur les phénomènes physico-chimiques et mécanismes survenant au cours du malaxage [2].
Dans un enrobé contenant des AE et en fonction du degré de mélange entre les matériaux d'apport et recyclés, plusieurs cas de figure peuvent se présenter [55]. En particulier, dans le cas où le LAE ne se mélange pas avec le LA, son comportement est qualifié de « black rock ». En conséquence, le LAE ne modifiera pas les propriétés du LA, dans ce cas l'utilisation des lois de mélange entre les deux liants peut s'avérer incorrecte. Cependant, il est généralement admis que les agrégats ne fonctionnent pas comme des « black rock » et qu'un certain degré de mélange existe entre les deux liants dans le nouveau mélange. Cela signifie qu'une partie du LAE se mélange avec le LA pour donner un liant aux propriétés nouvelles.
Les sections suivantes visent à soulever un certain nombre de problématiques inhérentes à l'homogénéité des enrobés recyclés. Les principales procédures utilisées dans la littérature pour aborder ces problématiques seront également discutées.

1.4.4 Mélange entre le liant d'apport et le liant d'agrégats d'enrobé

En pratique, dans le cas d'utilisation des agrégats en faibles pourcentages, la quantité du LA peut être réduite par le pourcentage du LAE, i.e. un mélange total entre les deux liants peut être considéré dans ce cas. Toutefois, si le pourcentage de recyclage est élevé, les particules peuvent agir comme des « black rock », le LAE ne se combinera pas avec le liant d'apport dans un taux admissible, conduisant à des résultats erronés [60].
Dans cette optique, McDaniel and Anderson [61] ont effectué une étude expérimentale en simulant en laboratoire les trois scénarios possibles d'interaction entre le liant d'apport et le liant d'agrégats d'enrobé. Les cas simulés sont : le cas « black rock » (pas de mélange), mélange total (100% de mélange) et le cas « Actual Practice » (la méthode de mélange utilisée habituellement en pratique). La granulométrie et la teneur totale en liant bitumineux dans les trois cas ont été maintenues constantes. Trois différents types de granulats, deux LA et deux pourcentages d'agrégats (10 et 40%) ont été utilisés. Les échantillons « black rock »ont été fabriqués en utilisant des GA, des GAE et un liant d'apport. Les GAE ont été désenrobés avant le mélange. Ainsi ce cas simule une rémobilisation nulle du LAE. Le cas « Actual Practice » simule un cas intermédiaire du mélange, et a été préparé en mélangeant les matériaux d'apport avec les GAE avec leur enrobage intact. Le cas mélange total est obtenu en mélangeant dans des proportions adéquates le LA avec le LAE qui a été récupéré préalablement à partir des agrégats. Les mélanges produits ont été comparés en utilisant des paramètres de performances « SuperPave » du SHRP (Strategic Highway Research Program). Les résultats indiquent que pour un pourcentage de 10% d'agrégats, aucune différence significative n'existe entre les divers mélanges, et ainsi l'effet du liant âgé est négligeable dans ce cas. En revanche, à 40% d'agrégats, le cas « black rock » était significativement différent des deux autres cas. L'étude a également montré que seulement 42% de tous les échantillons ont indiqué des résultats similaires entre le cas mélange total et le cas « Actual Practice ». Cela suggère qu'en réalité le scénario mélange total ne se produit pas tout le temps.
Aujourd'hui, il a été compris que le degré de mélange qui se produit entre les matériaux d'apport et ceux recyclés est une situation intermédiaire entre le cas mélange complet et le cas « black rock » [54, 55].
Il est considéré qu'il n'existe pas de méthodes directes pour déterminer avec précision le degré de mélange qui se produit entre les deux liants [55]. Aussi, la manière dont les deux liants (LA et LAE) interagissent n'est pas encore claire et l'ampleur de cette interaction sur les performances finales du mélange constituent encore un verrou scientifique.

1.4.5 Caractérisation du degré de mélange entre les matériaux d'apport et les agrégats

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été utilisées pour repérer puis récupérer le liant âgé au sein d'un enrobé recyclé. Les techniques citées ne sont absolument pas exhaustives mais évoquent certaines observations et particularités présentes dans un enrobé recyclé.

La méthode la plus intuitive consiste à mettre en œuvre un moyen qui permettra la distinction visuelle du LA par rapport au LAE. Nguyen [62] fait partie des premiers chercheurs

qui se sont intéressés à l'étude de la cinématique de malaxage des enrobés recyclés. L'auteur a mené une étude pour inspecter le degré de mélange entre les agrégats et les matériaux d'apport. Des essais de mélange ont été réalisés sur un enrobé recyclé fabriqué à partir d'un enrobé vieilli artificiellement dans le laboratoire (120 h dans une étuve à 85°C). L'auteur a utilisé un LA d'une couleur claire qu'il a ensuite coloré en rouge en y ajoutant des pigments (particules d'oxyde de fer). Ainsi après le mélange, les deux liants (LA et LAE) peuvent facilement être distingués.
La fabrication des enrobés recyclés est effectuée à 130°C, les GA surchauffé sont combinés aux GAE, puis le LA est ajouté. La durée de malaxage varie entre 1 et 8 minutes. Il a ensuite préparé des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et les a sciées perpendiculairement à leurs axes pour obtenir des disques (*cf* Fig. 1.19). Ces disques sont photographiés et les images sont analysées pour localiser les amas d'agrégats. L'analyse d'images a révélé la présence d'amas d'agrégats qui ne se sont pas impliqués dans le processus du mélange même après une période de malaxage relativement longue (8 min). L'auteur a donc conclu que, pour les conditions de production proposées dans l'étude et notamment la température de malaxage, un mélange parfait entre les matériaux d'apport et les agrégats ne peut pas être obtenu.

Dans la même optique, Navaro et al. [46, 63] ont proposé une approche quantitative pour décrire la cinématique du mélange au cours de la phase de malaxage des enrobés recyclés. Dans cette étude les auteurs ont utilisé un LA fluorescent sous lumière ultra-violette (UV). En utilisant des observations microscopiques sous lumière blanche et UV, il était possible de différencier les deux liants (LA et LAE) (*cf* Fig. 1.20). L'auteur a ensuite utilisé une méthode d'analyse d'images pour extraire les pixels correspondant à chacun de liants (LA et LAE). En analysant les images obtenues, l'auteur a introduit deux indicateurs semi-empiriques pour décrire quantitativement la cinétique du mélange. Ces indicateurs quantifient la cinétique de (1) la disparition des amas d'agrégats et (2) l'homogénéisation progressive entre LA et LAE. Les essais ont été effectués sur des mélanges contenant 70% d'agrégats et produits à 110°C, 130°C et 160°C avec un temps de malaxage variant entre 20 secondes à 10 minutes. Les résultats des observations microscopiques montrent que lorsque les constituants de l'enrobé sont mélangés ensemble, le liant et les fillers d'agrégats ont tendance à former des amas sur la surface des gros granulats d'agrégats d'enrobé. La réduction de la taille de ces blocs est très étroitement liée à l'effet combiné de la température de production et du temps de malaxage. Les résultats ont permis de conclure que la température a une très grande influence sur la cinétique d'homogénéisation du liant d'agrégat d'enrobé : une réduction de la température de production de 30°C doit s'accompagner d'une multiplication du temps de malaxage par 3 pour obtenir le même degré de mélange, considérant la géométrie et le type de malaxeur utilisé dans l'étude.

Rinaldini et al. [64] ont étudié le mélange entre les matériaux d'apport et les agrégats en utilisant des observations à différentes échelles par la microscopie électronique, la tomographie (CT) et la micro-tomographie (μCT). Les auteurs ont opté pour des GA de grande taille (8/11 mm) et des GAE de petite taille (2/4 mm), cela dans l'objectif de pouvoir distinguer leur provenance après mélange. Quatre mélanges ont été utilisés dans cette étude : deux mélanges présentant les deux cas extrêmes ; un mélange entièrement neuf constitué des gra-

FIGURE 1.19 – Éprouvette après 8 min de malaxage, les amas d'agrégats non mélangé avec le reste du mélange sont visibles.

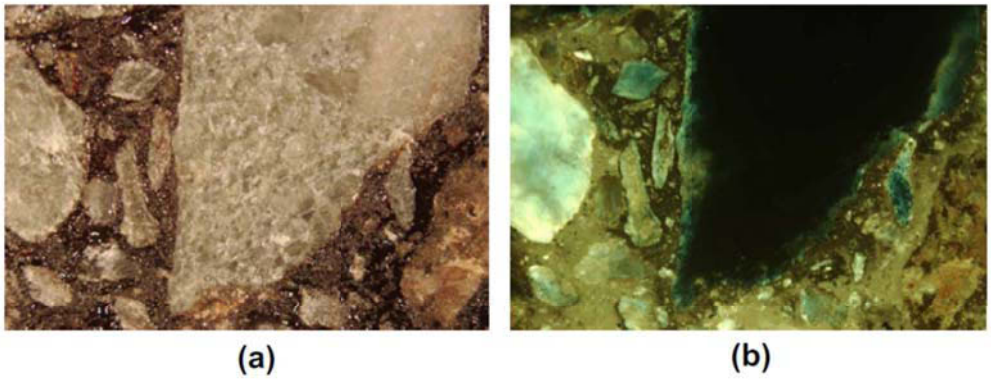


FIGURE 1.20 – (a) Photo prise sous lumière blanche et (b) photo prise sous UV : distinction du liant d'apport (fluorescent) et celui d'agrégats d'enrobé (foncé) [63].

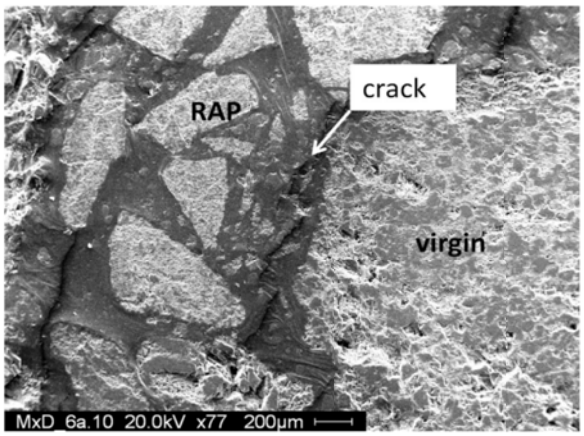


FIGURE 1.21 – Interface fissurée entre les matériaux d'apport (virgin) et les agrégats (RAP) [64].

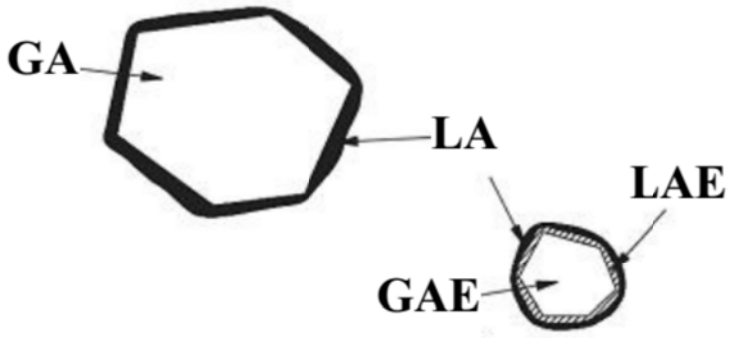


FIGURE 1.22 – Système composite en couches au sein d'un enrobé recyclé [65].

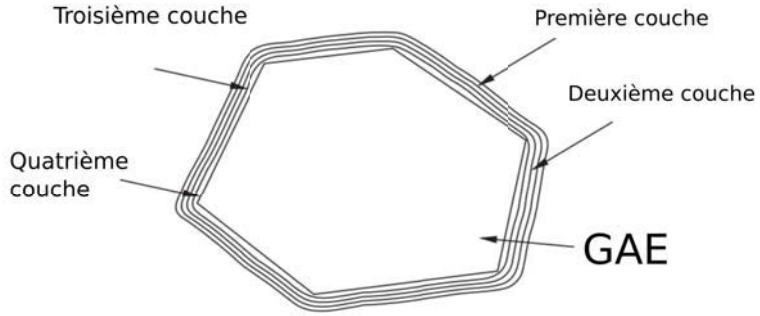


FIGURE 1.23 – Couches récupérées autour d'un granulat d'agrégats d'enrobé [65].

nulats de grande taille (8/11 mm) et un mélange entièrement recyclé constitué des granulats de petite taille (2/4 mm) ; puis deux mélanges intermédiaires avec environ 50% d'agrégats. L'analyse des propriétés rhéologiques du liant récupéré à partir des mélanges intermédiaires a révélé que celles-ci se situent entre celles du LA et du LAE, indiquant ainsi une certaine remobilisation de ce dernier.
L'observation par tomographie (CT) n'a pas par contre été concluante quant à l'homogénéité du mélange entre les matériaux. En revanche, l'analyse avec microscope à balayage a suggéré que le mélange entre les deux liants dépend de l'emplacement. Ainsi dans certains endroits, il y a un bon mélange entre les deux liants alors que dans d'autres endroits il a été observé la présence de microfissures à l'interface entre les matériaux d'apport et recyclés. Un exemple est illustré sur Fig. 1.21.
Il est à noter que cette observation est ponctuelle. Vraisemblablement, à cette échelle, il est difficile de conclure sur la nature de ces micro-fissures, surtout que la surface étudiée a subi un sciage. Ainsi les défauts surfaciques peuvent facilement être interprétés comme des fissures.

Huang et al. [65] se sont intéressés à l'examen de la nature et des caractéristiques rhéologiques du liant enrobant les GAE après le mélange. Les auteurs ont cherché à mettre en évidence l'existence d'un éventuel système de couches formé par le LAE autour des GAE. Ce

phénomène se produit lorsque le LAE enrobant les GAE ne se mélange pas entièrement avec le LA, des couches « coquilles » de LAE subsistent alors autour des GAE. Le principe est illustré sur Fig. 1.22. En raison du vieillissement à long terme, ces couches sont plus rigides que le LA.
Les auteurs ont choisi des GAE de même taille (tamis numéro 4) et donc facilement récupérable après mélange. Les GAE sont ensuite mélangés avec les GA. Plusieurs scénarios de mélanges ont été envisagés. Un premier cas extrême consiste à mélanger les agrégats avec les GA sans ajouter du LA. Cela vise à savoir si le bitume âgé entourant les GAE va « migrer » vers les GA. La procédure a été entamée pour différents pourcentages d'agrégats (10%, 20% et 30%). Le mélange a été effectué à 190°C durant 3 min. L'analyse de ce cas a révélé qu'uniquement 11% de LAE a migré vers les GA. L'auteur a ainsi conclu que le LAE a tendance à rester collé sur les GAE, et seulement une petite partie est disponible pour se mélanger avec les GA. Ensuite, des mélanges réalistes (contenant du bitume d'apport) avec 20% d'agrégats ont été préparés. Après le mélange, les granulats recyclés sont récupérés et ont ensuite subi une phase d'extraction où le bitume est récupéré en plongeant les agrégats dans un solvant pendant 3 minutes. Cette opération est répétée quatre fois, ainsi quatre couches de bitume entourant les GAE sont récupérées et caractérisées (*cf* Fig. 1.23).
Il a été observé que la viscosité du liant augmente en s'approchant du bord des GAE. Ainsi le liant âgé se présente sous forme d'une structure multicouche autour des GAE. L'auteur rapporte aussi que cette structure en couches est susceptible de réduire la concentration de contraintes autour des GAE et ainsi d'améliorer les performances en fatigue de l'enrobé à long terme [66, 67]. Ces conclusions ont été appuyées par quelques résultats de tests de fatigue réalisés dans [61, 68, 69]. En effet, cette amélioration des performances de l'enrobé peut s'expliquer par le fait que le LAE autour des GAE agit comme une couche de rigidité intermédiaire entre les granulats qui sont très rigides et le liant qui est souple. Ainsi, cette configuration favorise la suppression de saut de rigidité à l'interface des granulats et du liant réduisant ainsi la concentration de contrainte. Cependant, d'autres études rapportent une diminution de la durée de vie en fatigue suite à l'addition d'agrégats. Par exemple Shu et al. [70] ont évalué les caractéristiques en fatigue des mélanges contenant jusqu'à 30% d'agrégats et ont indiqué que l'ajout des agrégats peut entraîner une diminution de la durée de vie en fatigue sur la base d'essais de traction indirecte et l'essai de fatigue en flexion.

Plus récemment, et dans le cadre de la problématique évoquée dans l'étude précédente, Cavalli et al. [71] ont combiné les observations à l'aide de la microscopie à balayage électronique et l'analyse d'images pour mesurer l'épaisseur du film de LAE qui entoure les GAE. Les auteurs ont également étudié l'influence de la température sur l'épaisseur de ce film. Des mélanges contenant 50% d'agrégats ont été fabriqués à différentes températures (140°C, 160°C et 180°C). Un tamis seuil de 4 mm a été choisi pour séparer les agrégats et les matériaux d'apport et un agent traceur (dioxyde de titane) a été ajouté au liant d'apport pour le repérer après le mélange. L'analyse des images issues du microscope électronique ont permis de mesurer l'épaisseur du film entourant les LAE. Un exemple de distributions statistiques de l'épaisseur du film est représenté sur Fig. 1.24a pour les échantillons fabriqué respectivement à 140°C, 160°C et 180°C. L'épaisseur du film est de quelques microns et diminue au fur et à mesure de l'augmentation de la température. Il a été également trouvé que l'épaisseur dépend de la courbure locale du GAE. Les régions des GAE avec une courbure positive ont tendance

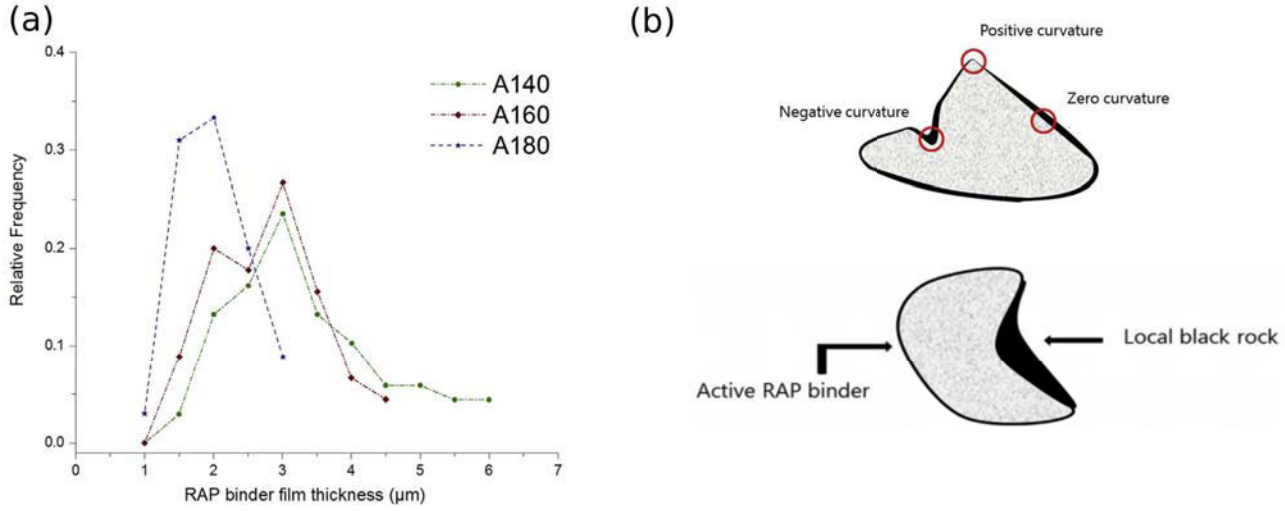


FIGURE 1.24 – Distribution statistique de l'épaisseur du film LAE autour de GAE (le chiffre après la lettre « A » désigne la température de production) et (b) Illustration de la distribution non uniforme du liant en fonction de la courbure locale de GAE [71].

à avoir une épaisseur du film plus faible que celles avec une courbure négative (voir Fig. 1.24b).

1.4.6 Phénomène de groupement des granulats dans un enrobé recyclé

Bressi et al. [2, 72, 73] ont publié une série d'études visant à comprendre l'interaction entre les agrégats et les matériaux d'apport. L'accent est particulièrement mis sur le phénomène de formation des amas au cours du processus de malaxage (cluster phenomenon en anglais). Les amas peuvent être déjà présents dans les agrégats avant le processus de malaxage et sont appelés dans ce cas : « anciens amas ». Ils peuvent également se former lors du processus du malaxage appelés dans ce cas : « nouveaux amas ».
Les nouveaux amas se forment au cours du processus de malaxage à l'étape où les agrégats chauffés sont malaxés avec les GA avant l'incorporation du LA. Ainsi sous l'effet de la température et de l'abrasion, la couche de liant entourant les agrégats s'active et devient adhérente, facilitant alors la formation des amas.
Les auteurs ont étudié plusieurs mélanges avec différents pourcentages d'agrégats. Pour chaque pourcentage d'agrégats, les auteurs ont choisi un tamis seuil, en dessous duquel tous les matériaux sont constitués d'agrégats, cela afin de pouvoir récupérer les agrégats après le processus de malaxage. Les matériaux sont ensuite mélangés manuellement sur plusieurs étapes et à plusieurs températures. Après le mélange, les matériaux sont séparés en utilisant le tamis seuil. Les auteurs déterminent ensuite le taux et les caractéristiques rhéologiques du liant dans la fraction passante. L'étape suivante consiste à définir un état de mélange parfait produit artificiellement qui servira comme mélange de référence. Dans celui-ci, il est supposé qu'il n'y a pas eu de formation d'amas et que chaque granulat est enrobé avec une

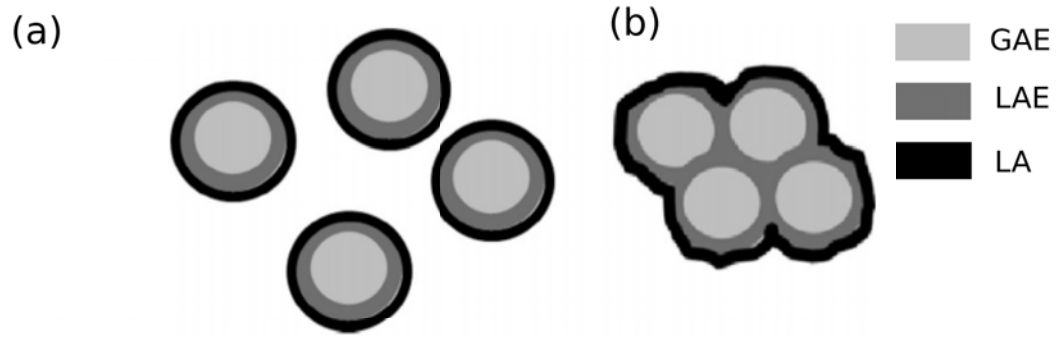


FIGURE 1.25 – Représentation schématique de (a) la situation de référence (pas de formation d'amas et pas de migration du LAE) et (b) formation d'un amas d'agrégats qui réduit la surface spécifique total [72].

couche de LA dont l'épaisseur est calculée empiriquement. Une schématisation de cet état est représentée sur Fig. 1.25a. Cet état de référence est reproduit expérimentalement et les caractéristiques rhéologiques du liant résultant ont été déterminées.
La Fig. 1.25b représente un cas où il y a eu formation d'amas. Celle-ci a pour effet de diminuer la surface spécifique disponible pour accueillir le liant d'apport. Ainsi, ce cas nécessite une quantité moindre de liant d'apport pour l'enrobage de tous les granulats. En conséquence dans le cas où le bitume extrait de la fraction passante est plus rigide que celui récupéré à partir du mélange de référence, cela signifie la présence d'une moindre quantité de LA que dans le mélange de référence. Ceci indique la formation d'amas d'agrégats.
Les résultats ont confirmé la présence des amas d'agrégats dans les mélanges. Ceux-ci sont influencés par plusieurs paramètres tels que taux de recyclage et la taille initiale des morceaux d'agrégats et les proportions des classes granulaires dans les agrégats.
Un phénomène assez intéressant qui a été observé au cours de ces études est le fait que le LAE subit un vieillissement différentiel : la partie externe du LAE est plus vieillie que le liant se trouvant à l'intérieur car le film de liant sous la croûte externe était protégé contre l'oxydation et donc plus mou. Ainsi au cours du processus de mélange avec les GA et sous l'effet d'abrasion, le liant interne s'active et participe au processus de mélange. Un exemple peut être visualisé sur Fig. 1.26. Il peut être observé qu'une partie du LAE devient disponible comme colle pour la formation des amas aux points de contact potentiels.

1.4.7 Critique de la bibliographie existante sur les enrobés recyclés

Dans cette section les principales caractéristiques des enrobés bitumineux recyclés ont été présentées. L'accent a été particulièrement mis sur les phénomènes physico-chimique et les mécanismes se produisant au cours du processus de malaxage. La préoccupation principale concerne particulièrement la problématique de l'homogénéité « finale » entre les matériaux d'apport et les agrégats. Le degré de mélange et le phénomène de formation des amas sont

FIGURE 1.26 – Exemple de la réactivation d'une couche de LAE au cours du mélange avec les GA [72].

deux des principaux problèmes à aborder afin d'acquérir une compréhension plus complète des enrobés recyclés.
Dans la littérature, l'approche multi-échelle s'est avérée pertinente pour appréhender la nature et la cinétique du mélange entre les matériaux recyclés et d'apport. Il existe différentes méthodes expérimentales pour caractériser l'homogénéité d'un enrobé recyclé. Les méthodes optiques d'observation multi-échelles et les techniques de traitement d'image sont très populaires et souvent privilégiées. Ces approches consistent à utiliser des outils permettant des observations couplées avec des méthodes permettant la distinction des agrégats. Les résultats et les conclusions avancées par les différents auteurs présentent souvent une certaine divergence concernant le degré de remobilisation du LAE au sein des enrobés recyclés. Cela est certainement dû au fait que l'homogénéité d'un mélange recyclé est conditionnée par de nombreux paramètres tels que : la température de production, le temps de malaxage, le type de malaxeur, le taux et la taille initiale des agrégats.
Cependant, cette méthodologie n'est pas dépourvue de limitations et son inconvénient majeur réside dans le fait qu'elle est incapable de décrire les conséquences de tels phénomènes sur le comportement mécanique local des enrobés recyclés. Cela est particulièrement dû à l'absence d'approches se basant sur les mesures cinématiques locales. En conséquence, la communauté ne dispose pratiquement pas d'information concernant le comportement mécanique local des agrégats et leur interaction avec les matériaux d'apport.
Aujourd'hui, il est nécessaire de développer des outils expérimentaux pour étudier la conséquence de l'inclusion des agrégats sur la distribution de la déformation locale dans un enrobé recyclé. À cet effet, les techniques de mesures de champs sans contact sont susceptibles d'apporter des informations complémentaires aux études déjà disponibles dans la littérature. Ces méthodes seront déployées dans le présente thèse afin de visualiser et quantifier le comportement local des enrobés recyclés sous chargements thermiques et mécaniques.

1.5 Conclusion

L'utilisation des enrobés bitumineux à l'échelle industrielle il y'a depuis plus d'un siècle et aujourd'hui, le matériau continue de garder sa place de référence dans les constructions routières.

À l'échelle macroscopique, où le matériau est considéré comme homogène isotrope, un grand nombre d'informations concernant son comportement thermique et mécanique est disponible. Cependant, les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie, justifiées autrefois par manque de moyens de mesure à des échelles microscopiques, ne semblent plus d'actualité, en particulier avec l'émergence et la popularisation de plusieurs techniques de mesure optique permettant la caractérisation de ces matériaux à l'échelle de leurs constituants comme la tomographie à rayon X et les méthodes de mesure de champs optiques. Par ailleurs, la tendance actuelle vers le recyclage de ces matériaux, impliquant l'utilisation d'au moins deux liants et plusieurs natures de granulats, fait que même à l'échelle du liant l'hypothèse d'homogénéité ne peut plus être garantie.

Jusqu'à présent, le comportement mécanique des enrobés recyclés a surtout été étudié à l'échelle macroscopique mais de plus en plus de travaux montrent la pertinence d'une analyse fine multi-échelle. Cette dernière passe à la fois par le développement et l'utilisation d'outils numériques originaux qui intègrent la très forte hétérogénéité de ces matériaux ainsi que le comportement fortement non-linéaire de la matrice bitumineuse. Ce comportement pourra être étudié sous chargements mécaniques (compression/traction) et thermiques (gel-dégel), dans les domaines réversibles ou irréversibles. Le comportement des liants au sein d'enrobés incorporant des agrégats est particulièrement intéressant à étudier à l'échelle mésoscopique, étant donnée la généralisation des pratiques de recyclage.
En conclusion, les techniques de mesures de champs sans contact développées et utilisées au laboratoire sont susceptibles d'apporter des informations très riches nécessaires à la compréhension des mécanismes de déformation des enrobés recyclés. Dans ce contexte, le travail proposé consistera à caractériser le comportement mécanique et thermique de plusieurs types d'enrobés recyclés à diverses échelles spatiales.

Dans le prochain chapitre nous passerons en revue les différentes techniques de mesure de champs cinématiques utilisées par la communauté concernée par la caractérisation du comportement des enrobés bitumineux. Les principes de ces méthodes seront présentés ainsi que leurs applications à l'étude des enrobés bitumineux.

Chapitre 2

Méthodes expérimentales pour la caractérisation de champs de déformation hétérogènes

2.1 Introduction

Les enrobés bitumineux sont des matériaux hétérogènes constitués de plusieurs phases. Cette nature leur confère un comportement mécanique très complexe que ce soit à l'échelle de la route ou à l'échelle de leur microstructure. En effet, le champ de déformation dans l'enrobé est très hétérogène même si un champ de contrainte homogène est appliqué sur celui-ci. Traditionnellement, la plupart des spécifications et des guides de construction de la chaussée quantifient le comportement des enrobés à l'aide d'essais à l'échelle du mélange ou par des essais uniquement sur le liant d'enrobé. Avec de tels essais, une hypothèse d'homogénéité du mélange d'enrobé doit être adoptée. Cependant, étant donné que les granulats ne se déforment pratiquement pas sous chargements mécaniques, l'interprétation de la réponse en utilisant des mesures de déformation globale conventionnelles est inappropriée. La déformation proprement dite est reprise presque exclusivement par le mastic (le mélange du liant bitumineux et les fillers) [74].
En conséquence, la compréhension des mécanismes complexes qui sont impliqués dans la réponse mécanique de ces types des matériaux exige une information détaillée, en particulier l'observation de la réponse des différentes phases lors de la déformation de ces matériaux.
Les techniques classiquement utilisées pour mesurer la réponse mécanique des enrobés consistent à coller des jauges de déformation ou des capteurs LVDT sur la surface des échantillons. Ces techniques sont bon marché et fournissent des résolutions intéressantes qui sont de l'ordre du microdéformation. Cependant elles ne fournissent que des informations ponctuelles et ne permettent pas de capter l'information dans les zones sujettes à des concentrations importantes de déformations. Elles exigent également une mise en œuvre rigoureuse qui prend du temps, limitant ainsi leur utilisation. En outre, ces techniques n'offrent pas de flexibilité, car le choix des points de mesure doit être décidé avant le test [75].
Au cours des deux dernières décennies, des techniques dites de mesure de champs sans contact sont devenues de plus en plus populaires pour détecter et analyser les hétérogénéités locales

dans les matériaux composites [76]. Divers procédés optiques ont été développés et appliqués à cet effet [4, 77], y compris les techniques interférométriques, telles que l'interférométrie holographie, interférométrie de speckle et moiré interférométrique, et des techniques non interférométriques, telles que la Méthode de la Grille (MG) [78, 79, 80, 81] et la Corrélation d'Images Numériques (CIN) [82].
La technique de mesure de champs la plus communément utilisée pour l'étude des enrobés bitumineux est la CIN. Quelques études reportant l'utilisation d'autres méthodes telles que la MG et des méthodes d'analyse d'images sont également disponibles dans la littérature [83, 84].
À cet effet, les principes de ces méthodes seront présentés dans la suite de ce chapitre ainsi que leurs applications à l'étude des enrobés bitumineux. Or, avant de présenter les méthodes de mesure de champs, il est nécessaire d'aborder quelques notions concernant leurs performances métrologiques. En particulier, il est nécessaire d'introduire le vocabulaire utilisé pour estimer la qualité des résultats des différentes méthodes.

2.2 Principales notions de métrologie

Les méthodes de mesure de champs ont gagné une importante notoriété au sein de la communauté de la mécanique expérimentale grâce à leur aspect sans contact, à la richesse des informations qu'elles offrent ainsi qu'à leur facilité de mise en œuvre. Cependant, l'utilisation de ces méthodes pour l'étude des enrobés bitumineux est relativement récente et la communauté est plutôt habituée à l'interprétation de mesures ponctuelles ou macroscopiques. En outre, le choix des paramètres d'entrée pour ces méthodes a des grandes répercussions sur les résultats des mesures. Elles sont également très sensibles aux phénomènes parasites tels que les mouvements hors-plan, vibrations et les erreurs de mise en position. Par ailleurs, leurs performances en matière de résolution de mesure sont beaucoup plus faibles que celle des outils classiques (jauge de déformation).
En conséquence, l'utilisateur doit être sensibilisé aux limites de ces méthodes et aux éventuelles perturbations susceptibles de survenir au cours de l'essai. Ceci afin de pouvoir les éviter, les minimiser ou les corriger par un post-traitement approprié. La prise en compte de tous ces aspects permet à l'utilisateur d'apprécier à leur juste valeur les résultats de ses mesures.
Avant tout mesurage (l'acte de mesurer) l'utilisateur des outils de mesure de champs doit se poser un certain nombre des questions :

— l'ordre de grandeur du mesurande est-il compatible avec la méthode de mesure utilisée ?
— le mesurande est-il localisé dans l'espace/temps ?

Ces deux questions couvrent les trois aspects les plus importants caractérisant les performances métrologiques des méthodes de mesure de champs : la résolution de mesure, la résolution spatiale et la résolution temporelle. Une prise en compte préalable de ces deux aspects permet de mieux adapter la méthode de mesure au phénomène observé. Dans le cadre du présent chapitre, la revue bibliographique a révélé une utilisation non optimale des méthodes de mesure de champs et des incohérences sur les termes utilisés pour quantifier les résultats de mesure. Dans ce contexte, il apparait pertinent de présenter quelques notions de base de la métrologie.

La métrologie s'intéresse à la *qualification* de résultat de mesure pour tout mesurage. Il s'agit de fournir à l'utilisateur les éléments nécessaires concernant la *qualité* des mesures obtenues. La terminologie propre à la métrologie est normalisée par un document : Vocabulaire International de Métrologie (VIM) [85].
Dans le cadre des méthodes de mesure de champs abordées dans ce chapitre (CIN et MG), le mesurage effectué est dit *différentiel*. Le mesurage *différentiel* consiste à comparer par soustraction la mesure que l'on fait à une mesure dite de « référence ». En mécanique des matériaux, celle-ci correspond le plus souvent à une mesure au repos. Le mesurage *différentiel* permet souvent d'éliminer une grande partie des erreurs systématiques au cours de la soustraction [86].
Les principaux termes de métrologie utilisés sont :

- **L'incertitude de mesure** est « un paramètre non négatif qui caractérise la distribution des valeurs attribuées à un mesurande (valeur qu'on cherche à mesurer), à partir des informations utilisées »(*cf* VIM [85]). Elle comprend donc les erreurs liées au bruit (fluctuation aléatoire avec une moyenne nulle), aux effets systématiques (les composantes associées aux corrections et aux valeurs assignées des étalons) et à l'incertitude définitionnelle. Pour quantifier l'incertitude, il existe plusieurs possibilités : un écart type (incertitude type), un multiple de l'écart type ou bien encore la demi-étendue d'un intervalle ayant une probabilité de couverture déterminée.
- **La résolution de mesure** est définie comme la « plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante ». Dans le cadre des mesures de champs, c'est la plus petite valeur du déplacement qui peut être détectée au-dessus du bruit. C'est une notion à utiliser dans le cas de mesurage *différentiel*. En pratique, avec les méthodes de mesures de champs, le bruit (optique, électronique, etc.) sont les facteurs limitant la résolution. Une définition pratique de la résolution est proposée dans [4] : c'est la « variation de la grandeur mesurée qui produit une variation égale à un écart type du bruit de mesure ».

Cependant, le VIM ne considère pas les notions liées à l'aspect spatial qui caractérisent les mesures de champs, comme la résolution spatiale. Cette grandeur est pourtant d'une importance capitale dans le cadre des systèmes de mesures de champs. La résolution spatiale quantifie la dépendance spatiale entre les mesures, et ainsi la capacité d'une méthode de mesure à détecter des phénomènes localisés. La résolution spatiale dépend de plusieurs facteurs dont en particulier, des éventuels filtrages ou post-traitements effectués sur les mesures. Dans la littérature plusieurs définitions sont données :

- une première approche consiste à définir la résolution spatiale sous forme d'analogie avec les instruments de mesure classique : il s'agit de la « plus petite distance séparant deux points dont les images sont séparées »[87].
- l'étude des images de grilles de diverses fréquences dans une mire, au lieu de regarder deux points voisins, permet d'aborder le concept de résolution spatiale en considérant la plus grande fréquence transmise par l'instrument sans dégradation notable (par exemple sans perte supérieure à 50%). C'est ce qu'évoque une deuxième définition : « Spatial resolution for optical data : One-half of the period of the highest frequency component contained in the frequency band of the encoded data »[88].

À titre d'exemple, pour une méthode comme la CIN, la résolution spatiale est au minimum égale à la taille de l'imagette utilisée pour faire les calculs de corrélation. En effet, il y a une dépendance spatiale entre toutes les mesures contenues dans une même fenêtre de corrélation. En outre, la résolution spatiale est un compromis délicat avec la résolution de mesure. Une résolution spatiale élevée implique des mesures localisées mais qui sont plus bruitées de la résolution et vice-versa. Dans le cas des enrobés bitumineux, la déformation est reprise par les bandes étroites de mastic dont la largeur est souvent inférieure à 1 mm. Ainsi, afin de pouvoir détecter la déformation localisée dans le mastic, la résolution spatiale de la technique utilisée doit être inférieure à la largeur de la bande du mastic en question, tout en conservant une résolution de mesure acceptable.

2.3 Méthode de mesure se basant sur l'analyse d'images

La méthode se basant sur l'analyse d'images utilise le fait que lors de la déformation de l'enrobé les granulats ne se déforment pas, mais effectuent des mouvements de solide rigide (i.e. déplacement et rotation). Ainsi dans la configuration déformée, les caractéristiques géométriques des granulats telles que la section, le périmètre et l'élongation restent constants. En se basant sur ces informations, un algorithme d'appariement des caractéristiques géométriques des granulats est proposé par Wang et al. [83]. La formulation présentée ici concerne uniquement le cas 2D, l'extension de cette méthode dans le cas 3D peut être retrouvée dans [84].
Le programme s'appuie deux images de la même région capturées avant et après le chargement. Un seuillage est effectué pour isoler les granulats dans les deux images. Les granulats sont ensuite labellisés comme montré sur la Fig. 2.1. Les petites particules sont enlevées manuellement et sont considérées comme appartenir au liant. Pour chacun des granulats de l'image déformée, les étapes suivantes sont effectuées :

— **Étape 1** : Consiste à considérer un granulat i de référence dans la configuration initiale. Dans la configuration déformée, on cherche à identifier les cinq granulats les plus proches de ce dernier. Cela est effectué par le calcul de la distance euclidienne entre les centres de gravité de ces granulats et le granulat i suivant l'Equation 2.1.

$$d_j = \sqrt{(x_j^d - x_i^u)^2 + (y_j^d - y_i^u)^2} \tag{2.1}$$

où x et y sont les coordonnées des centres de gravité des sections transversales des granulats. Les exposants u et d indiquent respectivement les configurations déformée et initiale, l'indice j est l'indice correspondant au numéro de granulats dans l'image déformée. Ces granulats sont ensuite classés par ordre croissant par rapport à leur distance et leurs numéros sont indexés afin de garder une trace de leurs propriétés.

— **Étape 2** : La similarité entre les cinq granulats identifiés au cours de la première étape et le granulat de référence est ensuite évaluée à travers l'**indice de similarité** qui est défini par $|Q_j^d - Q_i^u|,\ j = \{1, \ldots, 5\}$. La quantité Q est une caractéristique géométrique à comparer telle que la surface, le périmètre, l'élongation, etc.

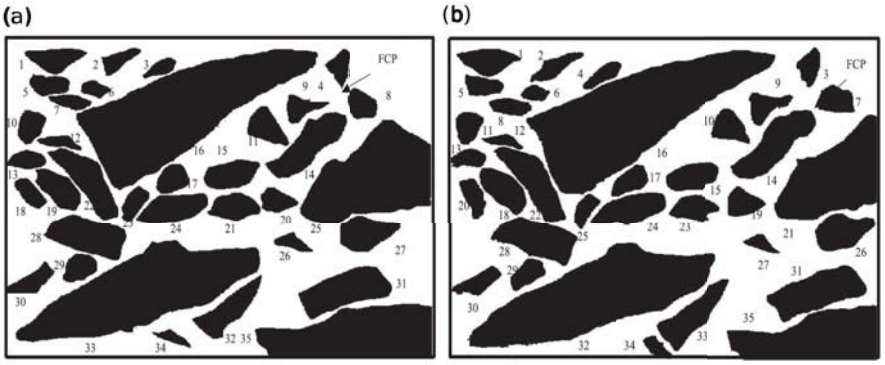


FIGURE 2.1 – Méthode de mesure basée sur l'analyse d'images : (a) configuration de référence et (b) déformée [84].

— **Étape 3** : Les granulats sont classés par l'indice de similarité dans l'ordre croissant et les deux premiers sont assignés d'une valeur de proximité de 1.
— **Étape 4** : Les deux étapes précédentes sont répétées pour les différentes caractéristiques des granulats et les valeurs de proximité pour chacun des cinq granulats sont additionnées. Le granulat avec la plus grande valeur de proximité est identifié comme étant le granulat correspondant au granulat i dans la configuration déformée.

Une fois que les granulats sont appariés, le déplacement de chaque granulat peut être calculé à partir de la différence des coordonnées de son centre de gravité dans les configurations initiale et déformée. Les rotations des granulats peuvent être calculées à partir des différences entre les orientations du plus grand diamètre Féret avant et après le déplacement. Cette procédure peut aussi être élargie pour estimer les déformations moyennes dans le mastic. L'approche est illustrée sur la Fig. 2.2 en considérant le déplacement relatif entre le centre de gravité (centre de la surface en coupe transversale) de deux quelconques granulats. Le déplacement du granulat i par rapport au granulat j résultant de leur translation, il peut être décomposé en deux composantes (*cf* Fig. 2.2) :

— la composante suivant BA :

$$\Delta u_n = (u_i - u_j)\cos\theta + (v_i - v_j)\sin\theta \tag{2.2}$$

— la composante normale à la BA

$$\Delta u_t = -(u_i - u_j)\sin\theta + (v_i - v_j)\cos\theta \tag{2.3}$$

où u_i, u_j, v_i, v_j sont les composantes du déplacement de centre de gravité des granulats suivant x et y, tandis que θ est égal à l'angle de BA (j à i) par rapport à l'axe x. Étant donnée que les granulats sont rigides, la déformation proprement dite se produit dans le mastic. Celle-ci peut donc être calculée en utilisant le déplacement relatif de deux granulats et la distance entre A et B (*cf* Fig. 2.2). La déformation moyenne le long BA (déformation normale) dans le mastic est :

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta u_n}{H} \tag{2.4}$$

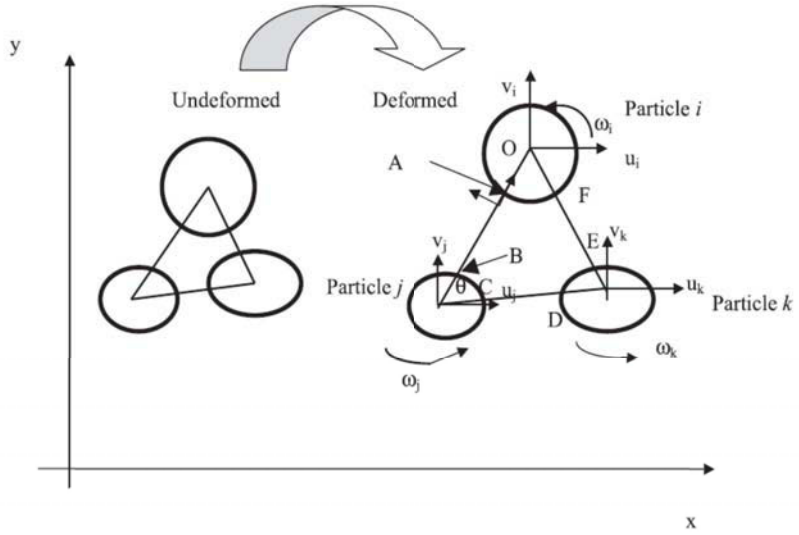


FIGURE 2.2 – Illustration de la cinématique des particules [84].

Et la déformation tangentielle moyenne s'exprime :

$$\gamma = \frac{\Delta u_t - \omega_i r_i - \omega_j r_j}{H} \tag{2.5}$$

où r_i est la distance du centre de la particule à un point de croisement tel que A ; w_i est la rotation de la particule (positive dans le sens anti-horaire) ; H est la distance entre A et B.
Un exemple d'application de cette méthode à l'étude des déformations permanentes au sein d'un échantillon d'enrobé parallélépipédique de $30 \times 13 \times 8$ cm soumis à un chargement par passage de roue au centre de son côté supérieur peut être retrouvé dans [83, 89]. Les champs de déformation calculés dans le mastic avec les équations Eq. (2.4) et (2.5) sont illustrés sur la Fig. 2.3. À partir ces champs de déformations, les auteurs concluent que la déformation dans le mastic est très localisée. L'amplitude varie de plusieurs ordres de grandeur et est généralement beaucoup plus grande que les déformations globales. Cependant à une très grande amplitude de la déformation, l'interface entre les particules et le mastic peut se rompre. La déformation réelle dans le mastic peut être inférieure à celle mesurée basée sur l'analyse d'images.
Pour conclure, la méthode s'appuie sur une idée assez originale qui intègre les spécificités relatives au comportement local des enrobés bitumineux. En revanche cette méthode ne fournit qu'une approximation des déformations moyennes dans une couche de mastic entre les granulats. De plus, le vecteur qui relie les centres de gravité de deux granulats n'est pas nécessairement normal aux bords des granulats, ainsi en points A et B, les déformations sont seulement des approximations. De plus, l'outil proposé s'appuie sur une hypothèse silencieuse stipulant l'absence des fissures entre mastic et granulats. Enfin, la méthode comporte une étape de seuillage qui s'accompagne généralement d'une importante perte d'information.

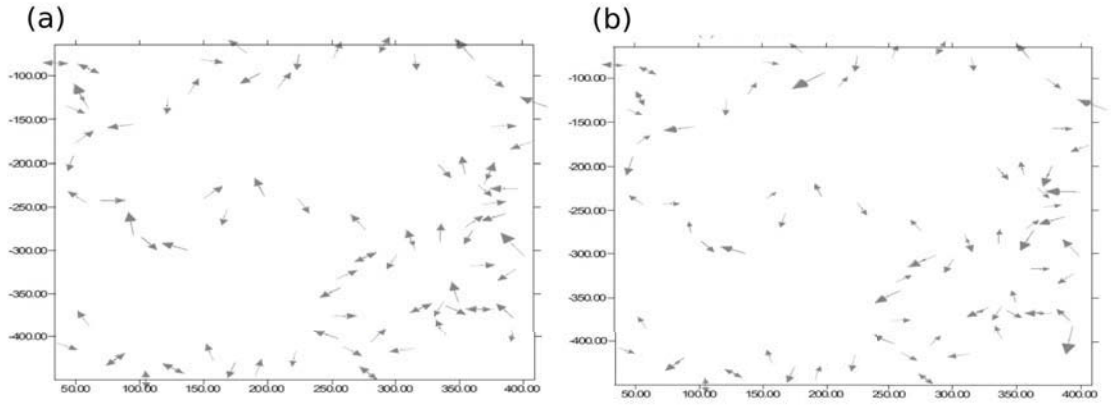


FIGURE 2.3 – (a) Déformation moyenne normale dans le mastic le mastic représentée sous forme des flèches et (b) déformation moyenne tangentielle [84].

2.4 Méthode de corrélation d'images numériques 2D (CIN)

2.4.1 Principe de la méthode de corrélation

La corrélation d'images numériques [90] consiste à déterminer le champ de déplacement de la surface d'un matériau, lorsque celui-ci est soumis à des sollicitations extérieures en s'appuyant sur la comparaison d'images avant et après sollicitation. Le champ de déplacement est calculé en comparant « pixel à pixel » la zone d'étude D (ZOI[1]) dans les deux images pour déterminer le déplacement du centre de la zone $\boldsymbol{u}$ (*cf* Fig. 2.4). La comparaison du sous-domaine D entre les deux configurations est basée sur la ressemblance des niveaux de gris. Ainsi le déplacement d'un « point » correspond à la valeur moyenne du déplacement d'une imagette (ZOI), modélisée par une transformation matérielle ϕ qui s'écrit sous la forme : $\boldsymbol{x} = \phi(\boldsymbol{X}) = \boldsymbol{X} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{X})$.
Avec $\boldsymbol{X}(X, Y)$ et $\boldsymbol{x}(x, y)$ sont les positions de la ZOI dans l'image de référence et l'image déformée respectivement.

La correspondance entre les deux zones est réalisée en utilisant une technique d'appariement d'images basée sur les similitudes entre les valeurs de niveau de gris durant le chargement : $f(\boldsymbol{X}) = g(\boldsymbol{x})$ ou encore $f(\boldsymbol{X}) = g(\phi(\boldsymbol{X}))$, où $f(\boldsymbol{X})$ et $g(\boldsymbol{x})$ représentent les niveaux de gris à l'état de référence et à l'état déformé. En réalité, l'égalité n'est pas parfaite à cause de la présence des variations de signaux liées, par exemple, au bruit du capteur ou des variations de l'éclairage lors de l'acquisition et l'interpolation dans le cas d'un déplacement non entier.
La détermination du déplacement nécessite la *régularisation* du problème en restreignant la transformation matérielle à une famille particulière de transformations. Cela est en pratique effectué en approchant la transformation par son développement limité ϕ_0 sur le domaine

1. Zone of Interest en anglais

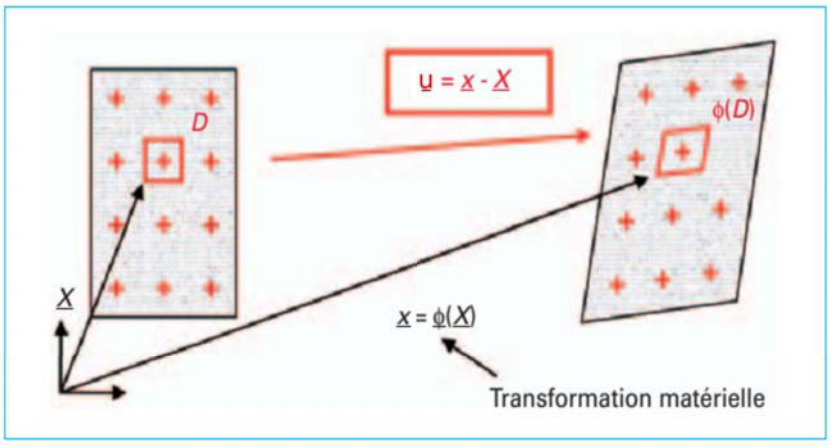


FIGURE 2.4 – Principe de l'appariement des imagettes [90].

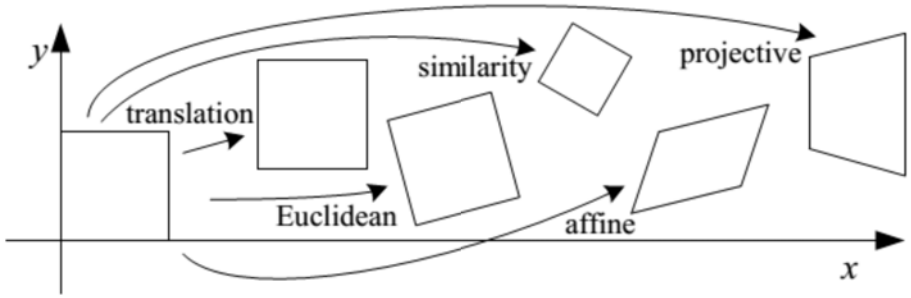


FIGURE 2.5 – La base de l'ensemble des transformations 2D [91].

centré en $\boldsymbol{X_0}$. L'expression générale de ϕ_0 peut alors s'écrire :

$$\phi_0(\boldsymbol{X}) = \boldsymbol{X} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{X}_0) + \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial \boldsymbol{X}}(\boldsymbol{X}_0).(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_0) + \frac{1}{2}.(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_0).\frac{\partial^2 \boldsymbol{u}}{\partial^2 \boldsymbol{X}} + \dots \tag{2.6}$$

L'ordre du développement est plus ou moins élevé en fonction du système étudié et les mécanismes de déformation mis en jeu. Un exemple de différentes familles des transformations qui peuvent être utilisées pour approcher la transformation ϕ_0 est illustré sur Fig. 2.5. Pour des applications courantes, le développement limité est effectué à l'ordre 1, ce qui correspond à une transformation affine : une translation et une variation linéaire du champ de déplacement sur le domaine de corrélation.

Les coefficients de corrélation

Une fois le choix de l'expression mathématique pour ϕ effectué, la détermination des valeurs optimales des paramètres de la transformation approchée ϕ_0 passe par la recherche du minimum de la quantité $\sum_{\boldsymbol{X} \in D} (f(\boldsymbol{X}) - g(\phi_0(\boldsymbol{X})))^2$ appelée « coefficient de corrélation ». Ce coefficient correspond à la somme des différences entre les niveaux de gris de D et de son

homologue $\phi_0(D)$ dans l'état déformé. La fonction de corrélation la plus simple et la plus classique est l'écart quadratique des images :

$$C_1 = \sum_{\boldsymbol{X}\in D} [f(\boldsymbol{X}) - g(\phi_0(\boldsymbol{X}))]^2 dx \tag{2.7}$$

La norme quadratique qui présente quelques avantages opératoires peut être remplacée par d'autres mesures de l'écart. En effet, Pan et al. [92] ont démontré qu'il y a une équivalence entre les critères de corrélation.
Dans le cas des variations des luminosités au cours de l'essai, la formulation Eq. (2.8) est plus adaptée :

$$C_2 = 1 - \frac{\sum_{\boldsymbol{X}\in D}(f(\boldsymbol{X}) - \bar{f}_D).(g(\phi(\boldsymbol{X})) - \bar{g}_D)}{\sqrt{\sum_{\boldsymbol{X}\in D}(f(\boldsymbol{X}) - \bar{f}_D)^2}\sqrt{\sum_{\boldsymbol{X}\in D}(g(\phi(\boldsymbol{X}) - \bar{g}_D)^2}} \tag{2.8}$$

avec $\bar{f}_D$ et $\bar{g}_D$ sont les valeurs moyennes des niveaux de gris sur D et $\phi_0(D)$. Cette formulation évalue des variations de niveaux de gris par rapport à la moyenne sur chaque domaine de corrélation, et est donc à cet effet moins sensible aux variations de luminosités au cours de l'essai [90].
Les diverses variantes de CIN se particularisent par la définition du coefficient de corrélation C, le paramétrage de la transformation et les algorithmes de minimisation utilisés.
Le choix optimal du paramétrage de la transformation matérielle a fait l'objet de plusieurs études [93, 94, 95, 96]. Il a été constaté que l'utilisation d'une fonction de forme simplifiée permet de réduire le coût de calcul, mais fournit des erreurs importantes lorsque des grandes déformations se produisent. En revanche l'utilisation d'un polynôme d'ordre élevé conduit à une instabilité numérique à cause du sur-paramétrage du système d'équations. En d'autres termes, l'information contenue dans une petite fenêtre de corrélation ne permettra d'identifier qu'un nombre limité de paramètres et l'augmentation de leur nombre s'accompagnera d'une incertitude croissante sur la valeur de chacun d'entre eux. Le problème peut éventuellement être résolu en augmentant la taille de ZOI, mais cette augmentation entrainera la dégradation de la résolution spatiale. Donc un compromis délicat entre la résolution et la résolution spatiale s'impose : une bonne résolution spatiale sera accompagnée d'une forte incertitude sur le déplacement et inversement [97].

Performances métrologiques de la CIN

Avant d'entamer une analyse d'images avec la CIN l'utilisateur doit fixer un certain nombre des paramètres. Ceux-ci ont une grande répercussion sur les résultats des mesures en déformation. Généralement ces paramètres sont les suivants :

- Subset Size (SS) : définit la taille de la zone d'intérêt (ZOI) ;
- Step (ST) : définit l'espacement entre les centres des ZOIs. L'analyse est rarement effectuée en chaque pixel de l'image à cause du coût élevé de calcul ;
- Strain Window (SW) : définit la taille de la fenêtre de calcul utilisée pour le calcul de la déformation.

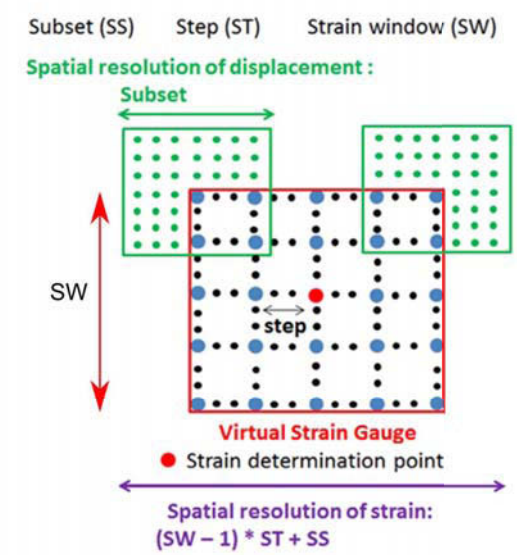


FIGURE 2.6 – Principe de la jauge virtuelle.

Les différents termes sont schématisés sur Fig. 2.6. La résolution spatiale en déformation peut alors être estimée à partir de ces paramètres comme (SW-1)×ST+SS. Cette formule représente la taille de la zone qu'on a utilisée pour estimer la déformation en un point. D'après cette formule, la taille de la ZOI a une grande influence sur la résolution spatiale de la CIN. Ainsi à partir de ces données on peut faire les remarques suivantes :

— Une petite taille de ZOI permet de mieux capturer les gradients localisés ;

— Une grande taille de ZOI masque (ou lisse) les gradients localisés et est plus adaptée dans le cas d'un champ de déformation uniforme ;

— Une petite taille de ZOI implique des résultats plus bruités.

Un exemple pratique peut être visualisé sur Fig. 2.7, où la distribution de déformation verticale à l'interface entre deux couches d'enrobés à la fin d'un essai de traction est représentée [98]. Les cartes de déformations sont représentées pour plusieurs tailles de ZOI (*cf* Fig. 2.7). On remarque que pour une ZOI de 8×8 pixels de taille, la carte de déformation est bruitée (résolution faible), mais le contour de la fissure est visible (résolution spatiale élevée). Au fur et à mesure que la taille de la ZOI augmente, une diminution de bruit est observable (résolution élevée) mais cela au détriment de la visibilité de la fissure (résolution spatiale faible). Pour une taille de 64×64, on remarque que le contour de la fissure devient flou à cause de l'effet de la moyenne locale induite par l'augmentation de la fenêtre de corrélation.

Un ordre de grandeur de la résolution théorique de la CIN est illustré dans le tableau Tab. 2.8. La résolution théorique (designée par accuracy) est représentée en fonction de la taille de la région d'étude (ROI [2]) et la taille de ZOI (grid), pour un capteur de 1300 × 1000 pixels et une erreur sur la convergence de $\sigma_u = 1/100$ pixel [99]. Il est alors clair à partir de ce tableau que pour une taille donnée de la région d'intérêt, la résolution théorique de

2. Region Of Interest

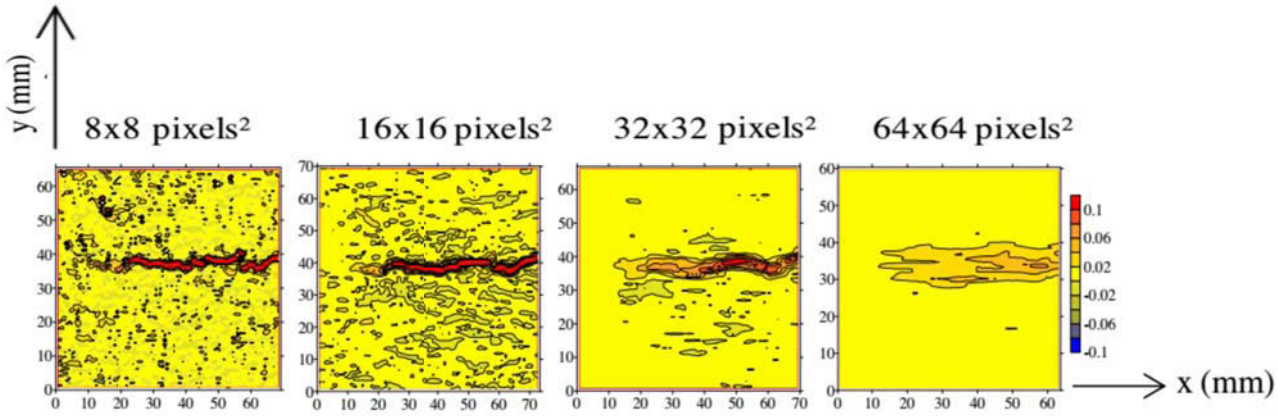


FIGURE 2.7 – Champs de déformation à la fin d'un essai à un essai de traction monotone sur l'enrobé [98].

ROI	1 cm	3 cm	5 cm	10 cm
Displ accuracy (µm)	0.08	0.23	0.38	0.77
ε grid 1 mm	0.011%	0.033%	0.054%	0.109%
ε grid 2 mm	0.005%	0.016%	0.027%	0.054%
ε grid 5 mm	–	0.007%	0.011%	0.022%

FIGURE 2.8 – Résolution théorique de la CIN pour un capteur de 1300 × 1000 pixels [99].

la méthode augmente en augmentant la taille de ZOI. Cependant, les valeurs données dans ce tableau sont assez optimistes, car en général la résolution réelle des mesures est affectée au cours de l'essai par plusieurs facteurs, comme l'éclairage, la qualité du mouchetis ou des mouvements parasites hors plan.

Préparation des échantillons et dispositif expérimental

Pour assurer une application correcte de la CIN, la texture de l'échantillon doit présenter un contraste élevé. Bien que la texture naturelle des enrobés peut être utilisée pour effectuer une analyse de CIN [100], le contraste de celle-ci est souvent insuffisant pour avoir une mesure pertinente de déformations localisées dans les bandes de mastic. Ainsi, il est recommandé de pulvériser un mouchetis de peinture sur la surface de l'échantillon.
La qualité du motif de texture et les conditions de l'éclairage ont un impact important sur la résolution de mesure en déplacement [101]. Les mouchetures doivent être uniformément réparties sur la surface de l'échantillon et de préférence être de petites tailles. Les motifs de texture préparés sur le même échantillon par différents utilisateurs peuvent présenter des caractéristiques différentes au niveau de distribution de niveaux des gris, de contrastes de l'image et de tailles. En conséquence, les mesures CIN menées par des personnes différentes peuvent donner des résultats différents, même si l'échantillon et l'état de déformation réelle

sont tous identiques [102].
Les images sont acquises avec une caméra équipée généralement d'un capteur CCD [3], située sur un support fixe et son axe optique est placé perpendiculairement à la surface de l'échantillon. La caméra capture des images de la surface de l'échantillon à différentes étapes de chargement. Comme les images enregistrées sont une projection 2D de la surface de l'échantillon, il faut veiller tout au long de l'essai à ce que la surface de l'échantillon soit plane et reste dans le même plan parallèle au capteur pendant le chargement. Le mouvement hors plan conduit à un changement de grossissement des images enregistrées qui biaise la mesure [99, 103]. En outre, le système optique ne doit pas introduire de distorsions géométriques, qui peuvent éventuellement être éliminées en utilisant des techniques de correction des distorsions appropriées [99, 104, 105].

2.4.2 Application de la CIN à l'étude des enrobés bitumineux

Introduction

Dans les dernières années l'utilisation de la CIN s'est popularisée dans la communauté des matériaux routiers pour l'étude du comportement local des enrobés bitumineux. Le plus grand atout de cette méthode réside principalement dans la facilité de sa mise en œuvre en particulier dans la préparation de la surface à observer. Cette méthode est donc convenable pour l'étude des régions d'intérêt assez large où l'application d'un marquage régulier est délicate.
Sous chargements mécaniques, l'enrobé affiche des forts gradients de déformation concentrés dans les bandes de mastic dont la largeur est souvent inférieure à 1 mm. La méthode de mesure utilisée doit donc présenter un bon compromis entre résolution de mesure et résolution spatiales. La capacité de la CIN à capturer les gradients de déformation sera évaluée dans cette section. Cela se fera à travers l'analyse de la bibliographie disponible concernant l'utilisation de la CIN pour caractériser les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux. La confrontation de ces résultats avec ceux obtenus en utilisant la méthode de la grille permettra de conclure sur la pertinence de l'utilisation de l'une ou l'autre vis-à-vis des objectifs de la présente thèse.
Dans la suite nous proposons une revue bibliographique des études les plus récentes qui s'intéressent à la caractérisation du comportement mécanique des enrobés à l'aide de la CIN. Romeo [75] a effectué une étude bibliographique sur l'utilisation de la CIN pour la caractérisation du comportement des enrobés bitumineux. L'auteur propose une catégorisation des différentes études sous 4 volets :

1. L'évaluation de la pertinence des essais de laboratoire ;
2. Les gradients locaux de déformation et endommagement ;
3. Suivi de propagation de fissures ;
4. La validation des modèles ;

3. Charge-coupled device, ou en français « dispositif à transfert de charge »(DTC)

L'évaluation de la pertinence des essais de laboratoire

Cette catégorie concerne essentiellement l'optimisation des essais classiques de laboratoire pour qu'ils soient davantage représentatifs du comportement des enrobés bitumineux. Comme il a été évoqué dans l'introduction de ce chapitre, l'application des outils de mesure des déformations classiques (jauge de déformation ou capteur LVDT) nécessite préalablement la connaissance d'un certain nombre d'informations concernant la distribution de la déformation au sein de l'éprouvette étudiée. Cela permet de choisir un point de mesure adéquat et une longueur de jauge appropriée. Dans le cas des enrobés bitumineux, le choix d'une longueur représentative pour la jauge de déformation (ou le capteur LVDT), est un facteur qui peut impacter significativement les résultats des mesures. La CIN pourrait alors être utilisée dans ce cas non pas pour caractériser les propriétés du matériau mais plutôt comme un outil permettant d'évaluer la pertinence des procédures expérimentales, des systèmes de mesures et les méthodes d'analyse de données classiques [75].
Kim et al. [106] ont utilisé la CIN pour déterminer la longueur optimale du capteur LVDT afin de mesurer correctement la déformation dans le cadre d'un essai de traction indirect (IDT [4]) sur des échantillons cylindriques de 100 mm de diamètre. L'auteur a conclu que si la longueur du capteur est trop grande, la concentration de déformation à proximité des poignées de chargement peut provoquer des erreurs dans le calcul de la déformation. Inversement, si la longueur est trop courte, l'existence de gros granulats au centre de l'échantillon peut affecter la représentativité des mesures. En se basant sur l'analyse de champs de déformation fournis par la CIN, ils ont recommandé d'opter pour une longueur du capteur de 50 mm.
Yi-qui et al. [107] ont également discuté de la problématique concernant le choix de la longueur optimale (longueur de référence) dans le cadre d'un essai de traction indirect. Les auteurs ont trouvé que la longueur de référence est étroitement liée à la taille des granulats. Pour les enrobés étudiés, ils ont proposé une longueur de référence d'environ 35 mm. Les auteurs ont également vérifié la validité des formules proposées dans les normes chinoises pour le calcul de la déformation transversale. Les auteurs ont souligné que les champs de déformations dans l'enrobé sont très hétérogènes (*cf* Fig. 2.9) et que l'application des formules proposées par les normes chinoises (issues de la théorie de l'élasticité) pour le calcul des paramètres du matériau ne convient pas dans ce cas, en particulier pour les forces élevées qui induisent une localisation importante des déformations.
Montepara et al. [108] ont employé la CIN pour adapter l'essai de traction directe SuperPave DTT [5], utilisé pour les liants bitumineux, à l'étude de la fissuration du mastic. Les cartes de champs de déformation ont mis en évidence que la géométrie standard n'était pas adaptée à l'étude du mastic à cause d'une distribution de déformation non uniforme rendant les résultats difficiles à exploiter. En plus, la longueur de l'échantillon de 33,8 mm a été jugée insuffisante pour l'identification précise des propriétés de la rupture. Les résultats de CIN associés à une analyse éléments finis ont permis l'identification de la géométrie correcte de l'éprouvette pour les essais sur le mastic.

4. Indirect Tensile strength Tests
5. Direct Tension Test

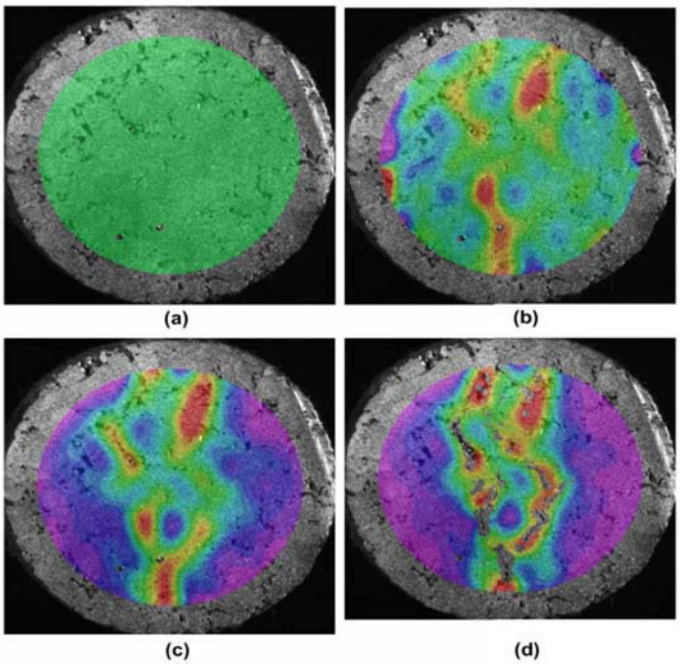


FIGURE 2.9 – Évolution de la déformation au cours de l'essai IDT à différents niveaux du chargement [107].

Gradients locaux dus à des hétérogénéités importantes

Cette section regroupe les principales études qui concernent la caractérisation de champs de déformation hétérogènes des enrobés bitumineux. En effet, la déformation dans un enrobé est principalement gouvernée par l'interaction entre le mastic (souple) et les granulats (rigides). Le comportement de l'enrobé se caractérise par un fort gradient de déformation qui est principalement concentré dans les bandes étroites de mastic entre les granulats [109]. Ainsi la mesure des déformations dans l'enrobé constitue un challenge, parce que la méthode de mesure doit présenter une résolution spatiale élevée.
Par ailleurs, une mesure précise de la répartition des déformations dans les mélanges bitumineux est essentielle pour révéler des informations importantes sur l'influence des propriétés de la microstructure sur le comportement macroscopique de l'enrobé. L'identification des zones de concentration de déformations fournit des informations sur l'emplacement probable de fissures. La revue bibliographique a mis en évidence que très peu d'études ont porté sur l'évaluation de l'amplitude des déformations au sein de la microstructure des mélanges bitumineux [75].
Moriyoshi et al. [110] ont réalisé des essais d'ornièrage sur des échantillons d'enrobé de forme prismatique à 45°C. Les auteurs ont utilisé la CIN pour identifier les zones correspondant à la localisation de déformation de traction dans l'éprouvette en fonction du nombre de cycles de passage de roue. À la fin de l'essai l'échantillon a été scanné à l'aide d'un tomographe pour détecter d'éventuelles fissures. La confrontation des résultats issus de la CIN et de tomographie a révélé l'existence d'une forte corrélation entre les concentrations de déformation de traction et l'emplacement de fissures dans l'éprouvette (*cf* Fig. 2.10). Ces résultats ont

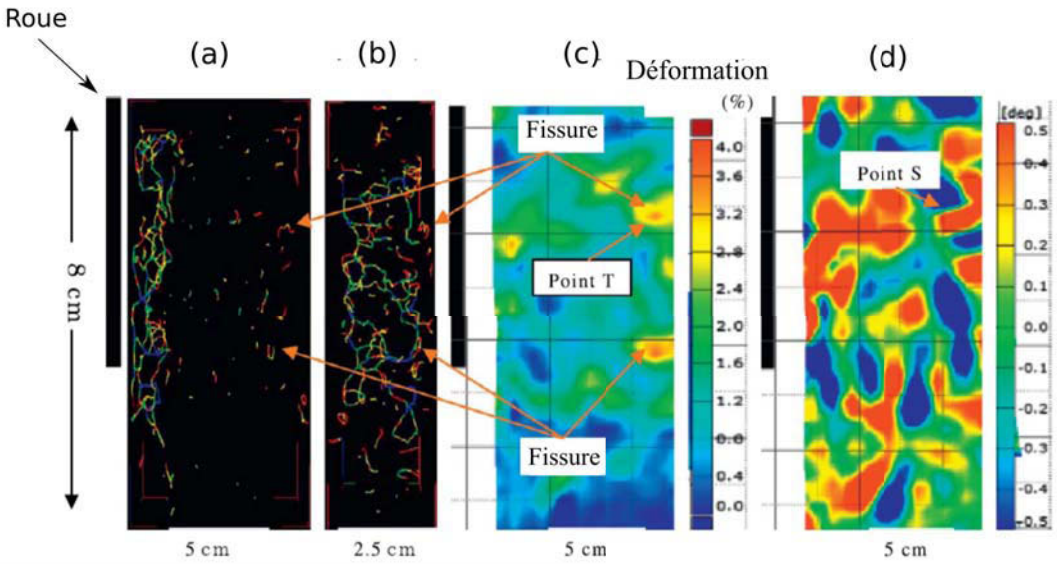


FIGURE 2.10 – (a) Exemple de la propagation des fissures suivant l'épaisseur de la plaque ; le passage de la roue est dans le plan perpendiculaire à celui-ci, (b) la propagation des fissures dans le plan de passage de la roue ; (c) et (d) illustrent respectivement la déformation de traction et de cisaillement dans l'épaisseur de la plaque [110].

suggéré que les fissures longitudinales observées sur les chaussées à haute température, qui étaient auparavant attribuées au cisaillement, résultent plutôt de la contrainte de traction engendrée par le passage des roues.

Seo et al. [111] ont utilisé la CIN pour des essais de traction monotone et cyclique sur des échantillons cylindriques et prismatiques à double entaille. Ils ont étudié l'effet de la taille des entailles sur les caractéristiques de FPZ [6]. Ils ont constaté qu'une zone d'initiation de rupture se forme à partir des entailles et avance vers le milieu de l'échantillon (*cf* Fig. 2.11a). Les résultats provenant de la CIN ont également été utilisés pour calculer la déformation moyenne dans FPZ. L'utilisation de cette déformation au lieu de celle issue du capteur LVDT, permet d'obtenir une loi contrainte-déformation plus représentative du comportement de FPZ (*cf* Fig. 2.11c).

Montepara et al. [112] ont appliqué la CIN pour évaluer l'effet de la modification du liant par le polymère SBS [7] sur les propriétés de déformation et de fissuration des mélanges d'enrobés. Trois types d'essais de caractérisation (indiqués sur Fig. 2.12) ont été effectués sur des échantillons modifiés ou non par le polymère. La distribution des déformations a été mesurée par CIN sur la région d'intérêt indiquée sur Fig. 2.12. Les auteurs ont observé que la modification du liant par le polymère augmente la ténacité des mélanges. En effet, ceux-ci se déforment beaucoup plus avant l'initiation des fissures. Ce comportement est visible sur les cartes présentées sur Fig. 2.13 correspondant au même niveau de déformation global. Les mélanges non modifiés présentent une forte dispersion des déformations sur toute la région d'étude, tandis que le mélange modifié présente des déformations plus localisées dans la zone

6. Fracture Process Zone
7. Styrene-Butadiene Polymers ou « styrène-butadiène »en français

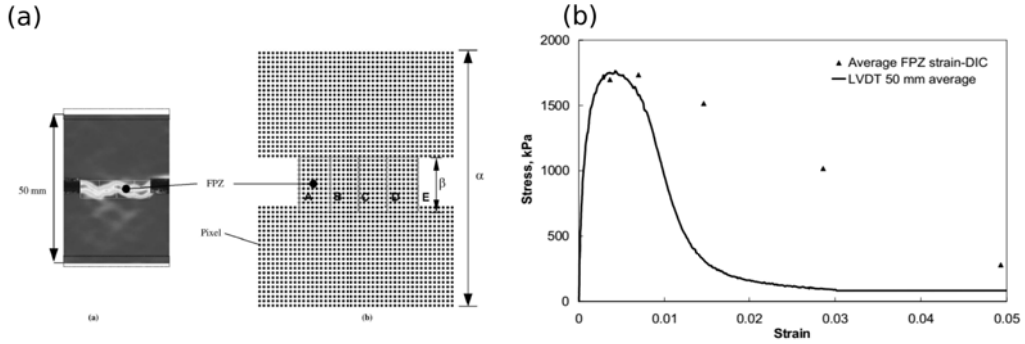


FIGURE 2.11 – Localisation de la déformation dans une éprouvette à double entaille et procédure du calcul de déformation moyenne dans cette zone, (b) Courbe contrainte en fonction des déformations issue du capteur LVDT et CIN [111].

d'initiation des fissures. Ils ont également observé que la grande différence entre la rigidité des granulats et celle du liant bitumineux provoque la concentration des déformations dans le liant.

Suivi de propagation de fissures

Cette section regroupe principalement les différentes études qui s'intéressent à la caractérisation de la propagation de fissures dans les enrobés en utilisant les approches de la mécanique de la rupture. En effet, la propagation de fissures dans les enrobés est fortement influencée par la distribution des granulats et du liant conduisant ainsi à une complexité significative dans l'analyse de la propagation de fissures. L'observation de l'initiation et de la propagation de fissures dans des enrobés bitumineux indique que les fissures peuvent s'initier sous forme de microfissures qui se propagent et fusionnent pour former des macrofissures [39]. La complexité de l'observation de l'initiation et la propagation de fissures dans les enrobés bitumineux a toujours été un obstacle pour la détermination de lois de dommages appropriées. Ce sujet constitue un sujet d'actualité aussi bien pour les enrobés que pour d'autres matériaux du génie civil.
Read [114] a utilisé une technique d'imagerie numérique pour suivre la propagation d'une fissure réflective initiée dans une poutre d'enrobé. Il a surveillé l'augmentation de la longueur de la fissure pour déterminer la longueur totale du chemin de la fissure. Il a remarqué que les fissures se propagent toujours autour des gros granulats en suivant un chemin préférentiel à l'interface mastic/granulat. Les fissures ont ainsi tendance à prendre le chemin le plus court entre le point d'initiation de la fissure et le point d'application de la force.
Hartman et al. [115] ont utilisé une technique d'imagerie pour mesurer la longueur de fissure physique développée dans des échantillons d'enrobés durant un test de fatigue en flexion à quatre points. Les analyses d'images ont permis de prouver que l'approche de la mécanique de la rupture était en mesure de décrire les performances d'enrobés bitumineux.
Birigson et al. [116] ont étudié le mécanisme associé à la fissuration au sein de plusieurs mélanges bitumineux en réalisant les essais de caractérisation illustrés sur Fig .2.12. Différents mécanismes de fissuration ont été observés : des valeurs élevées de déformation ont été observées dans l'ensemble de la zone centrale de l'échantillon de l'essai de traction indirecte

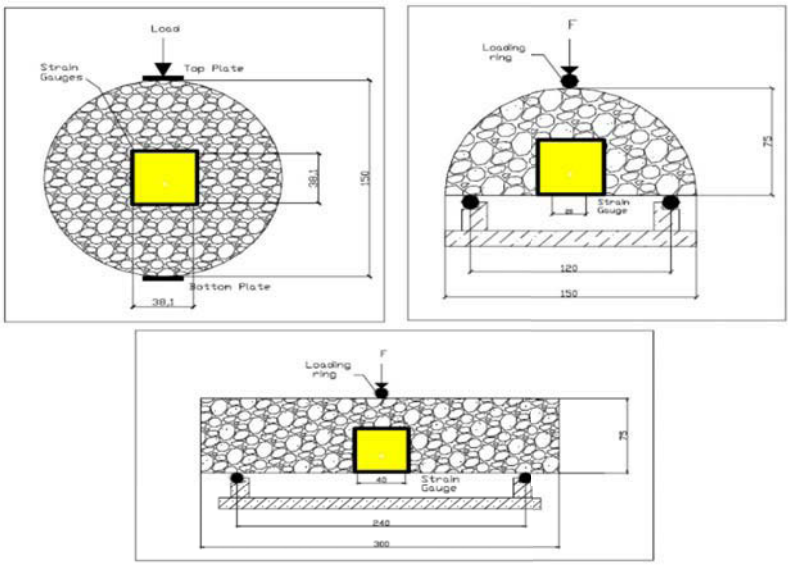


FIGURE 2.12 – Essais de caractérisation réalisés dans [112] ; la région d'intérêt est colorée en jaune.

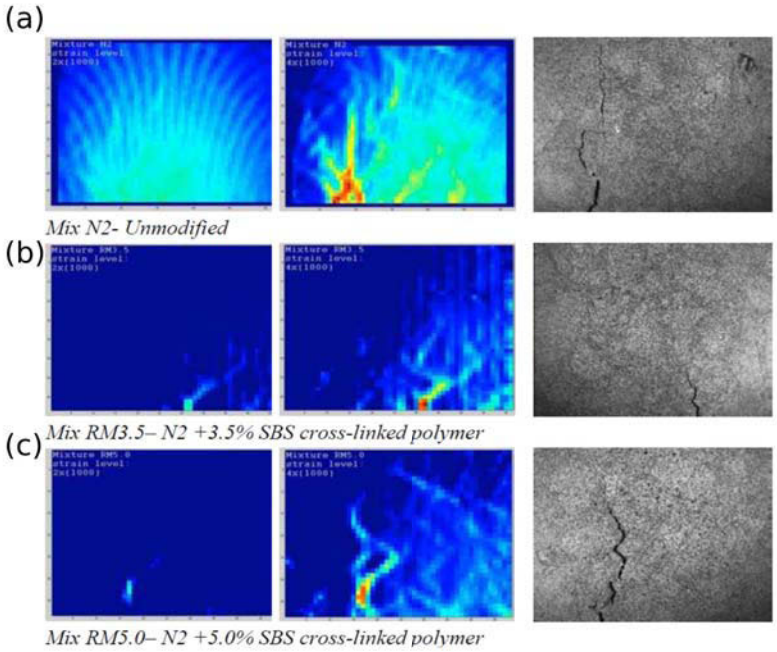


FIGURE 2.13 – Cartes de déformation pour l'essai de flexion semi-circulaire, (a) Mélange non modifié, (b-c) Mélange avec differents degrés de modification [112].

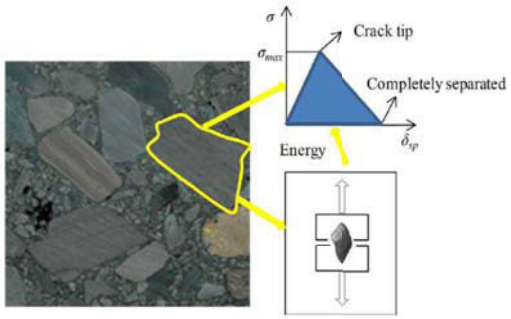


FIGURE 2.14 – Modèle de zone cohésive et la détermination de l'énergie à partir d'un essai de traction sur des granulats noyés dans le mastic [113].

(IDT), tandis que pour l'essai de flexion semi-circulaire et l'essai de flexion à 3 points, la déformation la plus élevée est située sur une zone restreinte proche du bord inférieur des échantillons.
Dans [117] les travaux réalisés par le RILEM Technical Committee 241-MCD sur les applications spécifiques de CIN pour l'évaluation de l'initiation et de la propagation de fissures dans les enrobés bitumineux sont présentés. Les essais réalisés concernent l'étude de la fissuration d'enrobés bitumineux en mode I et II. L'étude de la rupture en mode I a été réalisée sur des éprouvettes entaillées en forme de disque DC(T) [8], sollicitées en mode I en exerçant une traction par l'intermédiaire des deux alésages symétriques. Deux enrobés, modifiés et non modifiés par l'ajout de polymère, ont été testés à deux températures (0^o C et -12^o C). Les déformations sont mesurées sur une région d'intérêt située en aval de la pointe de la fissure (*cf* Fig .2.15a). Les mesures de déformation obtenues par CIN ont mis en évidence que les mélanges modifiés présentent une large région de concentration de déformation. Des résultats similaires ont également été reportés dans une autre étude effectuée par les mêmes auteurs sur des échantillons similaires [118]. Cependant, ces résultats sont en contradiction avec ceux présentés par [112], stipulant que l'enrobé modifié présente une distribution de déformation plus localisée que celles observées dans les éprouvettes non modifiées. Il est à noter que la différence entre les deux études réside dans la présence d'une entaille dans le second cas.
L'étude de la fissuration en mode II a été réalisée à travers un essai de fissuration par fatigue en cisaillement alterné (essai DST [9]) dont la configuration est illustrée sur Fig.2.15b. L'échantillon DST se compose de trois couches de même caractéristiques collées ensemble par une intercouche avec les mêmes caractéristiques. Les deux couches extrêmes sont fixées, et un effort sinusoïdal est appliqué sur la couche centrale. L'objectif de l'étude est de déterminer l'augmentation de la longueur de la fissure d'intercouche en fonction du nombre de cycles. À cet effet, plusieurs approches pour identifier la position et l'instant de l'amorçage de la fissure à l'interface ont été testées :

— *Le contour de déformation :* cette approche consiste à observer l'augmentation de la déformation dans l'intercouche et à définir un seuil de déformation correspondant à l'apparition de la fissure. Cette approche s'est révélée infaisable à cause d'une part du

8. Disk-shaped Compact Tension specimen
9. Double Shear Test

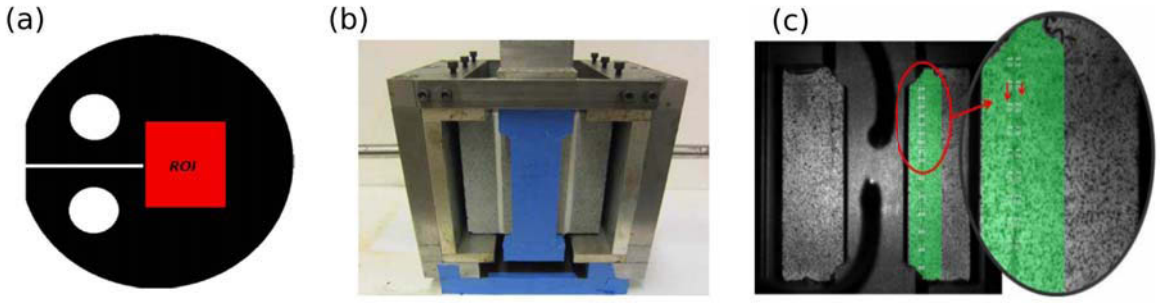


FIGURE 2.15 – (a) Essai en mode I, échantillon DC(T), (b) essai en mode II, échantillon DST et (c) la disposition des jauges virtuelle pour estimer l'avancée de la fissure à l'interface [117].

bruit de mesure en déformation qui est de l'ordre de 300 $\mu\varepsilon$ au repos (bruit inhérent au capteur de la caméra) et auquel s'ajoutent les bruits intrinsèques et extrinsèques à la CIN. D'autre part la détermination du seuil de déformation à partir duquel la fissure est supposée apparaitre est difficile à estimer.

— *L'approche bissectrice :* cette approche consiste à disposer des jauges virtuelles de part et d'autre de l'intercouche puis à calculer le déplacement relatif des deux couches suivant la longueur de l'intercouche. En effet, il a été trouvé que le déplacement relatif pour chaque jauge varie linéairement avec le nombre de cycles jusqu'à un point où les deux jauges semblent commencer à se déplacer indépendamment. Ce point a donc été corrélé avec l'apparition de la fissure et la rupture de l'intercouche.

La propagation de fissures en mode mixte a été étudiée par Gao et al. [119]. Les essais ont été réalisés en utilisant la configuration Arcan illustrée sur Fig. 2.16. Dans cette étude, la méthode d'essai Arcan a été adaptée aux enrobés bitumineux. Elle permet de simuler cinq niveaux différents de fissuration en mode mixte, y compris le mode à 100% en mode I et 100% en mode II. La CIN a été utilisée pour calculer l'ouverture des lèvres de fissure CMOD [10] et l'écartement en pointe de la fissure CTOD [11]. Les mesures CIN ont aussi permis d'observer l'influence de la température et le pourcentage de chaque mode sur le comportement de l'éprouvette. Il a été trouvé que dans la configuration 100% en mode II, l'initiation de la fissure est difficile mais dès l'apparition de celle-ci, sa propagation est instable. Les cartes de déformations provenant de la CIN ont permis d'observer la concentration de déformations dans l'échantillon à chaque niveau de chargement et pour les différents modes. Un exemple des concentrations de déformations à la pointe de la fissure pour les différents modes est représenté sur Fig. 2.17. Les résultats expérimentaux provenant de cette étude ont été utilisés dans [120] pour valider les résultats de simulations numériques pour l'essai Arcan. Une bonne corrélation a été retrouvée entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux.

10. Crack Mouth Opening Displacement
11. Crack Tip Opening Displacement

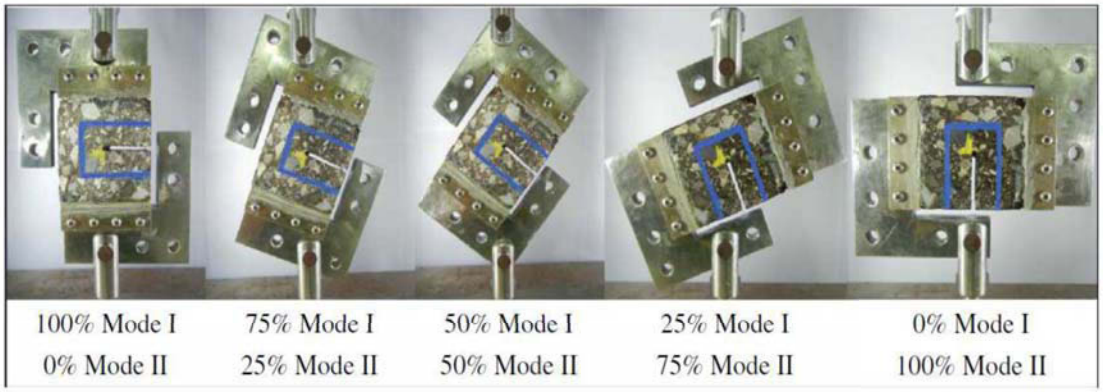


FIGURE 2.16 – Configuration Arcan avec le montage correspondant aux différents modes [119].

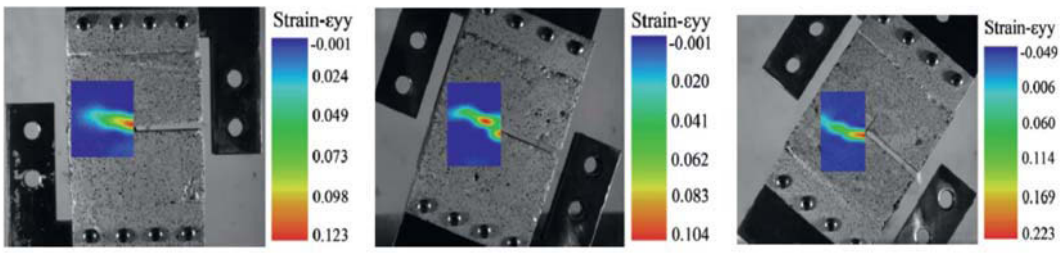


FIGURE 2.17 – Exemple de la concertation de la déformation pour les certains modes [119].

Validation des modèles

Les techniques de mesure de champs sont également des outils efficaces pour valider les modèles théoriques lorsque des hétérogénéités sont impliquées. Dans ce cadre, on a recours aux mesures par CIN dans la phase de localisation des déformations et de propagation des fissures où les outils de mesures classiques ont des difficultés à détecter correctement les grandeurs cinématiques.
Dans cette perspective, Seo et al. [121] et Chehab et al. [122] ont calibré, en utilisant la CIN, un modèle visco-élasto-plastique à endommagement continu (VEPCD [12]), développé par Kim et al. [123] pour la prédiction du comportement d'enrobés bitumineux en traction. En particulier la CIN a permis l'identification des paramètres du modèle au-delà de la zone de la localisation des déformations et de propagation des fissures, ce qui n'était pas possible avec l'utilisation de LVDT.
Aragão et al. [124] ont utilisé une approche élément finis combinée à la CIN pour caractériser les propriétés de fissuration des mélanges bitumineux chargés à différentes vitesses et températures (5°C, 20°C, et 40°C). La fissuration est modélisée utilisant un modèle de zone cohésive, et les paramètres du modèle ont été identifiés localement en utilisant les mesures provenant de la CIN.
Dong et al. [113] ont utilisé la simulation numérique pour valider les résultats expérimentaux obtenus dans [107] et illustrés sur Fig. 2.9. La structure de l'éprouvette a été générée à partir des images de celle-ci. L'interface entre les granulats et le liant a été modélisée en utilisant un modèle de zone cohésive dont les paramètres ont été déterminés à partir d'un essai de traction sur des granulats noyés dans le mastic (*cf* Fig. 2.14). Les résultats du modèle ont été confrontés aux résultats expérimentaux et une bonne concordance a été retrouvée (*cf* Fig.2.18). Les résultats ont permis d'effectuer une corrélation entre les propriétés macroscopiques des granulats (forme, allongement, angularité) et les performances macroscopiques de l'éprouvette.
Ktari et al. [98] ont utilisé la CIN pour caractériser la loi de comportement en traction de l'interface entre deux couches d'enrobés. Les paramètres de l'interface telle que la rigidité, l'évolution de l'endommagement et le taux de restitution d'énergie ont été expérimentalement déterminés en utilisant les mesures locales provenant de la CIN.

2.4.3 Critique de la bibliographie existante

Dans la section précédente, le principe de la CIN et ses applications à l'étude des enrobés bitumineux ont été présentés. La revue bibliographique a révélé que la CIN connaît actuellement une diffusion au sein de la communauté d'étude des enrobés et les travaux présentés ont démontré ses atouts potentiels pour la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux.
Les travaux cités ont permis de répondre à un certain nombre des problématiques concernant la caractérisation du comportement local des enrobés bitumineux. Cependant, en y portant un regard critique, des nombreuses questions émergent. Les réponses pourraient éventuellement constituer l'objet de la présente thèse. Dans cette optique les principales remarques concernant l'étude bibliographique sont présentées comme suit :

12. ViscoElastoPlastic Continuum Damage model

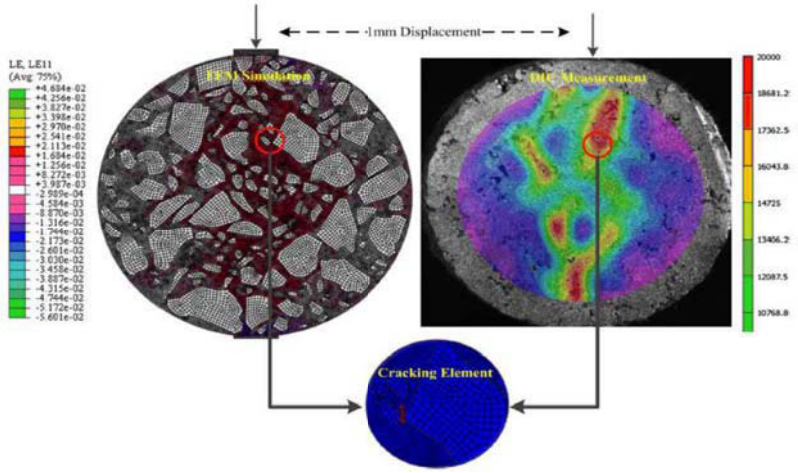


FIGURE 2.18 – Comparaison entre les résultats de simulation et ceux issus de la CIN [113].

Malgré le succès indéniable qu'a rencontré la CIN dans le domaine de la mécanique expérimentale, son application à l'étude des enrobés bitumineux reste très modeste. La plupart des études sont encore en phase de faisabilité et se concentrent essentiellement sur les aspects *qualitatifs* des champs des déformations. Dans ce cas les mesures sont utilisées pour voir si « quelque chose se produit quelque part dans l'échantillon ». Ainsi les performances métrologiques des mesures en termes de résolution et de résolution spatiale restent insuffisantes pour obtenir des informations quantitatives concernant les phénomènes observés, comme l'évolution des déformations dans une bande de mastic au cours de l'essai. Cette tâche est plus exigeante qu'une simple observation puisque la performance métrologique du système doit être maitrisée et compatible avec l'ordre de grandeur du phénomène observé. À titre d'exemple examinons la Fig. 2.13 dans laquelle le champ de déformation après la rupture de deux enrobés est illustré. La CIN a été utilisée dans ce cas pour déterminer l'instant et l'endroit où les fissures apparaissent en faisant abstraction des leurs caractéristiques quantitatives. On remarque que les concentrations de déformations n'apparaissent qu'après un stade assez avancé du chargement où les fissures deviennent observables à l'œil nu. L'utilisateur peut alors se demander l'utilité d'appliquer la CIN sur un phénomène clairement visible à l'œil nu.
En outre les mesures sont effectuées à une échelle spatiale assez large, qui pourrait être positionnée à la limite entre les échelles mésoscopique et macroscopique (voir la définition des échelles Fig. 1.6). En effet en observant les champs de déformation provenant des différentes études (exemple Fig. 2.18), on remarque que ceux-ci prennent une valeur non nulle dans les zones correspondant aux granulats. Or, comme il a été mentionné auparavant, la grande différence de rigidité entre les granulats et le liant fait que la déformation au sein des granulats peut être considérée comme nulle. Ces problèmes sont la conséquence de la dépendance entre les mesures dans la même zone d'intérêt. La qualité d'indépendance de mesure est estimée par la résolution spatiale, qui est le fruit d'un compromis délicat avec la résolution de mesure. Ainsi, à partir de champs de déformation et avec une résolution spatiale correcte pour la CIN, la microstructure de la surface de l'éprouvette en matière de distribution des granulats et du liant doit pouvoir être retrouvée. En plus les logiciels de corrélation souvent utilisés dans la

littérature sont des outils commerciaux qui n'offrent pas assez de flexibilité pour les adapter aux objectifs plus spécifiques.
La partie validation des modèles s'appuie surtout sur l'approche macromécanique qui consiste à utiliser un modèle représentatif du comportement macroscopique de l'enrobé et d'obtenir les paramètres du modèle à partir des mesures moyennes sur une région assez large. Dans ce contexte, les auteurs font appel à la CIN à partir de l'instant où le capteur LVDT ne détecte plus la déformation moyenne à cause de la localisation trop élevée de cette dernière. Ainsi la déformation est mesurée comme la déformation moyenne dans la zone d'élaboration des fissures. Or cette démarche est en contradiction avec les objectifs de l'utilisation des méthodes de mesure de champs sans contact, qui sont censées mettre en évidence less phénomènes localisés pour proposer finalement des lois de comportement plus pertinentes.
Il peut alors être conclu de ce qui précède que la mesure *quantitative* du comportement mécanique des enrobés bitumineux à l'échelle mésoscopique (échelle des constituants granulats, bitume et des vides) constitue toujours un verrou scientifique. Le domaine des petites déformations (le domaine visco-élastique linéaire voir Fig. 1.9) reste à ce jour inaccessible pour de telles méthodes.
Par ailleurs, il est également important de souligner que l'application des méthodes de mesure de champs sans contact se restreint uniquement à l'étude du comportement de type mécanique. L'utilisation de telles méthodes afin de mettre en évidence les mécanismes locaux de réponse des enrobés aux sollicitations climatiques n'a pas été effectuée à ce jour.

2.5 Méthode de la grille (MG)

2.5.1 Principe de la MG

La méthode de la grille est une technique optique qui consiste en l'analyse du déplacement d'une grille collée sur la surface plate d'un substrat. La grille est supposée suivre fidèlement les déformations de la surface du substrat sur laquelle elle est déposée. L'idée est assez ancienne puisqu'elle est intuitive : considérer un marquage régulier permet de distinguer facilement des caractéristiques telles que des points particuliers sur des surfaces marquées déformées, et facilite ainsi le suivi pendant la déformation. De plus une image de grille peut être considérée comme un signal quasi-période. Cette modélisation permet d'utiliser des techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation de signal des images des grilles.
Considérons une image de grille dont les lignes horizontales et verticales sont alignées avec les lignes et les colonnes de pixels du capteur de la caméra. Chaque pixel de l'image de la grille est défini par ses coordonnés (x, y). L'intensité lumineuse $s(x, y)$ en chaque point (x, y) est un signal quasi-périodique, qui peut être modélisé comme suit [80] (dans la suite, les vecteurs sont désignés par des lettres en gras et les scalaires par lettres simples) :

$$s(x,y) = \frac{A}{2}\Big(2 + \gamma \cdot \mathrm{frng}(2\pi f x + \phi_x(x,y)) + \gamma \cdot \mathrm{frng}(2\pi f y + \phi_y(x,y))\Big) \tag{2.9}$$

Où :

— A représente l'intensité moyenne ;

— γ le contraste du signal modulé, sa valeur est comprise entre 0 et 1 ;

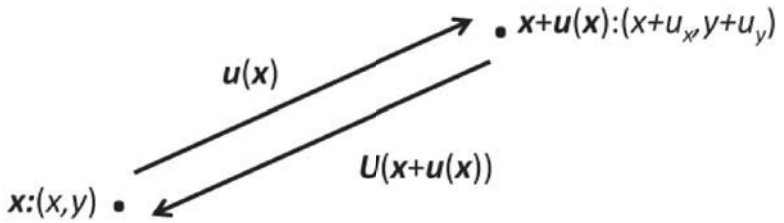


FIGURE 2.19 – Déplacement d'un point physique [126].

— frng est une fonction 2π-périodique décrivant le profil du trait de la grille, d'amplitude 1 et de valeur moyenne 0 ;
— f est la fréquence spatiale de la porteuse, définie comme étant l'inverse du pas de la grille p ;
— $\phi_x(x, y)$ et $\phi_y(x, y)$ sont les modulations des phases des porteuses suivant les axes x et y respectivement. Cette modulation est provoquée par le déplacement qui se produit en chaque point. Pour les grilles réelles, il peut également être induit par ses éventuels défauts ou un mauvais parallélisme entre capteur et surface à observer. Par ailleurs, la présence d'un marquage régulier dont on connait *a priori* la fréquence permet de vérifier plus précisément le parallélisme entre le capteur de la caméra et la surface de l'échantillon.

Les paramètres A et γ sont supposés constants ici, mais en réalité ils peuvent légèrement changer spatialement.
Un léger mouvement de la grille peut être interprété comme une modulation de phase de la porteuse, de sorte que les déplacements et les changements de phase sont directement liés. L'objectif de la section suivante est de préciser la nature de ce lien.

Lien entre déplacement et changement de phase, déformation et changement de phase dérivé

Suivant [125], notons $\boldsymbol{u} = (u_x, u_y)$ le champ de déplacement direct et $\boldsymbol{U} = (U_x, U_y)$ le déplacement inverse. Un point matériel situé au point géométrique $\boldsymbol{x} = (x, y)$ avant la déformation sera emmené au point $\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})$ après déformation (*cf* Fig.2.19), et un point matériel situé au point géométrique $\boldsymbol{x}$ après déformation sera emmené au point de coordonnées $\boldsymbol{x} + \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})$ avant déformation.

On a donc :

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = -\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) \\ \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) = -\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})) \end{cases} \tag{2.10}$$

Ou, d'une manière équivalente en termes des composantes :

$$\begin{cases} u_x(x, y) = -U_x(x + u_x(x, y), y + u_y(x, y)) \\ u_y(x, y) = -U_y(x + u_x(x, y), y + u_y(x, y)) \end{cases} \tag{2.11}$$

et

$$\begin{cases} U_x(x, y) = -u_x(x + U_x(x, y), y + U_y(x, y)) \\ U_y(x, y) = -u_y(x + U_x(x, y), y + U_y(x, y)) \end{cases} \tag{2.12}$$

Soient s_1 et s_2 respectivement les images de la grille avant et après la déformation, et $\phi_x^1, \phi_y^1, \phi_x^2, \phi_y^2$ les modulations de phase suivant les directions x et y respectivement. À partir les équations (2.9) et (2.10), et en supposant que l'éclairage de l'échantillon ne varie pas durant le test, on obtient :

$$\begin{aligned} s_2(\boldsymbol{x}) &= s_1\left(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})\right) \\ &= \frac{A}{2}\Big(2 + \gamma \cdot \mathsf{frng}(2\pi f(x + U_x(x,y)) + \phi_x^1(x + U_x(x,y), y + U_y(x,y))) \\ &+ \gamma \cdot \mathsf{frng}(2\pi f(y + U_y(x,y)) + \phi_y^1(x + U_x(x,y), y + U_y(x,y)))\Big) \end{aligned} \tag{2.13}$$

Après l'identification de la modulation de la phase dans s_2 :

$$\begin{cases} \phi_x^2(x,y) = 2\pi f U_x(x,y) + \phi_x^1(x + U_x(x,y), y + U_y(x,y)) \\ \phi_y^2(x,y) = 2\pi f U_y(x,y) + \phi_y^1(x + U_x(x,y), y + U_y(x,y)) \end{cases} \tag{2.14}$$

Ce qui peut s'écrire :

$$\boldsymbol{\phi}^2(\boldsymbol{x}) = 2\pi f \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\phi}^1(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})) \tag{2.15}$$

Cette égalité est valable modulo 2π. Dans [125], l'image de la grille avant la déformation est supposée être parfaite, en d'autre termes, il n'y a pas besoin de modulation de la phase et les phases de references (ϕ_x^1 et ϕ_y^1) ne sont pas considérées. Il est donc possible de conclure que dans ce cas, les modulations de phase sont proportionnelles aux composantes du champ de déplacement inverse. Cependant il est plus réaliste de considérer les phases initiales causées par exemple par des défauts d'impression ou de collage des grilles.
Par ailleurs, en insérant Eq. (2.11) dans $\boldsymbol{\phi}^2(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}))$ donnée par Eq. (2.14) et en utilisant Eq. (2.10), on obtient le lien entre les phases ϕ_x^2 et ϕ_y^2 dans la configuration actuelle, et leur contrepartie ϕ_x^1 et ϕ_y^1 dans la configuration de référence. Ainsi :

$$\boldsymbol{\phi}^2(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) = 2\pi f \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) + \boldsymbol{\phi}^1(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) = -2\pi f \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{\phi}^1(\boldsymbol{x}) \tag{2.16}$$

Notons Δ l'opérateur qui exprime le changement de champs, ici le changement de phase, une fois exprimé dans le système de coordonnées de la grille avant la déformation [127]. Ainsi :

$$\begin{cases} \Delta\phi_x(x,y) = \phi_x^2(x + u_x(x,y), y + u_y(x,y)) - \phi_x^1(x,y) \\ \Delta\phi_y(x,y) = \phi_y^2(x + u_x(x,y), y + u_y(x,y)) - \phi_y^1(x,y) \end{cases} \tag{2.17}$$

Notons également par $\widetilde{\Delta}$ l'opérateur qui exprime le changement de phase exprimé dans le système de coordonnées de la grille après la déformation :

$$\begin{cases} \widetilde{\Delta}\phi_x(x,y) = \phi_x^2(x,y) - \phi_x^1(x + U_x(x,y), y + U_y(x,y)) \\ \widetilde{\Delta}\phi_y(x,y) = \phi_y^2(x,y) - \phi_y^1(x + U_x(x,y), y + U_y(x,y)) \end{cases} \tag{2.18}$$

Avec l'équation Eq. (2.14), nous avons

$$\widetilde{\Delta}\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}) = 2\pi f \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) \tag{2.19}$$

et avec l'équation Eq. (2.16) :

$$\Delta\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{x}) = -2\pi f \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) \tag{2.20}$$

Estimation des champs de déplacement et de déformation

A partir de l'équation Eq. (2.17), il peut être observé que $\boldsymbol{u}$ ne peut pas être estimée directement à partir $\Delta\boldsymbol{\phi}$, étant donné que cette dernière quantité dépend elle-même de $\boldsymbol{u}$. Dans ce contexte, l'approche qui est souvent utilisée est :

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = -\frac{p}{2\pi}\left(\boldsymbol{\phi}^2(\boldsymbol{x}) - \boldsymbol{\phi}^1(\boldsymbol{x})\right) \tag{2.21}$$

Au lieu de :

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}) = -\frac{p}{2\pi}\left(\boldsymbol{\phi}^2(\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})) - \boldsymbol{\phi}^1(\boldsymbol{x})\right) \tag{2.22}$$

Cela suppose que le déplacement du point physique est négligé avec l'équation Eq. (2.21). Cette hypothèse, assez forte, est toutefois acceptable d'après les observations dans les cas réels pour lesquels les déplacements restent faibles [127]. Cependant différencier directement le déplacement obtenu avec cette approche pour en déduire les composantes de déformation peut devenir un problème lorsque la grille comporte des défauts.
Il existe des procédures itératives pour déterminer le déplacement. Elles consistent à utiliser un algorithme de point fixe pour résoudre l'équation Eq. (2.22) à partir d'une estimation initiale $\boldsymbol{u}^0$ (par exemple avec l'équation Eq. (2.21)).
Le champ de déformation peut être directement obtenu en calculant le gradient du champ de déplacement issu de la solution de l'équation Eq. (2.22) comme suit :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i}\right) \qquad i, j = x, y \tag{2.23}$$

Extraction directe des phases et leurs dérivées à partir des grilles

D'après l'équation Eq. (2.22), le déplacement est lié au changement de phase entre les configurations initiale et finale. D'où la nécessité d'abord d'extraire les phases à partir des images de la grille dans ces deux configurations. Ici nous présenterons la méthode basée sur la transformée de Fourier à fenêtre glissante ou transformée de Fourier à court terme (TFCT), dénotée ici $\widehat{s_W}(u, v, \xi, \eta)$. Cette fonction est définie en un point de coordonnées (u, v) et pour un couple des fréquences ξ, η suivant les directions x et y respectivement comme suit :

$$\widehat{s_W}(u, v, \xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} s(x, y)g(u - x, v - y)e^{-2i\pi(\xi u + \eta v)}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \tag{2.24}$$

Cette fonction est calculée pour une zone autour d'un point $M(u, v)$ de l'image. La zone est définie par la fenêtre d'analyse g dont la taille est choisie par l'utilisateur. L'intégrale ci-dessus implique plusieurs fonctions :

- le signal s à traiter ;
- une modulation de fréquences ξ, η le long des directions x et y, respectivement ;
- une fenêtre glissante 2D g dont la largeur est définie par un paramètre choisi par l'utilisateur. Cette fonction est symétrique, positive, et intégrée à 1.

Une fenêtre d'analyse gaussienne est Souvent utilisée :

$$g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)} \tag{2.25}$$

avec σ est l'écart-type de la fonction gaussienne. C'est le paramètre qui définit la largeur de la fenêtre dans ce cas.
La fenêtre gaussienne est dérivable, ce qui permet si nécessaire l'extraction directe de dérivées de phase, sans passer par le calcul des phases.
L'extraction de la phase d'un motif régulier, comme des franges [128, 129, 130] ou grilles [131] en utilisant la TFCT consiste d'abord à la sélection d'une zone dans le domaine de Fourier sur laquelle l'intégration est effectuée. Cela peut être effectué en considérant à son tour une zone entourant les sommets de chacune des premières harmoniques $(f,0)$ et $(0,f)$. La procédure d'extraction de la phase est appliquée en tout point/pixel de l'image et la fenêtre g se déplace d'un pixel à l'autre avec un pas de 1 pixel afin que le résultat soit obtenu pour l'ensemble des pixels. Pour $(f,0)$ et $(0,f)$, le TFCT s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \text{along direction } x: & \widehat{s_W}(u,v,f,0) = \displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} s(x,y)g(u-x,v-y)e^{-2i\pi fx}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \\ \text{along direction } y: & \widehat{s_W}(u,v,0,f) = \displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} s(x,y)g(u-x,v-y)e^{-2i\pi fy}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \end{cases} \tag{2.26}$$

On peut remarquer que, g étant symétrique, $\widehat{s_W}(u,v,f,0)$ et $\widehat{s_W}(u,v,0,f)$ sont les convolutions de g avec $s(x,y)e^{-2i\pi fx}$ et $s(x,y)e^{-2i\pi fy}$ respectivement. La distribution des phases $\phi_x(x,y)$ et $\phi_y(x,y)$ pour une image de la grille est estimée modulo 2π en calculant l'argument des nombres complexes définis dans l'équation Eq. (2.26), ce qui donne [125] :

$$\begin{cases} \phi_x(x,y) = \arctan\left(\dfrac{Im(\widehat{s_W}(u,v,f,0))}{Re(\widehat{s_W}(u,v,f,0))}\right) \\ \phi_y(x,y) = \arctan\left(\dfrac{Im(\widehat{s_W}(u,v,0,f))}{Re(\widehat{s_W}(u,v,0,f))}\right) \end{cases} \tag{2.27}$$

Ainsi, en connaissant les cartes de phases pour les deux directions x et y et en utilisant respectivement les équations Eq. (2.21) ou Eq. (2.22) les déplacements peuvent être déduits. En différenciant le champ du déplacement spatialement on déduit le champ de déformation. L'opération de dérivation est généralement effectuée numériquement.

Méthode de transfert des grilles

Le marquage de surface des échantillons constitue l'étape la plus délicate pour la mise en œuvre de la méthode de la grille. Plusieurs méthodes de transfert de grille peuvent être retrouvées dans la littérature. Le transfert peut être effectué par impression, gravure ou collage sur la surface à analyser. La technique utilisée dépend principalement de la fréquence des grilles. Pour des grilles à faibles fréquences (5 à 10 traits /mm), la méthode de transfert utilisée et développée au laboratoire par l'équipe de Mécanique Expérimentale est décrite dans [132]. Cette technique utilise des grilles croisées qui sont imprimées préalablement sur

un support de polyester avec une imprimante de résolution de 12 800 dpi. Les grilles sont collées sur la surface à analyser en utilisant une colle blanche qui assure le contraste nécessaire à l'observation des traits noirs. On laisse la colle polymériser pendant 40 heures à 37°C. Le film est ensuite enlevé soigneusement et lentement avec un angle d'environ 30°. L'interaction entre la colle et le substrat est plus forte qu'entre le film support et l'encre déposée par l'imprimante. En conséquence, l'encre reste solidaire à la colle, et donc à la surface de l'étude.
Les hypothèses faites dans ce cas sont les mêmes que celles relatives aux jauges de déformations : le cisaillement est négligeable dans la couche de la colle et la grille reproduit fidèlement la déformation de la surface d'étude.

2.5.2 Application de la MG à l'étude des enrobés bitumineux

À notre connaissance, uniquement deux études ont appliqué la MG à l'étude des enrobés bitumineux. La première étude [5] peut être considérée comme une étude de faisabilité sur la pertinence de l'utilisation de la MG à l'étude des enrobés bitumineux. Les auteurs ont testé des échantillons prismatiques en compression simple et cyclique. Plusieurs échantillons ont été testés en faisant varier les conditions de l'essai et les paramètres de traitement des images tels que la taille de la zone d'étude, le pas de la grille, le nombre de pixels utilisés pour encoder une période de la grille et la largeur de la fenêtre gaussienne utilisée pour l'extraction de la phase du signal (*cf* Tab. 2.1). La Fig. 2.20 illustre les cartes de déplacement et déformation typiques obtenues dans cette étude. La taille de la fenêtre gaussienne est représentée par un cercle noir. À partir des cartes de déformation la mésostructure de la surface d'étude est clairement visible. D'autres informations pertinentes ont été quantifiées à partir de champs cinématiques : les déformations dans les bandes du mastic, la rotation et l'interaction entre les granulats, la non-linéarité du comportement du mastic et la propagation de fissures dans les bandes du mastic.
La deuxième étude [6], faisant suite à l'étude précédente, vise à comparer le comportement mécanique de deux types d'enrobés bitumineux. Les essais réalisés sont l'essai de compression simple et l'essai de recouvrance.
Les résultats ont mis en évidence la relation entre l'hétérogénéité des champs de déformation et la fraction volumique apparente du mastic. Le phénomène de concentration des déformations dans le mastic a été examiné en calculant en chaque pixel le rapport entre la déformation locale et globale dans l'échantillon. Il a été remarqué que dans certaines zones l'amplitude de déformation dans le mastic était jusqu'à 8 fois la déformation globale de l'échantillon. Le comportement mécanique de deux enrobés a été ainsi comparé en utilisant le facteur d'amplification de la déformation locale et la distribution spatiale de ce facteur. Enfin, un modèle constitué d'un élément de Maxwell et deux éléments Kelvin–Voigt a été recalé localement (sur une bande de mastic) et globalement ce qui a permis de souligner le lien entre la réponse viscoélastique du mastic et celle de l'éprouvette d'enrobé.

2.5.3 Critique de la bibliographie existante

À partir des résultats provenant de la CIN et la MG, il peut être conclu que la dernière est très bien à la caractérisation des matériaux présentant des faibles niveaux de déformations avec potentiellement des forts gradients cinématiques.

	specimen A	specimen B	specimen C
Cross-head speed (mm s^{-1})	0.01	0.01	0.005
Size of the front face (mm^2)	52 × 32	52 × 42	52 × 32
Size of the surface under investigation (mm^2)	48.72 × 29.72	30.27 × 22.73	15.12 × 11.40
n, number of frames for image averaging	16	16	16
Time period between two images that are processed (s)	1.92	1.92	1.92
Pitch of the grid (mm) *p*	0.2	0.2	0.1
m, pixels/grid period	5	9	5
Size of the square observed by one pixel (μm)	40	22.2	20
Standard deviation σ of the Gaussian envelope (pixel)	5	7–13	9

TABLE 2.1 – Conditions de l'essai et le choix des paramètres utilisée dans le traitement des images des grilles [5].

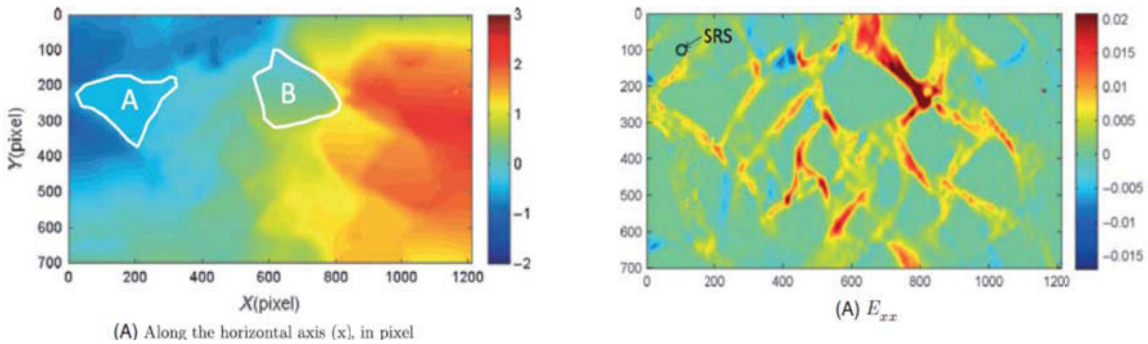


FIGURE 2.20 – Champs de déplacement et déformation longitudinaux dans une éprouvette d'enrobé soumise à une compression [5].

Cependant, l'utilisation de cette méthode n'est pas totalement dépourvue d'inconvénients. En particulier, le fait que la surface étudiée doit être marquée d'un motif régulier est un inconvénient d'un point de vue pratique, surtout par rapport à la CIN où un mouchetis aléatoire est suffisant. Mais la connaissance a priori de l'encodage de la surface est un avantage en matière de performances métrologiques. Une comparaison de quelques performances métrologiques des deux méthodes est effectuée dans [133] et suggère que la MG présente de meilleures performances que la CIN.
L'inconvénient avec la MG est la méthode de transfert des grilles couramment utilisée au laboratoire qui limite l'utilisation de cette méthode à l'étude des enrobés bitumineux. La difficulté du transfert des grilles augmente avec l'augmentation de la surface à étudier. Ainsi, l'utilisation de la méthode se limite souvent aux échantillons des petites tailles. En outre cette méthode de transfert [132] nécessite le chauffage de l'échantillon pendant 48 heures à des températures allant jusqu'à 37°C afin de polymériser la colle. Or le chauffage de l'enrobé à des telles températures pendant des longues durées risque de vieillir le liant dans les échantillons et de modifier leur pourcentage de vides. Il est donc nécessaire de modifier la méthode de transfert pour l'adapter à l'étude des enrobés bitumineux.
Finalement, dans notre cas, la qualité des résultats justifie parfaitement l'effort supplémentaire engendré par le dépôt du marquage.

2.6 Conclusion

Les différentes méthodes de mesure de champs et leur application à la caractérisation du comportement mécanique des enrobés bitumineux ont été présentées dans ce chapitre. Parmi les techniques utilisées, la CIN connait une diffusion importante dans la communauté concernée par la caractérisation mécanique des enrobés grâce particulièrement à sa facilité de mise en œuvre. De par leur aspect sans contact et la richesse des informations procurées, ces techniques permettent de surmonter les limites des outils traditionnelles de mesure du déplacement/déformation. Cependant, la revue bibliographique a révélé que les mesures sont typiquement réalisées à une échelle spatiale assez large et sont souvent interprétées à l'échelle macroscopique. Pour obtenir une compréhension plus fondamentale du comportement des enrobés, il est indispensable de réaliser les expériences à une échelle inférieure comme l'échelle des constituants (échelle mésoscopique).
Par ailleurs, la comparaison des résultats issus de la CIN et la MG a suggéré que la seconde permet de mieux intégrer la très forte hétérogénéité de ces matériaux et par conséquent elle est mieux adaptée pour l'objectif de la présente thèse.

Nous formulons les principales problématiques et les objectifs de la thèse comme suit :

— l'une des principales problématiques inhérentes au recyclage des enrobés bitumineux est l'homogénéité du mélange final en particulier l'interaction entre les matériaux d'apport et les Agrégats d'Enrobé (AE). En conséquence, le premier objectif portera sur l'étude de la répartition locale des champs de déformation au sein d'un mélange bitumineux avec présence d'agrégats. L'accent sera mis sur l'évaluation de l'incidence du recyclage sur la répartition des champs locaux ;

— l'étude bibliographique a mis en évidence que la réponse thermique de l'enrobé est uniquement inspectée à l'échelle macroscopique. En conséquence, le seconde objectif portera sur l'étude de la réponse des enrobés vis-à-vis des sollicitations thermiques (gel-dégel).

— les challenges associés à l'application de la CIN (ou méthodes de mesures de champs en général) sont le faible niveau de déformation requis par les tests cycliques tels que le module complexe et les essais de fatigue. Étant donné que le niveau de déformation requis est assez faible, l'utilisation de la CIN pour obtenir la distribution de la déformation n'est souvent pas possible en raison des limitations en termes de résolution des caméras et les perturbations qui se produisent au cours des essais réels. Ainsi, nous fixons comme objectif l'étude du comportement local des enrobés dans le domaine des petites déformations.

Plusieurs défis seront à relever lors de ce travail de thèse, en particulier adapter les techniques de mesure du laboratoire aux éléments d'enrobés de taille représentative des essais de laboratoire classiques. Cela passe à la fois par le développement et l'utilisation d'outils numériques originaux et par la mise en œuvre de techniques expérimentales tout aussi novatrices.

Chapitre 3

Comportement des enrobés recyclés en compression

3.1 Introduction

L'analyse bibliographique effectuée au cours des chapitres précédents a mis en évidence les problématiques inhérentes au recyclage des enrobés bitumineux. En particulier, l'interaction entre les matériaux d'apport et les Agrégats d'Enrobé (AE) est au cœur du débat et constitue un véritable verrou scientifique. Jusqu'à maintenant, cette problématique a été traitée en utilisant les observations multi-échelles combinées avec des méthodes permettant de faire la distinction entre les matériaux d'apport et les AE. Dans ce chapitre, l'interaction entre ces matériaux est abordée en utilisant les mesures de champs cinématiques avec la Méthode de la Grille (MG).
Les objectifs visés dans ce chapitre sont les suivants :

- mesurer la déformation des enrobés en compression à l'échelle du mastic (i.e. mélange entre le bitume et les fillers) ;
- visualiser et expliquer les mécanismes locaux impliqués dans la déformation locale des enrobés ;
- caractériser l'effet de l'inclusion des Agrégats d'Enrobé (AE) sur la distribution locale de champs de déformation ;

Tout d'abord, les matériaux testés et le dispositif expérimental sont présentés. Ensuite, les réponses mécaniques locale et globale en termes de cartes de déformation sont présentées et analysées. En particulier, l'incidence du recyclage sur la répartition des champs locaux est évaluée. Finalement les réponses de différents échantillons sont comparées.

3.2 Matériaux testés

Pour mettre en évidence l'effet de l'incorporation des agrégats sur le comportement local des enrobés, nous avons opté pour des mélanges contenant plusieurs pourcentages d'agrégats d'enrobé à savoir 0%, 20%, 40% et 100% (*cf* Tab. 3.1). Ces matériaux ont été formulés et préparés par le Cerema. Les Granulats d'Apport (GA) et les Granulats d'Agrégats d'Enrobé

(GAE) ont été choisis de telle sorte qu'ils présentent une différence de couleurs afin de pouvoir les distinguer après le mélange. Les GAE ont été choisis d'une couleur foncée et sont constitués de granite, basalte et de gneiss. Les GA, quant à eux, ont été choisis d'une couleur blanche et sont composés de calcaire. La Fig. 3.1 permet de visualiser les matériaux avant le mélange. Des informations complémentaires sont présentées dans l'annexe A. Le malaxage des matériaux

(a) (b)

FIGURE 3.1 – (a) Agrégats d'enrobé (noir) et les granulats d'apport (blanc), (b) les granulats d'agrégats d'enrobé dépourvus de leur enrobage.

est effectué à 165°C suivant les étapes suivantes :

- les AE et les matériaux d'apport ont d'abord été chauffés dans une étuve à 165° pendant 3 h ;
- ensuite, les GA et les AE ont été mélangés ensemble pendant 30 secondes dans un malaxeur ;
- finalement, le Liant d'Apport (LA) est ajouté et l'ensemble est malaxé pendant deux minutes supplémentaires (*cf* Fig. 3.2a-b) ;

Des échantillons de forme cylindrique de 80 mm de diamètre et 90 mm de hauteur ont été fabriqués à la presse Duriez : moulage par compression, suivant la norme EN 12697-12, méthode B [21] (*cf* Fig. 3.2c-d). Cette géométrie d'éprouvettes a été choisie car elle est au cœur de plusieurs actions de recherche menées depuis des années au Cerema. En particulier, elles ont été utilisées pour inspecter l'action de chargements du type gel-dégel sur les enrobés [34, 35, 36].
Il a été décidé dans la thèse d'opter pour la même géométrie d'éprouvettes, avec une légère modification pour les adapter aux spécificités des mesures de champs. Plus particulièrement, un méplat a été aménagé en découpant l'échantillon cylindrique parallèlement à son axe de symétrie (*cf* Fig. 3.2e et Fig. 3.3). La dimension de la surface d'étude ainsi obtenue est d'environ 6,5 cm×7 cm (*cf* Fig. 3.3). Au total, huit éprouvettes ont été testées avec 2 éprouvettes pour chaque composition. Des exemples de régions d'étude pour quatre éprouvettes testées dans ce chapitre sont présentés dans la Fig. 3.4. La distinction entre les matériaux d'apport et les agrégats d'enrobé peut facilement être faite grâce à la différence dans leurs couleurs.

TABLE 3.1 – Composition des mélanges.

	Agrégats		bitume d'apport		
Désignation du mélange	Classe granulaire (mm)	Masse (%)	Pénétration	Masse (%)	Pourcentage des vides (%)
0% AE	-	0	50/70	5,7	10,50
20% AE	0/10	20	50/70	5,7	5,70
40% AE	0/10	40	50/70	5,7	12,73
100% AE	0/10	100	50/70	0,7	3,39

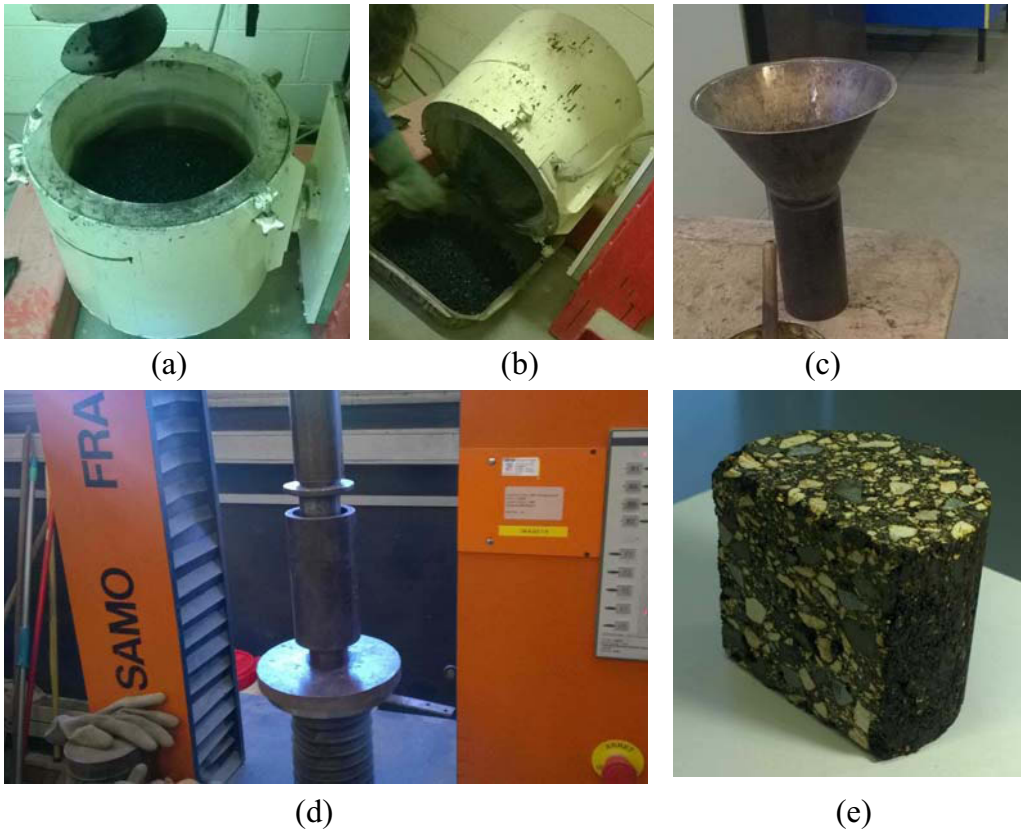


FIGURE 3.2 – Les différentes étapes de fabrication des éprouvettes Duriez. (a)-(b) malaxage des matériaux dans un malaxeur, (c) moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes cylindriques, (d) compactage des éprouvettes avec une presse, (e) forme finale de l'éprouvette après l'élaboration du méplat qui correspond à la région d'intérêt.

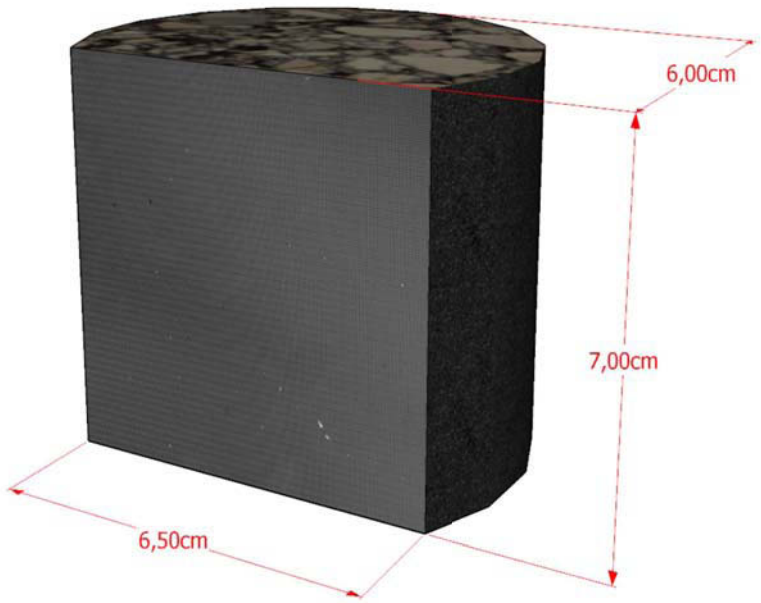
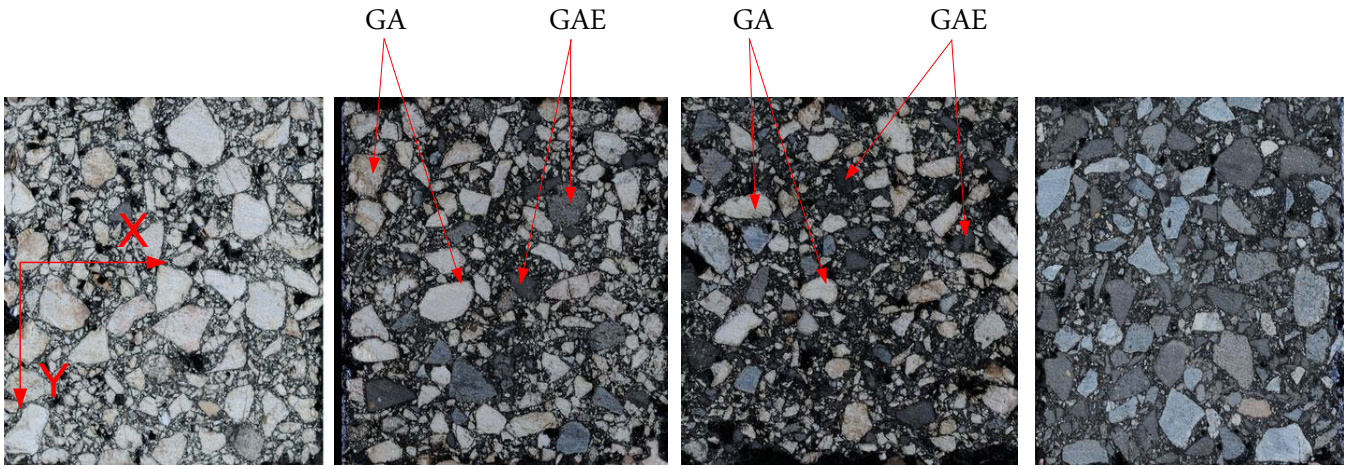


FIGURE 3.3 – Dimension de l'éprouvette testée.



(a) 0% AE (b) 20% AE (c) 40% AE (d) 100% AE

FIGURE 3.4 – Exemples de surfaces étudiées avec différents pourcentages d'agrégats d'enrobé.

3.3 Le montage expérimental et la méthode de la grille

3.3.1 Essais de faisabilité et définition du protocole expérimental

Dans ce chapitre, des essais de compression et de recouvrance ont été réalisés. Les essais sont effectués dans une pièce à température contrôlée à 21°C en utilisant une machine universelle Zwick 50kN. Le chargement est piloté en déplacement avec une vitesse de 0,01 mm/s. Chaque essai comporte deux phases : une phase de chargement effectuée jusqu'à la force maximale. Le chargement est ensuite remis à zéro. Cette phase est suivie d'une phase de recouvrance où l'échantillon est laissé libre de tout chargement et peut se déformer librement. La configuration des essais est illustrée sur la Fig. 3.5.
Avant d'effectuer les essais principaux sur les éprouvettes décrites dans le paragraphe précédent, il était nécessaire de fixer les paramètres relatifs à l'acquisition des images. Les paramètres à prendre en considération sont :

- **la fréquence d'acquisition de la caméra** : la fréquence d'acquisition par défaut de la caméra est d'environ 2 images/seconde. Elle dépend de plusieurs paramètres tels que le temps de pose, la taille du capteur CCD et le nombre d'images utilisées pour effectuer la moyenne temporelle. En fonction de la vitesse de chargement, il faut privilégier une fréquence d'acquisition appropriée.
- **la moyenne temporelle des images** : dans le but de réduire l'impact du bruit du capteur de la caméra, il est préférable d'effectuer une moyenne temporelle sur plusieurs images. Cela consiste à acquérir plusieurs images de l'éprouvette, puis à les moyenner pour former une seule image. Cette image est utilisée pour l'analyse avec la MG. La procédure permet de réduire l'impact du bruit du capteur de la caméra en le divisant par $\sqrt{n}$, où n est le nombre d'images utilisées pour effectuer la moyenne [134]. La caméra permet d'effectuer directement cette moyenne au cours de l'essai, mais dans ce cas sa fréquence d'acquisition diminue. Avant d'effectuer la moyenne, il faut s'assurer que le déplacement de l'éprouvette lors de l'acquisition des images utilisées pour la moyenne soit petit. Cela passe donc par un choix judicieux de la vitesse de chargement.

Il est alors clair que chacun des paramètres précédents est conditionné par l'autre. Le choix initial de ces paramètres a été basé sur les résultats d'essais précédemment effectués au laboratoire et présentés dans [5, 6]. Le nombre d'images pour la moyenne temporelle a été fixé à 4 images, ce qui correspond à une vitesse d'acquisition de la caméra de 1,83 seconde/image. Une campagne d'essais de faisabilité a été effectuée pour vérifier l'adéquation de ces paramètres à cette étude. Ces essais ont également permis d'identifier certaines problématiques relatives aux essais de compression. Les essais de faisabilité ont été effectués sur les éprouvettes de la même géométrie que celles présentées dans la section précédente, mais préparées avec un enrobé différent. L'une des problématiques qui s'est manifestée lors de ces essais est la difficulté d'appliquer un chargement uniforme sur la face supérieure de l'échantillon. Un exemple de champs de déplacement et de déformation verticaux à la fin de la phase de chargement est représenté sur la Fig. 3.6. Ceux-ci sont plus accentués sur le côté gauche de l'éprouvette traduisant ainsi une asymétrie dans l'application de la force. Il est à noter que les plateaux de compression sont dotés de rotules qui sont susceptibles de prévenir ces types de phénomènes. Une telle asymétrie dans l'application de la force passe généralement inaperçue dans le cadre d'utilisation de moyens de mesure classiques tels que les jauges de déformation

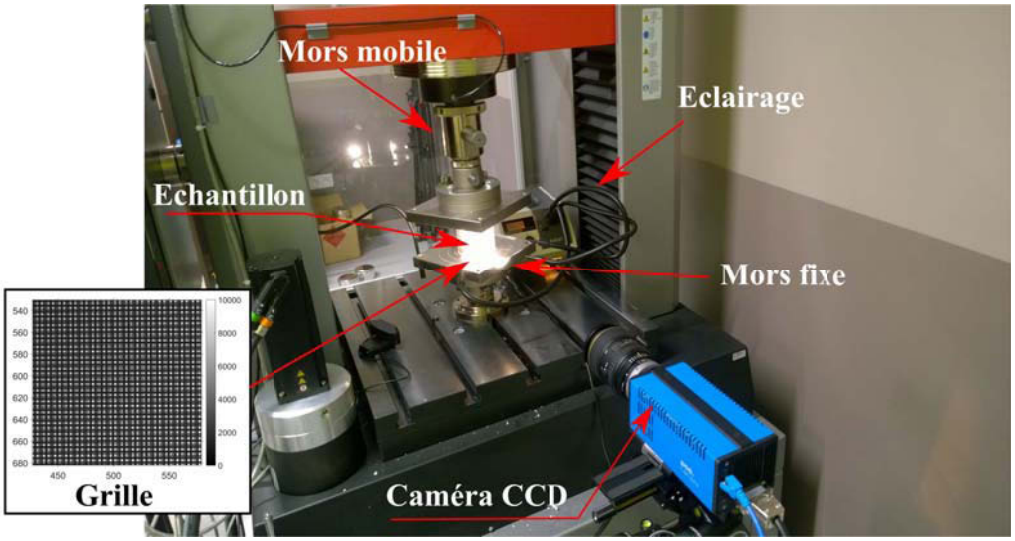


FIGURE 3.5 – Configuration de l'essai.

et le capteur LVDT. Pour remédier à ce problème une fine feuille de caoutchouc de 4 mm d'épaisseur a été placée entre les côtés de l'échantillon et les plaques de compression. La feuille permet d'assurer une pression plus uniforme sur la face supérieure de l'échantillon.

3.3.2 Mesure de déplacement et déformation en utilisant la méthode de la grille

Comme cela a été expliqué dans le chapitre 2, la méthode de grille consiste à déduire les champs de déplacement à partir du déplacement d'une grille qui est transférée préalablement sur la surface de l'échantillon à étudier [80, 135]. La mise en place de cette méthode de mesure sans contact passe par certaines étapes de préparation dont les détails sont données dans les paragraphes qui suivent.

Transfert des grilles sur la surface des échantillons

La première étape consiste à transférer une grille sur la surface à étudier. Celle-ci correspond dans le cas présent aux méplats présentés sur la Fig. 3.4. La méthode de transfert des grilles employée ici est celle développée et utilisée à l'Institut Pascal depuis plusieurs années [132]. Les grilles croisées avec un pas p=0,2 mm sont préalablement imprimées sur un fin substrat de polymère à l'aide d'une imprimante haute définition (50 800 ppp). Le substrat est ensuite collé sur la surface de l'échantillon à l'aide d'une fine couche de colle blanche (*cf* Fig. 3.7c-e). La colle est une résine époxyde obtenue par le mélange de deux composants : partie A d'une couleur blanche et une partie B d'une couleur jaune, transparente (*cf* Fig. 3.7a-c). Le rapport de mélange de deux composants fourni par le fabricant est : Partie A/Partie B= 5/1. Après la polymérisation de la colle, le substrat est retiré et le motif de la grille d'encre reste collé sur la zone à étudier (Fig. 3.7f). En effet, l'adhérence entre l'encre et

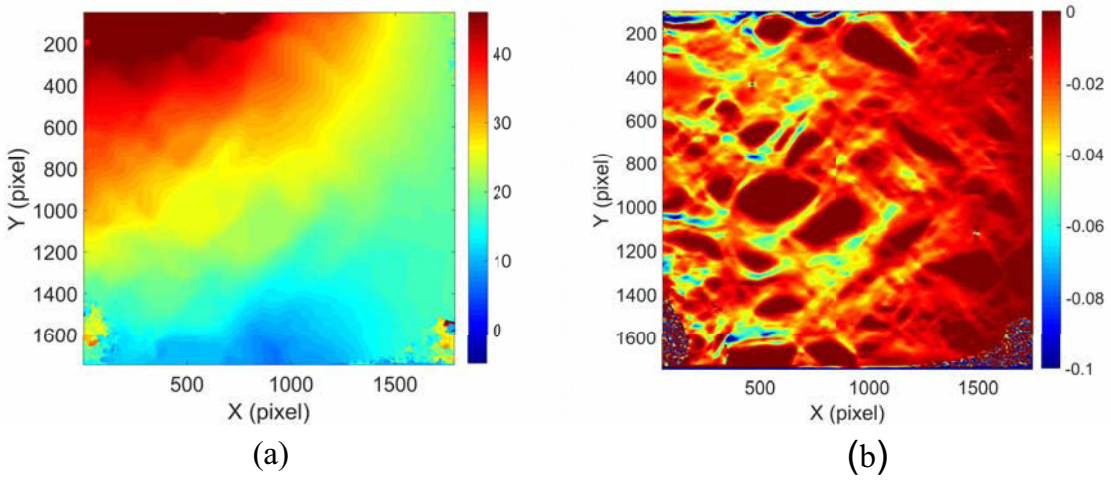


FIGURE 3.6 – (a) Déplacement vertical U_y et (b) déformation verticale ε_{yy}.

la colle est plus élevée qu'entre la colle et le substrat de polymère. Il convient de noter que la procédure de transfert de grille décrite dans [132] implique une phase de polymérisation de la colle pendant 40 heures à 37 °C permettant d'accélérer la polymérisation de celle-ci. Pour faciliter le retrait du substrat de polymère, l'échantillon est généralement chauffé à 80°C pendant 1 heure.
Pour prévenir la détérioration de l'échantillon et notamment le liant qui est très sensible à la chaleur, la polymérisation de la colle a été effectuée à température ambiante (20°C) pendant une semaine. Fig. 3.8 illustre une coupe transversale d'une éprouvette cylindrique sur laquelle une grille a été transférée. L'épaisseur de la couche de colle peut être estimée à 0.20 mm. Compte tenu de la faible épaisseur de la couche de colle, il est raisonnable de supposer que la grille suit parfaitement la déformation de la surface de l'échantillon.
L'étape de transfert des grilles est relativement délicate et demande de travailler avec précaution. En particulier, la sensibilité des enrobés à la température empêche le chauffage des grilles rendant le transfert plus difficile. Ainsi, environ 3 mois ont été nécessaires pour maîtriser totalement le transfert des grilles sur les éprouvettes d'enrobés. Durant ces mois, nous avons essayé plusieurs méthodes pour retirer correctement le substrat de polymère sans endommager l'échantillon ou la grille. Finalement, en jouant sur le dosage de la colle, c'est le décollage des grilles à température ambiante qui a fonctionné. Le collage des grilles a constitué l'un des premiers obstacles rencontrés durant cette thèse.

Acquisition des images de la grille et mesure de déformation

L'étape suivant le collage des grilles consiste à acquérir des images de celle-ci au moyen d'une caméra à différentes étapes de chargement. L'appareil photo utilisé ici est une caméra PCO-2000 dotée d'un capteur CCD 14 bits/2048×2048 pixels et équipée d'un objectif SIGMA 105 mm. La discrétisation d'une période de la grille est fixée à 5 pixels. Ce choix est conditionné à la fois par les dimensions de la région d'étude et la taille du capteur de la caméra. Le capteur de la caméra permet d'augmenter ce nombre à 6 pixels par période de la grille, mais

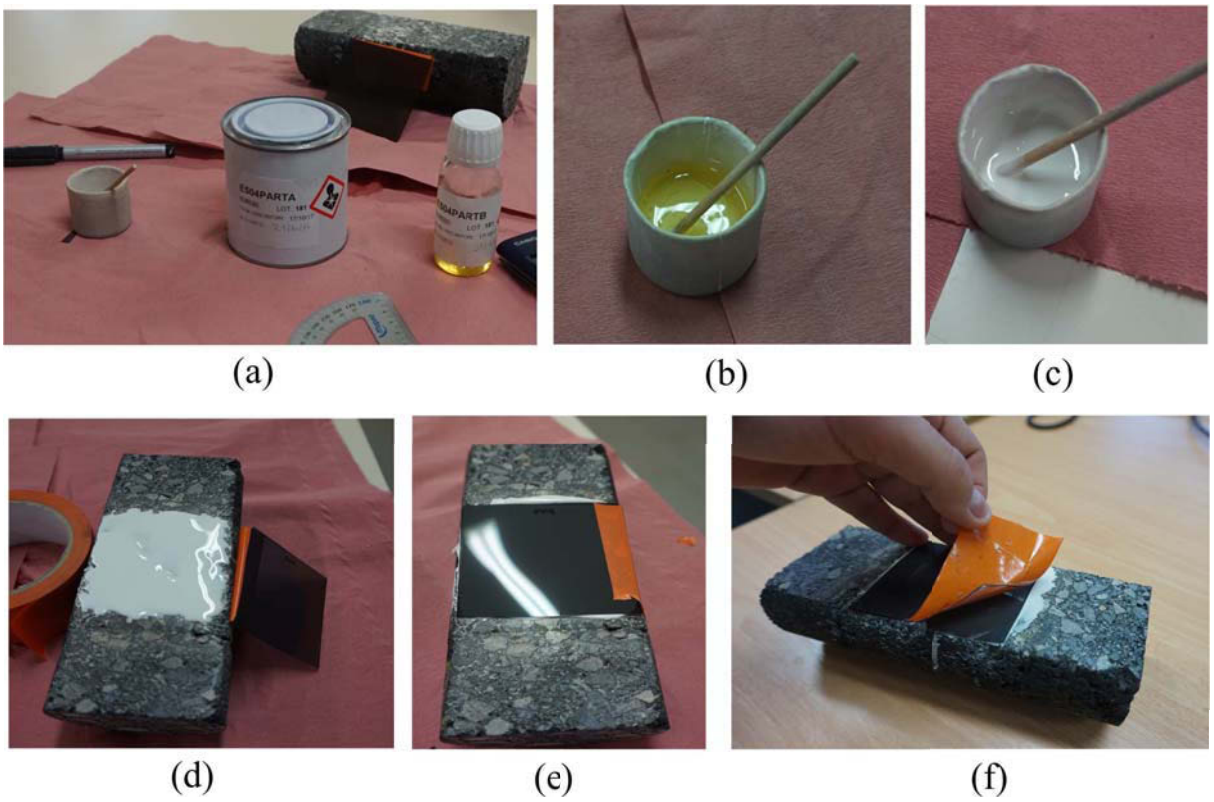


FIGURE 3.7 – (a)-(b) Les composants de la colle avant le mélange, (c) aspect final de la colle après le mélange des composants, (d) mis en place de la colle sur la surface à étudier, (e) collage de la grille et (f) décollement de la feuille polymère.

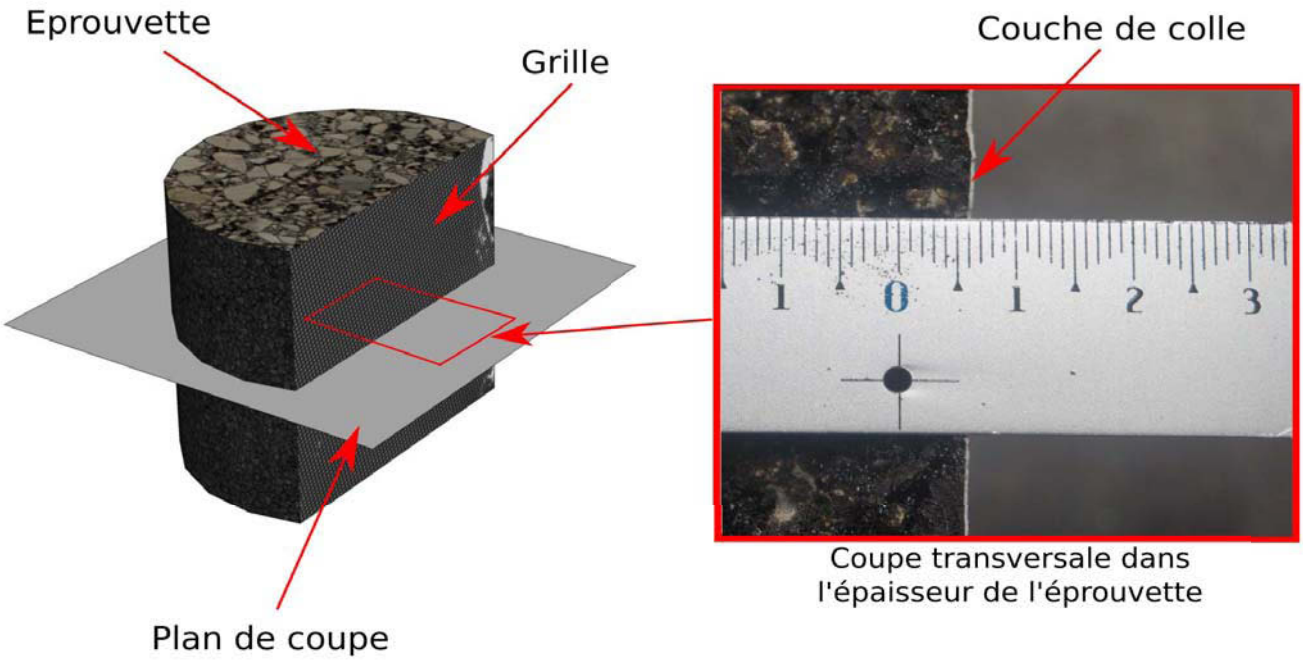


FIGURE 3.8 – Coupe transversale dans une éprouvette d'enrobé équipée d'une grille.

l'espace devant la machine d'essai n'est pas suffisant pour pouvoir rapprocher davantage le support de la caméra. Au cours de l'essai, la grille a été éclairée à l'aide de la lampe KL 2500 LCD équipée avec 3 bras flexibles qui fournissent un éclairage quasi uniforme de la grille (*cf* Fig. 3.5). Il a été vérifié au cours des essais préliminaires que, avec cette configuration et une vitesse de déplacement égal à 0,01mm/s, une moyenne temporelle sur 4 images pourrait être effectuée sans flouter les images de la grille. Dans ce cas, la fréquence d'acquisition de la caméra est d'environ 1,83 image/seconde. La moyenne temporelle introduite permet de réduire l'impact du bruit du capteur la caméra [134]. Finalement, ces images ont été traitées après l'essai en utilisant un programme développé au laboratoire sous environnement MATLAB® [80, 135]. Le code et des informations utiles sont disponibles gratuitement sur un site internet dont le lien est donné dans [136]. L'algorithme repose sur la transformée de Fourier à fenêtre glissante permettant de calculer le changement de phase du marquage de la surface de l'échantillon. Le déplacement supposé plan est proportionnel au changement de phase entre l'image de la grille dans la configuration courante et son image de référence [137]. Les cartes de déplacements ainsi obtenues sont différenciées spatialement pour obtenir les champs de déformation. La transformée de Fourier à fenêtre glissante est effectuée grâce à une convolution entre l'image de la grille et un noyau de convolution Gaussien 2D dont l'écart type fixé et choisi ici égale à σ=5 pixels. Par conséquent, la déformation à un pixel donné dépend des informations contenues dans les pixels environnants. La largeur de l'enveloppe gaussienne peut être approchée à 99.7% en utilisant la règle classique de 3σ comme étant égale à 2×3×5= 30 pixels. Cela représente la plus faible distance entre deux mesures indépendantes et fournit une estimation de la résolution spatiale associée aux mesures effectuées

dans ce chapitre.
En plus, le programme de la MG utilisé prévoit une compensation des déplacements fictifs qui sont engendrés par les inévitables défauts d'impression des grilles. Ceci permet d'améliorer considérablement les performances métrologiques de cette technique [80, 135]. Finalement, un bon compromis est obtenu entre la résolution en déformation et la résolution spatiale. Un tel compromis est crucial dans la présente étude, car une déformation fortement localisée est prévue d'apparaître dans le matériau. Les performances métrologiques de la MG peuvent être estimées dans ce cas à quelques centaines de μdef en résolution et 30 pixels en résolution spatiale [138].

3.4 Réponse à l'échelle macroscopique

La réponse globale des différents échantillons testés dans ce chapitre est présentée sur la Fig. 3.9. Sur cette figure, les courbes force en fonction du déplacement issu du capteur de la machine pour 8 éprouvettes, soit 2 éprouvettes par enrobé sont présentées. Les courbes présentent toutes une tendance similaire : une branche initiale concave représentant le tassement de l'échantillon [139], suivie d'une seconde partie linéaire, puis d'une troisième partie ascendante non linéaire jusqu'à une valeur d'effort maximale. À ce stade, la force appliquée est ramenée à zéro et l'échantillon commence une phase de recouvrance. La Fig 3.9 illustre clairement l'effet de l'inclusion d'agrégats sur les propriétés mécaniques des différents mélanges : l'ajout d'agrégats augmente la rigidité et la résistance à la compression du mélange. Cette augmentation est principalement due à la différence des propriétés mécaniques entre les agrégats et les matériaux d'apport. En effet, le LA est moins rigide que le liant d'agrégats d'enrobé car ce dernier a été exposé au vieillissement [56].
La phase de recouvrance peut être visualisée en traçant les réponses temporelles des échantillons (*cf* Fig. 3.10) où la déformation verticale moyenne (ou déformation macroscopique) ε_{yy}^{moy} est tracée en fonction du temps. Cette déformation est calculée à l'aide des mesures fournies par la MG. À partir des champs de déplacement et suivant la direction de compression y, on calcule la différence de déplacement entre deux lignes de pixels situées 100 pixels en dessous (respectivement au-dessus) de la face supérieure (respectivement de la face inférieure) de l'échantillon puis en divisant le résultat obtenu par la distance entre ces deux lignes de pixels. Cette procédure est illustrée sur Fig. 3.11. Il convient de noter que les faces opposées des échantillons ne sont pas parfaitement parallèles. Par conséquent, la déformation n'est pas parfaitement uniforme selon l'épaisseur de l'échantillon. La déformation moyenne calculée par cette méthode peut légèrement différer de la déformation moyenne mesurée par le capteur de la machine d'essai.
Cette figure illustre clairement les deux phases de l'essai à savoir : la phase du chargement représentée par une partie linéaire (l'essai est piloté en déplacement), suivie par la phase de recouvrance. La réponse des échantillons est quasi-stabilisée après 6000 s. À la fin de l'essai, une déformation résiduelle subsiste. Cette déformation permanente est due à la viscoplasticité et aux dégradations irréversibles qui se produisent au sein des éprouvettes.
L'effet de l'incorporation des agrégats sur la réponse temporelle de l'enrobé ne peut pas être clairement observée à partir de ces courbes en raison des différences significatives dans les niveaux de déformation entre les différents échantillons. Pour comparer objectivement les

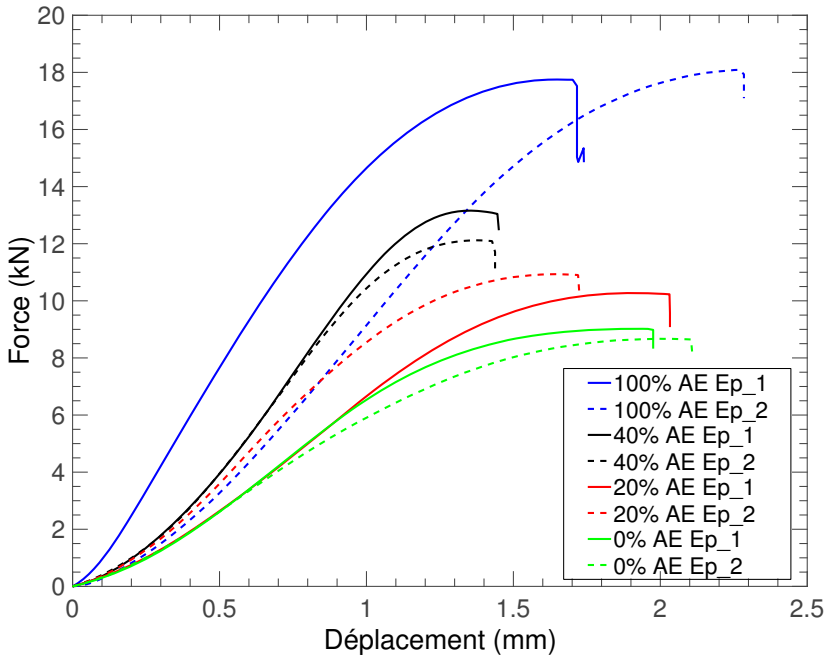


FIGURE 3.9 – Courbe force-déplacement.

résultats de la réponse temporelle des mélanges, les courbes précédentes sont normalisées par rapport à la déformation maximale atteinte à la fin de la phase de chargement. Les courbes correspondantes sont représentées sur Fig. 3.12. Il ressort clairement de ces courbes que le mélange 100% AE présente le taux de déformation résiduelle le plus élevé, alors que les mélanges 20% AE et 40% AE montrent les taux de déformations résiduelles le plus bas. Cela suggère que l'incorporation d'agrégats procure aux mélanges recyclés une meilleure recouvrance et en conséquence une réponse plus élastique. En général, l'inclusion d'agrégats dans un enrobé entraine une augmentation de la rigidité de celui-ci, ce qui se reflète souvent par une meilleure résistance vis-à-vis les déformations permanentes [57, 140]. Cette constatation peut en partie expliquer le taux de recouvrance élevé des échantillons 20% AE et 40% AE.

3.5 Réponse à l'échelle microscopique

3.5.1 Introduction

L'objectif de cette partie est de caractériser le comportement local des différents mélanges d'enrobés grâce aux résultats obtenus par la méthode de la grille. Dans ce qui suit, les cartes de déplacement et de déformations mesurées avec cette méthode sont présentées et discutées. Certaines régions sont sélectionnées dans le liant et la distribution locale des déformations est étudiée [141, 142, 143]. Enfin, le comportement local des agrégats dans le mélange est analysé. Les résultats relatifs à un seul échantillon de chacun des mélanges suivants : 0 % AE, 40 % AE et 100% AE seront analysés dans cette partie.

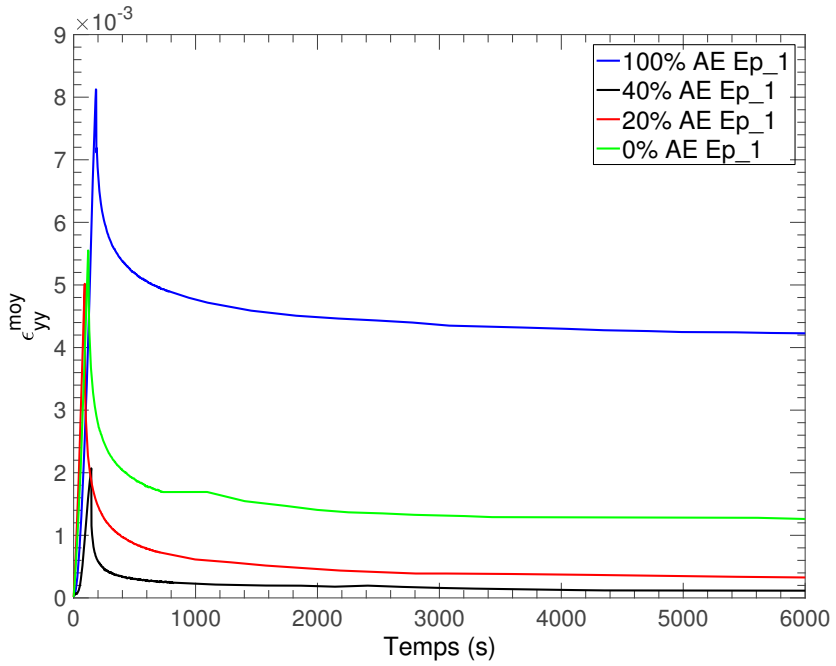


FIGURE 3.10 – Déformation moyenne ε_{yy}^{moy} en fonction du temps.

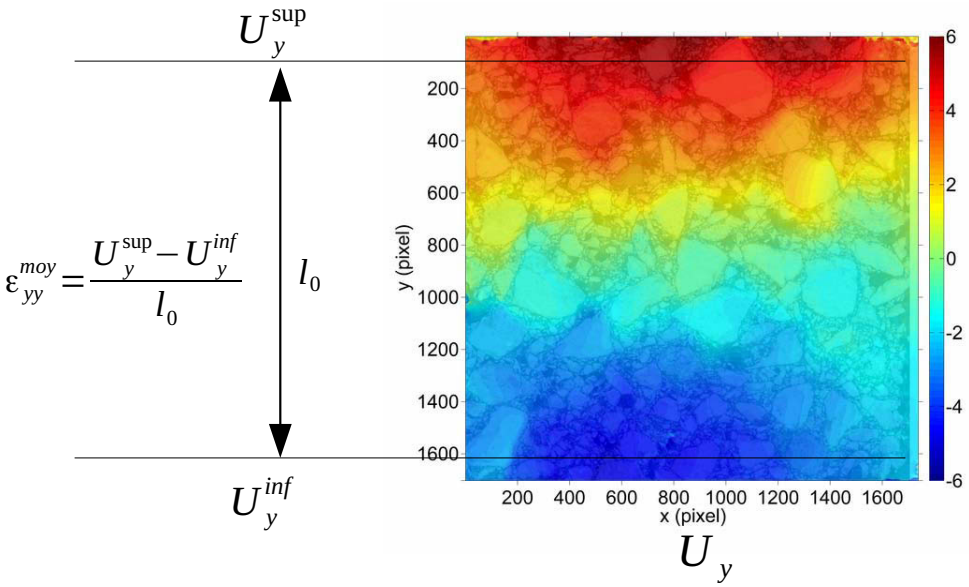


FIGURE 3.11 – Méthode de calcul de la déformation moyenne ε_{yy}^{moy} à partir du champ de déplacement vertical (en pixel, 1 pixel = $400\mu m$).

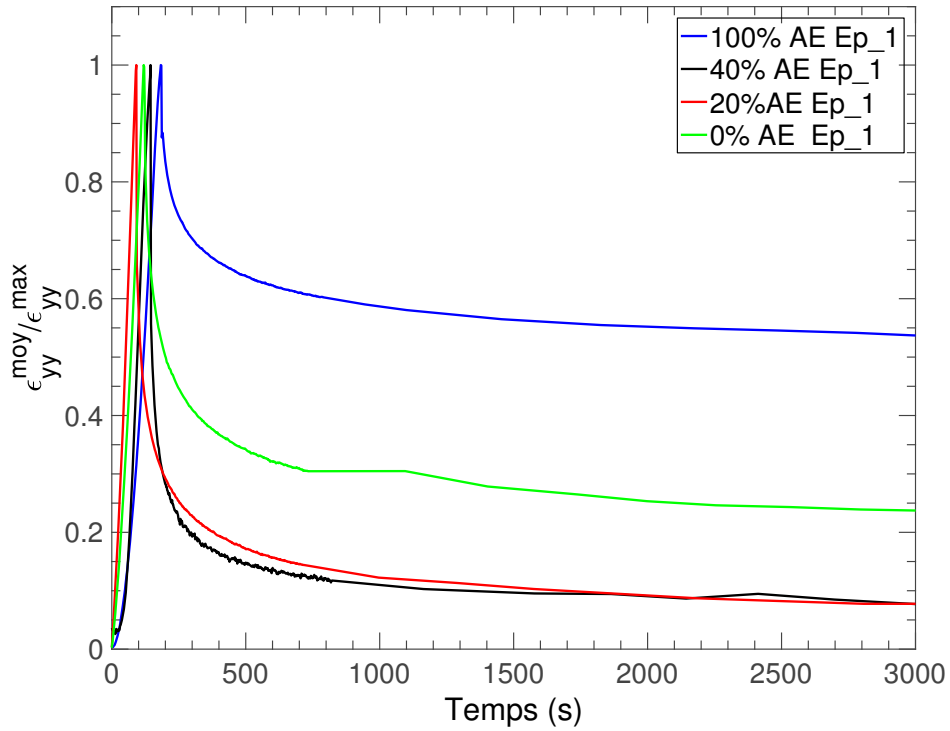


FIGURE 3.12 – Déformation moyenne normalisée ($\frac{\varepsilon_{yy}^{moy}}{\varepsilon_{yy}^{max}}$) en fonction du temps.

3.5.2 Champs de déplacement et déformations

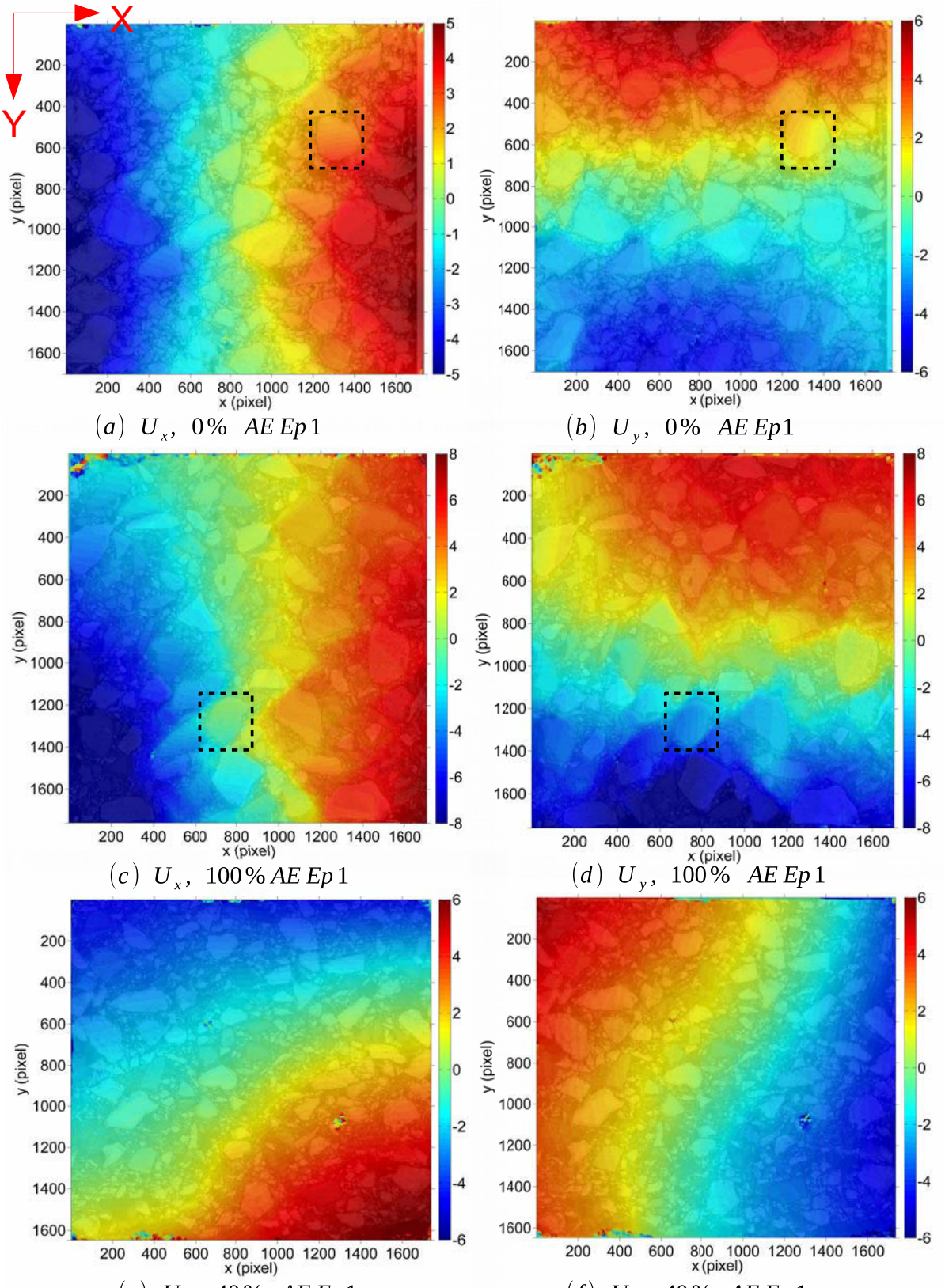
Des exemples de cartes de déplacement obtenus avec la méthode de la grille à la fin de la phase de chargement sont présentées sur la Fig. 3.13. Ces cartes sont superposées sur la microstructure des éprouvettes. Sur cette figure, l'effet du déplacement du solide rigide a été éliminé en soustrayant à chaque pixel la valeur du déplacement moyen de la surface de l'échantillon. Cette procédure permet ainsi d'éliminer l'effet des déplacements correspondants à de la mise en place de l'échantillon en début d'essai.
Pour les 3 éprouvettes présentées, la même tendance est observée. Le déplacement vertical augmente du bas vers le haut de l'échantillon, ce qui est en accord avec le fait qu'un essai de compression est effectué avec le mors du haut mobile. Le déplacement horizontal est positif sur le côté droit et négatif sur le côté gauche, ce qui reflète l'expansion globale de l'échantillon le long de la direction x. Certaines irrégularités dans les champs de déplacement peuvent être observées à l'interface entre les grandes particules et le liant. Ces irrégularités sont plus prononcées pour l'échantillon 100% AE que pour les autres échantillons. Elles sont dues à un gradient important de déplacement à l'interface liant/granulats. Cependant, dans certains granulats (voir les zones encadrées sur Fig. 3.13a-d), une légère variation du déplacement vertical (respectivement déplacement horizontal) le long de la direction x (respectivement la direction y) est observée. Ceci est dû au fait que les granulats correspondants pivotent.
Pour l'échantillon 40% AE, les isovaleurs du déplacement sont inclinées. Elles ne sont pas globalement verticales, comme c'est le cas pour les autres échantillons. On peut observer que

le déplacement vertical est plus élevé sur le côté gauche de l'échantillon. Cela suggère qu'une rotation globale de l'échantillon s'est produite au cours de l'essai. La rotation de l'échantillon est probablement due au non-parallélisme de ses faces opposées. Par conséquent, au début de l'essai, la force ne s'applique pas d'une manière homogène sur sa face supérieure. Les feuilles flexibles de caoutchouc placées entre les plateaux de compression et l'échantillon tolèrent une certaine rotation de celui-ci pour compenser l'excentricité dans l'application de la force.

Un exemple de cartes de déformations obtenues avec la méthode de grille à la fin de la phase de chargement est présenté sur Fig. 3.14. Pour chaque échantillon, ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} sont présentés. La déformation ε_{xx} montre une expansion globale de l'échantillon le long de la direction x, tandis qu'une déformation négative apparaît suivant la direction y. Les résultats pour les autres échantillons sont présentés dans l'annexe B.1. La distribution de déformations est étroitement liée à la répartition des granulats et du liant. En effet, la déformation est presque nulle dans les zones correspondant aux granulats. Cela signifie que toute la déformation est supportée exclusivement par le mastic. Ce résultat est logique compte tenu de la différence significative de la rigidité entre le liant bitumineux et les granulats. Cependant, la déformation dans certains petits granulats ne peut pas être différentiée de celle du liant. Ceci est dû au fait que la taille des granulats en question est trop petite par rapport à la résolution spatiale de la méthode de mesure. Ainsi les granulats qui présentent une taille inférieure à 30 pixels (1.2 mm) ne peuvent pas être localisés ici et sont considérés comme appartenant au liant (mastic).
La Fig. 3.14 permet également d'observer que le mélange 100% AE présente des déformations qui sont principalement distribuées dans la partie inférieure de l'échantillon. Les concentrations de déformation localisées sont observées à l'interface entre les granulats et le mastic. Un exemple de telle concentration est indiqué avec rectangle jaune sur Fig. 3.14d. Ces concentrations peuvent éventuellement correspondre à une fissuration à l'interface dans ces zones. D'autre part, pour le mélange avec 0% AE, les déformations sont principalement concentrées dans la partie centrale de l'échantillon. Des concentrations de déformation peuvent être observées aussi bien dans le mastic (repérées avec des rectangles rouges sur Fig. 3.14a) qu'à l'interface entre le mastic et les granulats (repérée avec un rectangle jaune sur Fig. 3.14a). Ces différences dans le mécanisme de déformation entre les différents mélanges sont discutées en détails dans la section 3.6.

3.5.3 Distribution des déformations à l'échelle du mastic

La carte de déformation en cisaillement présentée sur Fig. 3.14f met en évidence la présence des mécanismes complexes en déformation. En effet, l'existence d'un changement de signe de ε_{xy} dans une même bande de liant est visible comme illustré dans la zone Z1 de Fig. 3.14f par exemple. Pour analyser les mécanismes impliqués dans la réponse mécanique à cette échelle, une ligne parallèle à x' est sélectionnée dans la zone Z1 (voir Fig. 3.14f). L'évolution du déplacement et de la déformation le long de cette ligne est tracée sur la Fig. 3.15. Les déformations tracées sont exprimées dans la base locale (x', y') définie sur Fig. 3.14f. Ainsi, $\varepsilon_{x'x'}$ est la déformation normale le long de la direction du profil, et $\varepsilon_{y'y'}$ est la déformation le long de la direction perpendiculaire au profil. Le changement de repère permettant d'obtenir

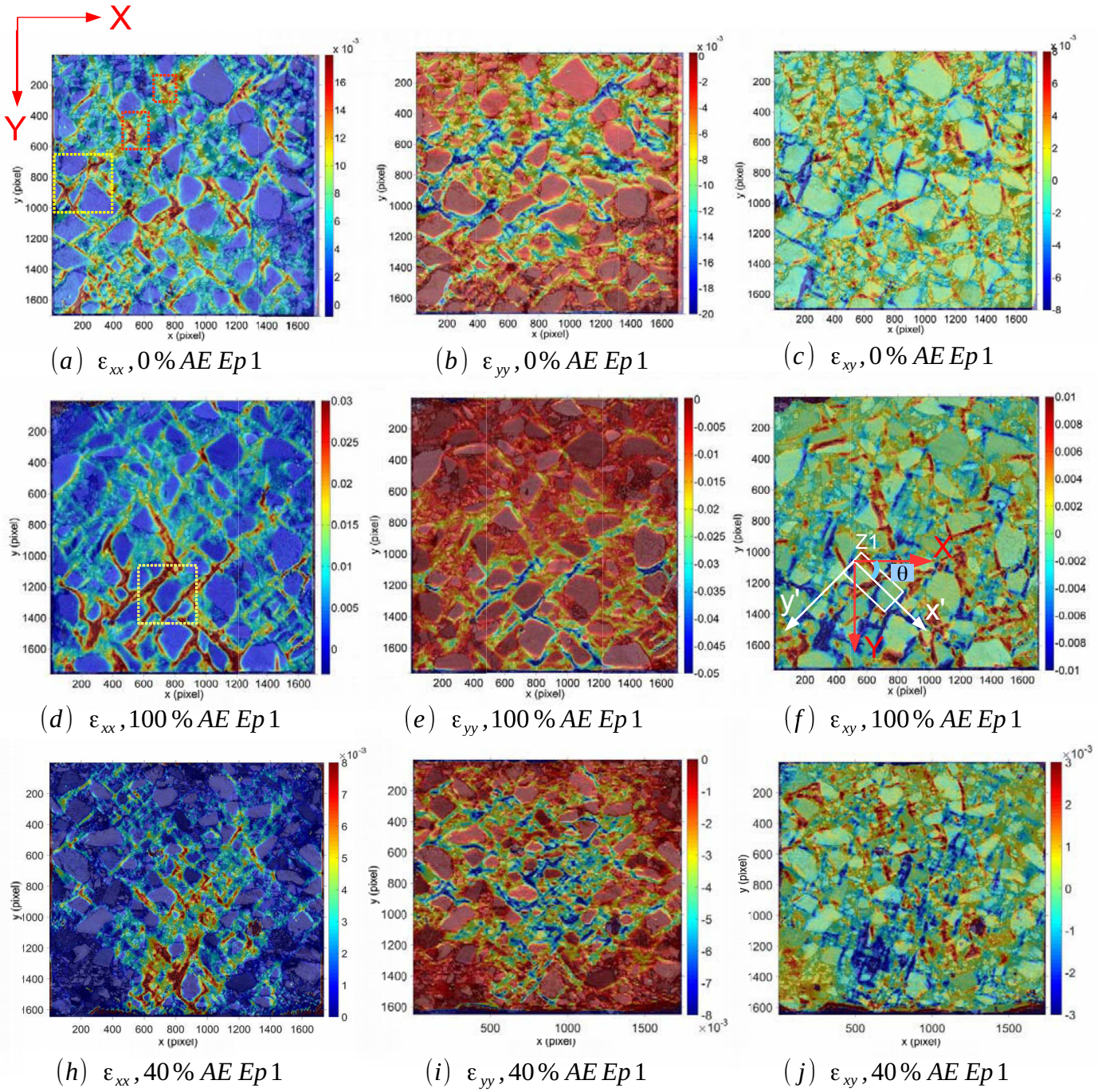


(a) U_x, 0% $AE\,Ep\,1$ (b) U_y, 0% $AE\,Ep\,1$

(c) U_x, 100% $AE\,Ep\,1$ (d) U_y, 100% $AE\,Ep\,1$

(e) U_x, 40% $AE\,Ep\,1$ (f) U_y, 40% $AE\,Ep\,1$

FIGURE 3.13 – Champs de déplacement (en pixel, 1 pixel = $400\mu m$) superposés à la microstructure des échantillons à force maximale.



(a) ε_{xx}, 0 % *AE Ep* 1 (b) ε_{yy}, 0 % *AE Ep* 1 (c) ε_{xy}, 0 % *AE Ep* 1

(d) ε_{xx}, 100 % *AE Ep* 1 (e) ε_{yy}, 100 % *AE Ep* 1 (f) ε_{xy}, 100 % *AE Ep* 1

(h) ε_{xx}, 40 % *AE Ep* 1 (i) ε_{yy}, 40 % *AE Ep* 1 (j) ε_{xy}, 40 % *AE Ep* 1

FIGURE 3.14 – Champs de déformation superposés à la microstructure de la région d'étude de l'éprouvette correspondante

.

les différentes grandeurs est effectué en utilisant les formules suivantes :

$$\begin{bmatrix} U_{x'x'} \\ U_{y'y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{xx} \\ U_{yy} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x'x'} \\ \varepsilon_{y'y'} \\ 2\varepsilon_{x'y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \sin^2(\theta) & \cos(\theta)\sin(\theta) \\ \sin^2(\theta) & \cos^2(\theta) & -\cos(\theta)\sin(\theta) \\ -2\cos(\theta)\sin(\theta) & 2\cos(\theta)\sin(\theta) & \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

où $\theta = 0,78$ rad est l'angle entre les deux repères.

Il convient de noter que l'épaisseur de la bande de mastic entre les granulats est égale à 70 pixels (2.76 mm). Cette valeur est supérieure à l'estimation de la résolution spatiale de la méthode de grille (30 pixels ou 1,2 mm). Par conséquent, la valeur de déformation au centre de la bande peut être considérée comme proche de la valeur réelle. La rotation moyenne des granulats A et B est présentée sur Fig. 3.15a par des flèches blanches. La rotation a été calculée à partir de la partie antisymétrique du tenseur gradient du déplacement en utilisant la formule suivante :

$$\theta = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \tag{3.3}$$

On constate que les deux granulats tournent dans la même direction. En outre, la figure 3.15b illustre le fait que les deux granulats présentent un mouvement relatif opposé : vers le bas pour A et vers le haut pour B. On peut également remarquer à partir de la Fig. 3.15c que la partie du liant avoisinant le granulat A (respectivement granulat B) est tendue (respectivement comprimée) suivant la direction x'. La même tendance est également observée suivant la direction y'. La déformation de cisaillement est négative dans la bande du liant.

Il convient de souligner que la déformation observée dans la partie du granulat adjacente à la bande du liant est principalement due à l'effet moyen local induit par la convolution avec le noyau Gaussien utilisé pour l'extraction de la phase. Cela provoque une atténuation du pic de déformation dans le mastic et de la propagation progressive de la déformation dans une partie du granulat.

Il est également intéressant d'examiner l'orientation des déformations principales ainsi que la rotation des granulats dans cette zone. La Fig. 3.16 montre la carte de rotation (en rad) sur laquelle ont été superposées les directions principales du tenseur de déformation dans le plan (x, y). La longueur des lignes est proportionnelle à l'amplitude des déformations principales. L'inclinaison de chaque croix est proportionnelle à l'orientation des directions principales. On peut observer dans la partie mastic adjacente à chacun des granulats A et B que les déformations principales sont inclinées dans des sens opposés. Elles sont dans le sens des aiguilles d'une montre au voisinage du granulat A et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre au voisinage du granulat B. Ainsi, la bande de mastic est divisée en deux parties, chacune étant influencée par la rotation et la translation du granulat le plus proche.

La représentation proposée sur Fig. 3.17 illustre ce phénomène. Sur cette figure, les champs de déplacements sont utilisés pour déformer un maillage carré. Le pas du maillage est égal à 10 pixels et les déplacements sont amplifiés de 18 pour donner un aspect plus réaliste de la déformation de l'échantillon. Il convient de noter que cette représentation (et contrairement à la carte de Fig. 3.16) est exprimée dans la configuration déformée. Pour cette raison, les coordonnées des pixels correspondant aux granulats sont différents de celles données dans la

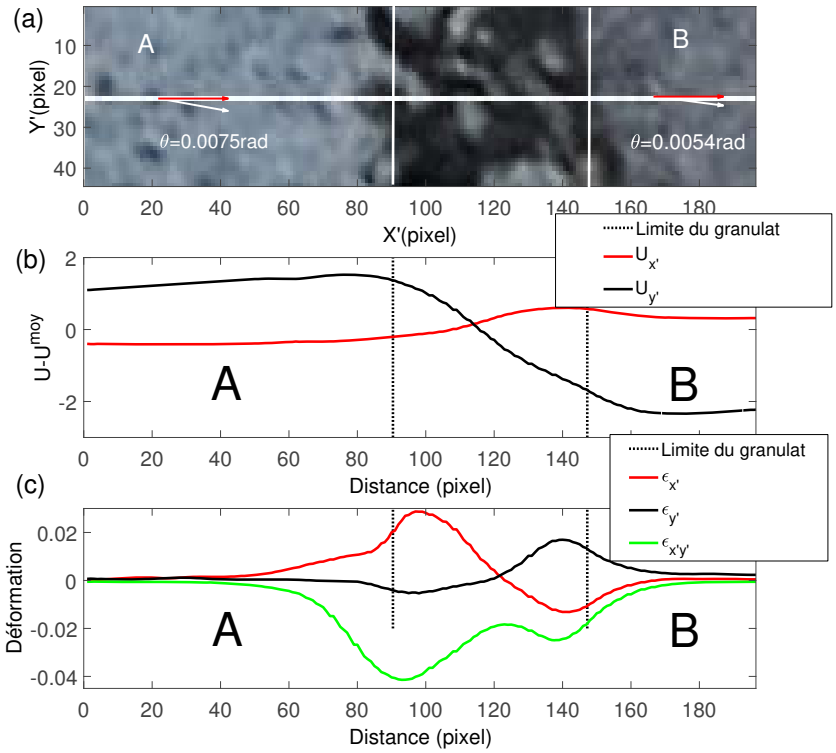


FIGURE 3.15 – (a) Bande de mastic entre deux gros granulats A et B situés dans la zone Z1 de la Fig. 3.14f, les flèches blanches indiquent le sens de rotation des granulats (b) déplacement vertical et horizontal le long de la ligne blanche (en pixel, 1 pixel = 40 μm) et (c) distribution de déformation entre les granulats A et B.

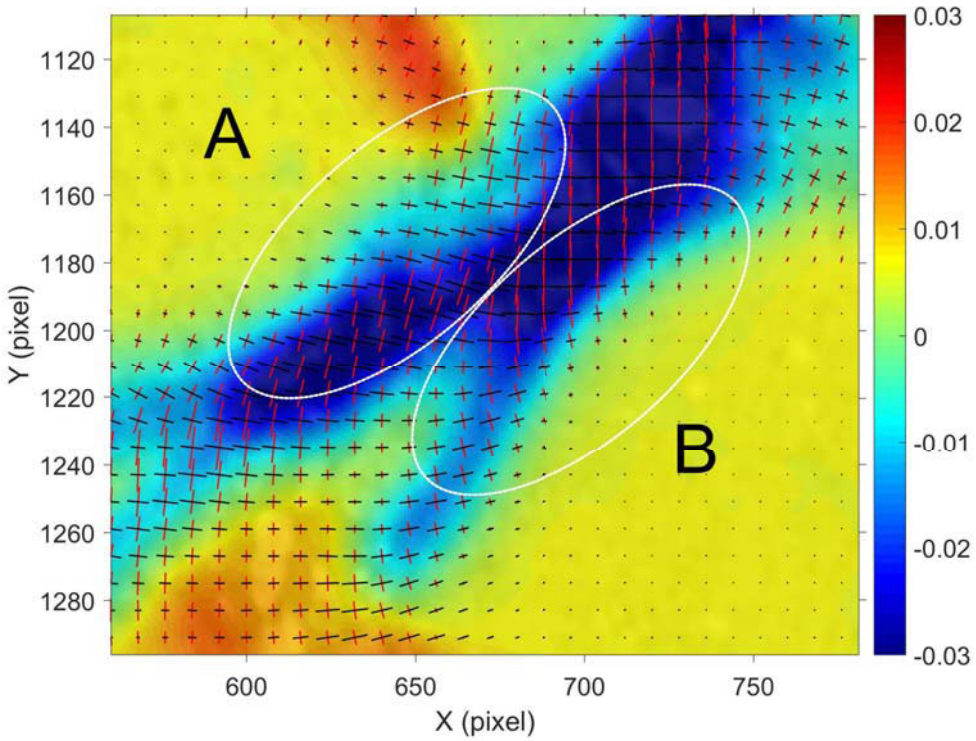


FIGURE 3.16 – (a) Champ de rotation (en rad) et directions principales à force maximale. ε_1 en noire (positive) et ε_2 en rouge (négative) .

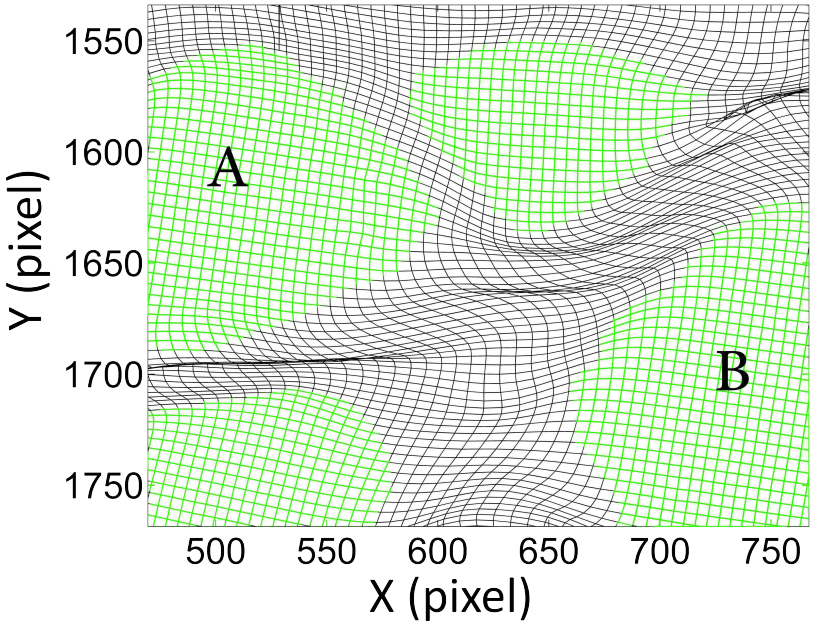


FIGURE 3.17 – Champ de déplacement représenté sous forme d'un maillage déformé. Les granulats A et B sont mis en évidence en vert. La taille du maillage est égale à 10 pixels (400 μm), et l'amplification du déplacement est égale à 18.

Fig. 3.16. On peut voir à partir de cette représentation que le maillage des deux granulats est tourné dans le sens des aiguilles d'une montre, confirmant ainsi les observations précédentes concernant le sens de rotation des granulats. La partie du mastic avoisinant les deux granulats est affectée par cette rotation, ainsi que par le mouvement du granulat situé au-dessus. Cette représentation souligne la complexité des mécanismes de déformation à cette échelle.

3.5.4 Comportement local des agrégats dans le mélange 40% AE

Comme étudié dans [54] et schématiquement représenté sur Fig. 3.18, le processus de malaxage mécanique ne permet pas généralement une fragmentation complète des amas d'agrégats. Ainsi, certains granulats d'agrégats d'enrobé restent couverts avec du liant d'agrégat d'enrobé et des fines particules. En plus, les agrégats d'enrobé ont tendance à former des amas au cours du malaxage avec les matériaux d'apport [2, 72, 73].
Dans la présente section nous allons traiter la question de l'homogénéité du mélange à travers l'analyse de champs de déformations locales au voisinage des agrégats. À cette fin, l'échantillon 40% AE est étudié.
Sachant que la méthode de la grille fournit une quantité conséquente des données, en particulier pour chaque étape du chargement, trois cartes de déformations sont disponibles. Nous avons choisi de considérer la déformation équivalente au sens de Von Mises définie par :

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{3}\sqrt{\varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}^2 + 3\varepsilon_{xy}^2} \tag{3.4}$$

ε_{eq} est la déformation équivalente de Von Mises en supposant un état de déformations planes. Celle-ci permet de prendre en considération les 3 cartes de déformation dans le plan (x, y). La carte de ε_{eq} obtenue à la fin de la phase de chargement et correspondant à l'échantillon 40% AE est représentée sur la Fig. 3.19. L'inspection minutieuse de cette carte a permis d'identifier un certain nombre des régions qui ont été repérées avec des rectangles et numérotées de R1 à R8 (*cf* Fig. 3.19). Ces régions sont représentées en détails sur Figs. 3.20 et 3.21. Pour chaque région nous présenterons les éléments suivants :

— un agrandissement de la région considérée permettant de visualiser les détails de la zone et la nature des granulats qui s'y trouvent ;

— une représentation sous forme de niveaux des gris de l'agrandissement précédent, ceci permet de localiser les fines particules d'agrégats d'enrobé ;

— la distribution de la déformation équivalente ε_{eq} dans la région correspondante.

Nous rappelons que la différence de couleur entre les granulats d'apport (blancs) et les granulats d'agrégats d'enrobé (foncés) permet d'identifier facilement la répartition de ces derniers dans la zone sous l'étude. En outre, les fillers de calcaire (fillers d'apport) peuvent également être utilisés comme des traceurs pour identifier le LA. En fait, l'absence de fines particules de calcaire dans certaines zones de l'éprouvette peut indiquer que le LAE n'est pas complètement mobilisé dans ces zones et, par conséquent qu'aucun mélange n'a eu lieu avec les matériaux d'apport.
Les régions R1-R8 représentées sur Figs. 3.20 et 3.21 sont analysées ci-dessous :

Région R1 La région R1 est constituée de deux GAE (*cf* Fig. 3.20a). L'examen de la déformation entre les deux granulats met en évidence un état de déformation nul qu'on associe à une rigidification (*cf* Fig. 3.20c). Il semble que les deux granulats soient liés ensemble par une couche du liant âgé qui est plus rigide que le LA et ne se déforme pas durant le chargement.

Région R2 La région R2 est constituée d'un GAE qui est enrobé de ses deux cotés par une couche de liant foncé (zone encadrée sur la Fig. 3.20d). La zone concernée est relativement large et ne semble pas contenir de grains blancs de calcaire (*cf* Fig. 3.20e). L'examen de la déformation autour de ce granulat indique que la couche en question ne se déforme pas et se comporte comme faisant partie du granulat (*cf* Fig. 3.20f).

Région R3 La région R3 est constituée de deux LA et d'un GAE localisé entre les deux (*cf* Fig. 3.20g). L'examen de la déformation autour des granulats en question met en évidence qu'ils ne se déforment pas et se comportent comme un seul bloc. Ainsi, le comportement mécanique de ces granulats est similaire à celui d'un gros granulat. Les amas impliquant les GA sont généralement formés au cours du processus de malaxage, à la première étape où les matériaux chauffés (granulats d'apport et agrégats) sont mélangés ensemble. Sous l'effet de la température et de l'abrasion, la couche de LAE entourant le GAE est activée et devient adhérente, ce qui facilite la formation des amas [72]. Ces amas sont qualifiés de « nouveaux amas ». Il est à noter que dans les travaux de [72], uniquement les amas formés par les GAE ont été rapportés.

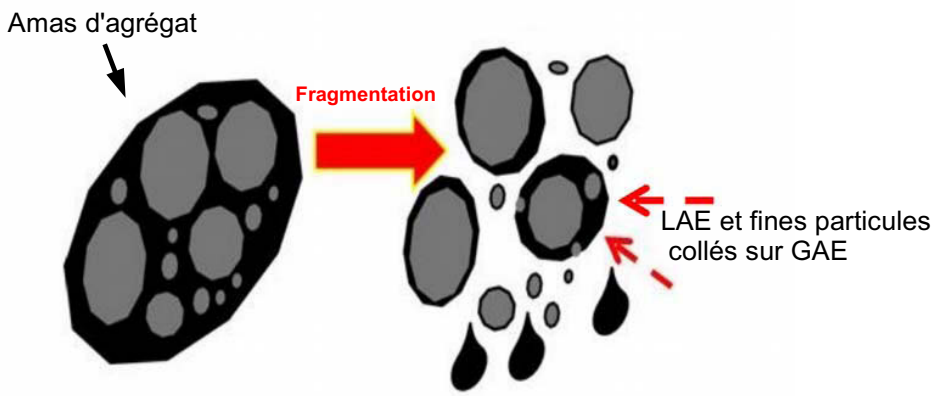


FIGURE 3.18 – Séparation d'un morceau d'agrégat (adapté de [60]).

Dans le cas présent, il parait que la couche du LAE entourant le GAE s'est activée. Celle-ci maintient les deux granulats de calcaire collés sur le GAE et l'ensemble se comporte comme un granulat unique.

Région R4 La région R4 est constituée d'un GAE qui semble être enrobé dans sa partie basse gauche (voir zone encadrée *cf* Fig. 3.20j) d'une fine couche du liant très foncé et qui ne contient pas de grains de calcaire (*cf* Fig. 3.20j). L'examen de la déformation au voisinage de ce granulat met en évidence une rigidification du liant se trouvant dans sa partie basse gauche (*cf* Fig. 3.20l).

Région R5 La région R5 présente un ensemble de plusieurs granulats (*cf* Fig. 3.21a). On y voit particulièrement deux GAE collés ensemble (encadrés en blanc). L'examen de la distribution de la déformation indique que ces granulats ne se séparent pas au cours de chargement et se comportent comme un granulat unique (*cf* Fig. 3.21c). En plus, ces deux granulats semblent faire partie d'un plus gros amas (encadré en rouge Fig. 3.21a) qui inclut deux autres granulats. L'ensemble est supposé se comporter comme un bloc unique.

Région R6 La région R6 illustre un amas constitué des petites particules foncées (fines particules d'AE) (*cf* Fig. 3.21d-e). L'amas ne se déforme pas au cours du chargement et se comporte également comme un granulat.

Région R7 La région R7 est constituée d'un GAE qui semble avoir dans sa partie basse une fine couche du liant très foncé et qui ne contient pas de grains de calcaire (*cf* Fig. 3.21g-h). L'examen de la déformation autour du granulat met en évidence une rigidification de la couche du liant correspondant.

Région R8 La région R8 nécessite une analyse plus fine comparée aux régions précédentes. Un agrandissement de cette région est examiné sur la Fig. 3.22. On s'intéresse en particulier à

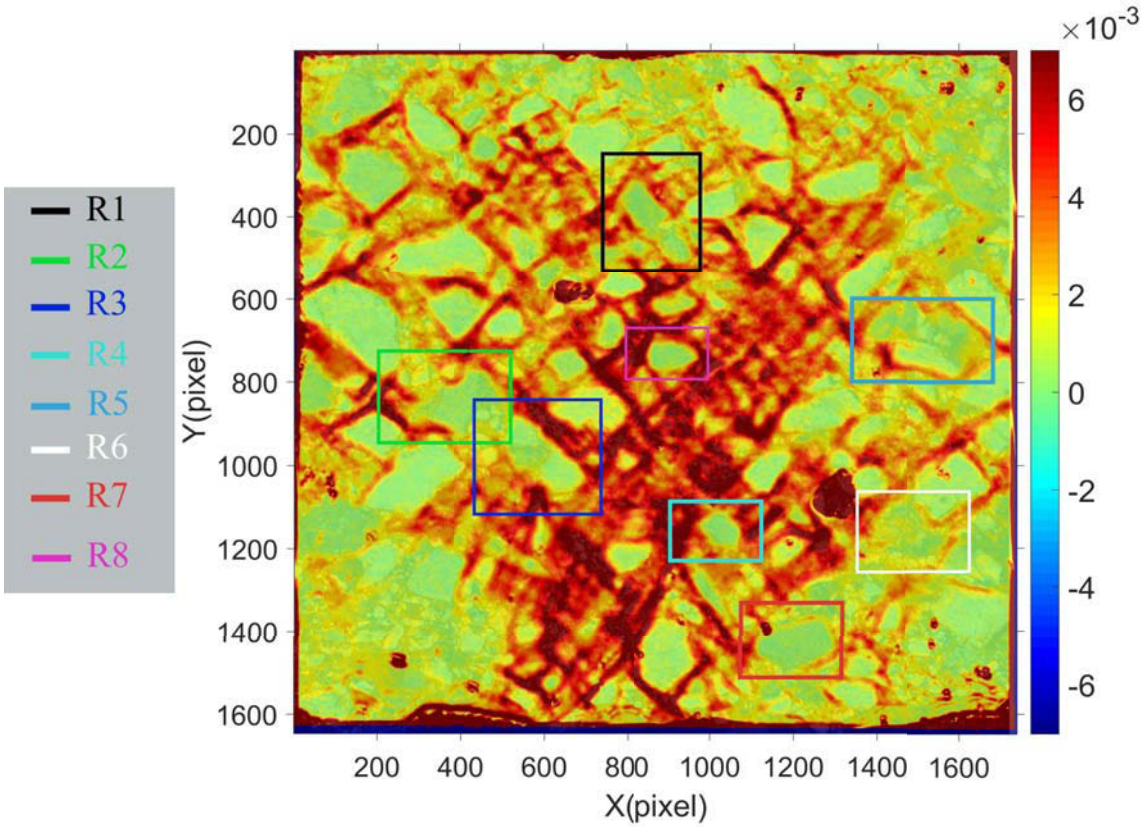


FIGURE 3.19 – Déformation équivalente pour l'échantillon 40% AE sur laquelle les régions R1-R8 ont été mise en évidence par des rectangles.

la partie du liant foncé située sur le côté gauche du granulat (repérée en rouge sur Fig. 3.22a). Cette couche ne semble pas contenir de fines particules de calcaire ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle elle est constituée uniquement du LAE. Pour examiner en détails la déformation dans cette couche de liant, trois lignes ont été sélectionnées sur la Fig. 3.22a et la distribution de la déformation équivalente suivant ces lignes a été tracée sur la Fig. 3.22b. La ligne verticale pointillée représente la limite de bord du granulat. Les lignes horizontales sont choisies de manière à ce que la ligne rouge soit située à la limite supérieure de la couche en question. Les lignes bleue et verte passent à l'intérieur de la couche du liant. L'idée est de comparer la position du pic de déformation dans le liant suivant les trois lignes. On peut remarquer à partir de la Fig. 3.22b que les pics de déformation suivant les lignes qui traversent la couche du liant foncé (bleue et verte) semblent se décaler vers la gauche. Cela signifie que le liant traversé par les lignes bleue et verte semble être plus rigide que celui situé en dessus (ligne rouge).

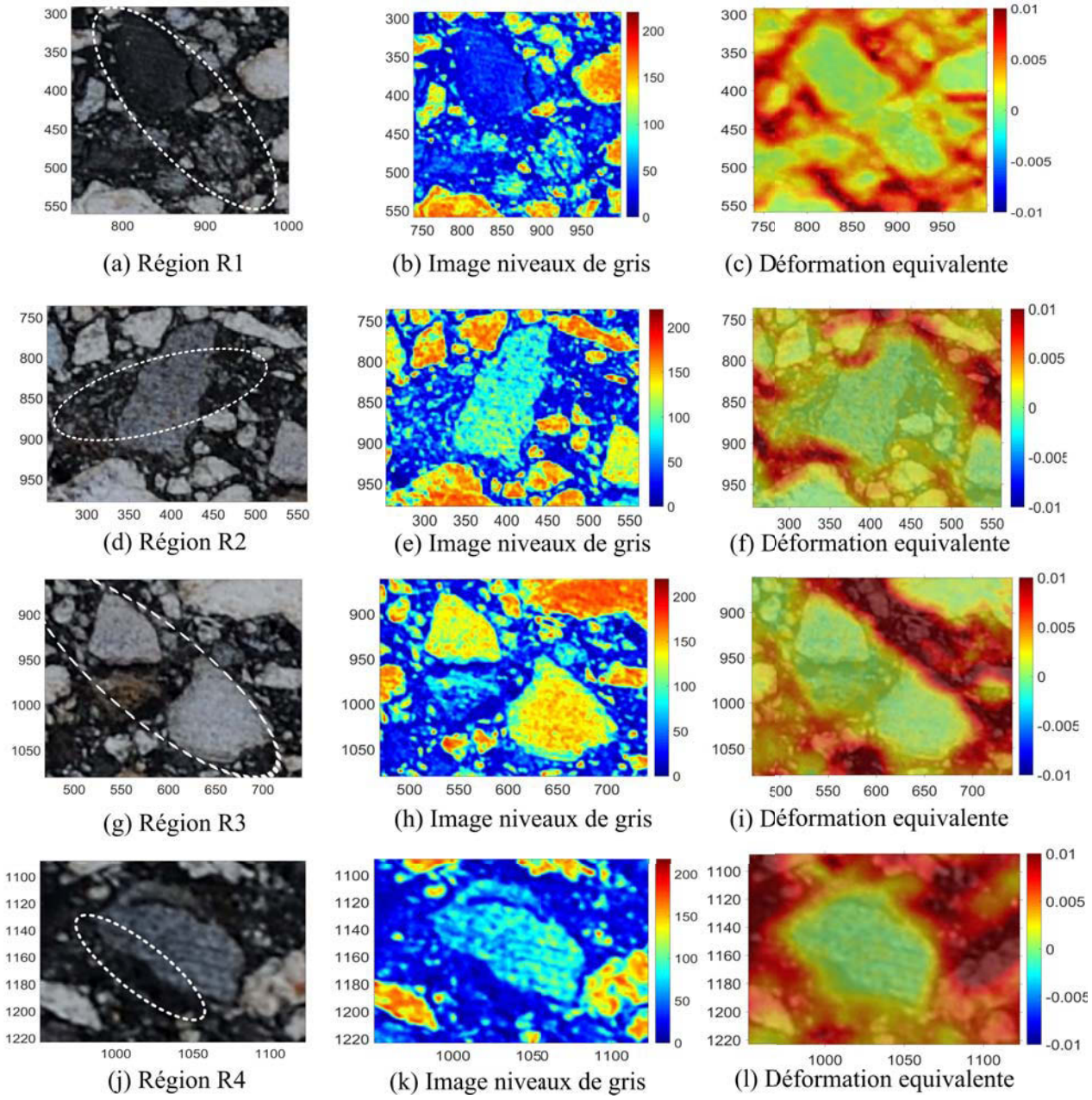


FIGURE 3.20 – Les détails des régions R1-R4.

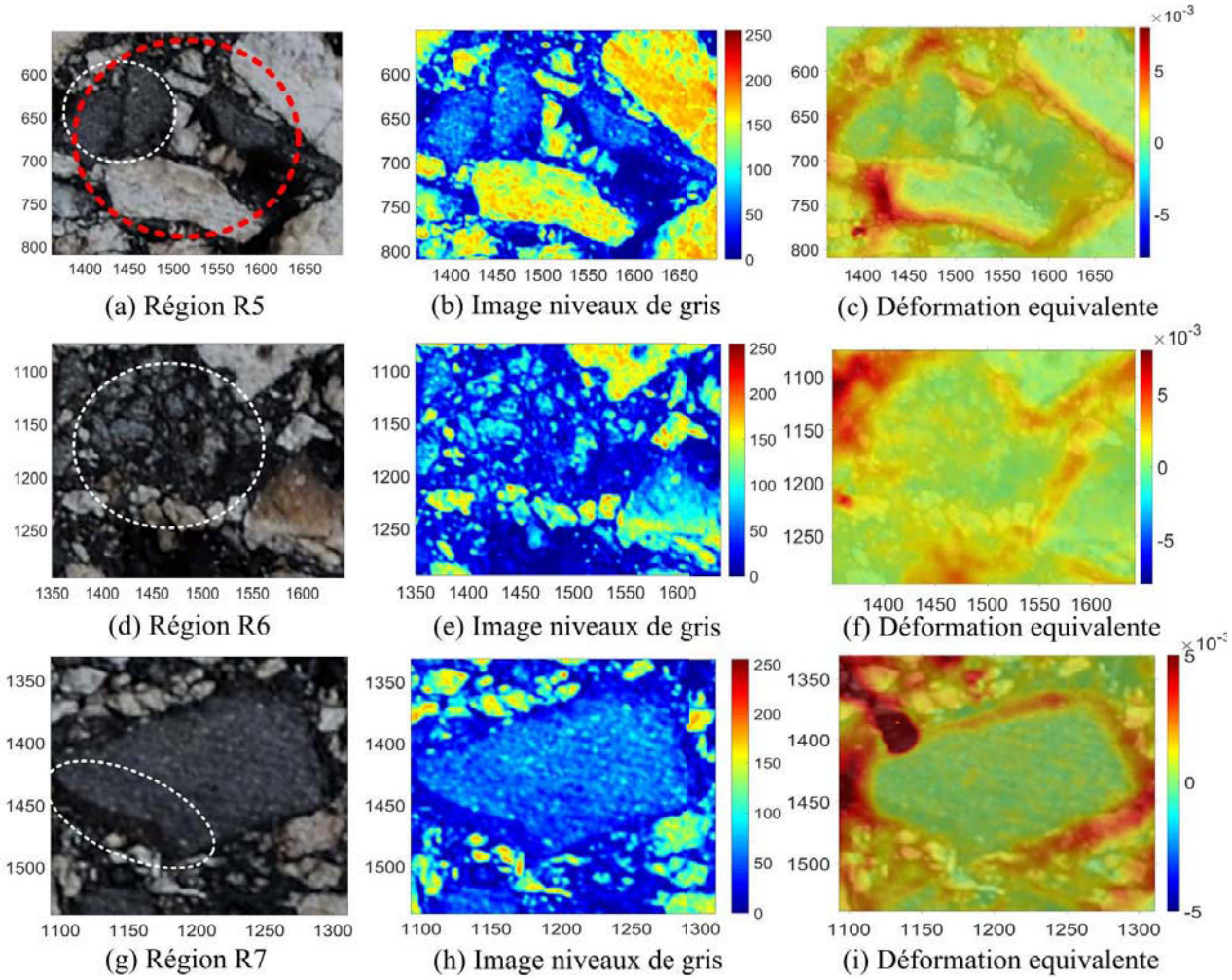


FIGURE 3.21 – Les détails des régions R6-R8.

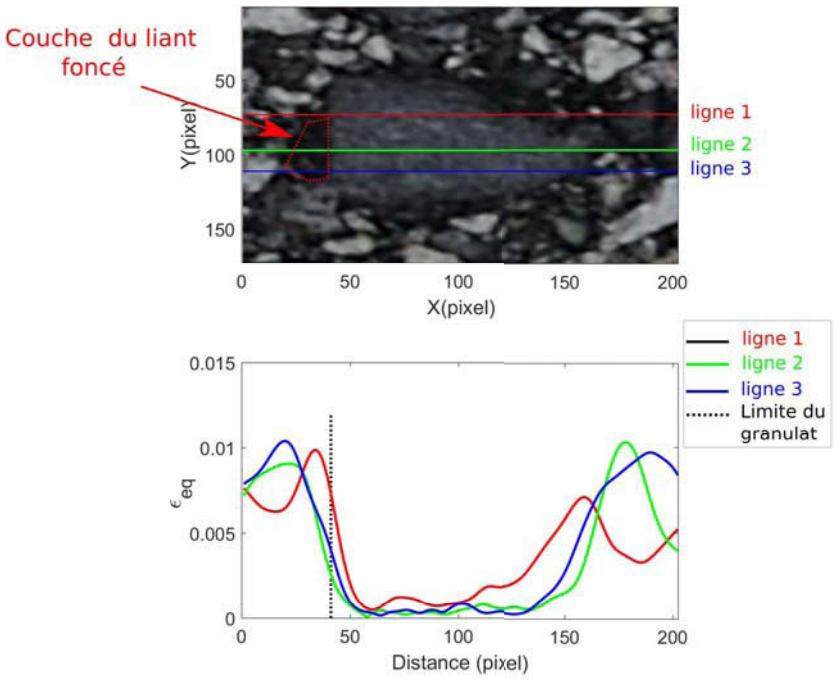


FIGURE 3.22 – Analyse de la déformation dans la région R8. (a) Trois lignes sélectionnées dans la zone R5. La ligne rouge est située au-dessus de la couche du liant foncé alors que les lignes bleue et verte la traversent (b) la distribution des déformations suivant ces ligne.

En conclusion, l'analyse de la distribution de déformation dans l'éprouvette 40% AE a permis de mettre en évidence certaines particularités concernant le comportement local des agrégats d'enrobé. Les principales observations sont résumées comme suit :

— le liant autour de certains GAE semble avoir une rigidité élevée. Celui-ci ne se déforme pratiquement pas au cours de la phase du chargement. Cela signifie que le liant en question se comporte comme un « black rock » et ne doit pas être considéré dans la formulation de l'enrobé ;

— des particules formant des amas ont été observées. Celles-ci ne se déforment pas au cours du chargement et se comportent comme de gros granulats. Ces amas modifient la granulométrie effective du mélange résultant ;

— des amas impliquant des GA ont également été observés. Ceux-ci sont souvent collés aux GAE et se comportent comme des gros blocs. Il est possible que sous l'effet de la température, de l'abrasion et du compactage, la couche du liant entourant les GAE est activée et devient adhérente, facilitant alors la formation des amas.

3.6 Comparaison du comportement mécaniques des différents mélanges

Cette section vise à comparer quantitativement le comportement des différentes compositions en utilisant les résultats issus de la méthode de la grille. La comparaison s'effectuera en deux étapes : tout d'abord, la réponse mécanique des mélanges représentant les cas extrêmes à savoir 0% et %100 d'AE est caractérisée. Ceci est fait afin de mettre en évidence la spécificité associée à chaque mélange. Puis, la réponse des échantillons 20% AE et 40% AE est étudiée en s'appuyant sur les réponses des échantillons précédents. Cette étude repose sur les deux phases du test à savoir la phase de chargement et de recouvrance.

3.6.1 Phase de chargement

Pour comparer objectivement le comportement du liant dans les différents mélanges, il est nécessaire de normaliser les réponses de différentes éprouvettes. À cet effet, on définit le paramètre adimensionnel r_{eq} comme suit :

$$r_{eq} = \frac{\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}^{moy}} \tag{3.5}$$

avec :

$$\varepsilon_{eq}^{moy} = \frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_{xx}^{moy})^2 - \varepsilon_{xx}^{moy}\varepsilon_{yy}^{moy} + (\varepsilon_{yy}^{moy})^2 + 3(\varepsilon_{xy}^{moy})^2} \tag{3.6}$$

où ε_{eq}^{moy} est la déformation moyenne équivalente au sens de Von Mises.
Le paramètre r_{eq} exprime le rapport entre la déformation locale dans le liant et la déformation macroscopique de l'éprouvette. Nous allons l'appeler par la suite le facteur de localisation de la déformation.
La distribution de r_{eq} relative aux quatre mélanges à la fin de la phase de chargement est

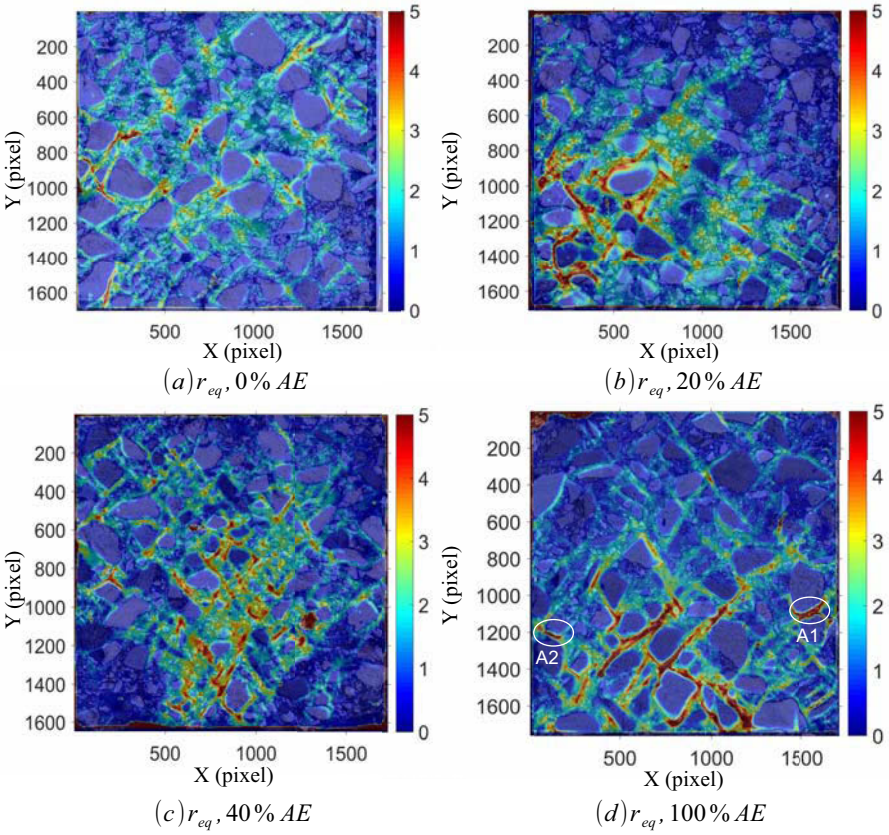


FIGURE 3.23 – Distribution de r_{eq} pour différents mélanges.

représentée sur Fig. 3.23. Plusieurs différences dans les mécanismes de déformation peuvent être observées à partir de ces cartes.
Le mélange 100% AE affiche les valeurs du facteur de localisation les plus élevées. Une forte concentration de ce facteur est particulièrement observée à l'interface entre le liant et les granulats. Cette concentration de déformation pourrait traduire une éventuelle propagation de fissures à l'interface entre le liant et les granulats en question (rupture adhésive). Afin d'inspecter davantage cet aspect, la couche d'adhésif utilisée pour déposer la grille a été enlevée à l'aide d'une ponceuse à bande et la surface de l'échantillon a été examinée avec un microscope optique. Les images correspondant aux zones A1-A2 (voir Fig. 3.23d) sont présentées sur Fig. 3.24a-b. Les fissures sont observables dans certaines zones de l'interface entre le liant et les granulats. Cependant, dans d'autres régions, la présence de fissures est plus difficile à détecter en raison de la présence d'une fine couche d'adhésif qui subsiste après le ponçage. Pour cela, une autre éprouvette du même enrobé a été testée dans les même conditions d'essai mais sans la grille. La surface de cette éprouvette a également été observée à l'aide du microscope optique après l'essai. Un exemple de certaines images de sa microstructure est représenté sur la Fig. 3.25a-b. La Fig. 3.25a montre la présence d'une fissure à l'interface entre un gros granulat et le liant. De plus, sur Fig. 3.25b la présence de fissures autour des petites particules peut également être observée. Des images additionnelles relatives à la microstructure de cet échantillon sont présentées dans l'annexe B.2. Ces observations

FIGURE 3.24 – Microstructures de l'échantillon 100% AE observé avec un microscope optique. (a) zone A1, (b) zone A2

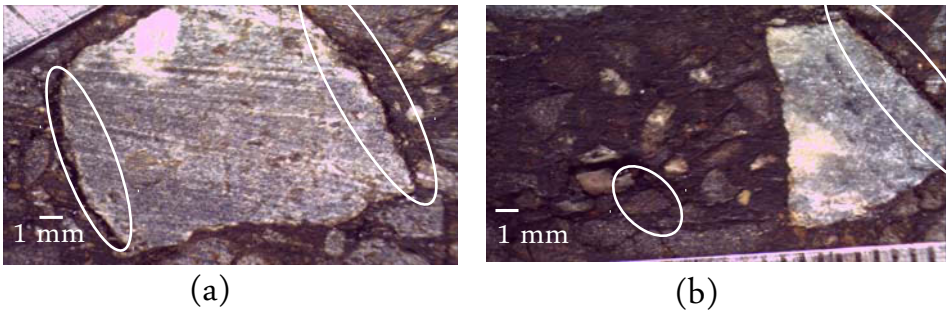


FIGURE 3.25 – Microstructures de l'échantillon 100% AE testé sans la grille, (a) et (b) exemples de fissures à l'interface de certains granulats.

tendent à montrer que la concentration importante du facteur d'amplification autour des gros granulats dans l'échantillon 100% AE traduit en effet une rupture d'interface entre le liant et le granulat dans ces zones. Il est possible que l'ancienne couche de bitume enrobant les GAE compromette l'adhérence entre les granulats et la nouvelle couche du liant constituant ainsi une ligne de faiblesse suivant laquelle de fissures se propagent.

Le mélange 0% AE présente des concentrations de r_{eq} qui sont moins accentuées que celles de l'échantillon avec 100% d'AE (*cf* Fig. 3.23a). Les valeurs de r_{eq} au sein du liant sont du même ordre de grandeur et semblent être moins dispersées comparées à celles de l'échantillon 100% AE. Des concentrations de r_{eq} peuvent être visualisées dans certaines zones du mastic et dans des points de contact entre les granulats. Certains bords pointus des granulats semblent induire une concentration du facteur de localisation. Suivant la même méthodologie que pour le mélange précédent, la grille a été poncée et la surface de l'échantillon a été examinée avec un microscope optique. L'examen n'était pas concluant quant à la présence de fissures au sein de l'échantillon. Une autre éprouvette de la même composition mais sans la grille a été également testée dans les même conditions puis observée avec le microscope. Une seule fissure a pu être observée dans cette éprouvette et celle-ci est localisée dans le mastic (*cf* Fig. 3.26a-b).

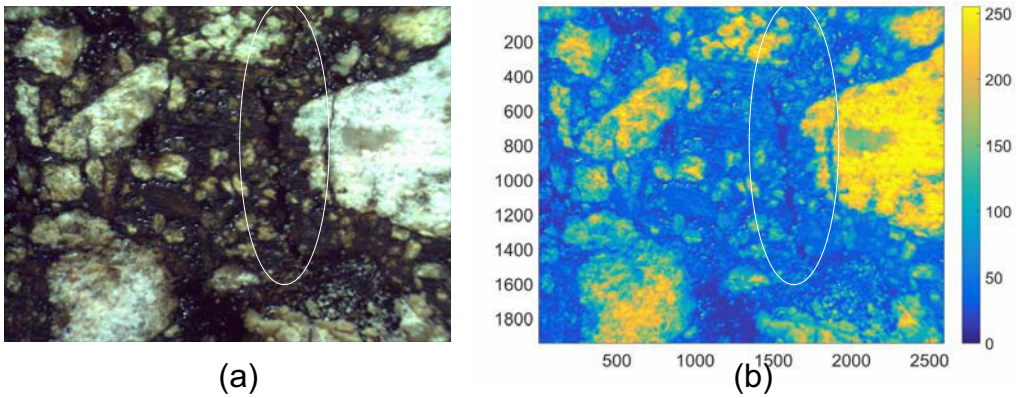


FIGURE 3.26 – Microstructure de l'échantillon 0% AE testé sans la grille et observé avec un microscope optique. (a) Image mettant en évidence l'existence d'une fissure au sein du liant et (b) image de niveaux des gris de la même zone permettant une meilleure visualisation de la fissure.

Les remarques descriptives précédentes peuvent être appuyées en traçant les histogrammes représentant la distribution du facteur de localisation dans le liant. Les histogrammes correspondants sont illustrés sur la Fig. 3.27. On peut observer que toutes les distributions presentent une asymétrie gauche. Les courbes relatives aux mélanges 0% AE et 100% AE permettent de définir deux intervalles :

— le premier intervalle correspond à $r_{eq} < 2,45$. Dans cette zone, le nombre de pixels est supérieur pour le mélange 0% AE que à celui pour l'échantillon 100% AE. Cela suggère que les valeurs du facteur de la localisation du mélange 0% AE sont moins dispersées autour de la moyenne et donc réparties d'une manière plus homogène dans le mastic. Cela est également en accord avec les remarques faites ci-dessus concernant la distribution des valeurs de r_{eq}.

— le deuxième intervalle correspond à $r_{eq} > 2,45$. Dans ce cas, le nombre de pixels est supérieur pour l'échantillon 100% AE. Ceci est cohérent avec le fait que le pic de r_{eq} dans 100% AE sont plus prononcés. Les valeurs de r_{eq} qui sont supérieures à 4, sont principalement localisées autour des gros granulats (comme cela a été illustré précédemment dans cette section).

La distribution du facteur de localisation de la déformation pour les échantillons 20% AE et 40% AE est représentée sur Fig. 3.23b-c. L'échantillon 20% AE présente des concentrations de facteur de localisation qui sont concentrées autour de certains gros granulats. La concentration de r_{eq} dans l'échantillon 40% AE est principalement répartie en diagonale et sur des zones correspondant à de petites particules. Ces zones fournissent une ligne de faible rigidité par rapport aux autres parties de l'échantillon où de plus grandes particules sont distribuées. Les pics du facteur de localisation relatif aux échantillons 20% AE et 40% AE semblent être plus prononcés que ceux correspondant au mélange 0% AE mais sont moins prononcés que ceux correspondant à 100% AE. Ceci est également visible sur l'histogramme présenté sur la Fig. 3.27. On peut remarquer que pour $r_{eq} > 3,8$, les histogrammes correspondant aux

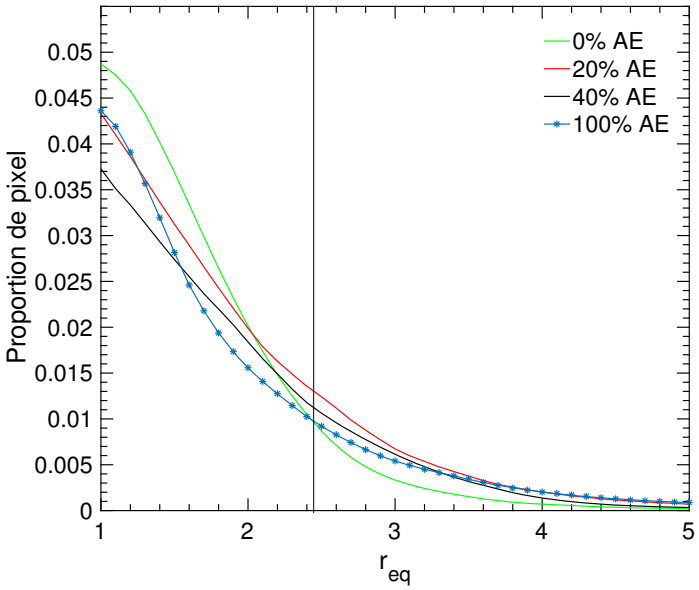


FIGURE 3.27 – Histogramme de la distribution r_{eq}.

échantillons 20% AE et 40% AE sont situées entre ceux relatifs aux échantillons 0% AE et 100% AE. De plus, ces histogrammes semblent correspondre à celui du 0% AE, en le translatant vers la droite. Cela montre que la réponse mécanique des échantillons 20% AE et 40% AE résulte d'une combinaison des réponses mécaniques des mélanges 0% AE et 100% AE. En effet, l'ajout d'agrégats au mélange d'apport entraîne une amélioration de sa réponse mécanique en compression. Cependant, les propriétés de ce dernier sont plus dispersées. Cela pourrait être attribué au fait que la formation des amas empêche la répartition homogène du liant d'apport, ce qui entraîne une augmentation de l'hétérogénéité du mélange résultant.

3.6.2 Phase de recouvrance

Cette section vise à analyser l'effet de l'inclusion des agrégats sur la déformation résiduelle des échantillons. Pour ce faire, on définit le pourcentage de récupération en chaque pixel par :

$$\rho = \frac{\varepsilon_{eq}(t = debut\ de\ phase\ de\ recouvrance) - \varepsilon_{eq}(t = 7000s)}{\varepsilon_{eq}(t = debut\ de\ phase\ de\ recouvrance)} \tag{3.7}$$

Ce paramètre permet d'évaluer en chaque pixel l'effet de l'inclusion des agrégats sur la recouvrance de l'échantillon. Les cartes correspondantes sont présentées dans Fig. 3.28. Le taux de récupération dans les granulats n'a pas été pris en compte parce qu'ils restent non déformés pendant la phase de chargement.

L'échantillon avec 100% AE présente le taux de récupération le plus faible, avec une valeur moyenne d'environ 50%. Ceci était attendu car une dégradation irréversible du matériau a été observée pendant la phase de chargement. Les taux de récupération les plus élevés sont observés pour les mélanges 20% AE et 40% AE.

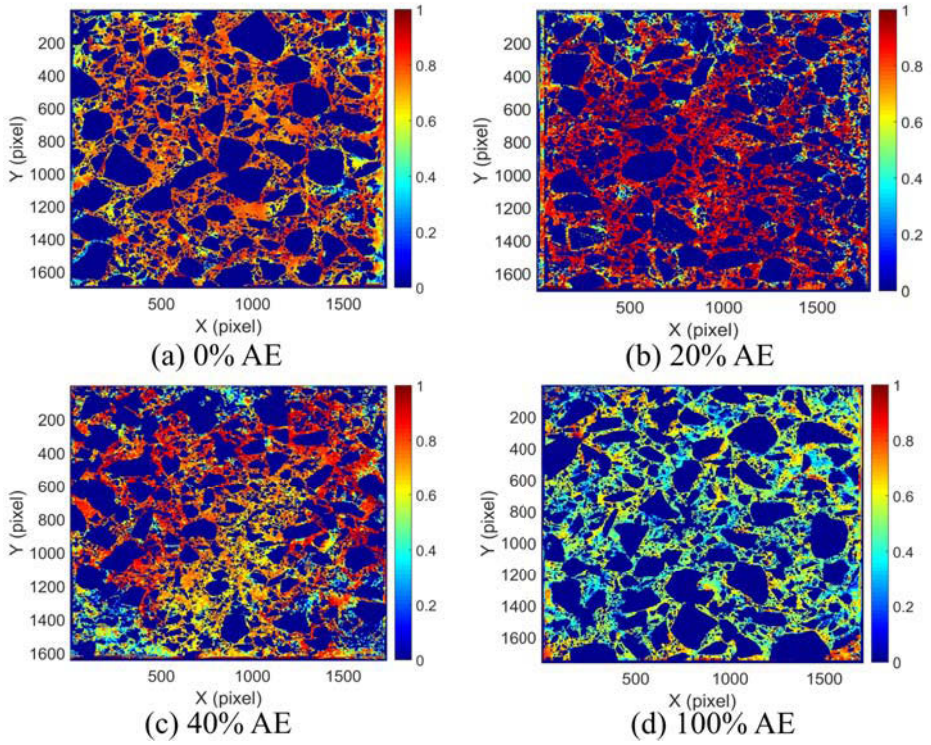


FIGURE 3.28 – Distribution du taux de récupération pour les différentes éprouvettes.

Cela peut être visualisé en analysant les histogrammes de la répartition du pourcentage de récupération pour les différents échantillons (voir Fig. 3.29). Il ressort de ces courbes que l'incorporation des agrégats semble avoir un effet positif sur la partie récupérable dans la déformation totale du mélange. Cependant, au fur et à mesure de l'augmentation de pourcentage d'agrégats, on constate une plus grande dispersion des résultats, ce qui reflète l'hétérogénéité des propriétés de mastic dans la surface à l'étude.

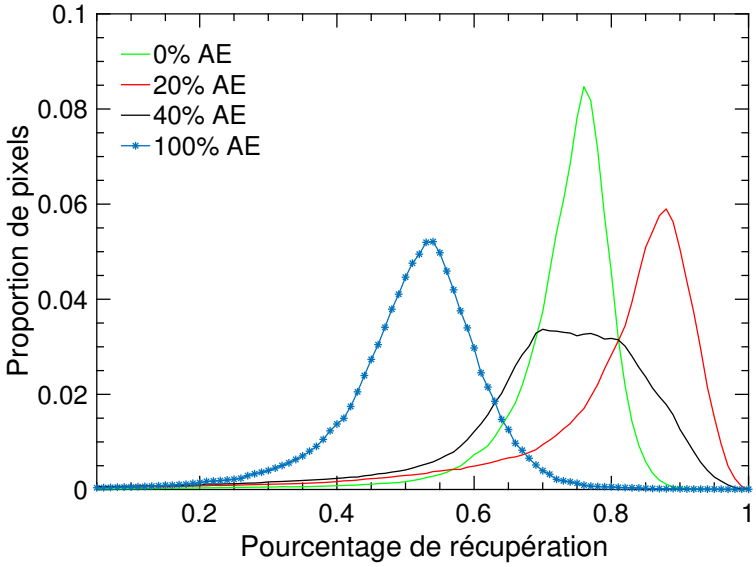


FIGURE 3.29 – Histogramme de la répartition en pourcentage de récupération.

3.7 Conclusion

Dans le présent chapitre, la réponse mécanique de plusieurs mélanges d'enrobés contenant différents pourcentages d'agrégats a été analysée avec la méthode de la grille. Des essais de compression et de recouvrance ont été effectués sur des enrobés avec 0%, 20%, 40% et 100% d'AE. Des granulats d'apport d'une couleur blanche ont été utilisés afin de pouvoir les distinguer après le processus du malaxage. Les résultats issus de mesures de champs cinématiques semblent très prometteurs pour étudier l'effet de l'inclusion d'agrégats sur les propriétés mécaniques des enrobés. La réponse mécanique du matériau a été observée à des échelles allant de l'échelle du liant jusqu'à l'échelle macroscopique.

L'étude à **l'échelle macroscopique** a révélé que l'incorporation des agrégats augmente la rigidité, la résistance à la compression ainsi que la partie élastique dans la déformation totale du mélange. Cette augmentation est principalement attribuée à la différence de propriétés mécaniques entre les agrégats et les matériaux d'apport. En outre, le liant d'apport est moins rigide que le liant d'agrégat d'enrobé qui avait été exposé au vieillissement *in situ*. Il a été observé que le mélange recyclé à 100% présente des concentrations de déformations autour des granulats, provocant ainsi la rupture à leur interface. Cette rupture adhésive est attribuée ici à la présence de l'ancienne couche du LAE entre le granulat et la nouvelle couche du liant. Celle-ci est susceptible de compromettre la qualité d'adhérence entre le liant et les granulats. En outre, l'enrobé avec 0% d'AE a montré une répartition de déformations plus homogène dans le liant. Des pics de déformation ont été observés au bord de certains granulats et dans le liant. Il a également été constaté que la réponse mécanique des échantillons avec 20% et 40% d'AE provenait de la combinaison des réponses mécaniques des mélanges avec 0% et 100% d'AE. En outre, l'inclusion des agrégats génère une plus grande dispersion dans la réponse mécanique. L'utilisation de paramètres normalisés tels que le facteur de la localisation de déformation et le pourcentage de récupération permet de comparer la réponse globale de l'enrobé en se basant sur la réponse de ses constituants.

À **l'échelle du liant**, le comportement des agrégats dans l'échantillon avec 40% d'AE a été inspecté. Le fillers de calcaire ont été utilisés comme des traceurs pour le liant d'apport, permettant la détection des granulats qui restent enrobés avec du liant d'agrégats d'enrobé. La répartition de la déformation sur la surface de l'échantillon a révélé l'existence de plusieurs types d'interactions entre les matériaux d'apport et les agrégats d'enrobé à savoir : formation des nouveaux amas d'agrégats d'enrobé ; présence d'anciens amas d'agrégats d'enrobé ; rigidification du liant autour de certains granulats d'agrégats d'enrobé.

Bien que les essais présentés et analysés dans ce chapitre portent sur des mélanges élaborés spécifiquement pour cette étude, ils permettent de répondre à un certain nombre des problématiques soulevées par le recyclage des mélanges bitumineux. Ainsi ces résultats viennent en complément de ceux disponibles dans la littérature, et sont susceptibles d'enrichir la base de données existante concernant la problématique de l'homogénéité des enrobés recyclés.

Chapitre 4

Vers une mesure de la dilatation/contraction locale des enrobés soumis à des cycles gel/dégel

4.1 Introduction

Dans les régions caractérisées par un climat froid, les chaussées subissent des dégradations importantes, notamment de la fissuration thermique. Ce phénomène est principalement causé par le retrait thermique empêché à basse température de la surface de la chaussée dans la direction longitudinale. Comme cela a été évoqué dans les chapitres bibliographiques, les connaissances fondamentales du comportement thermique des enrobés sont généralement acquises à travers des essais à l'échelle du mélange en assimilant l'enrobé à un matériau homogène et isotrope, ou à travers des essais réalisés sur le liant bitumineux tout seul, ce qui revient souvent à négliger l'effet de structure engendré par l'interaction entre les constituants.
Cependant, étant donné que l'endommagement de l'enrobé à basse température est initié dans sa structure interne, la réponse thermique de ses constituants (liant et granulats) est d'une importance capitale pour une meilleure compréhension de sa réponse thermique globale. En effet, l'incompatibilité thermique entre les granulats et le liant, provoquée par la grande différence entre leurs coefficients de dilatation-contraction thermique (CTE [1]/CTC [2]) est reconnue comme la principale source de l'accumulation des contraintes thermiques à l'interface liant/granulats [41]. Cette accumulation des contraintes thermiques peut devenir critique à très basse température car elle peut dépasser la résistance en traction du liant, et par conséquent induire des détériorations interfaciales [42, 43]. Les fissures interfaciales impactent négativement la résistance du matériau et accélèrent également les dommages liés à l'humidité.
La revue bibliographique a souligné que l'étude de la réponse thermique des enrobés à l'échelle des constituants n'a pas suscité beaucoup d'attention et constitue un véritable verrou scientifique. Le travail présenté dans ce chapitre est motivé par la nécessité d'observer et d'analyser

1. Coefficient of Thermal Expansion
2. Coefficient of Thermal Contraction

cette réponse. À cette fin, les enrobés bitumineux étudiés dans le chapitre précédent sont soumis à des cycles de gel-dégel. La distribution de déformations locales est mesurée à la fois avec la CIN et MG à des fins de comparaison entre ces techniques. Un cycle additionnel sous conditions saturées sera également réalisé sur l'échantillon avec 40% d'AE.
Les objectifs visés dans ce chapitre sont les suivants :

- évaluer la capacité de la CIN et MG à être des outils efficaces pour mesurer la dilatation/contraction locale des mélanges d'enrobés sous sollicitations de type gel-dégel ;
- fournir une description détaillée de la réponse locale des enrobés sous sollicitations thermiques ;
- analyser et comparer la réponse thermique de plusieurs types d'enrobés recyclés ;

4.2 Montage expérimental et méthodes

4.2.1 Matériaux testés

Les mélanges d'enrobés fabriqués précédemment ont été également utilisés dans le présent chapitre. Nous rappelons brièvement leurs principales caractéristiques. Il s'agit de quatre mélanges d'enrobés contenant respectivement 0%, 20%, 40% et 100% d'AE. Les granulats d'apport (GA) et les granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) ont été choisis de telle sorte qu'ils présentent une différence au niveau de leur couleur afin de pouvoir les distinguer facilement après le mélange. Les granulats d'agrégats d'enrobé ont été choisis d'une couleur foncée. Dans ce but, ils sont constitués de granite, basalte et de gneiss. Les granulats d'apport, quant à eux, ont été choisis d'une couleur blanche et sont composés de calcaire. Des éprouvettes de forme cylindrique de 80 mm de diamètre et 90 mm de hauteur ont été testées. Un méplat a été élaboré en sciant les échantillons parallèlement à leurs axes. La dimension de la surface d'étude ainsi obtenue est d'environ 6,5 cm$\times$ 7 cm. Au total, quatre éprouvettes ont été testées avec une éprouvette unique pour chaque composition vu la complexité relative de ce type d'essai. Les régions d'étude pour les éprouvettes testées dans ce chapitre sont présentées sur Fig. 4.1.

4.2.2 Essai de faisabilité et montage expérimental

Les essais gel-dégel ont été effectués dans une enceinte climatique nouvellement acquise au laboratoire (*cf* Fig. 4.2). La mesure de déformations locales sur la surface de l'éprouvette a été effectuée avec des techniques de mesure de champs, à savoir : CIN et MG. En effet, on a profité des essais qui mobilisent des petites déformations pour effectuer une comparaison rapide entre d'une part la CIN qui est la technique des mesures de champs usuellement utilisée pour caractériser la déformation de l'enrobé et d'autre part la MG qui est utilisée dans la présente thèse.
L'amplitude de la dilatation/contraction thermique des éprouvettes causée par le changement de leur température est proche de la résolution théorique de ces techniques. Par conséquent, il est nécessaire d'éliminer tous les phénomènes parasites susceptibles de perturber les mesures telles que les vibrations de l'enceinte climatique et les mouvements hors plan. À notre connaissance, au niveau des enrobés bitumineux, la mesure de déplacements et déformations

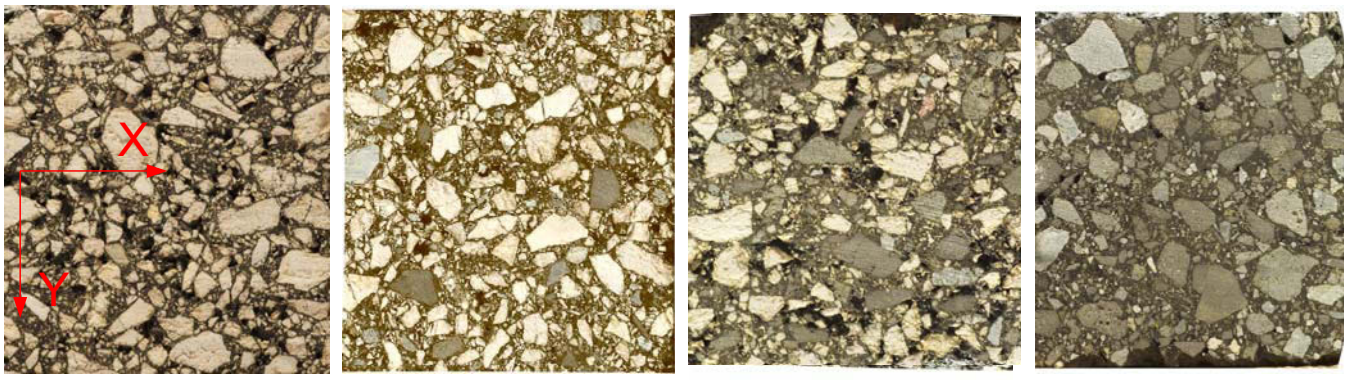


FIGURE 4.1 – Méplat correspondant à la région d'étude pour les différents échantillons testés dans ce chapitre.

à l'aide des méthodes optiques sous sollicitation de type gel-dégel constitue une première du genre. Il a été ainsi nécessaire d'effectuer une série d'essais de faisabilité afin d'identifier les différentes difficultés associées à ce type d'essais et de proposer des solutions pratiques appropriées à chacune.
Au cours des essais de faisabilité qui ont précédé la définition du protocole expérimental, de nombreux obstacles et défis ont été surmontés avant d'obtenir des résultats acceptables. En effet, l'espace à l'intérieur de l'enceinte climatique était insuffisant pour pouvoir placer le dispositif de mesure. Il a été ainsi décidé de placer l'éclairage et la caméra à l'extérieur. Le dispositif d'essai (la caméra, l'éclairage et l'enceinte climatique) a été placé dans une chambre à température contrôlée ($+20°C \pm 0.5°C$). Avant chaque prise d'images il est nécessaire d'arrêter totalement l'enceinte et d'ouvrir sa porte. Effectuer cette manœuvre au cours de la phase de gel perturbe considérablement le refroidissement de l'éprouvette. En conséquence nous avons décidé d'effectuer les mesures de déformation uniquement dans la phase de dégel pour limiter cet effet perturbateur. Le protocole consiste donc à enregistrer une image de référence avant le début de l'essai à $+20°C$ puis les images déformées à la fin de la phase de gel. De cette façon, une seule fermeture/ouverture de la porte est effectuée au cours d'un essai.
Parmi les perturbations également observées au cours de l'étude de faisabilité figurent les mouvements de l'enceinte engendrés par l'ouverture de sa porte. En effet, la porte possède une importante inertie et à son ouverture elle entraîne un léger mouvement de l'enceinte thermique. Le mouvement de l'enceinte entre les deux positions de la porte (position ouverte et position fermée) n'est pas perceptible à l'œil nu, mais assez suffisant pour perturber les mesures de déformation. Une solution envisagée consiste à mettre un support pour marquer l'angle d'ouverture de la porte. Ceci permet d'avoir le même angle d'ouverture de la porte pour l'image de référence et les images dans la configuration courante. L'éclairage a été également placé sur un support rotatif qui permet de le tourner afin de ne pas gêner l'ouverture/fermeture de la porte de l'enceinte.
Pour limiter les mouvements hors-plan qui pourraient être induits par le déplacement de l'éprouvette lors de la dilatation/contraction thermique et les vibrations de l'enceinte, l'éprou-

vette a été légèrement maintenue en butée contre un support situé sur sa face avant, ceci à l'aide d'une bande élastique, comme illustré sur Fig. 4.2. Il convient de noter que d'autres sources de mouvements hors-plan pourraient se produire comme la contraction du support sur lequel l'échantillon a été placé. Malheureusement, des telles sources de perturbation ne peuvent pas être contrôlées simplement.
Un autre problème qui est apparu lors des essais préliminaires est le givrage de la surface étudiée. Un exemple du phénomène est illustré sur la Fig. 4.3. La formation d'une couche de givre est clairement visible sur la surface de l'échantillon pour les températures en dessous de $T = 0$°C. Le givre modifie la distribution des niveaux de gris et induit des erreurs importantes lors du calcul du déplacement et de la déformation. En particulier, on remarque d'après Fig. 4.3 que le givre reflète l'éclairage sur le coin supérieur gauche de l'échantillon. La formation du givre est causée par l'eau sous forme d'humidité présente dans la pièce qui, à une température en dessous de 0°C, cristallise au contact de la surface de l'échantillon.
Une première solution envisagée a été une solution préventive qui consiste à utiliser un produit antibuée, initialement prévu pour la surface intérieure des pare-brises des voitures. L'antibuée, appliqué sur la surface de l'échantillon avant le début de l'essai, est censé empêcher le dépôt d'humidité sur la surface de l'échantillon et donc le givrage de celle-ci. Après essai, il a été constaté que cette solution fonctionnait à des températures au-dessus de -8°C, mais à -10°C, le givre se forme toujours. Ainsi une solution additionnelle a été envisagée dans le cas d'apparition du givre. Celle-ci consiste à dégivrer la surface avec un dégivrant de type spray. Celui-ci a été appliqué à la fin de la phase de gel. Ainsi combiné à l'antibuée, nous avons observé qu'un dégivrage de la surface était possible en quelques secondes. Avec la dernière solution l'éprouvette est protégée pour éviter que l'anti-givrant sature la surface de l'éprouvette et ne modifie pas son comportement thermique apparent. Avant la prise de l'image déformée Nº 1, il faut attendre quelques instants pour que le dégivrant se dissipe de la surface de l'échantillon d'où la nécessité de régler la température du test à -11°C afin de pouvoir enregistrer l'image déformée Nº 1 à $T = -10$°C.

Chaque échantillon a été équipé avec quatre thermocouples afin de mesurer sa température pendant les essais (*cf* Fig. 4.4). Trois thermocouples ont été placés sur la surface de l'échantillon près de la région d'intérêt pour couvrir toute sa hauteur, et le quatrième a été placé à l'intérieur de l'échantillon. Un trou a été percé dans l'échantillon à cet effet puis il a été rempli d'un mastic après l'introduction du thermocouple. Un thermocouple supplémentaire a été placé dans l'enceinte climatique pour connaitre avec précision la température ambiante. Les thermocouples ont été connectés à un système d'acquisition de données qui permet de mesurer en continu l'évolution de la température de l'échantillon durant l'essai.

Franges parasites

L'un des problèmes rencontrés lors de l'encodage des images de grilles avec le capteur de la caméra a été la présence des franges parasites dans les cartes de déformations. Il s'agit des motifs quasi périodiques superposés à ces cartes (*cf* Fig. 4.5a). Cette perturbation n'est pas liée au type d'essai ou à la méthode de traitement mais plutôt au fait de discrétiser un marquage périodique avec le capteur de la caméra. En effet, les motifs réguliers (grilles) sont enregistrés par le capteur de caméra et celui-ci est constitué d'une matrice de pixels. La distribution spatiale des niveaux de gris de la grille subit donc un échantillonnage par le

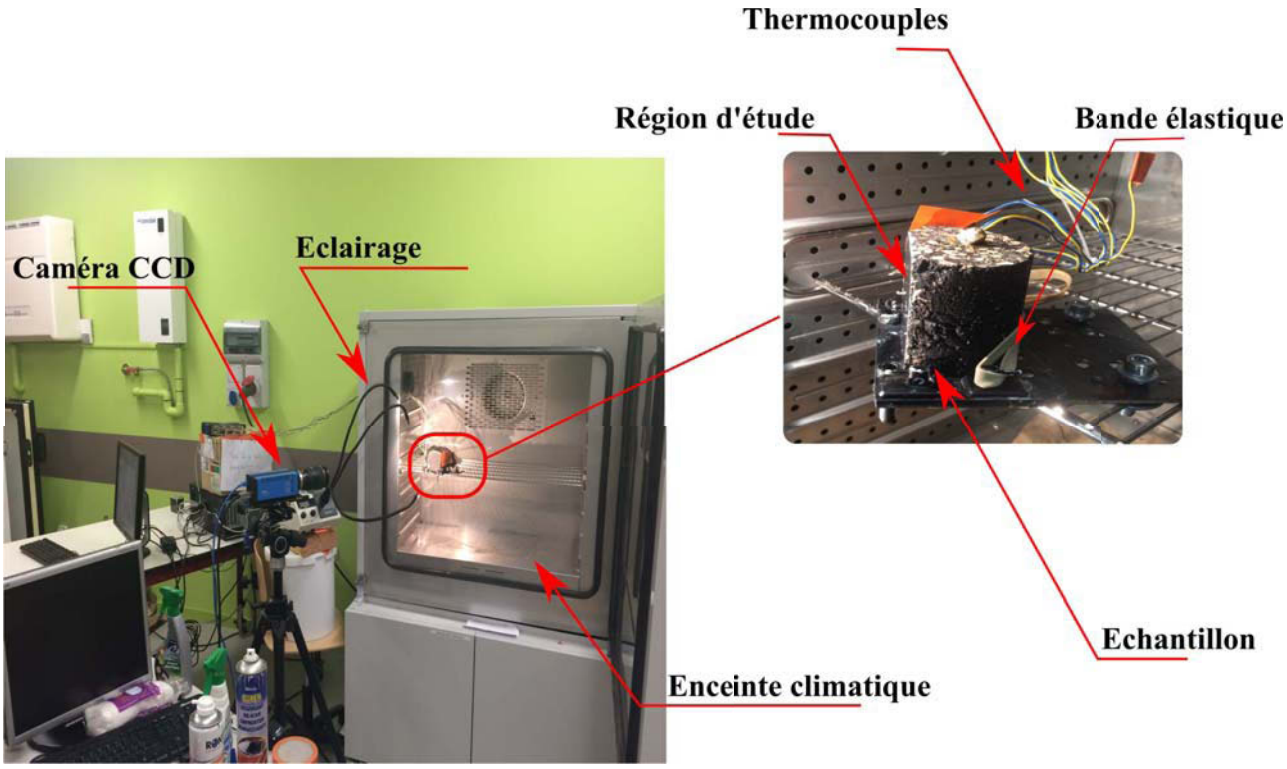


FIGURE 4.2 – Dispositif expérimental.

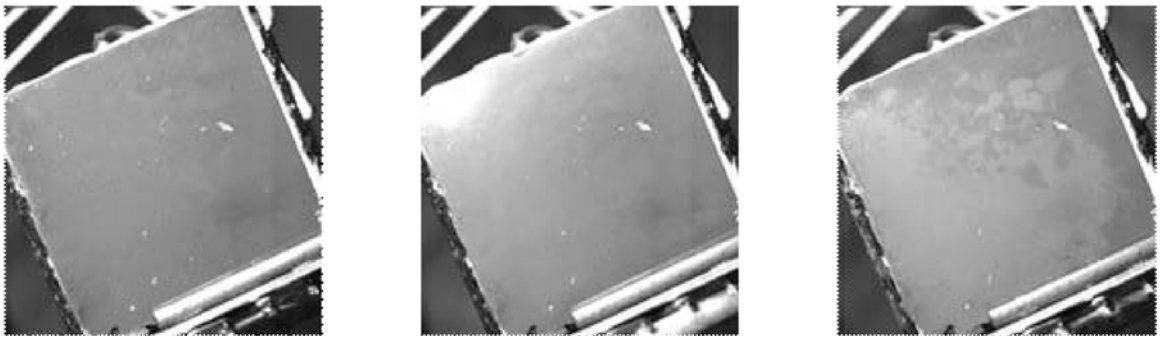


FIGURE 4.3 – Image de référence à $T = 20$°C. L'image déformée à $T = -10$°C montrant une couche de givre couvrant la grille, celle-ci reflète l'éclairage sur la partie supérieure de l'échantillon. À $T = 0$°C, début de la fonte du givre couvrant la grille.

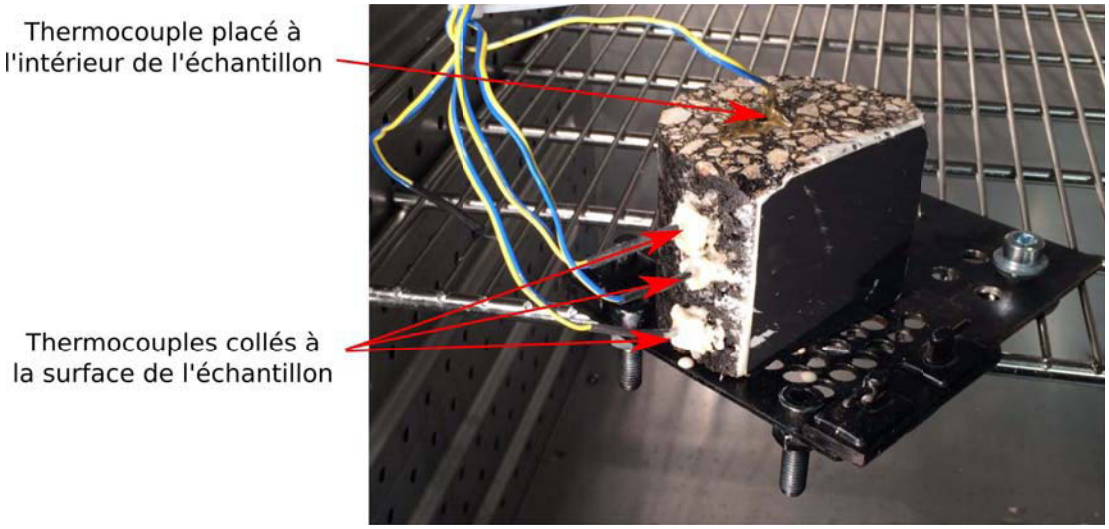


FIGURE 4.4 – Emplacement des thermocouples : 3 thermocouples collés sur la surface de l'éprouvette et 1 thermocouple placé au cœur de l'éprouvette.

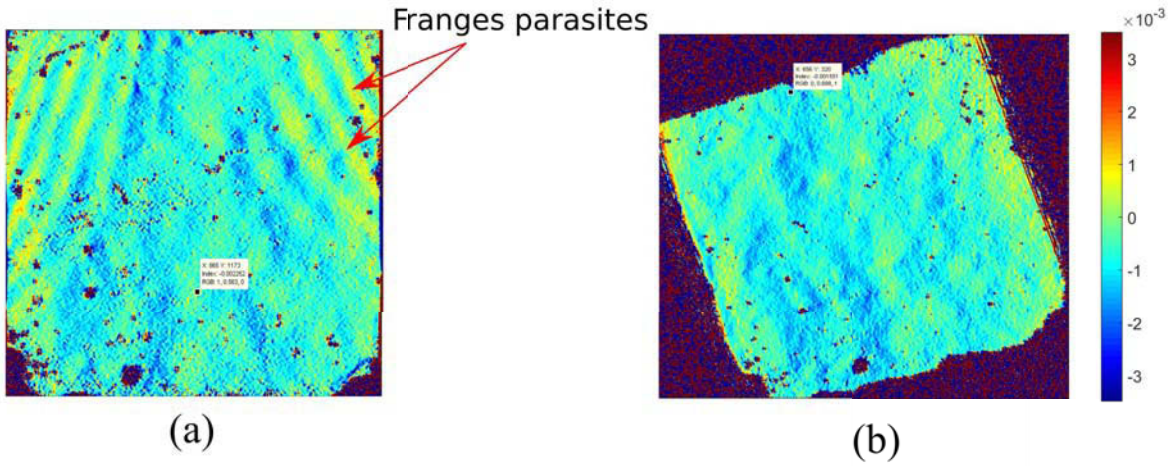


FIGURE 4.5 – (a) Franges parasites sur la carte de déformation ε_{xx} où la grille alignée sur les pixels du capteur et (b) le même échantillon avec la caméra inclinée avec 18° (absence des franges).

capteur de la caméra. Ceci entraîne potentiellement un phénomène bien connu en traitement de signal : le repliement de spectre (ou aliasing), si la condition de Nyquist n'est pas satisfaite dans le théorème d'échantillonnage de Petersen-Middleton [144]. Dans le chapitre précédent, il s'agissait de déformations relativement grandes (de l'ordre de 10^{-2}). En conséquence, les franges ont très peu d'influence car leur amplitude était négligeable par rapport au mesurande lorsqu'elles étaient présentes. Cependant il apparait que ce n'est plus le cas dans le présent chapitre parce que les franges sont supérieures au mesurande (*cf* Fig. 4.5a).
À la date de réalisation des essais de gel-dégel, les solutions pour éviter les franges parasites sur les images des grilles n'étaient pas encore établies. Après une discussion avec Johan Hoefnagels qui est professeur à Technische Universiteit Eindhoven, une astuce qui consistait à tourner les grilles avec un angle donné par rapport au capteur de la caméra a été testée. Un exemple du résultat obtenu est représenté sur Fig. 4.5b. Dans cet exemple, la grille a été préalablement collée parallèlement aux bords de l'échantillon, c'était donc la camera qui a été tournée par rapport à l'échantillon d'un angle de 18°. On remarque que cette solution a permis l'élimination des franges parasites dans la carte de déformations. Plus tard, Sur al. [145] ont proposé une explication de ce phénomène dont les grandes lignes sont résumées brièvement ci-dessous.
La distribution des niveaux de gris d'une grille peut être modélisée par un signal quasi-périodique continu (*cf* Équation 2.9) dont le spectre est représenté sous la forme illustrée sur Fig.4.6a. Il peut être raisonnablement supposé qu'il génère uniquement trois harmoniques. L'harmonique principale (numéro 1) correspond aux grandes tendances du signal (les traits de la grille) tandis que les fréquences plus élevées correspondent aux détails (petites oscillations très rapides représentant la forme anguleuse du signal discrétisé). En réalité le signal représentant l'image de la grille n'est pas continu mais échantillonné par le capteur de la caméra avec une fréquence de $f_e = 1$ pixel^{-1}. L'effet d'un tel échantillonnage sur le spectre consiste en une périodisation de celui-ci (*cf* Fig. 4.6b) avec une fréquence f_e. Pour remplir la condition de Nyquist, le spectre de la grille échantillonnée devrait être inclus à l'intérieur du rectangle $[-f_e/2, f_e/2] \times [-f_e/2, f_e/2]$. Ce rectangle est représenté avec un fond gris sur Fig. 4.6b. On remarque d'après Fig. 4.6b que le support du spectre correspondant à la grille droite dépasse le rectangle, ce qui signifie que les fréquences supérieures à $f_e/2 = 1/2$ pixel^{-1} ne sont pas correctement représentées. De surcroît, les spectres périodisés adjacents se superposent, induisant le phénomène du repliement de spectre, appelé aussi aliasing en traitement du signal. L'aliasing provoque des franges parasites dans les images des grilles. Celles-ci se propagent dans les cartes de phases, de déplacement et principalement de déformations. Cependant, en tournant l'image de la grille, le spectre correspondant tourne également (*cf* Fig. 4.6c) évitant ainsi la superposition des spectres périodisés adjacents.
Finalement, Sur al. [145] ont également mis en évidence, qu'en fonction de la période de discrétisation de la grille, il existe des angles de rotation optimaux qui permettent de minimiser l'aliasing. À titre d'exemple pour une discrétisation égale à 5 pixels par période de la grille, les angles 30° et 45° sont optimaux. Dans la suite de ce chapitre, les grilles collées sur la surface des échantillons sont tournées avec un angle de $30° \pm 3°$ par rapport au bord de l'échantillon.

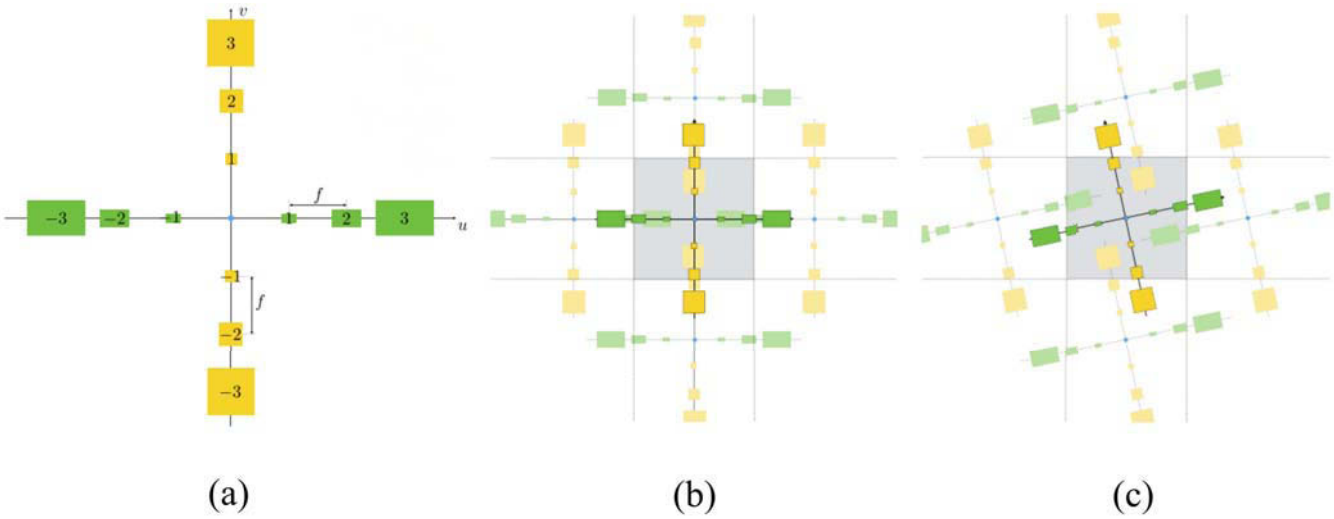


FIGURE 4.6 – (a) Illustration du spectre continu d'une grille qui est supposée générer trois harmoniques le long de chaque axe. (b) Spectre discret d'une image de grille alignée avec les pixels du capteur. (c) Même figure que (b), mais pour une grille tournée [145].

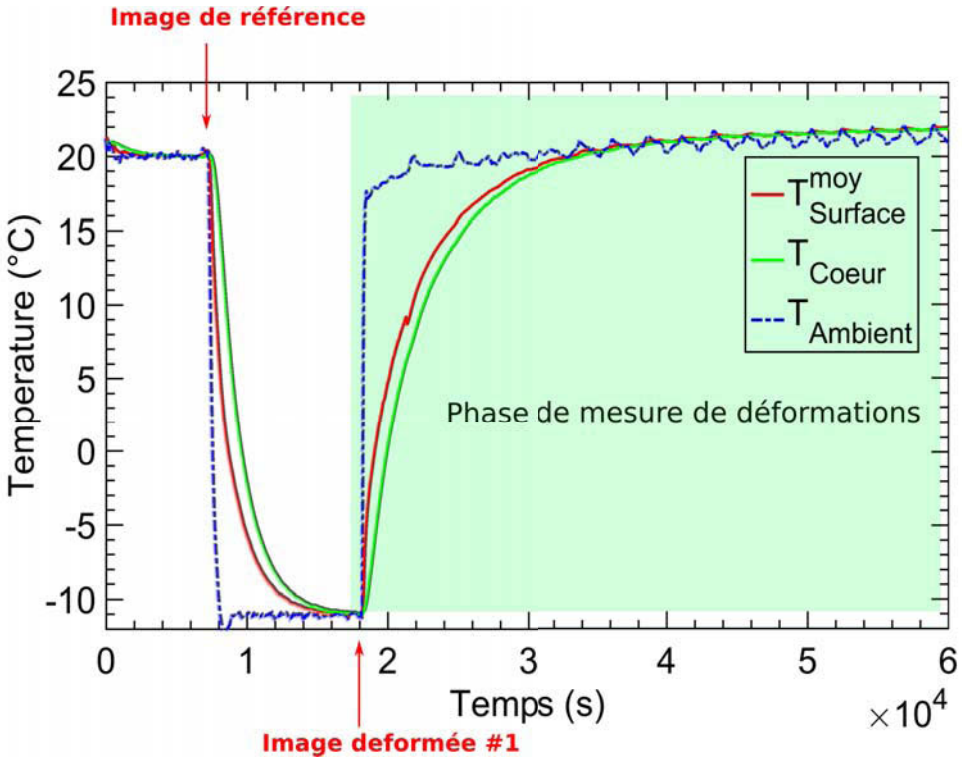


FIGURE 4.7 – Évolution typique de la température à la surface et au cœur de l'échantillon pendant un essai. Les instants de prise de l'image de référence et des images déformées sont indiqués.

4.2.3 Protocole expérimental

Suites aux conclusions tirées des essais préliminaires discutés dans les paragraphes précédents, la température de la pièce dans laquelle l'enceinte climatique a été placée a été réglée à +20°C± 0.5°C avant d'entreprendre les cycles gel-dégel. C'est à cette température ambiante que le dégel des échantillons a été effectué.
L'échantillon à tester a été d'abord placé dans l'enceinte climatique durant la nuit à +20°C pour homogénéiser sa température avant le début de l'essai. Ensuite, la porte de l'enceinte a été ouverte pour enregistrer l'image de référence (*cf* Fig.4.7). La porte a été ensuite refermée et le cycle de gel-dégel a démarré. La température finale ciblée était de -11°C. Au cours du gel, les températures à la surface et au cœur de l'échantillon ont été mesurées en continu avec les thermocouples. Le temps nécessaire à l'homogénéisation de la température sur la totalité de l'éprouvette était d'environ 3 h. Enfin, la porte de l'enceinte climatique a été ouverte et le dégivrant appliqué sur la face avant de l'échantillon. L'acquisition des images a alors été lancée. Un exemple typique de la variation de température dans l'échantillon d'enrobé est représenté sur Fig. 4.7. L'image de référence est ici considérée au début de l'essai et les images à l'état déformé commencent à la fin de la phase de gel. Les images couvrent la totalité de la phase de dégel.
La fréquence d'acquisition de la caméra a été fixée en considérant la vitesse de réchauffement de l'échantillon. La vitesse de réchauffement de l'échantillon est à son tour proportionnel au taux de dilatation de l'échantillon. En effet, la fréquence d'acquisition de la caméra dépend de la taille du capteur CCD, du nombre d'images n choisi pour effectuer la moyenne temporelle et de la taille de la mémoire disponible dans la caméra. Comme il a été évoqué dans le chapitre précédent, la réalisation de la moyenne temporelle réduit l'impact du bruit du capteur sur les cartes de déformation. Compte tenu du compromis à trouver entre le bruit dans les cartes et la résolution temporelle de la caméra, il a été décidé d'opter pour une fréquence d'acquisition variable pendant la phase de dégel. Au cours des 5 premières minutes, le nombre n était égal à 4 images, ce qui correspond à une fréquence d'acquisition de la caméra égale à 1,83 (image/seconde)$^{-1}$. Pour t$\in$ $[5\ min, 60\ min]$, la fréquence d'acquisition était égale à 15 (image/seconde)$^{-1}$ ($n = 32$ images). Enfin, pour t>60 min, la fréquence était égale à 58,7 (image/seconde)$^{-1}$ ($n = 128$ images).
Ces images ont été traitées après le test pour obtenir les champs de déplacement et de déformation à la surface de l'échantillon.

4.2.4 Méthodes de mesures des champs

Comme cela a été discuté dans le deuxième chapitre bibliographique, la CIN est la méthode la plus utilisée pour mesurer les champs de déplacement et déformations dans les enrobés. Les principaux atouts de cette méthode sont sa polyvalence, sa flexibilité et sa facilité d'application car elle ne nécessite qu'un mouchetis aléatoire de niveaux des gris comme marquage de surface, alors que MG nécessite un marquage régulier plus délicat à déposer. Étant donné que la CIN et la MG sont à la fois disponibles et utilisées dans le laboratoire, nous avons profité des essais qui mobilisent des petites déformations pour comparer les deux techniques. Comparer objectivement les deux méthodes de mesure de champs est une tâche conséquente en tant que telle et qui est hors de portée de la présente thèse. Ainsi, la com-

paraison effectuée ci-dessous est sommaire et ses conclusions ne concernent que les essais réalisés dans ce chapitre.

CIN ou MG pour mesurer les champs de déformation hétérogènes dans l'enrobé ?

L'échantillon 100% AE a été utilisé pour effectuer la comparaison des résultats des deux méthodes. D'abord, l'éprouvette a été équipée d'une grille et puis elle a subi le cycle gel-dégel décrit sur Fig. 4.7. La méthode de la grille a été utilisée pour traiter les images des grilles acquises lors du premier test. Un programme interne développé sous MATLAB® a été utilisé à cet effet [136]. Dans un deuxième temps, la grille a ensuite été enlevée et un mouchetis a été pulvérisé sur la surface de l'échantillon. Un autre cycle de gel-dégel a ensuite été appliqué. Un logiciel libre de la CIN-2D Ncorr a été utilisé pour déduire les champs de déplacement et de déformation à partir des images de mouchetis [146]. Afin d'avoir une comparaison aussi pertinente que possible, une attention particulière a été accordée pour avoir le même protocole expérimental dans les deux cas (champ de vision de la caméra, fréquence d'acquisition et temps d'exposition). En particulier, l'éclairage a été réglé de telle sorte que toute la dynamique du capteur soit utilisée. Dans la littérature, seule une norme générale concernant la comparaison des méthodes optiques est disponible [147], et il n'existe pas de guides détaillés aidant l'utilisateur à effectuer une telle comparaison de manière objective [133]. Ainsi, il a été décidé, de choisir la même résolution spatiale dans les deux cas, et ensuite de comparer le niveau de bruit dans les cartes de déformation fournies par les deux méthodes [133]. La résolution spatiale reflète la distance entre deux mesures indépendantes. Les valeurs des paramètres utilisés pour l'analyse de la CIN sont : Subset Size (SS)=20 pixels, Step (ST)=5 pixels et Strain Window (SW)=4 pixels, ce qui représente des paramètres standards pour la CIN (voir également le paragraphe 2.4.1). Une comparaison basée sur l'emploi de réglage « habituels » pour ces techniques a été conduite ici par souci de facilité. Le lecteur intéressé par une comparaison plus fouillée est invité à consulter la référence [133]. Une estimation de la résolution spatiale peut être calculée pour la CIN à partir de ces paramètres, en utilisant la formule de calcul de la résolution spatiale proposée dans [148] : (SW-1)×ST+SS=35 pixels. Une fenêtre gaussienne d'écart type égal à 5 pixels a été utilisée ici pour traiter les images de la grille, ce qui correspond à 30 pixels de résolution spatiale selon la règle classique dite de 3σ. Les cartes de déformation issues de la MG sont calculées en chaque pixel alors que celles issues de la CIN sont calculées chaque 5 pixels. Afin d'avoir le même mode de représentation, un filtre médian de taille 5×5 pixel^2 a été appliqué sur les cartes issues de la méthode de la grille. La carte finale a subi un sous-échantillonnage en affichant une valeur de déformation tous les 5 pixels. La résolution spatiale de la MG peut être estimée dans ce cas à 30+5=35 pixels. Une définition plus élaborée de la résolution spatiale est proposée dans [133], mais elle n'est pas utilisée ici pour des raisons de simplicité. Les Figs. 4.8a-d montrent ε_{xx} et ε_{yy} typiques à $T = -6$°C. Les remarques suivantes peuvent être tirées de ces cartes :

— il est clair que les deux techniques sont capables de capturer les champs de déformation hétérogènes qui ont lieu sur la surface de l'échantillon d'enrobés. En outre, il peut être visualisé que les résultats locaux de la MG et la CIN sont globalement en accord. Cette constatation valide l'hypothèse selon laquelle la couche adhésive utilisée pour déposer la grille n'a pas d'influence observable sur le comportement de l'échantillon. Il confirme également la fiabilité du protocole expérimental ;

— à résolution spatiale semblable, il est clair à l'œil nu que les champs de déformation fournis par la CIN (Fig. 4.8c-d) sont plus bruités que ceux issus de la MG (Fig. 4.8c-d). Ceci est en accord avec la conclusion donnée dans [133] ;

— pour des paramètres standards de la CIN choisis dans l'exemple actuel, le déplacement déduit n'est pas calculé en chaque pixel mais avec un pas égal à ST=5 pixels. La réalisation du calcul à chaque pixel avec la CIN nécessitait des ressources informatiques importantes (18 min par image), ce qui la rend moins pratique pour les essais lents avec un grand nombre d'images (comme c'est le cas dans la présente étude), alors que la méthode de la grille fournit rapidement (12 secondes par image) des cartes définies au pixel.

Comme nous nous intéressons à la mesure des valeurs de déformation assez faibles, et comme des gradients de déformation importants se produisent dans l'échantillon, il peut être conclu que la méthode de la grille est la plus appropriée pour cette expérience. Cette technique est donc utilisée dans la suite de ce chapitre.
Nous rappelons les paramètres choisis pour cette méthode : la discrétisation du signal de la grille est fixée à 5 pixels par la période de grille et l'écart type de l'enveloppe Gaussienne a été augmenté à 10 pixels. Cette augmentation permettra de diminuer le bruit du capteur de la caméra, mais au détriment de la résolution spatiale dont la valeur dans ce cas s'élèvera à 60 pixels selon la définition simple proposée plus haut. Les grilles ont été tournées avec un angle de $30° \pm 3°$ par rapport au bord de l'échantillon pour éviter l'aliasing.

4.3 Analyse globale

Les champs de déplacement déduits à partir des images des grilles permettent la mesure de la dilatation/contraction thermique globale des différents mélanges en fonction de la température. La dilatation moyenne des échantillons a été mesurée en calculant le rapport entre la moyenne de la différence entre le déplacement collecté le long de deux colonnes (respectivement lignes) de pixels dans la direction x (respectivement direction y) et la distance initiale entre ces lignes (respectivement colonnes). Ce rapport a été calculé sur une région carrée située au centre de l'échantillon. Sa taille est de 900×900 pixel^2. Cela correspond à une jauge de déformation virtuelle carrée de 3,6 cm de côté. La mesure de déformation selon les directions verticale et horizontale a révélé une anisotropie dans le comportement des échantillons. Ce résultat est illustré sur les Figs. 4.9 et 4.10, où les déformations isotropes ($\varepsilon^\circ = (\varepsilon_{xx}^{moy} + \varepsilon_{yy}^{moy})/2$) et les déformations déviatoriques ($\varepsilon^D = (\varepsilon_{xx}^{moy} - \varepsilon_{yy}^{moy})/2$) sont tracées en fonction de la température de surface. Ces courbes correspondent aux déformations des éprouvettes par rapport à l'image de référence prise à $T = +20°\text{C}$. Il est à noter que la déformation de cisaillement moyenne dans l'éprouvette est nulle. Les déformations ε^D et ε° sont calculées dans le plan (x, y). La valeur de déformation déviatorique est prononcée à basse température et diminue graduellement à mesure que la température augmente. Il est à noter que peu d'études soulignent le comportement anisotrope des échantillons cylindriques d'enrobé. La raison est probablement que la mesure de la déformation est souvent effectuée uniquement selon la direction verticale. Le comportement anisotrope est certainement dû au compactage des échantillons le long de la direction verticale. Cette procédure induit une

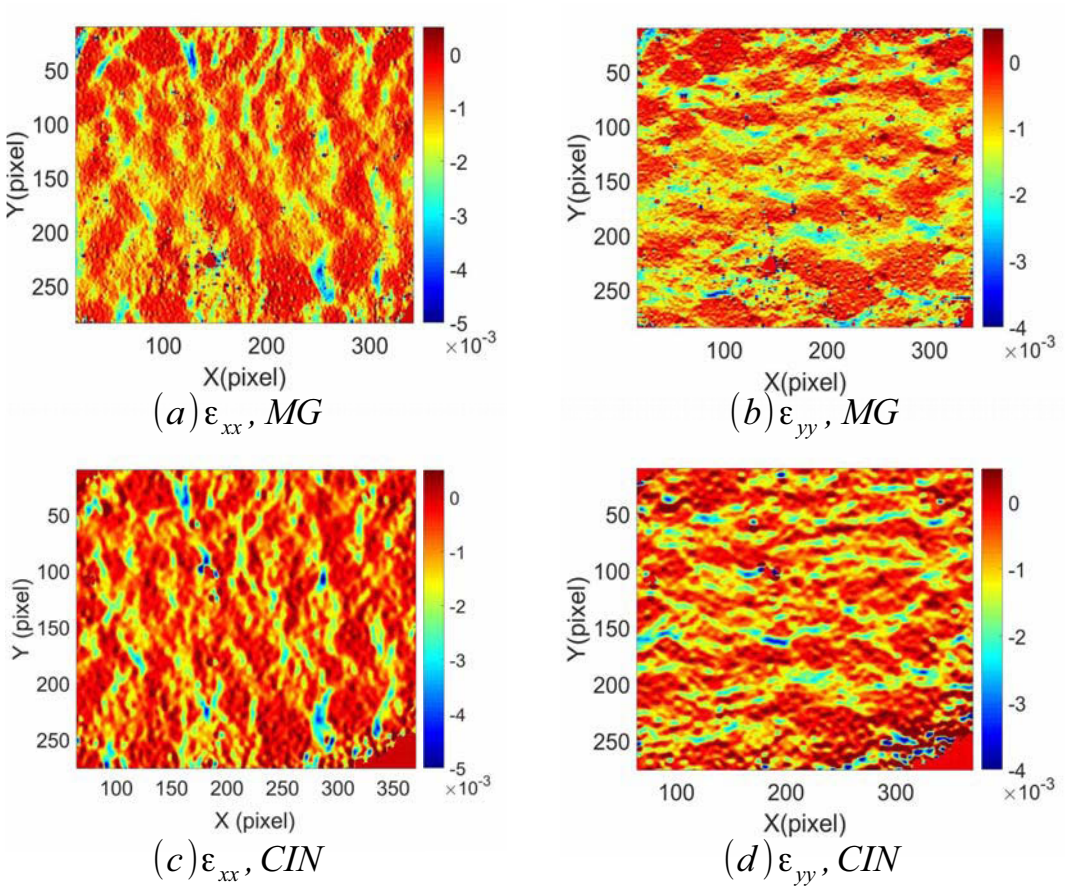


FIGURE 4.8 – Comparaison entre les cartes de déformations obtenues à partir de la CIN et MG pour l'échantillon 100% AE à $T = -6$°C.

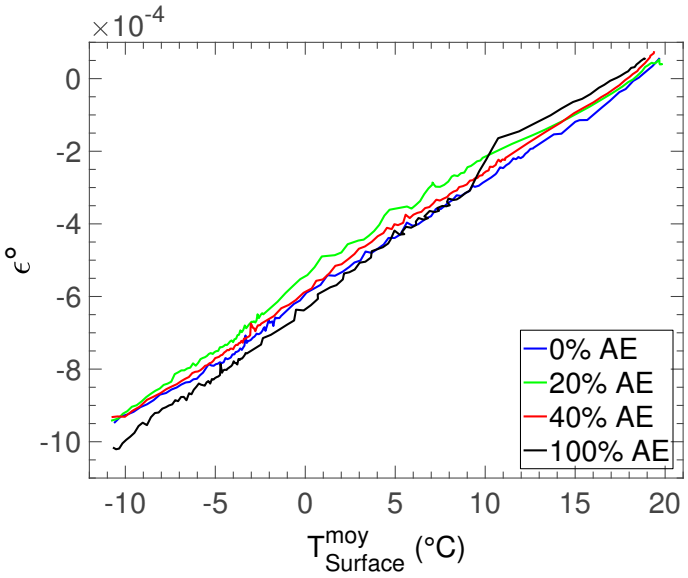


FIGURE 4.9 – Déformation isotrope moyenne (déformation moyenne) en fonction de la température.

certaine anisotropie qui dépend de la distribution des particules et des vides, ainsi que de leur orientation. Di Benedetto et Neifar [149] ont rapporté une différence allant jusqu'à 50 % entre les coefficients de contraction radial et axial des échantillons cylindriques (cité dans Olard [150]). Islam et Tarefder [151] ont signalé une différence de 4,7% entre les deux coefficients. Dans la présente étude, la différence la plus élevée a été obtenue pour l'échantillon 20% AE où le rapport $\varepsilon^D/\varepsilon^\circ$ est d'environ 11% à -10°C. Pour les échantillons 100% AE, 20% AE et 0% AE, le coefficient de dilatation-contraction thermique (CTE/CTC) le plus grand est observé suivant la direction x, alors que pour l'échantillon 40% AE, le coefficient le plus grand est suivant la direction y (*cf* Fig. 4.10). Il convient de noter que plusieurs cycles de gel-dégel ont été effectués sur la dernière éprouvette pour confirmer cette observation.

À partir de la Fig. 4.9, il peut être constaté que les courbes sont quasi-linéaires, ce qui suggère que le CTE des échantillons peut être considéré comme constant dans cette plage de température. Les valeurs du CTE/CTC mesurées à partir des pentes de ces courbes sont rapportées dans le tableau Tab. 4.1. Le CTC est calculé à partir de l'image initiale à +20°C (image de référence) et l'image à la fin de la phase de gel (image déformée Nº 1). Ceci est bien évidemment sous l'hypothèse d'un CTC constant dans la plage de température considérée dans cette étude. Pour les échantillons 0% AE, 20% AE et 40% AE, le CTE/CTC sont du même ordre de grandeur. Il est difficile de détecter l'effet des agrégats sur le CTE/CTC puisqu'un seul échantillon de chaque composition a été testé. Cependant, on peut observer que le CTE/CTC de l'échantillon 100% AE est sensiblement plus élevé que celui des autres mélanges. Artamendi et al. [152] ont suggéré que le CTC augmente au fur et à mesure que la classe du bitume diminue, ce qui peut être induit par l'incorporation des agrégats dans le cas présent. Akentuna et al. [33] ont rapporté que le mélange contenant les agrégats d'enrobé présente une accumulation de contraintes thermiques plus élevées car ils contiennent du liant d'agrégats d'enrobé qui est plus rigide. L'augmentation de l'accumulation de contraintes

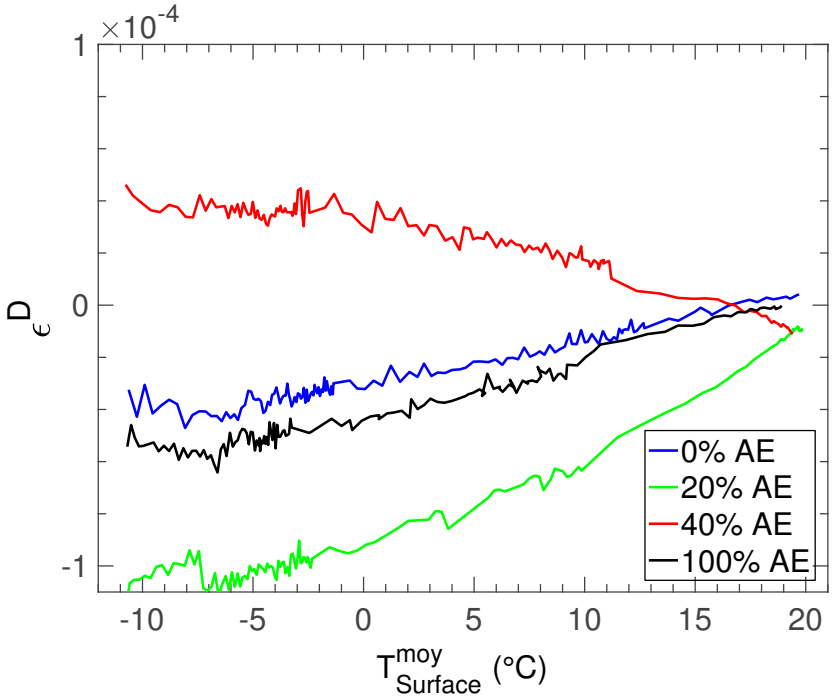


FIGURE 4.10 – Déformation déviatorique moyenne en fonction de la température.

thermique peut être corrélée avec l'augmentation de la valeur CTE/CTC et la rigidité du mélange. Cependant, il existe d'autres facteurs qui influencent d'une manière significative le CTE/CTC, comme le pourcentage de liant et les propriétés des granulats. Dans la plupart des minéraux, les granulats de calcaire utilisés dans le mélange 0% AE présentent la valeur CTE/CTC la plus faible (environ 6 $\times 10^{-6}$/°C) [153].
Généralement, il est considéré que sous chargement thermique, le mélange présentant le CTE/CTC le plus faible est celui qui affiche la meilleure réponse thermique. Ces coefficients représentent le taux d'accumulation de déformations/contraintes thermiques dans le matériau ainsi que la capacité de ce matériau à relaxer cette accumulation de contrainte avant d'atteindre la rupture. Ainsi, à rigidité égale, un faible CTE/CTC reflète un faible pourcentage d'accumulation de déformations/contraintes thermiques et par conséquent un faible potentiel de fissuration [30].

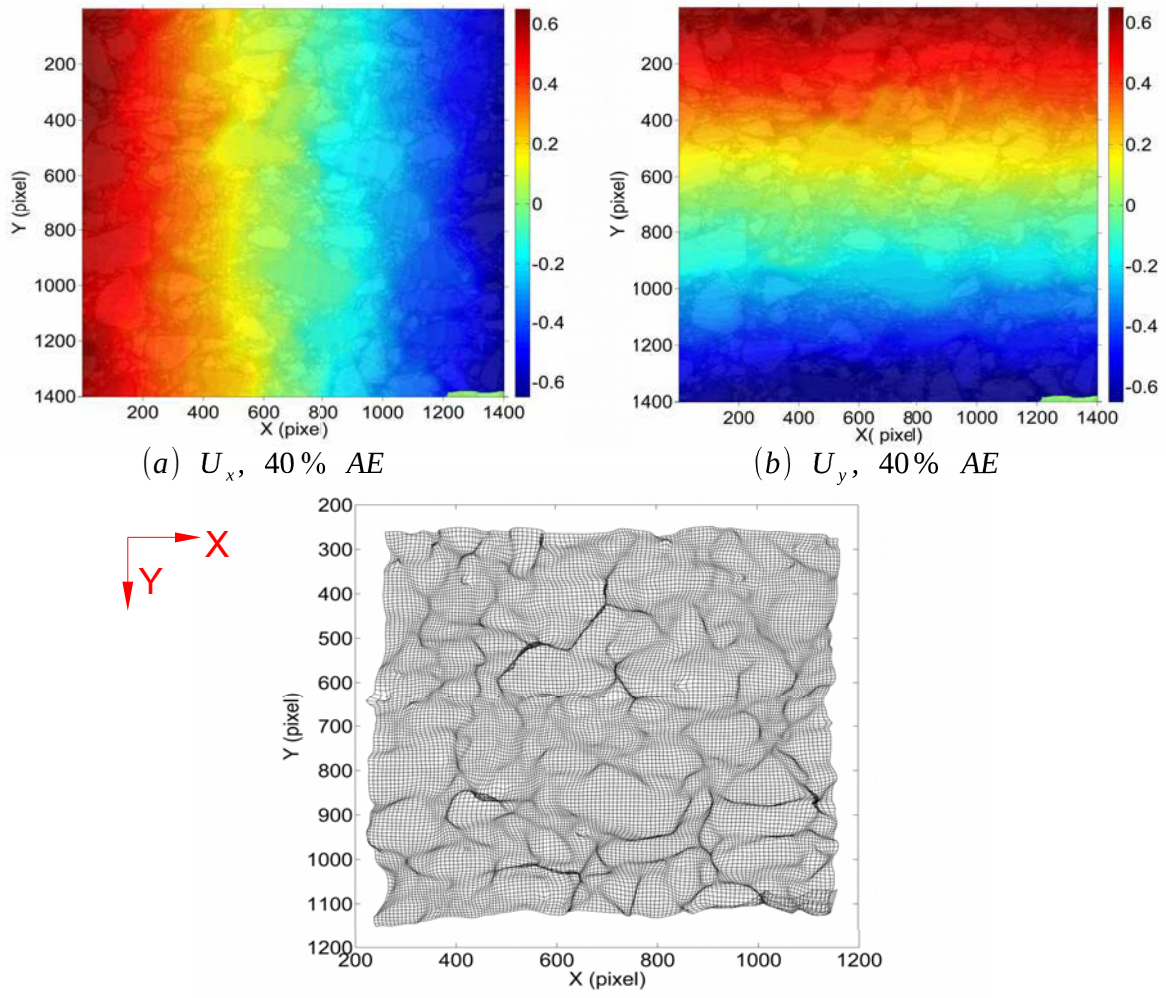
4.4 Réponse à l'échelle des constituants

4.4.1 Champs de déplacement

Les champs de déplacements typiques obtenus par la méthode de la grille à $T = -10$°C sont représentés sur Fig. 4.11. Ces déplacements correspondent à une différence de température égale à $\Delta T = -30$°C (*cf* Fig. 4.7). Les champs considérés correspondent à l'échantillon 40% AE, qui est sélectionné ici comme un exemple représentatif de tous les mélanges étu-

TABLE 4.1 – Coefficients de dilatation-contraction linéique (CTE/CTC) pour tous les échantillons dans l'intervalle de température de -10°C à 20°C.

Désignation du mélange	CTC (10^{-6}/°C)			CTE (10^{-6}/°C)		
	α_{cx}	α_{cy}	α_c^{Mean}	α_{dx}	α_{dy}	α_d^{Mean}
0% AE	32,2	29,3	30,8	34,8	31,6	33,2
20% AE	32,6	27,2	29,9	36,1	29,5	32,8
40% AE	29,8	32,6	31,2	32,3	35,5	33,8
100% AE	36	31,9	33,9	39	35	37



(a) U_x, 40 % AE (b) U_y, 40 % AE

(c) Maillage deformé

FIGURE 4.11 – Champs de déplacements typiques pour l'échantillon 40% AE à $T = -10$°C (en pixels, 1 pixel = 40μm). (a) et (b) représentent les champs de déplacement suivant x et y dans la configuration de référence. Le champ de déplacement est superposé à la microstructure de l'échantillon. (c) illustre le champ de déplacement représenté comme un maillage déformé amplifié (amplification = 350, pas = 10 pixels).

diés. Dans cette figure, l'effet du mouvement du solide rigide dû à la fois à la rotation et au déplacement de l'échantillon a été éliminé. Ces déplacements sont principalement induits par la contraction du support sur lequel repose l'échantillon. Le déplacement a été corrigé en soustrayant d'abord à chaque pixel la valeur du déplacement moyen. Ensuite, le mouvement généré par la rotation globale de l'échantillon a été supprimé.
Les champs de déplacement présentés sur Fig. 4.9a et b illustrent clairement la contraction de l'échantillon selon les directions verticale et horizontale. À partir de ces résultats, il est clair que l'échantillon se contracte vers son centre. La région du déplacement maximal dans les deux sens est située aux bords de l'échantillon et sa valeur est une fraction de pixel (environ 0,7 pixel= 28μm). À partir de ces cartes, des irrégularités évidentes dans les champs de déplacement sont visibles. Celles-ci sont en particulier accentuées à l'interface entre les gros granulats et le liant. Elles sont dues à l'augmentation soudaine du déplacement dans le liant tandis que le gradient de déplacement dans les granulats est relativement faible.
Enfin, une autre représentation des champs de déplacement est proposée dans Fig. 4.11c. Sur cette figure, les champs de déplacement sont utilisés pour déformer un maillage régulier pour aider le lecteur à percevoir la déformation de l'échantillon. Le pas du maillage est égal à 10 pixels et le déplacement a été multiplié par 350 pour donner un aspect plus réaliste de la déformation de l'échantillon. La contraction globale de l'échantillon vers son centre est clairement visible. Cette contraction est principalement portée par le liant.

4.4.2 Champs de déformation

Les champs de déformation typiques obtenus pour les quatre échantillons à -10°C sont présentés sur Fig. 4.12. La même échelle de couleur est utilisée pour les déformations dans une direction donnée. Les déformations mesurées sont le résultat d'une différence de température égale à $\Delta T = -30$°C. Les composants de déformation ε_{xx}, ε_{yy} et ε_{xy} sont présentés pour chaque échantillon. La microstructure des échantillons est superposée à ces cartes afin de mettre en évidence le rapport entre la déformation dans l'enrobé et la distribution des granulats.
Les cartes ε_{xx} et ε_{yy} représentent la contraction globale de l'échantillon selon les directions x et y, respectivement. À partir de ces cartes, on peut observer que les champs de déformation sont très hétérogènes et que la forme de la plupart des granulats peut être distinguée puisque leur niveau de déformation est inférieur par rapport à celui du liant. Ce résultat est dû à l'énorme différence entre le CTE/CTC du liant et des granulats. Ainsi, le liant tend à se contracter d'une manière plus significative que les granulats pendant le refroidissement thermique.
Il est important de souligner que la réponse du liant rapportée ici dépend de la capacité de réorganisation du squelette granulaire car ce dernier interfère avec la contraction physique du liant (effet de structure). À cause de cette interaction, le liant à l'intérieur de la structure d'enrobé présente un comportement anisotrope. Ce phénomène est visible en observant que les déformations horizontales (respectivement verticales) dans le liant sont réparties selon des bandes verticales (respectivement horizontales).
Pour inspecter cet phénomène en détail, le tenseur de déformation est décomposé en une déformation hydrostatique ($\varepsilon^\circ = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2)$) et une déformation déviatorique ($\varepsilon_1^D = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2$), où ε_1 et ε_2 sont les déformations principales. La déformation déviatorique est expri-

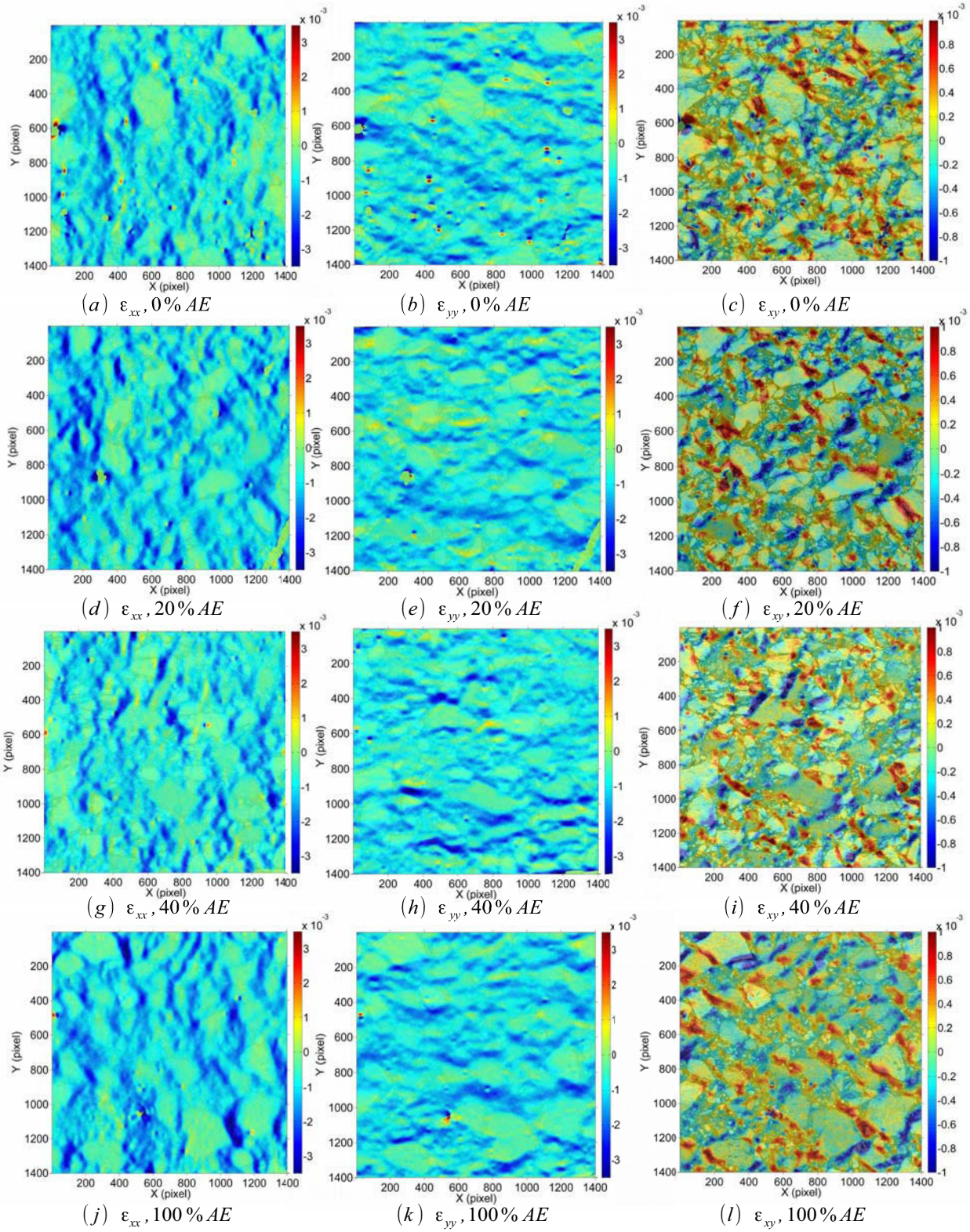


FIGURE 4.12 – Champs de déformation typiques pour chacun des échantillons testés à $T = -10$°C (1 pixel= 40μm). Les cartes de déformation sont superposées sur la microstructure de l'échantillon.

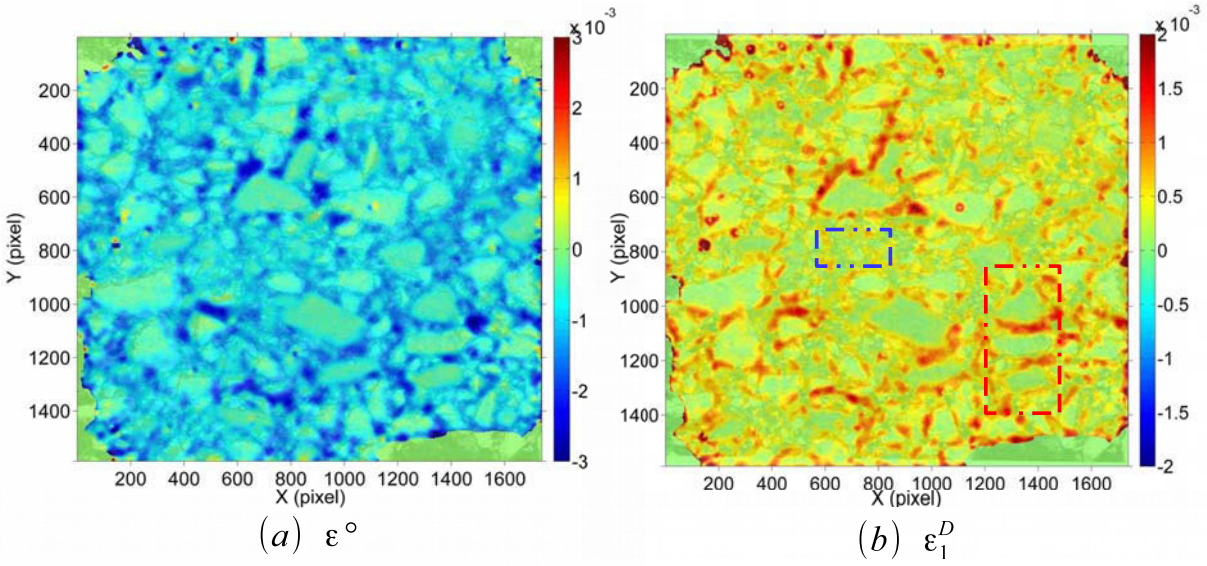


FIGURE 4.13 – Exemple de la déformation (a) isotrope et (b) déviatoriques pour l'échantillon 40% AE à $T = -10$°C. Les déformations sont superposées sur la microstructure de l'échantillon.

mée dans la base principale. L'idée consiste ici à identifier les régions où le comportement du liant s'éloigne le plus de celui d'un matériau isotrope. Les cartes relatives à l'échantillon 40% AE sont présentées sur Fig. 4.13. Sur ces cartes, il est clairement visible que le champ de déformation déviatorique est nul dans les granulats, ce qui signifie qu'il présente un comportement isotrope. Ceci est tout à fait logique, car leur comportement ne devrait pas être perturbé par l'interaction avec le liant en raison de la différence significative de la rigidité entre ces deux constituants. Cependant, une concentration de déformation déviatorique est clairement visible à l'interface entre les granulats et le liant (un exemple d'une telle région est encadré dans avec un rectangle rouge sur Fig. 4.13b). Cette déformation s'annule dans les régions situées loin des gros granulats (un exemple de la région correspondante est encadré dans un rectangle bleu sur Fig. 4.13b). Ce résultat est dû au fait que le liant autour des granulats est influencé par :

— le mouvement des granulats suite à la contraction globale de l'échantillon ;

— la contraction thermique différentielle des constituants d'enrobés (granulats et liant).

Loin des bords des granulats, le comportement du liant est presque isotrope. L'interaction entre les composants d'enrobé est discutée en détails dans le paragraphe suivant.

4.5 Interaction entre granulats et liant

L'objectif de ce paragraphe est de décrire les mécanismes observés expérimentalement qui régissent l'interaction des constituants d'enrobé (granulat et liant), ceci en utilisant les résultats fournis par la méthode de la grille. Les déformations principales sont considérées à cet effet (*cf* Fig. 4.14). Seuls les résultats relatifs à l'échantillon 40% AE sont présentés

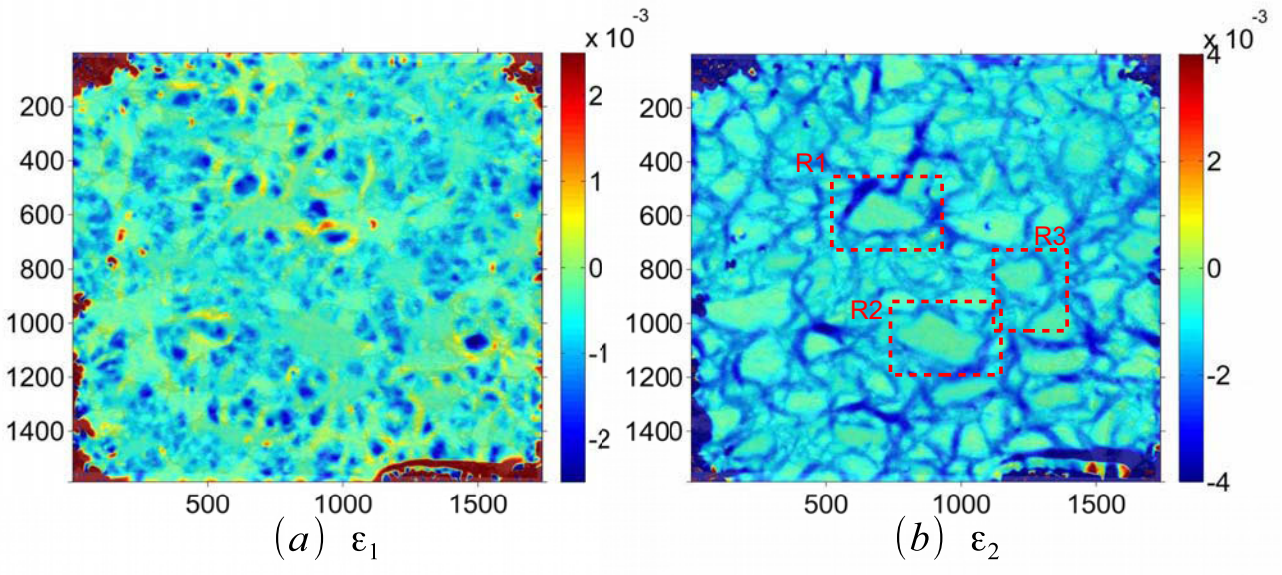


FIGURE 4.14 – (a) Déformation principale majeure et (b) déformation principale mineure pour l'échantillon 40% AE à $T = -10°C$. Les cartes de déformation sont superposées sur la microstructure de l'éprouvette.

car les mêmes remarques peuvent être formulées pour les autres échantillons. Les résultats indiquent que la déformation principale ε_1 présente une structure complexe. En particulier, on peut observer que les zones définies par $\varepsilon_1 \approx 0$ forment une sorte de réseau qui traverse les granulats via leurs points de contact. Ce phénomène peut être mieux visualisé en gardant uniquement les pixels caractérisés par $\varepsilon_1 > -5 \times 10^{-4}$. La carte correspondante est présentée sur Fig. 4.15. On peut voir à partir de cette figure que le squelette granulaire est interconnecté avec cette déformation. Ce réseau est similaire à la chaîne de force qui caractérise la répartition des contraintes dans les matériaux granulaires [154]. Nous pensons que ce schéma complexe est dû aux effets mécaniques exercés par le squelette granulaire pour s'opposer à la contraction de l'échantillon.

La deuxième déformation principale est négative. Cela signifie qu'une contraction se produit systématiquement. Les cartes précédentes sont complétées avec l'orientation des directions principales sous forme les lignes superposées aux cartes ε_1 et ε_2 dans Fig. 4.16. Par souci de visibilité, seuls des agrandissements de trois régions dénotées R1-R3 sont présentés. Leurs emplacements sont présentés dans la Fig. 4.14b. La longueur des lignes est proportionnelle à l'amplitude des déformations principales. La déformation principale majeure est tracée en noir et la mineure en rouge. L'orientation de chaque ligne correspond à l'orientation de la direction principale correspondante. Une observation intéressante est que la déformation principale majeure ε_1 est toujours le long d'une direction qui est tangente aux bords des granulats et la déformation principale mineure ε_2 est selon une direction perpendiculaire aux bords des granulats et orientée vers leur centre. Cette zone d'influence qui est observée autour de chaque granulat peut être le résultat d'une incompatibilité thermique des constituants de l'enrobé induite par la significative différence de CTE/CTC entre les granulats et le liant. En effet, au fur et à mesure que la température du composite granulat-liant diminue, le

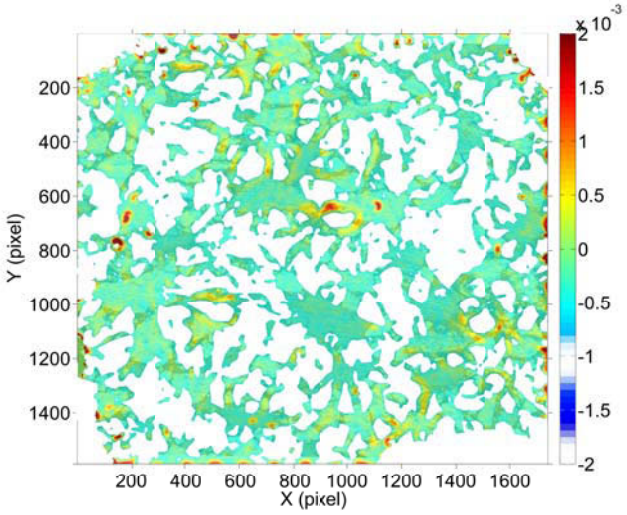


FIGURE 4.15 – Déformation principale majeure pour des pixels où $\varepsilon_1 > -0.0005$.

CTC du liant étant plus élevé que celui des granulats, le liant tend à se contracter plus que les granulats. Cependant, la contraction physique du liant est empêchée par la rigidité des granulats. Par conséquent, le liant applique une contrainte de compression radiale sur les bords des granulats. Cette pression induit une déformation de compression radiale (ε_2) observée sur les figures précédentes.
Enfin, on peut conclure que la décomposition de la déformation dans la base principale s'est révélée efficace pour mettre en évidence les conséquences de la différence des propriétés thermo-volumétriques entre le liant et les granulats.

4.6 Coefficient de contraction thermique du liant

L'objectif de ce paragraphe est d'estimer la répartition du coefficient apparent de contraction thermique noté α dans le liant pour chaque échantillon [155]. Ce coefficient est estimé pendant la phase de refroidissement. Il est obtenu en divisant les cartes de déformations mesurées à $T = -10°C$ (*cf* Fig. 4.12) par la différence de température $\Delta T = -30°C$. Cette estimation est faite sous l'hypothèse que α est constant dans la plage de température considérée dans cette étude. La Fig. 4.17 montre la répartition de ce coefficient selon les directions x et y (dénotés respectivement α_y et α_y) pour l'échantillon 40% AE. La différence entre α_x et α_y en même point indique la réponse anisotrope du liant. De plus, il est possible d'observer que le coefficient au milieu des granulats est globalement situé autour de $10{\times}10^{-6}/°C$. Cette valeur est supérieure à celle rapportée dans la littérature pour ce type de granulats ($0,9 - 12 \times 10^{-6}/°C$ pour le calcaire et $3,7 - 9,7 \times 10^{-6}/°C$ pour le basalt [153]). À ces faibles niveaux de déformation, la légère contraction hors-plan des granulats peut cependant induire une contraction fictive qui est superposée à la contraction réelle des granulats. Cela peut conduire à une surestimation de la valeur de déformation mesurée dans les granulats.

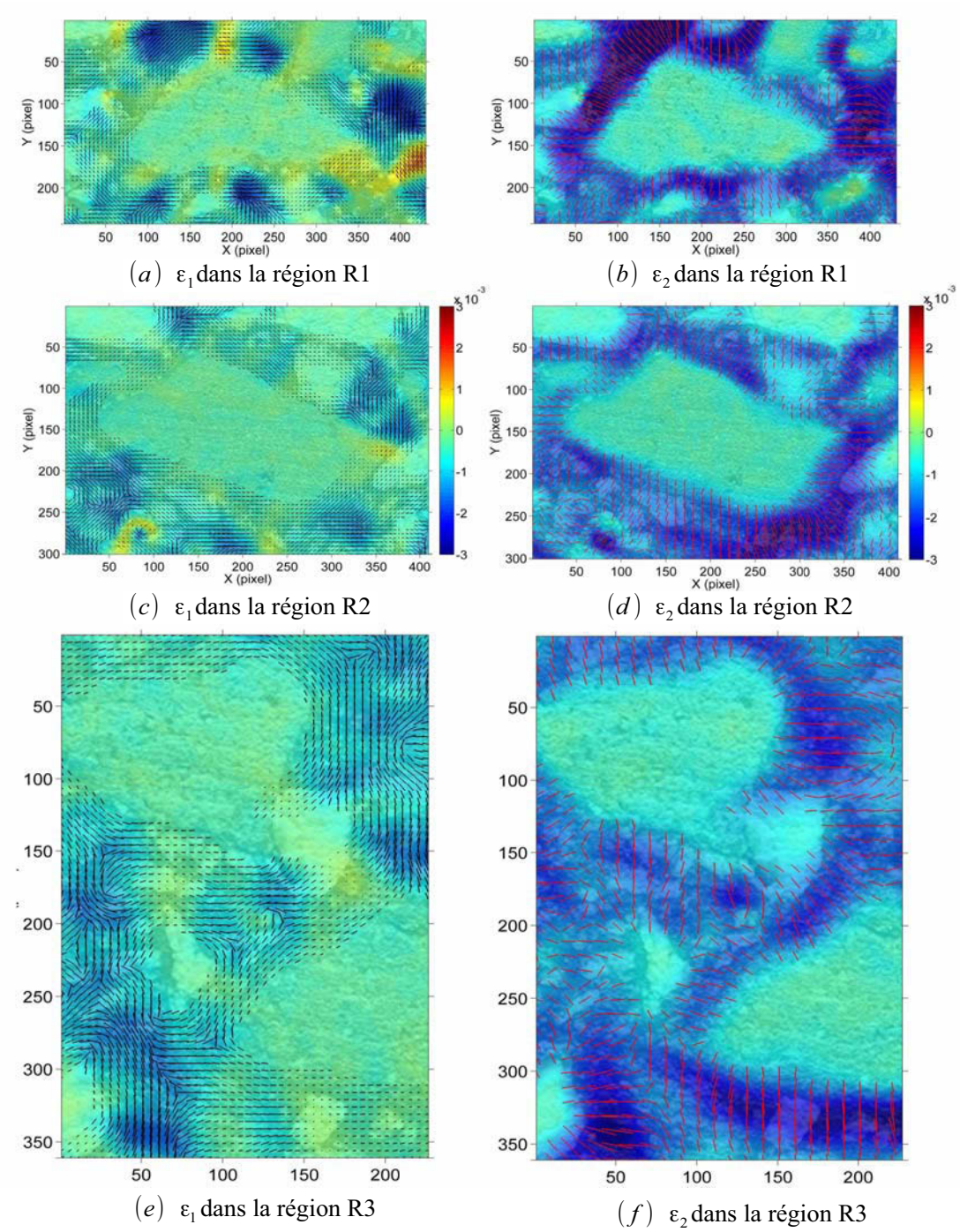


FIGURE 4.16 – Déformations principales (a, c, e) majeures et (b, d, f) mineures dans les régions R1-R3. L'orientation de la base principale de déformation est tracée sous forme de lignes.

La distribution de α dans le liant est non-uniforme (*cf* Fig. 4.17). En particulier, certaines régions de concentration sont clairement visibles pour le paramètre α suivant les deux directions. Ceci s'explique principalement par le fait que le liant n'est pas entièrement libre de se contracter, sa contraction physique étant limitée par les granulats. D'où l'existence des bandes du liant qui sont plus ou moins chargées sur la surface de l'échantillon. Ainsi, en fonction du type des granulats et de leur organisation, le même liant pourrait avoir un comportement local différent d'un échantillon à l'autre. Marasteanu et al. [28] a montré que le CTE/CTC moyen du mélange est étroitement lié à la structure interne des granulats (par exemple, le nombre des points de contact et la longueur de contact). Par conséquent, le paramètre thermo-volumétrique mesuré ici est appelé le « CTC apparent » car il dépend de la distribution du squelette granulaire et de sa connectivité (c'est-à-dire le nombre de points de contact entre les granulats). Les histogrammes de la distribution de α^{moy} ($\alpha^{moy} = (\alpha_x + \alpha_y)/2$) pour chaque échantillon sont tracés sur Fig. 4.18 pour comparer la distribution de α. Les données correspondant aux granulats ont été enlevés de ces histogrammes. En outre, certains pixels sont caractérisés par une concentration élevée de α^{moy}. Ces pixels sont principalement visibles dans les zones correspondant aux vides d'air et ont été également enlevés des histogrammes. Dans le cas présent, les vides sont pontés par la couche adhésive utilisée pour déposer la grille. En conséquence la contribution de ces pixels n'a pas été prise en compte dans les histogrammes.
On peut voir que les histogrammes correspondant à l'inclusion de 20% et 100% d'AE, sont décalés vers la droite par rapport à celui de l'échantillon 0% AE. Cela signifie que ces échantillons présentent une valeur supérieure de α^{moy}. L'augmentation de α^{moy} est particulièrement prononcée pour l'échantillon de 100% AE. Cependant, l'inclusion de 40% AE entraîne un léger décalage de l'histogramme correspondant vers la gauche (vers des valeurs plus petites). Cela peut être dû au fait que cet échantillon présente une quantité plus élevée de vides qui n'ont pas été considéré dans les histogrammes (voir le tableau Tab. 3.1). En effet, les vides d'air peuvent contribuer à la relaxation de la déformation dans le liant en accommodant le mouvement des granulats voisins. Ce phénomène est susceptible d'augmenter la capacité du mélange à relâcher l'accumulation de déformation dans le liant.
La valeur moyenne et l'écart-type de la distribution α^{moy} dans le liant sont rapportés dans le tableau Tab. 4.2. Comme mentionné ci-dessus, les valeurs de déformations thermiques mesurées sont contrôlées par le squelette granulaire, ce qui affecte d'une manière significative la déformation thermique dans le liant. Généralement, le mastic seul montre une valeur de CTC comprise entre $80\times10^{-6}/°C$ et $210\times10^{-6}/°C$ [41]. Il est donc clair en comparant les valeurs mesurées ici et celle rapportées dans [41] que l'effet structure induit une réduction de la capacité du liant à se contracter. Une grande partie de la déformation thermique dans le liant est donc restreinte. La différence entre la valeur rapportée pour le CTC et celle mesurée dans le liant est un indicateur de la quantité d'accumulation de déformation dans ce dernier.

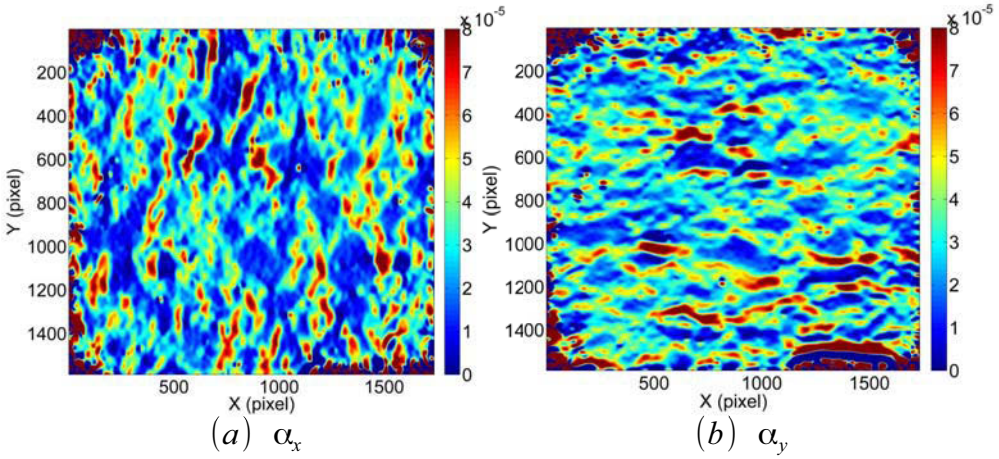


FIGURE 4.17 – La distribution du CTC dans l'échantillon 40% AE (en m/m°C). (a) α_x et (b) α_y

TABLE 4.2 – Moyenne et l'écart type relatif à la distribution de α^{moy} dans le liant.

Désignation	α^{moy} (10^{-6}/°C)	Écart type (10^{-6})
0% AE	37	15
20% AE	37	14
40% AE	35	11
100% AE	40	12

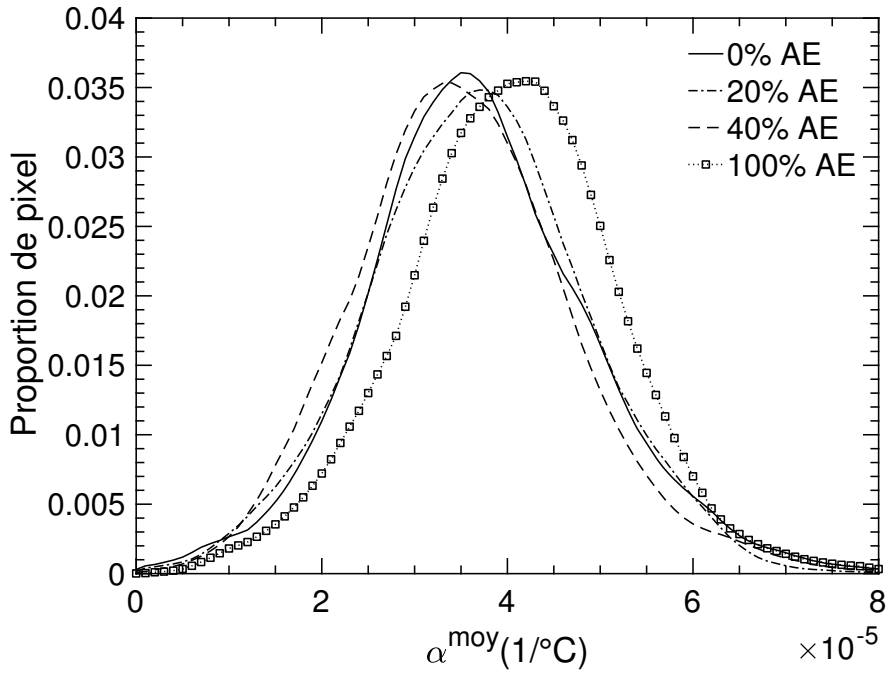


FIGURE 4.18 – Histogramme de la distribution de α^{moy} pour tous les échantillons

4.7 Cycle gel-dégel supplémentaire sous condition saturée

L'objectif de ce paragraphe est de présenter quelques résultats supplémentaires concernant un cycle de gel-dégel effectué sur une éprouvette d'enrobé saturée en eau par le Cerema. Cet essai est censé fournir des informations sur l'effet de la présence d'eau dans les pores du matériau. L'échantillon 40% AE a été utilisé à cet effet, car il présente le pourcentage de vides le plus élevé à savoir 12,7%. L'eau a été introduite à l'aide d'une méthode d'immersion à l'eau et de saturation sous vide. L'échantillon a d'abord été placé dans un récipient sous vide qui a ensuite été soumis à une dépression d'environ 98 kPa sous la pression atmosphérique pendant une heure (*cf* Fig.4.19). Ensuite, le récipient a été rempli d'eau, toujours sous vide, et l'échantillon a été maintenu à l'intérieur pendant une heure. Enfin, l'échantillon a été pesé pour mesurer la quantité de liquide qui a pénétré à l'intérieur et ainsi déterminer le degré de saturation. Il convient de noter que la saturation et les essais sont effectués dans deux laboratoires différents pour des raisons d'implantation des techniques mobilisées, à savoir le Cerema et l'IP. Après la saturation, l'échantillon est donc emballé dans un sac rempli d'eau puis transporté pour l'essai. La durée cumulée de transport et d'installation de l'échantillon est d'environ 25 min. Il était difficile de conserver l'eau à l'intérieur de l'échantillon pendant le transport et au cours de l'installation de celui-ci pour l'essai. Des fuites d'eau ont été notées pendant la phase de gel de l'essai. Au total, 3 cycles de gel-dégel ont été effectués sur cet échantillon et l'échantillon a été ré-saturé entre chaque cycle. Mais en raison de la fuite d'eau, seuls les résultats relatifs au dernier cycle sont exploitables. Avant l'installation de l'échantillon, le degré de saturation était d'environ 45%. Due à toutes ces incertitudes concernant l'évolution du degré de saturation de l'éprouvette, les résultats présentés par la suite sont uniquement qualitatifs.

L'évolution typique de la température de surface et au cœur de l'éprouvette est représentée sur Fig. 4.20. Cette courbe se distingue par deux points d'inflexion qui sont associé au changement d'état de l'eau contenue dans les pores de l'échantillon. Le premier point est associé à la formation de la glace (phase de gel) et le deuxième à la fusion de la glace (phase de dégel). Ces points sont plus marqués pour la courbe correspondant à la température au cœur de l'échantillon (T_{Coeur}). Cela résulte principalement de la différence de niveau de saturation et de la pression du liquide se trouvant à la surface et au cœur de l'échantillon.

La phase de solidification du liquide s'accompagne d'une légère augmentation de la température. En effet, la formation de glace s'effectue à une température et pression constantes et l'énergie libérée se transforme en chaleur (chaleur latente de fusion), causant une augmentation de la température à la surface et au cœur de l'échantillon [156]. Par ailleurs, lors de la phase de dégel, la fusion de la glace s'effectue d'une manière plus progressive, il est alors difficile de distinguer les variations de température associées au changement d'état de l'eau à partir de l'évolution des températures mesurées sur une éprouvette [156].

L'expansion globale de l'échantillon selon les directions verticales et horizontales pendant la phase de dégel est présentée sur la Fig. 4.21. La déformation a été calculée en utilisant la procédure illustrée dans le paragraphe 4.3. La principale différence avec la réponse de l'échantillon testé à l'état sec est que les courbes révèlent dans le cas présent une contraction de la surface de l'échantillon causée par la fusion de la glace (voir les points 1 et 2 sur la Fig. 4.21).

Cette contraction est plus accentuée suivant la direction y. Pour observer la localisation de cette contraction, deux points ont été choisis (1 et 2 dans la Fig. 4.21) et la différence de déformation isotrope entre ces deux points a été calculée en utilisant l'équation Eq (4.1), suivante :

$$\varepsilon_M = (\varepsilon_{xx2} + \varepsilon_{yy2})/2 - (\varepsilon_{xx1} + \varepsilon_{yy1})/2 \tag{4.1}$$

L'utilisation de la déformation isotrope moyenne permet de réduire le bruit et de visualiser la contraction dans les deux directions sur une seule carte. La carte correspondante est illustrée sur la Fig. 4.22. On peut constater clairement à partir de cette figure que la contraction due à la fusion de la glace est principalement concentrée au centre de l'échantillon alors que l'échantillon se dilate à proximité des bords. Ceci résulte principalement de la fuite d'eau de la surface de l'éprouvette. Par conséquent la contraction est principalement supportée par la quantité d'eau restant confinée au cœur de l'éprouvette. La phase où la contraction se produit (causée par la fusion de la glace) est indiquée sur Fig. 4.22. À partir de cette figure, il peut être conclu que la contraction se produit à la fois dans les vides et dans certaines zones du mastic. Cela pourrait indiquer qu'une fissure s'est initiée dans le mastic à l'intérieur duquel l'eau s'est infiltrée pendant la saturation. La fissure, si elle existe, n'est cependant pas visible sur les images de grille, sans doute à cause du pontage réalisé par la fine couche de colle.

FIGURE 4.19 – Saturation de l'éprouvette.

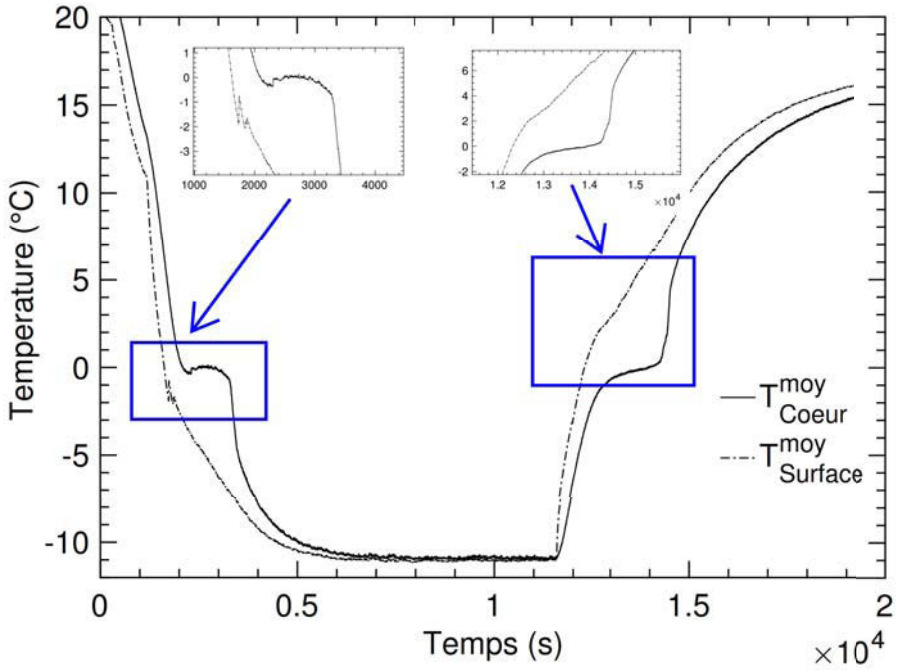


FIGURE 4.20 – Évolution typique de la température à la surface et au cœur de l'échantillon avec des agrandissements montrant les températures lors du changement de phase du liquide ou du solide.

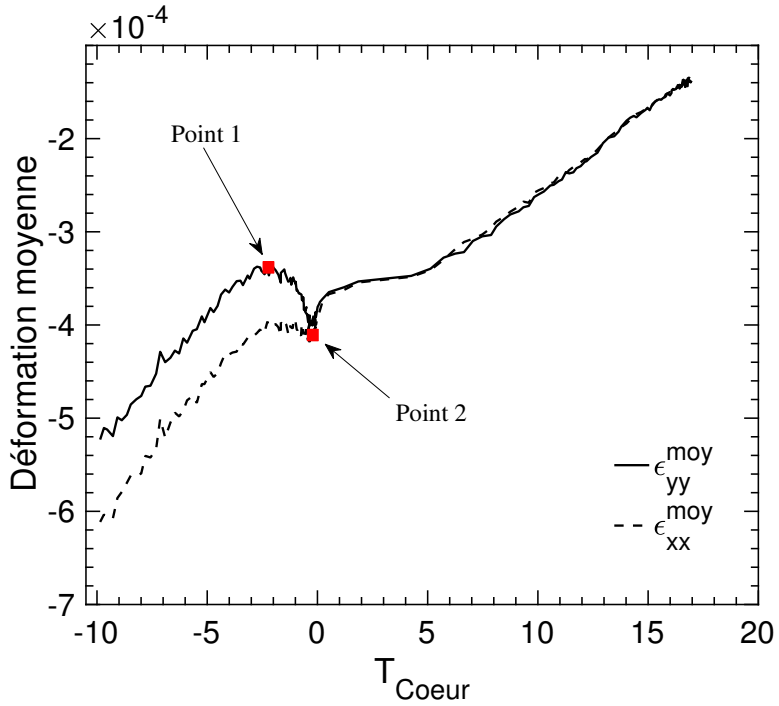


FIGURE 4.21 – Expansion globale de l'échantillon 40% AE suivant les directions verticale et horizontale.

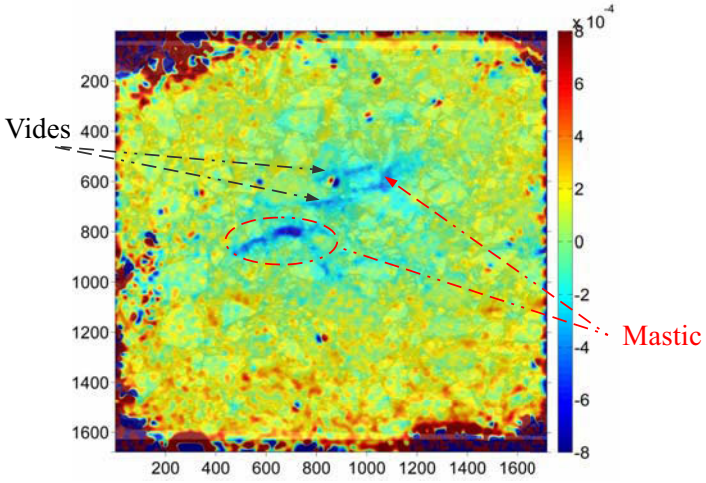


FIGURE 4.22 – Carte de différence de déformation avant et après la fusion de la glace dans les pores du matériau (ε_M). La contraction due à la fusion de la glace est principalement concentrée au centre de la surface d'étude.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, des essais de gel-dégel ont été effectués sur plusieurs enrobés contenant différents pourcentages d'agrégats d'enrobé (0%, 20%, 40% et 100%). Des essais de gel-dégel ont été effectués dans l'intervalle de température de -11°C à 20°C. Ces essais constituent un nouveau champ d'application pour les méthodes de mesure de champs. Toutefois, plusieurs adaptations spécifiques innovantes et la mise en œuvre de plusieurs solutions dédiées ont dû être introduites afin d'obtenir des résultats fiables et exploitables.
À travers une série d'essais de faisabilité, les principales difficultés associées à l'application des techniques des mesures de champs à ce type d'essais ont été identifiées et un certain nombre de solutions pratiques ont été proposées. La dilatation/contraction thermique des échantillons d'enrobé a été mesurée en utilisant à la fois la CIN et la MG. Après avoir comparé les résultats provenant de ces deux techniques, la méthode de la grille a été jugée plus apte pour pousser l'investigation de la déformation thermique à l'échelle locale. La réponse thermique a été observée à des échelles spatiales allant de celle du liant jusqu'à l'échelle globale.
À l'échelle globale, les échantillons cylindriques ont affiché une anisotropie selon les directions verticale et horizontale. Celle-ci a été associée au compactage des échantillons le long de la direction verticale. La comparaison des courbes de dilatation globale en fonction de la température a montré que l'échantillon 100% AE est caractérisé par un CTE/CTC élevé par rapport aux autres mélanges. L'effet de l'incorporation des agrégats sur les réponses thermiques des éprouvettes avec 20% et 40% d'agrégats n'était pas aussi claire.
L'analyse locale a montré que les champs de déformation dans les échantillons étaient très hétérogènes en raison de différence de propriétés thermo-volumétriques entre les granulats et le mastic. Il a également été observé que la réponse thermique locale du mastic est apparemment anisotrope en raison de son interaction avec les granulats. En outre, l'interaction entre les composants d'enrobé (granulats et mastic) pendant le refroidissement thermique a été caractérisée expérimentalement.
La distribution du coefficient de contraction thermique apparent dans le mastic pour tous les échantillons a été aussi quantifiée. Ce coefficient est nettement plus élevé pour l'échantillon 100% AE que pour les autres échantillons. La comparaison de la valeur moyenne de ce coefficient dans la structure de l'enrobé avec celle rapportée dans la littérature pour le mastic tout seul a suggéré qu'en réalité la contraction du mastic est fortement restreinte par le squelette granulaire.
Un cycle de gel-dégel additionnel a été effectué sur l'éprouvette 40% AE sous conditions saturées. Au cours de la phase de dégel, une contraction globale de l'éprouvette a été observée à 0°C. Celle-ci est due à la transformation en glace de l'eau contenue dans l'éprouvette. À l'échelle des constituants, l'examen de cette contraction a révélé qu'elle est localisée aussi bien dans les vides que dans le mastic. La dernière observation suggère l'initiation de fissures dans le mastic à l'intérieur desquelles l'eau s'est infiltrée pendant la saturation de l'éprouvette.
Enfin, cette étude ouvre la voie à une meilleure compréhension des mécanismes de déformation thermique des enrobés. Elle fournit également des renseignements précieux sur la réponse des composants d'enrobé qui pourraient ultérieurement être utilisés pour modéliser plus précisément leur réponse thermique.

Chapitre 5

Étude du comportement en traction des enrobés recyclés dans le domaine des petites déformations

5.1 Introduction

Dans le domaine des petites déformations (de l'ordre de $100\mu\varepsilon$), la réponse de l'enrobé bitumineux est modélisée comme étant viscoélastique linéaire Fig. 5.1 [20]. Le module de rigidité de l'enrobé est évalué dans ce domaine à travers des essais de laboratoire élaborés et standardisés à cet effet. Parmi les essais de mesure de rigidité figure l'essai de traction direct avec la Machine Asservie d'Essais Rhéologiques (MAER) [157]. Cet essai est largement utilisé en France et codifié par la norme NF EN 12697-26 [158]. Ainsi l'application de la Méthode de la Grille (MG) à ce type d'essai est susceptible d'apporter plus d'informations sur le comportement mécanique des enrobés d'une part et de contribuer à la vulgarisation des méthodes de mesures de champs sans contact au sein de la communauté d'enrobé d'autre part.
Comme il a été évoqué au cours des chapitres précédents, pour pouvoir capturer les gradients de déformation localisés dans le liant, des exigences élevées en termes de résolution spatiale sont nécessaires. L'estimation théorique des performances météorologiques de la MG suggère la faisabilité de mesure de déformation dans le domaine des petites déformations. Néanmoins, les perturbations qui se produisent au cours des essais réels tels que les conditions de chargement non idéales, les inévitables mouvements hors-plan (OPM [1]) et le bruit du capteur sont les principaux obstacles limitant la faisabilité des telles mesures.
L'objectif de ce chapitre est de mesurer les champs de déformations locales dans plusieurs mélanges d'enrobés lors d'un essai de module avec MAER. Une grande partie de ce chapitre est consacrée à l'identification des différentes perturbations influant les résultats de mesures et à la proposition de méthodes de compensation appropriées. Finalement, en se basant sur les résultats issus de la MG, le comportement des différents échantillons est analysé puis comparé.

1. Out-of-Plan Motions

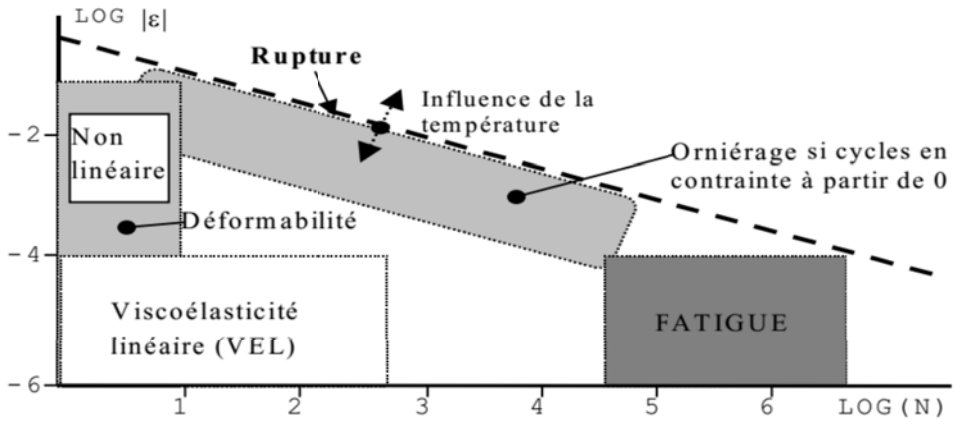


FIGURE 5.1 – Domaines de comportement des mélanges bitumineux [20].

5.1.1 Matériaux testés et préparation des échantillons

Les mélanges d'enrobés fabriqués précédemment ont été utilisés dans le présent chapitre. Nous rappelons brièvement leurs principales caractéristiques. Il s'agit de quatre mélanges d'enrobés contenant respectivement 0%, 20%, 40% et 100% d'AE. Les granulats d'apport (GA) et les granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) ont été choisis de telle sorte qu'ils présentent une différence au niveau de leur couleur afin de pouvoir les distinguer facilement après mélange. Les GAE ont été choisis d'une couleur foncée. Ils sont constitués de granite, basalte et gneiss. Les GA, quant à eux, ont été choisis d'une couleur blanche et sont composés de calcaire. Des échantillons de forme cylindrique de 80 mm de diamètre et 90 mm de hauteur ont été fabriqués. Un méplat a été élaboré en sciant les échantillons parallèlement à leurs axes. La dimension de la surface d'étude ainsi obtenue est d'environ 6,5 cm× 7cm.
La hauteur des échantillons de 90 mm n'était pas suffisante pour pouvoir les introduire dans la machine d'essai car l'écartement minimal des mors de la machine MAER est de 150 mm. En plus la norme NF EN 12697-26 [158] impose une longueur de l'échantillon entre 2 et 3 fois son diamètre. En effet, les échantillons ont été fabriqués en début de la thèse. À cette date les essais MAER n'étaient pas encore programmés. Ainsi nous avons été confrontés à deux choix :

— fabriquer des nouveaux échantillons avec une hauteur appropriée. Cette solution aurait nécessité un temps d'attente considérable (de quelques mois) à cause de l'emploi du temps chargé du technicien du Cerema responsable de la fabrication des échantillons ;

— modifier la hauteur des échantillons existants.

Nous avons décidé d'opter pour la seconde solution. La modification de la hauteur des échantillons a été effectuée en collant des extensions de part et d'autre de ceux-ci. Un exemple de l'échantillon final est illustré sur Fig. 5.2. En effet, la partie centrale de l'échantillon est constituée d'une éprouvette Duriez complète. Ensuite, une autre éprouvette Duriez a été sciée en deux parties, celles-ci ont été collées de part et d'autre de la partie centrale. Le collage a été effectué avec une colle Araldite tri-composante. Le joint de colle obtenu est assez fin pour que son impact sur la déformation de l'éprouvette puisse être négligé. La mesure de la déforma-

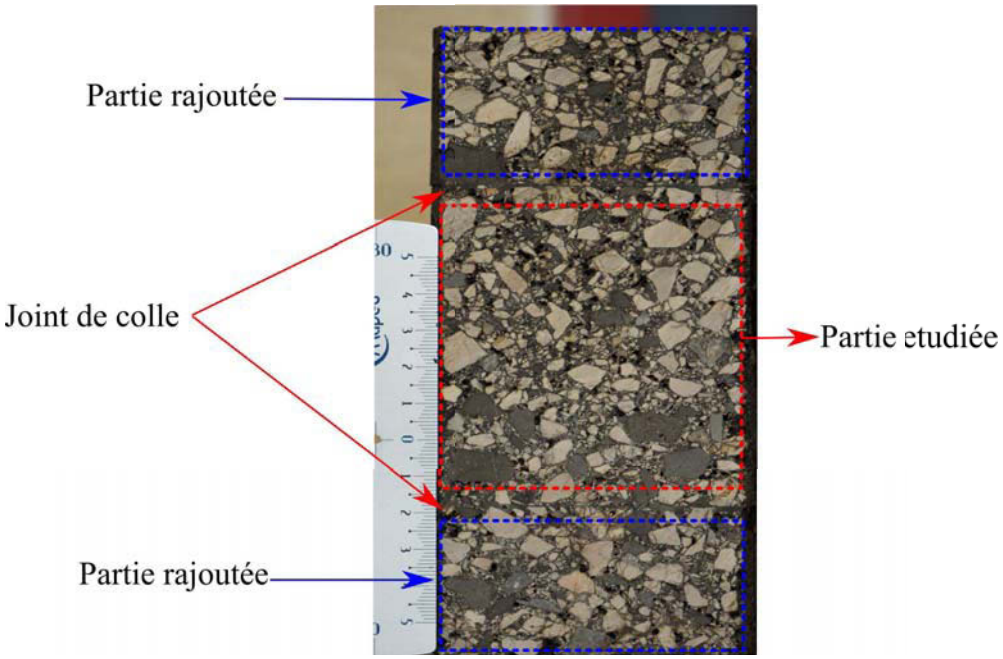


FIGURE 5.2 – Extension de la hauteur de l'échantillon.

tion de l'échantillon est effectuée uniquement dans la partie centrale. Des casques métalliques ont ensuite été collés à l'aide de la colle Araldite aux extrémités planes des échantillons (*cf* Fig. 5.3). Ces casques se vissent dans la machine de traction et permettent la transmission des sollicitations mécaniques appliquées au matériau. Le collage et le centrage des casques est effectué à l'aide d'un banc conçu à cet effet (voir Fig.5.3b-c). Au total, quatre échantillons ont été préparés et testés avec un échantillon unique pour chaque composition vu la complexité relative de ce type d'essai. Des exemples des régions d'étude pour les échantillons testés dans ce chapitre sont présentés sur Fig. 5.4.

5.1.2 Dispositif expérimental

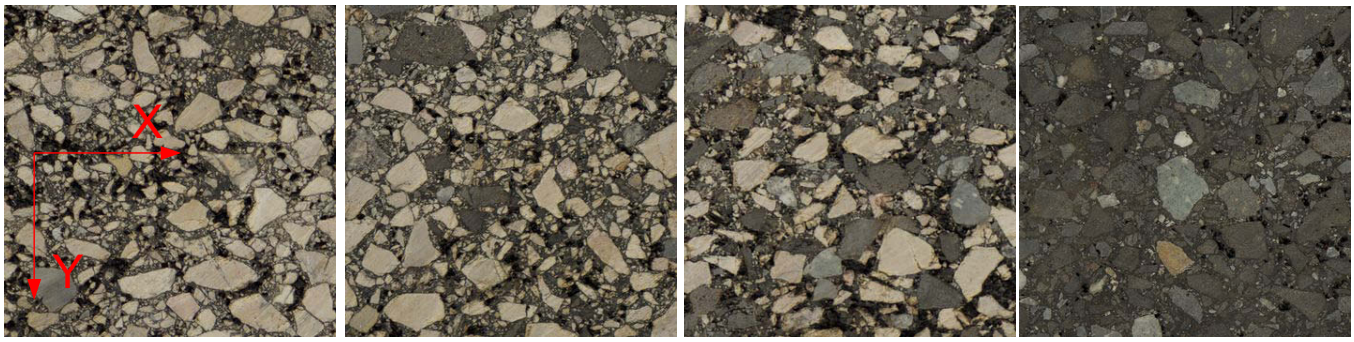
Les essais effectués dans cette étude sont des essais de traction directe. Ces essais ont été effectués à l'aide de la machine MAER équipée d'une chambre de contrôle de température (*cf* Fig. 5.5). Chaque échantillon est équipé de trois capteurs de déplacement repartis autour de celui-ci à l'aide de colliers. Les capteurs permettent de piloter en déformation le chargement de l'éprouvette. Cette machine est spécialement conçue pour déterminer les caractéristiques mécaniques de l'enrobé, en particulier le module sécant.
La déformation maximale pendant l'essai de module est fixée par la norme NF EN 12697-26 [158] et varie entre $50\mu\varepsilon$ et $300\mu\varepsilon$ en fonction de la température et de la rigidité. Cette dernière est déterminée par un essai préliminaire sous les conditions suivantes : T=10°C, amplitude de déformation de $50\mu\varepsilon$ et temps de chargement 3s et 300s. L'objectif du présent chapitre n'est pas la détermination de la rigidité en soi mais plutôt l'estimation la capacité de la MG à mesurer la déformation au cours de ce type d'essai. La valeur de la déformation maximale de l'essai a été fixée à $200\mu\varepsilon$. Les essais sont effectués à T=20°C et contrôlés en

FIGURE 5.3 – Procédure de collage des casques, (a) préparation de la colle Araldite tri-composante, (b)-(c) mise en place des casques, la colle et l'échantillon sur le banc de collage et (c) échantillon final à tester.

déformation selon une loi linéaire $\varepsilon = a_i t$ où a_i est la vitesse de déformation (*cf* Fig. 5.6). En fonction des résultats issus de ces essais, la capacité de la MG à couvrir les domaines de déformations plus faibles ($50\mu\varepsilon$ et $100\mu\varepsilon$) sera évaluée. Pour chaque échantillon, quatre temps de chargement ont été considérés à savoir : 16, 50, 100 et 200 secondes (*cf* Fig. 5.6). Entre deux temps de chargement, une période de récupération de 100 secondes est préprogrammée dans la machine, pendant laquelle celle-ci applique une charge compressive de -20 daN sur l'échantillon afin de s'assurer que les contraintes du chargement précédent se détendent.
En plus des capteurs de déplacement, la déformation de l'échantillon a été mesurée à l'aide de la MG. Ces mesures permettent de déterminer les champs de déplacement et de déformation dans la région étudiée. Les paramètres choisis pour effectuer la mesure de la déformation avec la MG sont les suivants : l'encodage de la grille est fixée à 6 pixels par période de la grille et l'écart type de l'enveloppe Gaussienne a été choisi égale à 8 pixels. La résolution spatiale peut être estimée avec la règle de 3σ et égale à 48 pixels (1,6 mm). Pour un encodage de la grille égale à p =6 pixels, l'angle optimal pour minimiser l'aliasing est d'environ 18° [145]. Ainsi les grilles ont été tournées avec un angle de $18° \pm 3°$ par rapport au bord de l'échantillon. Pour des temps de chargement de 16s et 50s, la fréquence d'acquisition était égale à 0,47 $(\text{image/seconde})^{-1}$ (pas de moyennes temporelles). Pour les temps de chargement plus lents (100s et 200s), la fréquence d'acquisition était égale à 1,83 $(\text{image/seconde})^{-1}$ (moyenne temporelle sur 4 images).

5.2 Résultats préliminaires

Avant d'analyser les champs de déplacement et de déformation fournis par la MG, il est nécessaire de vérifier leur pertinence. Dans le cas présent, la déformation macroscopique imposée par la machine MAER est connue (*cf* Fig. 5.6). Il est donc possible d'estimer la qualité des résultats de la MG en les comparant à la déformation macroscopique imposée. Cela aidera



(a) 0% AE (b) 20% AE (c) 40% AE (d) 100% AE

FIGURE 5.4 – Méplat correspondant à la région d'étude pour les différents échantillons testés dans ce chapitre.

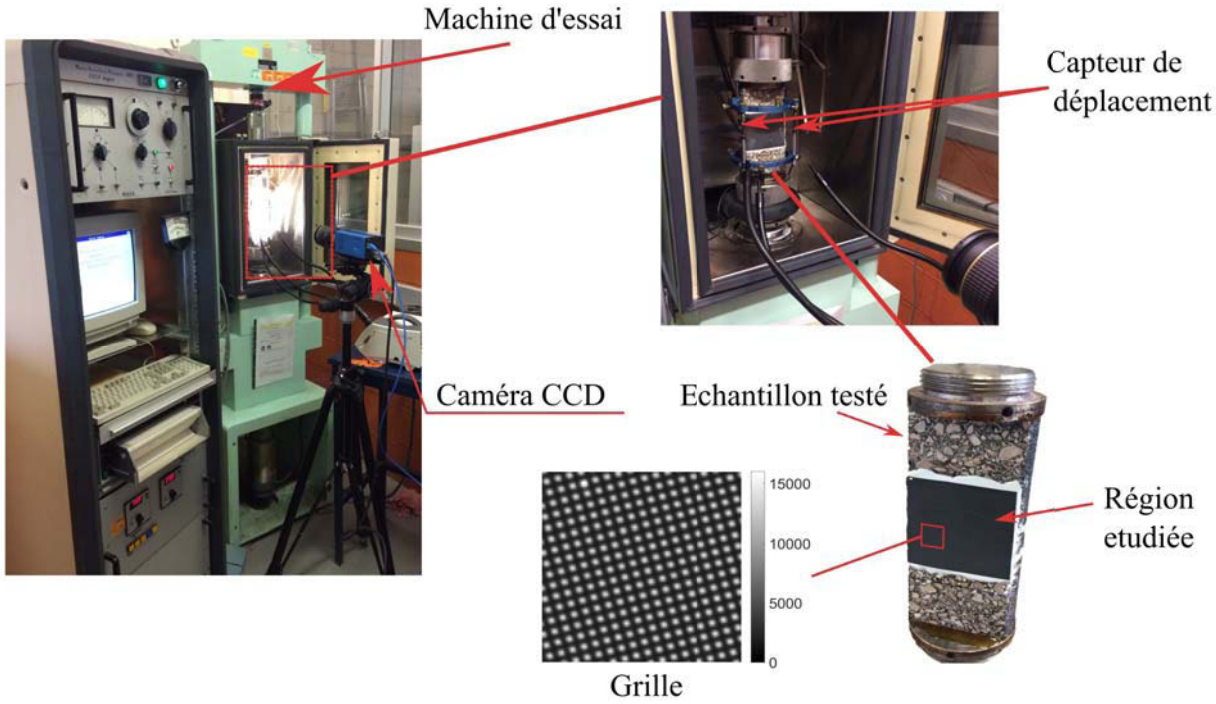


FIGURE 5.5 – Dispositif expérimental.

à comprendre les différentes perturbations susceptibles de se produire au cours de ces essais et à déterminer si les erreurs qui en résultent pourraient être séparées ou supprimées pour ne récupérer que l'information utile.
Une comparaison entre la déformation macroscopique mesurée avec les capteurs MAER et la MG pour les échantillons 0% AE et 40% AE est présentée sur les Fig. 5.7 et 5.8. La déformation verticale macroscopique mesurée en utilisant la MG correspond à la déformation moyenne sur la région d'étude (ROI) (les pixels au bord de la région d'étude ne sont pas considérés). Pour chacun des échantillons, les déformations présentées sur Fig. 5.7 et 5.8 cor-

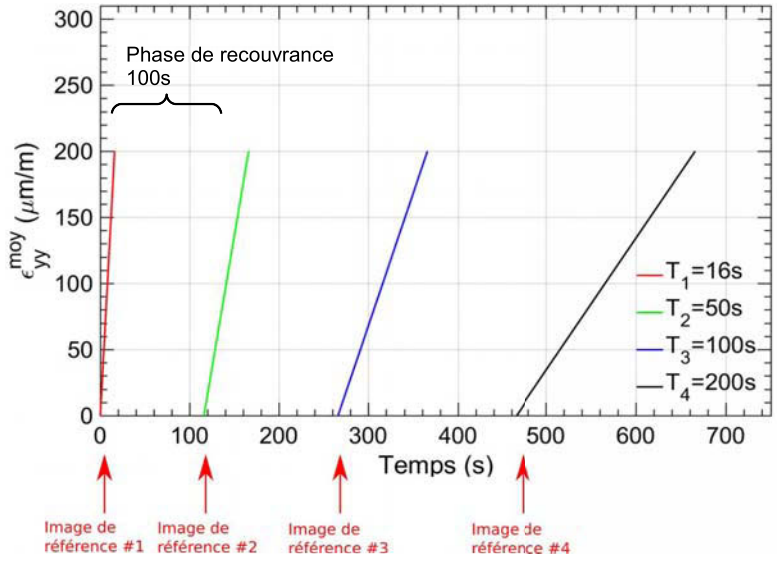


FIGURE 5.6 – Cycles de chargement (mesures MAER).

respondent à quatre temps de chargements (16, 50, 100 et 200 secondes). La déformation fournie par les capteurs MAER correspond à la valeur moyenne des trois valeurs fournis par les capteurs disposés autour de l'échantillon. Ces résultats montrent qu'une grande différence est observable entre les valeurs de déformations moyennes issues des capteurs MAER et de la MG. Ceci est particulièrement vrai après quelques instants du début de chaque test où une augmentation (ou diminution) prononcée de la déformation est observée. Ainsi, les déformations issues de la MG semblent être perturbées par les mouvements hors-plan (OPM). En outre, à ce faible niveau de déformation, les amplitudes de perturbations sont suffisamment grandes pour noyer la déformation mécanique de l'échantillon.
Pour confirmer l'apparition des OPM, les champs de déformation à la fin du premier temps de chargement (t=16s), pour les échantillons 0% AE et 40% AE sont présentés sur la Fig. 5.9. Ces cartes illustrent la localisation des déformations dans les bandes de liant. Ainsi, la microstructure de l'échantillon en termes de distribution des granulats et du liant est reconnaissable ici. Dans le cas des enrobés, la rigidité des granulats est supérieure à celle du liant, ainsi ils sont censés ne pas se déformer au cours du chargement. La déformation est donc principalement supportée par le liant. Ceci est particulièrement vrai dans le cadre d'un essai de traction, car la contrainte de traction est principalement supportée par le mastic qui sert de soudure entre les granulats. Par conséquent, la déformation observée dans les régions correspondant aux granulats n'est que « virtuelle » et résulte principalement de l'OPM. Sur la Fig. 5.9a-b, une déformation positive est observée dans les granulats suivant les directions x et y. Cela indique un déplacement de l'échantillon vers la caméra (réduction de la distance entre l'échantillon et la caméra) se traduisant par une expansion virtuelle de l'échantillon. De plus, la répartition de la déformation dans les granulats n'est pas uniforme. Ceci est la conséquence de la rotation de l'échantillon sur lui même qui induit le gauchissement de l'image entraînant un gradient dans le champ de déformation [159]. Pour l'échantillon 40% AE (*cf* Fig. 5.9c-d) un gradient de déformation négative est observé dans les granulats indiquant la rotation et l'éloignement

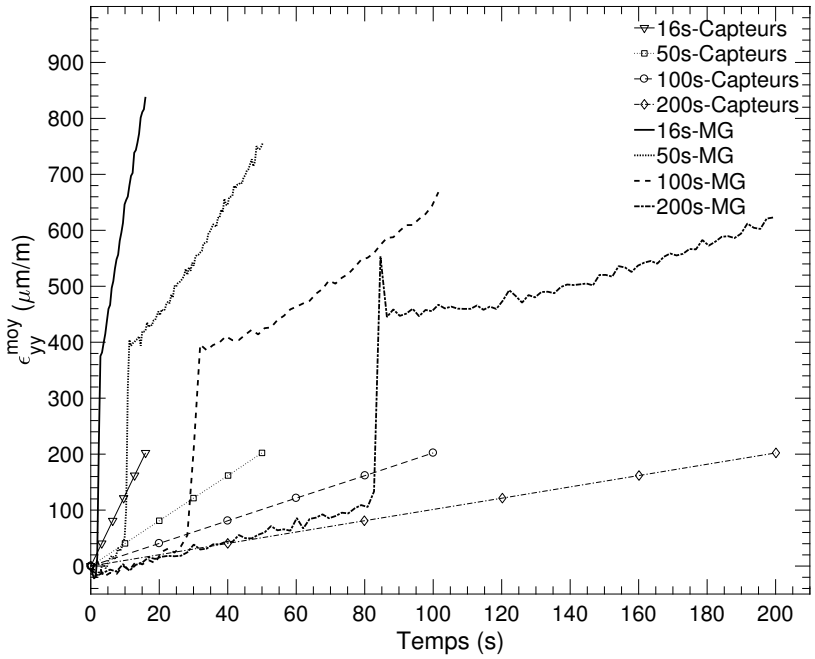


FIGURE 5.7 – Comparaison entre les déformations moyennes imposées par MAER et celles calculées avec la MG pour l'échantillon 0% AE.

de l'échantillon par rapport à la camera.
D'après ce qui précède, il est nécessaire de prévoir une compensation des OPM avant d'entamer l'exploitation des résultats des mesures locales. Dans la littérature, les effets des OPM dans le cadre de la corrélation d'image numérique 2D (CIN) ont été largement étudiés [159]. Toutefois, les méthodes de compensation de ces mouvements sont moins étudiée. Dans le paragraphe suivant nous passerons en revue les différentes méthodes disponibles dans la littérature pour corriger ou minimiser les OPM dans le cadre de systèmes de mesures de champs 2D.

5.2.1 Revue des méthodologies pour la compensation OPM

Les OPM sont une problématique majeure pour les systèmes de mesures optiques 2D [159] et qui limitent considérablement leur résolution de mesure pratique. Plusieurs auteurs se sont intéressés à comprendre l'effet des OPM sur les champs de déplacement et de déformation dans le plan [159], et des méthodes sont proposées pour les quantifier et éventuellement les compenser [160, 161].
La première étape vers la minimisation des OPM est d'assurer un positionnement perpendiculaire de la caméra à la région d'intérêt [161]. Dans le cas présent, la grille transférée sur la surface de l'échantillon et dont la période est connue a priori est utilisée pour calibrer le positionnement perpendiculaire de la caméra par rapport à la surface de l'échantillon. Pour chaque position de la caméra, une image de la grille est capturée et sa période apparente est mesurée à partir de l'image. Le changement de la période de grille mesurée à partir de l'image

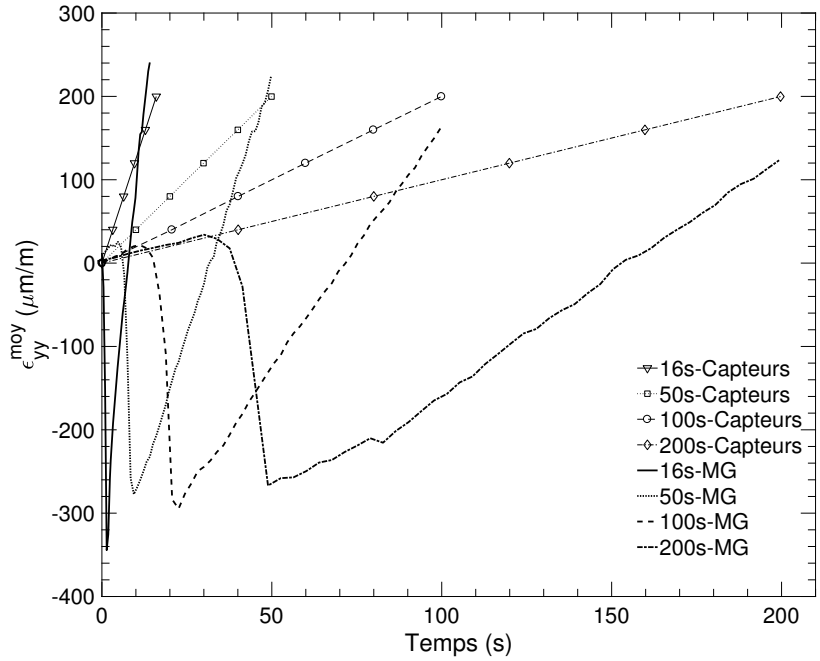


FIGURE 5.8 – Comparaison entre les déformations moyennes imposées par MAER et celles calculées avec la MG pour l'échantillon 40% AE.

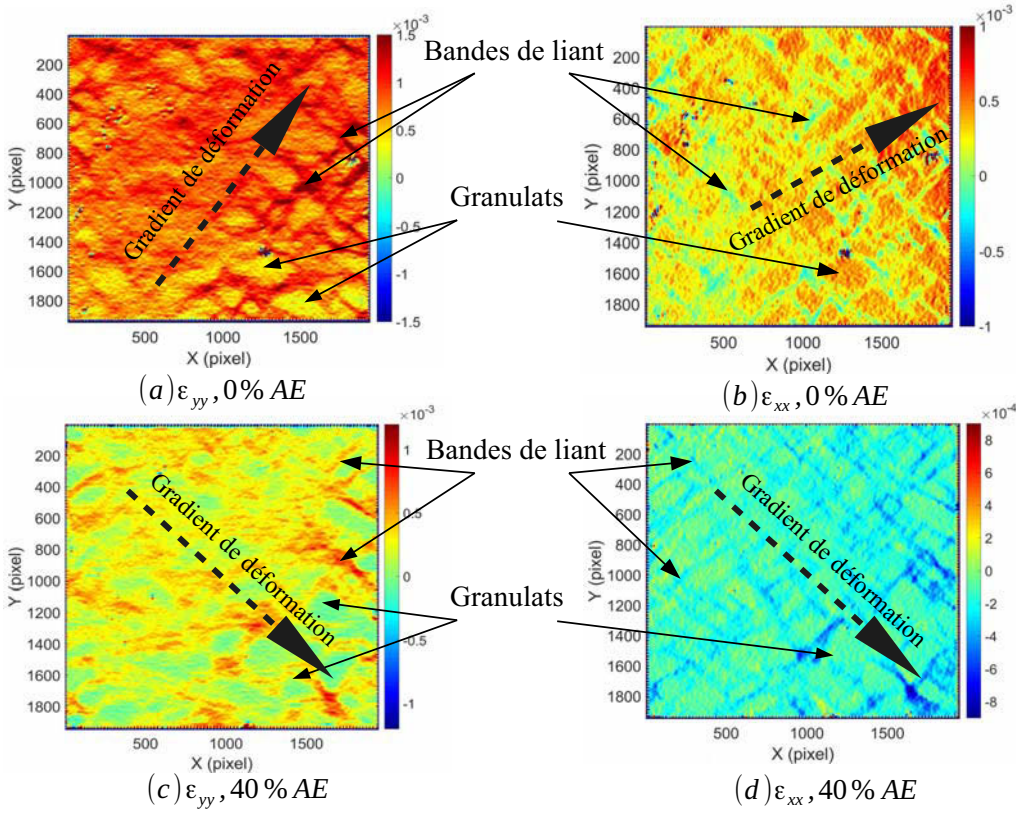


FIGURE 5.9 – Cartes de déformations pour les échantillons 0% AE et 40% AE.

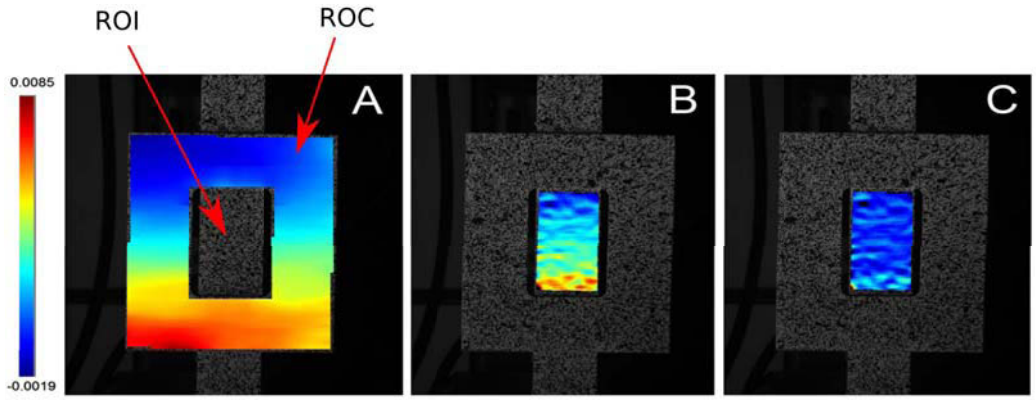


FIGURE 5.10 – Exemple d'un essai de traction sur un échantillon équipé d'une région de compensation sous forme d'un cadre. (a) Déplacement de la région de compensation, (b) déplacement de la région d'intérêt, celui-ci inclut les déplacements virtuels induit par les OPM et (c) déplacement après la compensation des OPM [161].

indique un désalignement entre le capteur de caméra et la surface étudiée. Une correction manuelle de la position de la caméra est effectuée dans ce cas et la procédure est répétée jusqu'à l'obtention d'une période de la grille homogène sur la totalité de la ROI.
La solution optimale pour compenser les OPM et obtenir une mesure précise de la déformation de la surface de l'échantillon consiste à utiliser un objectif télécentrique [160]. Cependant, ces objectifs sont plus chers que les objectifs standards. Ils manquent également de flexibilité et d'adaptabilité, car leur champ de vision est fixe et chaque essai ou échantillon nécessite un objectif télécentrique spécifique [160, 161]. Une autre méthode introduite par Pan et al. [160] consiste à corriger la déformation de l'échantillon en utilisant un échantillon de référence non déformable. En effet, l'échantillon de référence est fixé sur l'échantillon à tester de manière à ce qu'il effectue uniquement un mouvement de solide rigide et ne se déforme pas sous le chargement. Le déplacement mesuré de l'échantillon non déformable peut être modélisé et soustrait du déplacement de l'échantillon étudié. L'échantillon de référence est désigné par « Region Of Compensation » ou ROC. Un exemple d'une telle configuration est illustré sur Fig. 5.10. Il peut être remarqué qu'une ROC constituée d'un cadre est attachée sur l'échantillon à étudier (*cf* Fig. 5.10a). Une fois le déplacement du cadre est identifié, il est interpolé sur la ROI puis soustrait du déplacement de celle-ci pour compenser les OPM (*cf* Fig. 5.10b-c). L'avantage principal de cette méthode est qu'elle permet de compenser simultanément les OPM, les mouvements de solide rigide de l'échantillon et la distorsion de l'objectif. Cette méthode peut également être utilisée pour compenser une partie des erreurs induites par le système de capture d'image imparfait et instable [162].
D'autre part, les inconvénients de cette méthode sont le fait que l'échantillon étudié doit être manipulé avant l'essai pour attacher l'échantillon de référence et s'assurer également que sa surface est parfaitement alignée sur la ROI. En plus la présence de l'échantillon de référence peut influencer le comportement de l'échantillon testé. En outre, la taille du capteur de caméra utilisée devrait être suffisamment grande pour inclure la ROI et la ROC.

5.2.2 Compensation des OPM pour les enrobés bitumineux

Dans ce paragraphe, une méthode dédiée à la compensation des biais induits par les OPM pour les mélanges d'enrobé bitumineux est proposée. La méthode proposée est basée sur la méthode de ROC présentée ci-dessus. Nous exploitons ici le fait que les granulats dans les mélanges d'enrobé ne se déforment pas et effectuent uniquement des mouvements de solide rigide. Par conséquent, au lieu d'utiliser un échantillon de compensation, les granulats sont utilisés pour corriger directement les cartes de déformation. Wittevrongel et al. [161] ont proposé de modéliser le déplacement « artificiel » induit par les OPM par un polynôme du second ordre. Ce modèle est assez « riche » pour décrire correctement tous les scénarios relatifs aux effets des OPM sur les déplacements dans le plan. Les coefficients de ce polynôme intègrent à la fois la distorsion de l'objectif, les mouvements de solide rigide de l'échantillon et les OPM, permettant ainsi une correction simultanée des impacts de ces facteurs. En calculant les champs de déformation du modèle mentionné ci-dessus, la déformation virtuelle dans les granulats peut être modélisée en utilisant un polynôme du second ordre qui s'écrit comme suit :

$$\varepsilon_{xx}^{ROC} = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{02}y^2 \tag{5.1}$$

$$\varepsilon_{yy}^{ROC} = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{20}x^2 + b_{11}xy \tag{5.2}$$

$$\varepsilon_{xy}^{ROC} = c_{00} + c_{10}x + c_{01}y + c_{20}x^2 + c_{11}xy + c_{02}y^2 \tag{5.3}$$

où ε^{ROC} est la modélisation de la déformation de ROC (granulats). Les paramètres a_{ij}, b_{ij} et c_{ij} sont identifiés à partir de la déformation dans les granulats. Ils comprennent à la fois les paramètres relatifs aux OPM et aux éventuelles distorsions de l'objectif si elles existent [161]. En utilisant ε^{ROC}, la déformation dans la région d'intérêt peut être corrigée comme suit :

$$\varepsilon_{xx}^{C} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{xx}^{ROC} \tag{5.4}$$

$$\varepsilon_{yy}^{C} = \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yy}^{ROC} \tag{5.5}$$

$$\varepsilon_{xy}^{C} = \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xy}^{ROC} \tag{5.6}$$

où ε^{C} est la déformation corrigée dans la ROI.
L'utilisation des granulats comme ROC permet de corriger uniquement les champs de déformation et les déplacements ne peuvent pas être corrigés. Ceci est dû au fait que, en réalité, les granulats se déplacent l'un par rapport à l'autre pendant le chargement empêchant ainsi la mesure de tout déplacement relatif aux OPM. Cependant, l'avantage dans ce cas est que la ROC est située dans la région d'intérêt, ce qui permet une meilleure estimation des OPM dans cette dernière. De plus, aucune manipulation de l'échantillon n'est nécessaire.

5.2.3 Mise en œuvre sur les données expérimentales

La première étape consiste à choisir un ensemble de ROC appropriées dans les granulats. Le masque correspondant aux granulats peut être extrait automatiquement en effectuant directement un seuillage sur l'image sans grille de la surface étudiée. Dans ce cas, les bords des

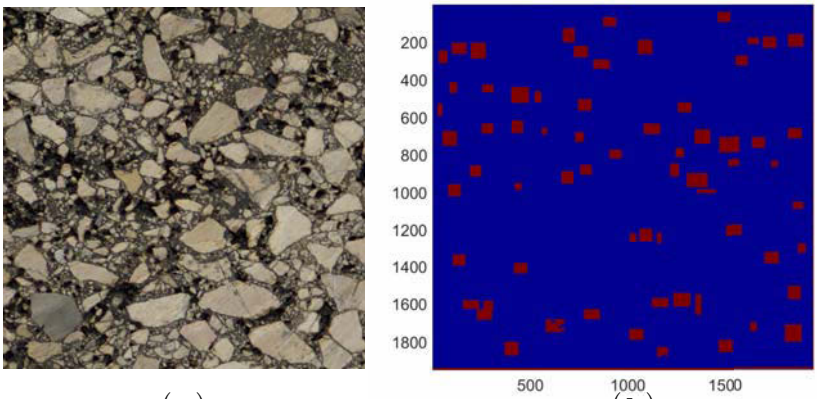


FIGURE 5.11 – (a) Microstructure de l'échantillon 0% AE (b) ROC (en rouge) considérée au centre des gros granulats afin d'éviter les effets de bord qui peuvent être induits par la déformation dans le liant.

granulats doivent être éliminés en utilisant, par exemple, des opérations morphologiques telle que l'érosion, ceci afin d'éviter les effets du lissage induit par le noyau gaussien. En effet, la déformation aux bords des granulats est affectée par la déformation du mastic environnant, ce qui conduit à une surestimation de la déformation associée aux OPM. Dans le présent chapitre, des petites régions rectangulaires au centre des gros granulats sont considérées (*cf* Fig. 5.11a-b). Des exemples de ROC relatifs aux autres échantillons peuvent être retrouvés dans l'Annexe C.1. L'étape suivante consiste à extraire les champs de déformation à l'intérieur des ROC considérées. Ensuite, le modèle proposé dans l'équation Eq. (5.1)-(5.3) est calibré sur ces données en utilisant une approche des moindres carrées. Une illustration des déformations virtuelles ε_{xx}^{ROC}, ε_{yy}^{ROC} et ε_{xy}^{ROC} induites par les OPM pour l'échantillon 0% AE est présentée Fig. 5.12b, e et h. Les gradients de déformation dans la ROI sont clairement visibles suivant toutes les directions, ce qui confirme les observations précédentes concernant la rotation de l'échantillon par rapport au plan du capteur. Fig. 5.12c, f et i montrent un exemple de champs de déformation compensés obtenus en utilisant les Eq. (5.4)-(5.6) pour l'échantillon 0% AE. Les exemples relatifs aux autres échantillons sont présentés dans l'Annexe C.2. Après la compensation des OPM, la déformation dans les granulats est réduite à presque zéro. L'effet de cette correction est illustré sur la Fig. 5.13 où sont représentés les histogrammes correspondant à la répartition de la déformation dans les granulats avant et après la compensation des OPM pour l'échantillon 0% AE. Après la correction des OPM, la valeur moyenne de l'histogramme est presque nulle et sa largeur est légèrement réduite. L'écart type des histogrammes dans les deux directions est d'environ 2,5 $\times 10^{-4}$. Cette valeur donne une estimation du bruit sur la mesure de déformations en chaque pixel de la ROI. Ce bruit est considérablement réduit lors du calcul de la déformation moyenne sur l'ensemble des pixels de la ROI (1850 $\times$1850 pixels). La compensation précédente a été effectuée pour toutes les images. Il est ainsi possible de comparer l'évolution de la déformation moyenne après la compensation avec celle issue des capteurs MAER. Les Fig. 5.14a-d montrent l'évolution de ε, ε^{ROC} et ε^{C} en fonction du temps pour les échantillons 0% AE et 40% AE le

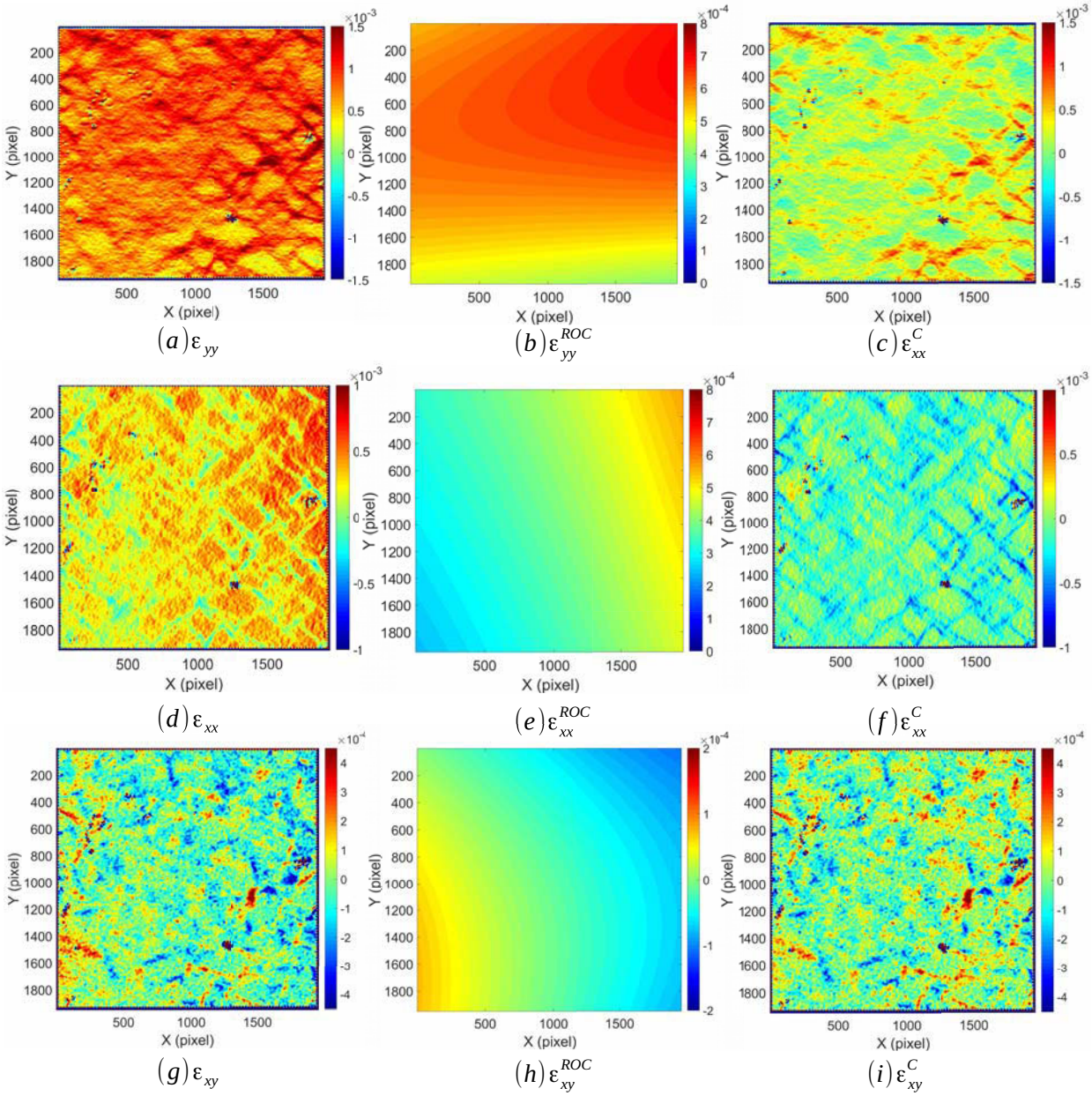


FIGURE 5.12 – (a, d, g) Champs de déformation bruts pour l'échantillon 0% AE, (b, e, h) champs de déformation induits par OPM et (c, f, i) champs de déformation corrigés.

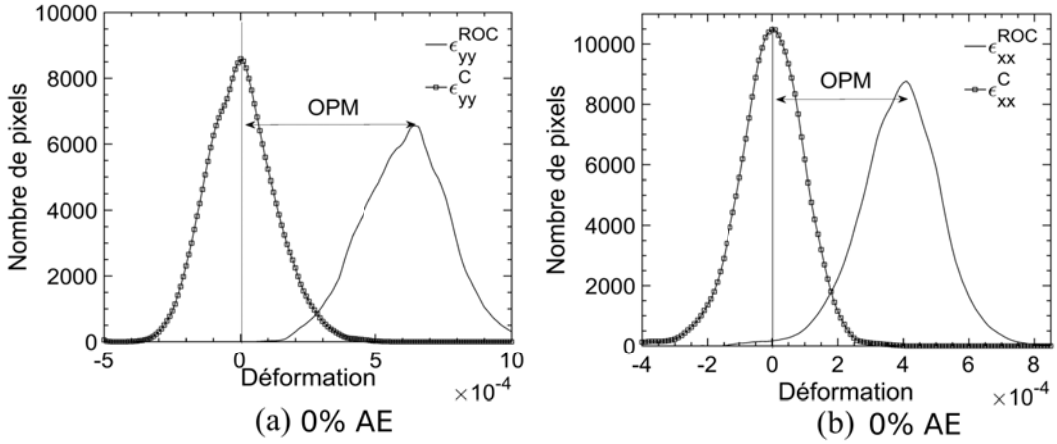


FIGURE 5.13 – Histogrammes de la distribution de la déformation au sein des granulats avant et après la compensation des OPM.

long de directions xx et yy. Comme le montre cette figure, les déformations mesurées avant la compensation ε s'écartent d'une manière significative de celles fournies par les capteurs MAER, alors que les déformations compensées sont en accord avec celles-ci. Il peut être également remarqué que les déformations correspondantes aux OPM ne reflètent aucune tendance régulière, et commencent dès le début de l'essai. Elles sont donc principalement causées par l'alignement de l'échantillon avec le chargement.
La machine d'essai ne dispose pas de capteurs suivant la direction horizontale ou radiale, il n'y a donc aucune mesure de référence qui peut être utilisée pour évaluer la qualité des mesures le long de la direction x. Le rapport entre les deux déformations $(\varepsilon^C_{xx}/\varepsilon^C_{yy})$ est d'environ 0,40 pour l'échantillon 40% AE et 0,56 pour l'échantillon 0% AE. Il est à noter que ce rapport ne représente pas le coefficient de Poisson, car ce dernier doit être mesuré à l'aide de la déformation radiale au lieu de la déformation horizontale mesurée ici.
Une comparaison entre les déformations issues de MAER et ε^C pour tous les échantillons est présentée dans l'annexe C.3. Pour certains temps de chargement les déformations issues de MAER et ε^C présentent toutefois des différences. L'écart maximal observé à la fin de la phase de chargement est de l'ordre de $20\mu m/m$. Pour des niveaux de déformation aussi faibles, cette différence peut être causée par plusieurs facteurs :

— le bruit de mesure ;

— la différence de longueur de mesure de déformation entre les capteurs MAER et la MG.

Les résultats de mesures peuvent être améliorés, en réduisant le l'effet de bruit de mesure à travers un filtrage temporel. La procédure est abordée dans le paragraphe suivant.

5.2.4 Filtrage temporel

Une partie du bruit électronique affectant les cartes de déformation peut être éliminée à travers un filtrage temporel. La procédure consiste à introduire un modèle approprié qui décrit parfaitement l'évolution de la déformation en chaque point de l'échantillon en fonction du temps. En effet, l'évolution temporelle de la déformation globale de l'échantillon est linéaire,

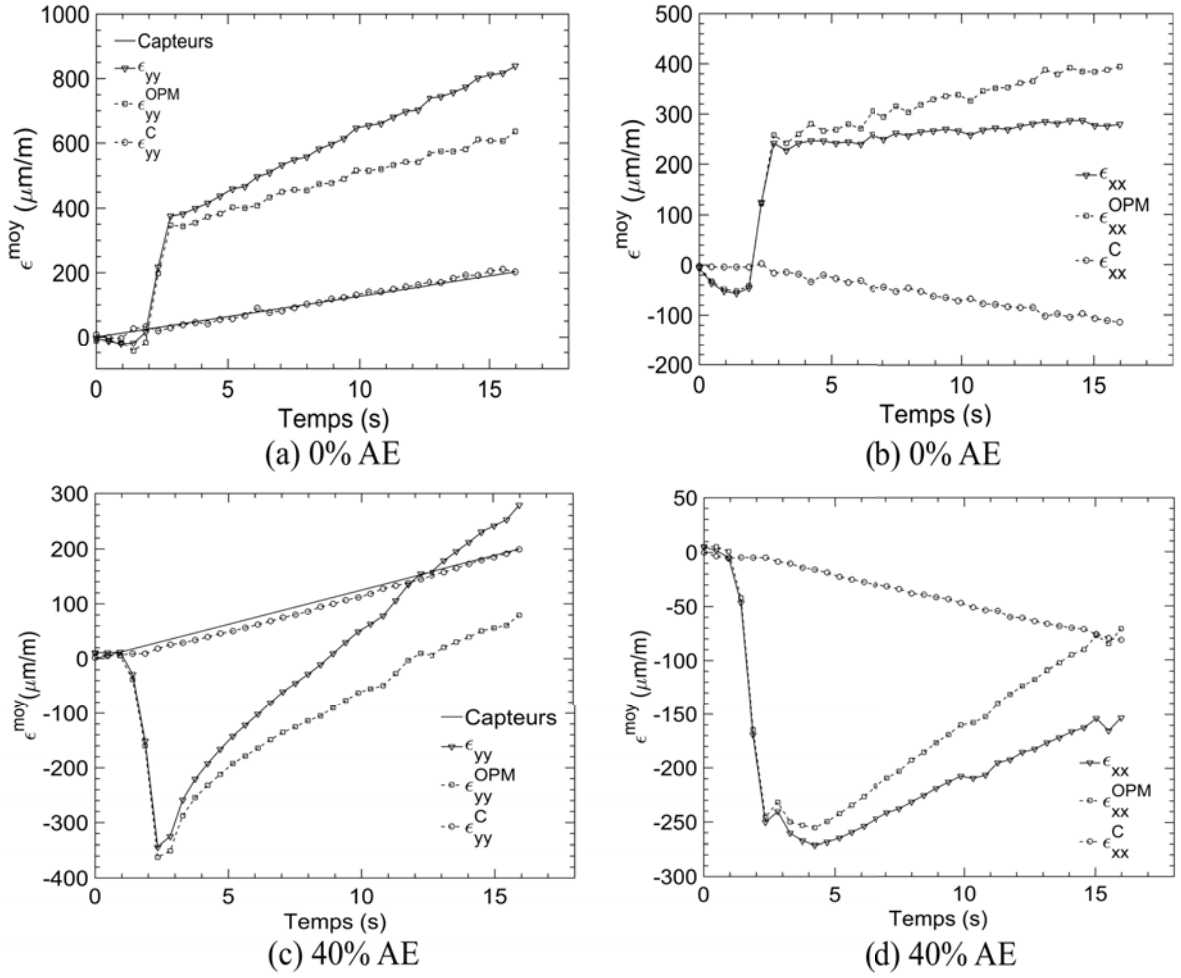


FIGURE 5.14 – (a) Comparaison de la déformation moyenne issue des capteurs MAER et de la MG avant et après la correction, (b) déformation horizontale avant et après la correction pour l'échantillon 0% AE. (c)-(d) Mêmes courbes pour l'échantillon 40% AE.

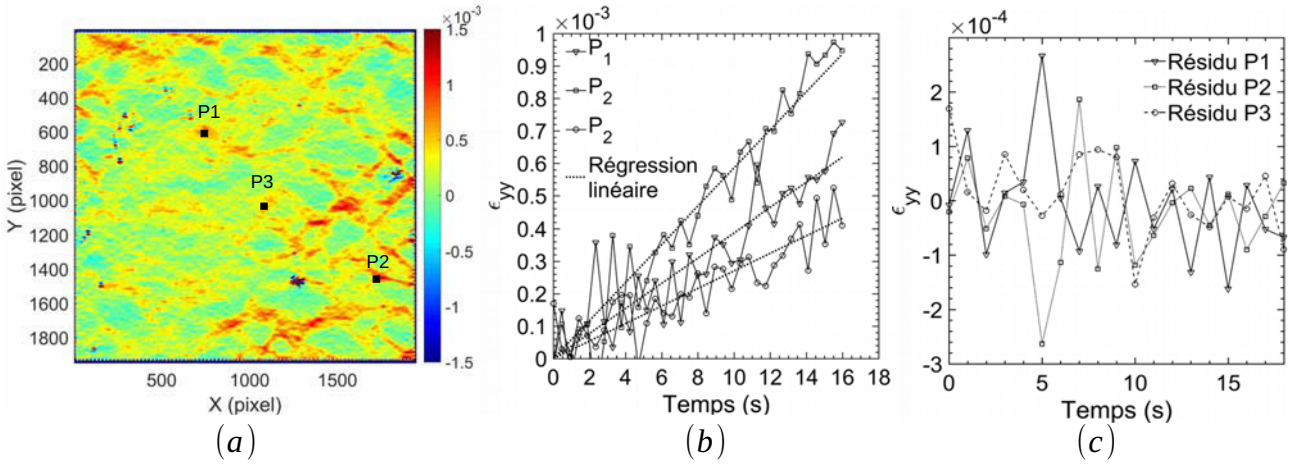


FIGURE 5.15 – (a) ε_{yy} avec l'emplacement des points P1-P3 choisis dans le liant, (b) évolution de la déformation verticale au cours de l'essai et (c) résidus.

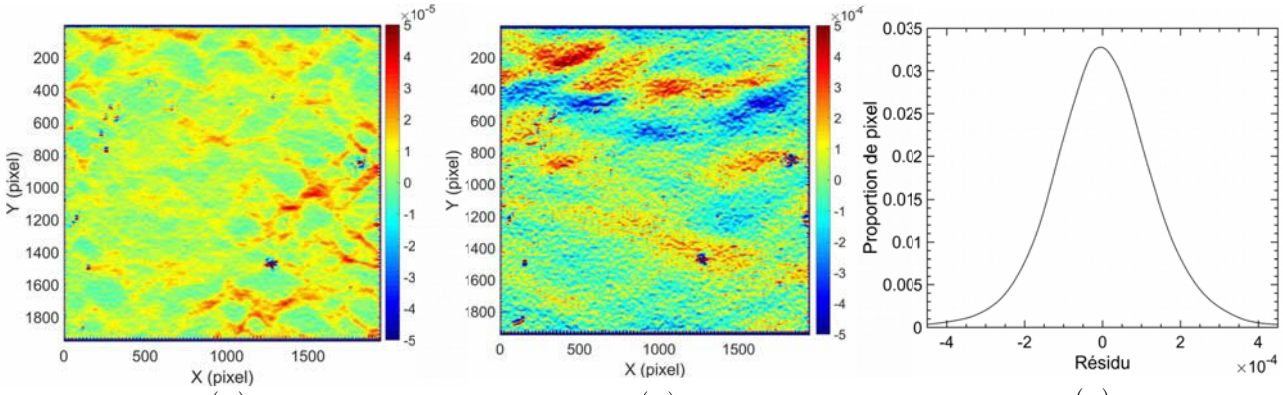
on peut alors envisager d'émettre une hypothèse de linéarité sur la réponse cinématique du liant. L'évolution temporelle de la déformation en plusieurs points dans le liant est tracée sur la Fig. 5.15b et un modèle linéaire est ensuite ajusté sur ces données. La localisation des points est montrée Fig. 5.15a. Les résidus, définis comme les différences entre la déformation et le modèle d'ajustement, sont tracés Fig. 5.15c. Les résidus sont dispersés aléatoirement autour de zéro indiquant que le modèle linéaire est une description appropriée ici.

Cette procédure peut être effectuée en chaque pixel d'une carte de déformation donnée. Dans ce cas pour chaque temps de chargement $T_i \in \{16s,\ 50s,\ 100s,\ 200s\}$, la carte de déformation pour $t \in [0\ T_i]$ est exprimée comme suit :

$$\varepsilon_{xx} = A_x^i t \tag{5.7}$$

$$\varepsilon_{yy} = A_y^i t \tag{5.8}$$

où A_x^i et A_y^i sont les cartes de taux de déformation pour le temps de chargement T_i suivant les directions x et y respectivement. Un exemple d'une carte de vitesse de déformation suivant la direction y pour l'échantillon 0% AE est présenté Fig. 5.16. La carte résiduelle correspondante et son histogramme à la fin de l'essai (t=16s) sont également illustrés Fig. 5.16b-c. La carte résiduelle Fig. 5.16b est répartie aléatoirement et ne révèle aucune tendance régulière. Celle-ci est principalement composée du bruit de capteur combiné avec des franges parasites [145]. L'histogramme correspondant à cette carte Fig. 5.16c est en forme de cloche et d'une moyenne quasi-nulle, ce qui indique que le modèle linéaire est encore bien adapté pour décrire l'évolution de la déformation dans le cas présent. Les exemples des cartes de vitesse de déformation et de résidus pour les mélanges 20% AE, 40% AE et 100% AE sont également illustrés dans l'annexe C.4.



(a) (b) (c)

FIGURE 5.16 – Carte de vitesse de déformation A_y^1 suivant la direction y, (b) carte de résidu et (c) histogramme correspondant de la distribution du résidu sur la ROI à t=16s.

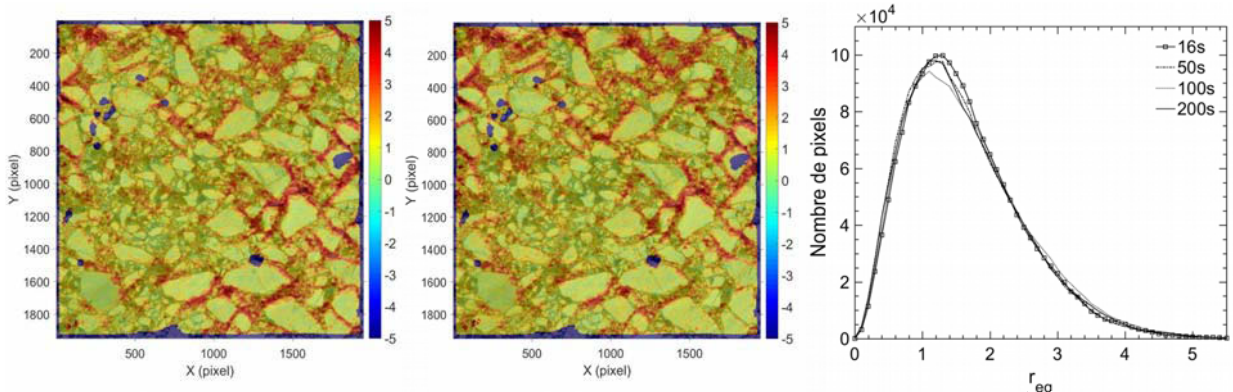
5.3 Analyse des résultats expérimentaux

5.3.1 Observations générales

Les corrections proposées ci-dessus ont été appliquées à tous les résultats relatifs aux essais effectués dans le cadre de ce chapitre. La prochaine étape vise à comparer le comportement local des différents mélanges. La MG fournit une quantité importante de données, pour chaque étape temporelle, trois cartes de déformation sont disponibles. Ainsi, il est pratique de réduire la quantité de données en considérant, par exemple, pour chaque échantillon, une carte de déformation équivalente (déformation de Von Mises) définie par :

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{3}\sqrt{\varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}^2 + 3\varepsilon_{xy}^2} \tag{5.9}$$

Cette déformation est ensuite normalisée par rapport à la déformation moyenne afin d'obtenir un facteur adimensionnel $r_{eq} = \varepsilon_{eq}/\varepsilon_{eq}^{moy}$ (appelé facteur de localisation des déformations). Il exprime l'amplification de la déformation locale dans le liant par rapport à la déformation macroscopique. Un exemple des distributions de r_{eq} pour l'échantillon 0% AE et pour les temps de chargement de 16s et 200s est représenté sur Fig. 5.17. L'histogramme correspondant à la distribution statistique du facteur r_{eq} pour tous les temps de chargement (16s, 50s, 100s et 200s) est également illustré Fig. 5.17. On observe, le même caractéristiques de distribution de la déformation pour tous les temps de chargement et les histogrammes correspondants coïncident. Ainsi pour une même déformation macroscopique, la variation du temps de chargement n'agit pas sur la distribution de la déformation dans le liant. En conséquence, la comparaison des différents mélanges pourrait être effectué pour un seul temps de chargement (pour $T_1 = 16s$ par exemple).
Pour les différents échantillons, les cartes de r_{eq} à la fin de la phase de chargement (t=16s) sont représentées sur Fig. 5.18. La déformation est particulièrement concentrée dans les bandes étroites du liant. À ce faible niveau de déformation, la méthode de la grille est toujours capable de capturer des champs de déformation hétérogènes qui se déroulent dans les bandes de

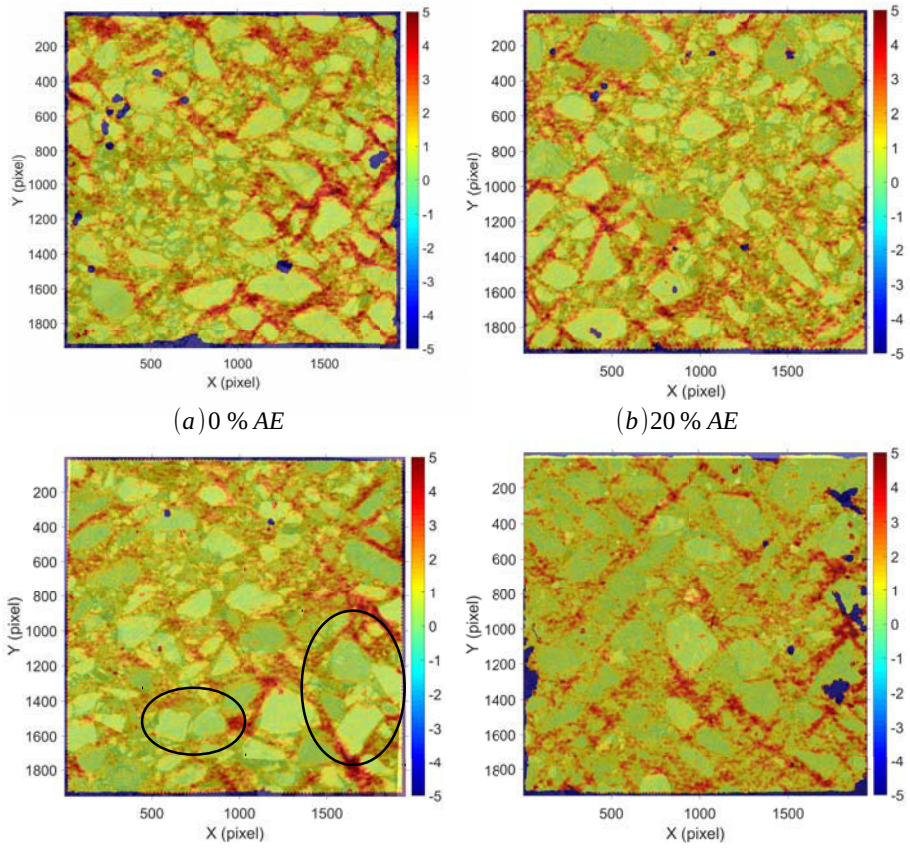


$(a)\, r_{eq}, 16\,s$ $(b)\, r_{eq}, 200\,s$ (c)

FIGURE 5.17 – Répartition de r_{eq} pour l'échantillon 0% AE

liant. Les concentrations de déformation ne sont pas uniformément réparties dans les bandes de liant et apparaissent dispersées dans la région d'étude. Le fait que les granulats soient de tailles très inégales et disposés de manière plus ou moins aléatoire contribue à l'existence de contacts (bandes de liant) plus ou moins déformés. Par conséquent, les essais classiques effectués sur le liant d'enrobé seul ne semblent pas pertinents pour remonter à la réponse globale du mélange final, car ce dernier implique des effets de structure. Ces essais doivent prendre compte les différentes interactions existantes entre le liant et les granulats.
La tendance générale observée à partir de ces cartes est que le facteur de localisation de déformation est principalement concentré dans les régions contenant des gros granulats. Les zones contenant de petites particules présentent en effet des faibles niveaux de déformation. Ces observations suggèrent que, dans le cas présent, la rupture se produirait très probablement dans les bandes de liant.

La déformation locale dans le liant est évidemment plus élevée que la déformation macroscopique. La valeur du facteur de localisation de déformations atteint 5 dans certaines régions du liant. L'échantillon 0% AE montre les valeurs de r_{eq} les plus élevées comparées aux autres échantillons. L'histogramme correspondant à la distribution statistique du facteur r_{eq} pour les mélanges testés ici est tracé Fig. 5.19. Seule la déformation dans le liant est considérée. Fig. 5.19 souligne que les concentrations du facteur de localisation diminuent sensiblement avec l'incorporation de 20 % et 40 % d'AE. Cependant, après l'examen de la région de l'étude des différents échantillons, ils semblent tous contenir un pourcentage comparable des gros granulats. En plus, l'épaisseur des bandes de liant entre ces granulats est du même ordre de grandeur. Cependant, dans les cas 20% AE et 40% AE, les bandes de liant entre les gros granulats semblent moins sollicitées que leur contreparties dans l'échantillon 0% AE. Ceci est probablement dû à la différence de rigidité du liant dans les différentes éprouvettes. Il est à noter que dans le cadre des essais de compression dans le chapitre 3, la tendance était inverse : l'incorporation des agrégats a induit une forte concentration de déformation au bord des granulats et ainsi une valeur de r_{eq} plus élevée. En effet dans le cadre d'essais de compression la transmission des efforts s'effectue essentiellement par le contact entre les granulats à travers les bandes de liant. Au fur et à mesure de l'augmentation de l'effort dans



(a) 0 % AE (b) 20 % AE

(c) 40 % AE (d) 100 % AE

FIGURE 5.18 – Répartition de r_{eq} pour les échantillons testés dans ce chapitre à la fin de phase de chargement (t=16s).

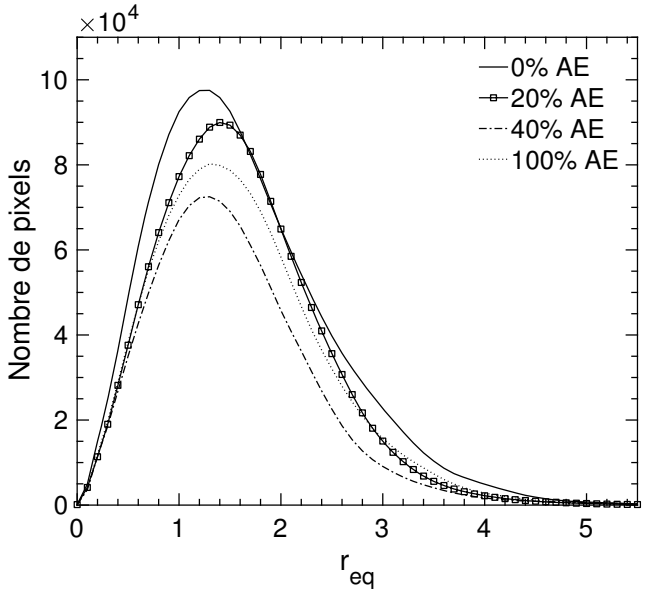


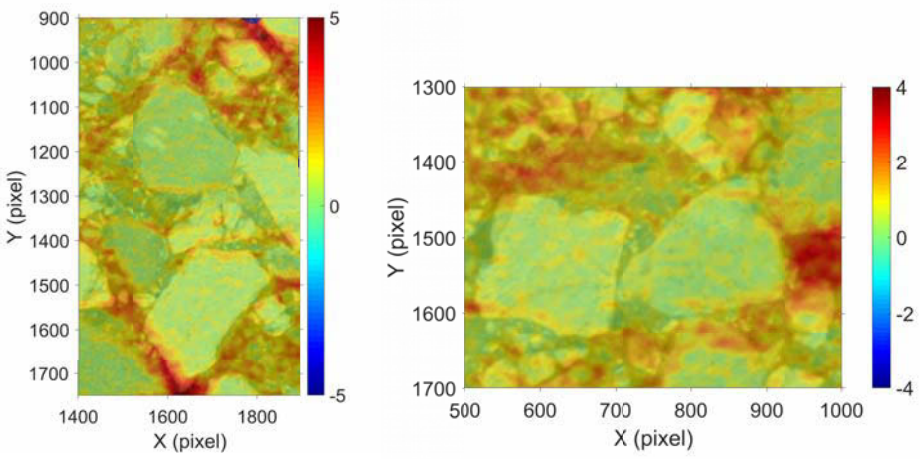
FIGURE 5.19 – Répartition de r_{eq} pour les échantillons testés dans ce chapitre à la fin de phase de chargement (t=16s).

le matériau, les contraintes sur les contacts augmentent induisant leur destruction progressive et par conséquent une perte de rigidité du matériau [163]. La présence de fissure interfaciales a été bien mise en évidence dans le chapitre 3.
Dans le cadre d'un essai de traction la transmission des efforts s'effectue par des maillons de contraintes. Ainsi le film de liant retenant les granulats ensemble joue un rôle primordial dans ce cas [163]. Vu la différence significative de deux modes de sollicitation et les protocoles de comparaison effectuées dans les chapitres 3 et 5, les résultats ne sont en aucun cas contradictoires.

5.3.2 Effet d'AE sur la répartition locale des déformations

L'effet de l'inclusion d'AE sur les propriétés locales de déformation des mêmes mélanges d'enrobés a déjà été étudié en compression dans le chapitre 3. L'observation de la répartition locale des déformations dans l'échantillon 40% AE a mis en évidence une rigidification locale du LAE à proximité de certains GAE ainsi que la formation d'amas de granulats. Les mêmes phénomènes devraient également être observés dans le présent chapitre. Le contexte actuel des petites déformations rend toutefois leur détection plus difficile. Néanmoins, des amas de granulats sont perceptibles dans le cas de l'échantillon 40% AE, comme montré sur Fig. 5.20. Les régions observées sont mises en évidence sur Fig. 5.18c.
La Fig. 5.20a montre un amas formé par plusieurs granulats. Apparemment ce groupement ne se déforme pas pendant la phase de chargement. En examinant la couleur des granulats constituant l'amas, il est possible de conclure sur leur provenance : trois GA (couleur blanche) et deux GAE (couleur foncée) (voir Fig.5.21a). Certaines petites particules d'AE sont également visibles entre les GA (voir Fig. 5.21a). Les amas impliquant des granulats d'apport sont appelés « nouveaux amas » et se forment pendant le processus de malaxage au stade où les

matériaux chauffés (AE et granulats d'apport) sont mélangés avant l'incorporation du LA. En effet, sous l'effet de la température et de l'abrasion, la couche de liant vieilli entourant les AE est activée et devient collante, facilitant ainsi la formation des amas [73]. Cette couche de liant vieilli, plus rigide que celle d'apport, ne se déforme pas lorsque des déformations de faible amplitude sont appliquées sur le mélange.
Pour étudier l'évolution de la déformation du premier amas, trois lignes sont choisies comme illustré Fig. 5.21a. La Fig. 5.21b montre l'évolution du facteur d'amplification de la déformation r_{eq} suivant ces lignes. Le facteur atteint une valeur quasi-nulle à l'intérieur de l'amas, ce qui signifie qu'il effectue des mouvements du solide rigide pendant la phase de chargement. Afin d'exclure la possibilité que ce raidissement soit induit par la méthode de compensation des OPM, les régions correspondantes au ROC sont mises en évidence sur Fig. 5.21a. Celles-ci sont situées aux cœurs des granulats et la compensation des OPM ne concerne que ces petites régions. Une autre observation intéressante concerne la forte concentration de déformation aux extrémités de l'amas (voir les zones entourées en bleu sur Fig. 5.21a et la déformation correspondante Fig. 5.21b). Cette concentration est due au fait que le liant à l'intérieur de l'amas ne participe pas au processus de déformation et provoque ainsi des surcharges dans les zones situées à ses extrémités.
Le deuxième cas montre un amas constitué de deux granulats : un granulat d'apport et un granulats d'AE (Fig. 5.22). Suivant la même approche, trois lignes verticales sont définies et le facteur de localisation de déformation r_{eq} est tracé selon ces lignes Fig. 5.22a-b. La déformation entre ces deux granulats s'annule, signifiant que ceux-ci restent liés pendant la phase de chargement. Les régions correspondantes au ROC sont mises en évidence Fig. 5.22a. Enfin, sur la base de l'analyse ci-dessus, on conclut que l'incorporation d'AE modifie considérablement la répartition de déformations locales. En particulier, la présence d'amas affecte l'homogénéité de la répartition de la déformation dans les bandes de liant et contribue à l'existence de bandes de liant plus ou moins sollicitées.



(a) (b)

FIGURE 5.20 – Exemple des amas non déformés dans l'échantillon 40% AE.

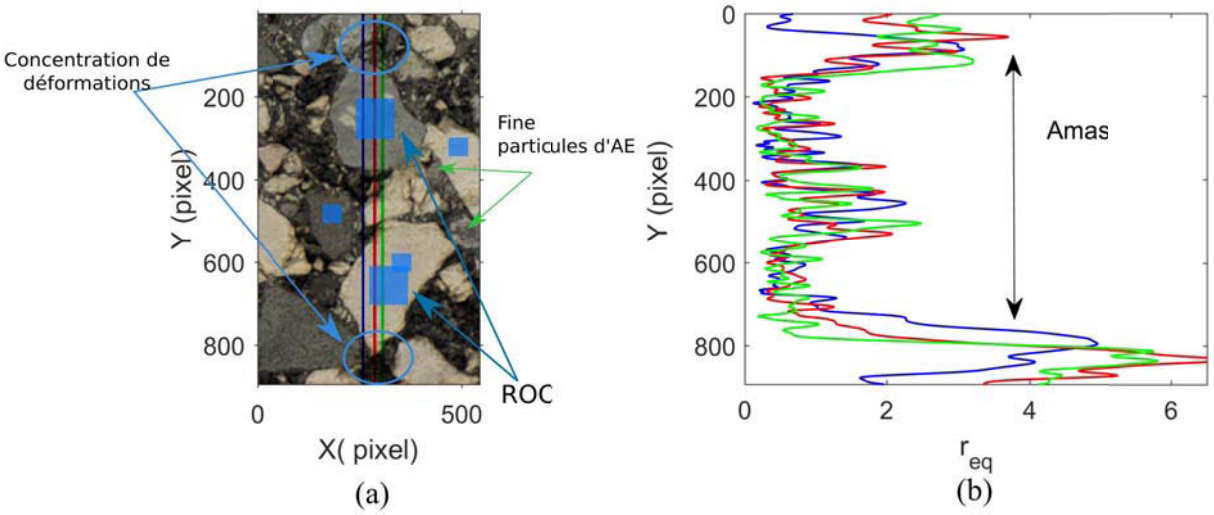


FIGURE 5.21 – (a) Amas de granulats et (b) déformation suivant les lignes choisies dans la figure (a).

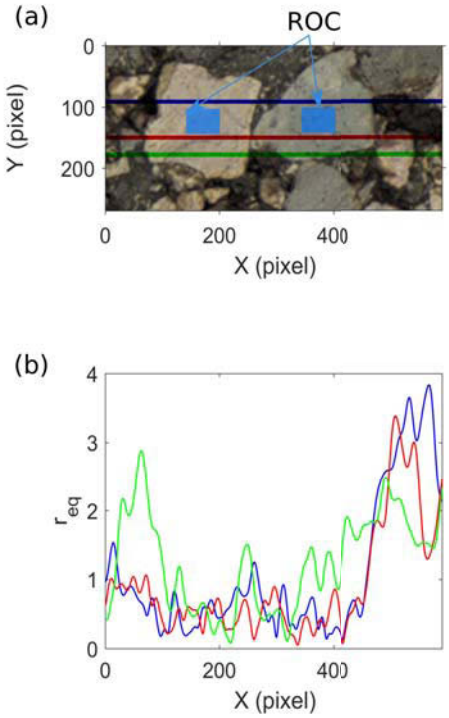


FIGURE 5.22 – (a) Amas de granulats et (b) déformation suivant les lignes choisies dans la figure (a).

5.4 Conclusion

Dans le présent chapitre, le comportement local des enrobés recyclés en traction a été étudié dans le domaine des petites déformations. En particulier, l'effet de l'incorporation des agrégats sur la répartition locale des déformations est discuté. Ce chapitre peut être subdivisé en deux principales parties. La première partie concerne l'amélioration des mesures de déformation avec la MG, en particulier l'introduction d'une correction spécifique pour éliminer plusieurs perturbations susceptibles de se produire pendant ce type d'essais. La deuxième partie concerne l'évaluation de l'incidence du recyclage sur la répartition des champs locaux. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

— la MG est en mesure de capturer les champs de déformation hétérogènes des enrobés dans le domaine des petites déformations à condition que les perturbations qui peuvent affecter les mesures de la déformation soient considérées et éliminées de manière adéquate ;

— les principales perturbations qui affectent d'une manière significative la mesure de la déformation dans le cadre des essais de traction sont les mouvements hors plan (OPM) et le bruit du capteur ;

— une méthode pour compenser adéquatement les effets négatifs induits par les OPM et la distorsion de l'objectif est proposée. Cette méthode est basée sur la méthode dite de la Région de Compensation (ROC) effectuée en post-traitement. Les granulats restant non déformés pendant la phase de chargement, en raison notamment de leur haute rigidité, ils sont utilisés pour corriger les OPM. Après correction, la MG et les capteurs de déformation MAER donnent des mesures globales en bonne concordance ;

— un filtrage temporel approprié est également introduit pour améliorer encore les champs de déformation et pour éliminer certaines erreurs aléatoires induites par le bruit du capteur et les franges parasites ;

— les champs de déformation obtenus sont fortement localisés dans les bandes du liant. En outre, les niveaux de déformation ne sont pas uniformément répartis dans les bandes de liant qui sont sollicités aléatoirement. Cela suggère que les essais conventionnels effectués sur le liant d'enrobés seuls ont une utilité limitée pour caractériser la réponse du mélange final, car ce dernier implique des effets de structure ;

— l'inclusion d'AE a une incidence remarquable sur la distribution locale des déformations. La présence des amas affecte l'homogénéité de la répartition de la déformation dans les bandes de liant et contribue à l'existence des bandes du liant plus ou moins déformées.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions

Dans ce travail de thèse, les comportements mécanique et thermique d'enrobés bitumineux ont été étudiés à l'aide de mesures de champs cinématiques. Tout d'abord une étude bibliographique a été menée pour présenter les propriétés fondamentales de ce matériau. Il a été constaté que malgré la complexité structurelle de l'enrobé, son comportement est généralement caractérisé à l'échelle macroscopique comme un matériau homogène et isotrope. À cette échelle, une large base de données d'essais et de normes est disponible pour encadrer et contrôler les aspects relatifs à son comportement et à ses performances. Cependant, les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie, justifiées autrefois par manque de moyens de mesure à des échelles microscopiques, ne semblent plus d'actualité. Ceci est particulièrement vrai avec l'émergence et la popularisation de plusieurs techniques de mesure optique permettant la caractérisation de ces matériaux à l'échelle de leurs constituants comme la tomographie à rayon X et les méthodes de mesures de champs optiques. Par ailleurs, la tendance actuelle vers l'augmentation du recyclage de ces matériaux, impliquant l'utilisation d'au moins deux liants et de plusieurs natures de granulats, soulève un certain nombre des questions, en particulier sur l'homogénéité du mélange entre les matériaux d'apport et les agrégats d'enrobé (AE).

À ce jour, il y a peu d'antécédents expérimentaux et théoriques qui décrivent le comportement thermique et mécanique des enrobés bitumineux à l'échelle des constituants. En conséquence, la structure unique et la complexité du comportement des enrobés nécessitent la prise en compte de l'aspect multi-échelle afin de mieux cerner les mécanismes mis en œuvre à des échelles plus petites.

Dans cette optique, un chapitre bibliographique a été consacré à la présentation de différentes méthodes de mesures de champs ainsi que leurs applications à la caractérisation du comportement mécanique des enrobés bitumineux. La recherche bibliographique a révélé que la corrélation d'images numériques (CIN) a commencé à gagner en popularité auprès de la communauté concernée par la caractérisation mécanique des enrobés, ceci grâce à sa facilité de mise en œuvre et à la richesse des informations qu'elle procure. Cependant, l'application de cette méthode se heurte à la forte hétérogénéité caractérisant les champs de déformation des enrobés. Ceci est d'autant plus vrai pour ces matériaux pour lesquels les essais s'effectuent à des faibles niveaux de déformation. Par ailleurs, l'analyse des résultats de différentes études rapportant l'application de la CIN et de la méthode de la grille (MG), a suggéré que la dernière permettait de mieux intégrer la très forte hétérogénéité de ces matériaux et par conséquent qu'elle était mieux adaptée aux objectifs à atteindre lors la présente thèse.

Tout au long de la thèse, quatre mélanges avec différents pourcentages d'AE (0%, 20%, 40% et 100%) ont été étudiés. Ces mélanges ont été formulés et préparés par le Cerema. Des granulats d'apport d'une couleur blanche ont été utilisés afin de pouvoir faire la distinction entre les matériaux d'apport et les granulats d'agrégats d'enrobé (GAE) après le processus du mélange.
Le travail est axé autour de trois campagnes expérimentales qui ont été présentées sous forme de trois chapitres. Chacun de ces chapitres traite une problématique bien spécifique, et qui est dans une certaine limite indépendante de celle des autres chapitres, mais illustre à chaque fois l'apport de la MG sur l'analyse du comportement des enrobés. Dans cette optique, les principaux résultats obtenus sont synthétisés comme suit :

Comportement des enrobés recyclés en compression

Ce chapitre vise à étudier la réponse en compression de plusieurs mélanges d'enrobés recyclés avec la MG. Les mélanges étudiés ont été soumis à des essais de compression et de recouvrance. Les champs de déplacement et de déformation ont été mesurés avec la MG. Les résultats issus de mesures de champs cinématique semblent très prometteurs pour étudier l'effet de l'inclusion d'agrégats sur les propriétés mécaniques des enrobés. La réponse mécanique du matériau a été observée à des échelles allant de l'échelle du liant jusqu'à l'échelle macroscopique.
Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

- la réponse macroscopique a indiqué que l'incorporation des agrégats augmentait la rigidité, la résistance à la compression ainsi que la partie élastique dans la déformation totale du mélange ;
- la réponse locale du mélange à 100% d'AE se caractérise par des concentrations de déformations autour des granulats, provoquant ainsi la rupture à l'interface liant/granulats. Cette rupture adhésive est attribuée ici à la présence de l'ancienne couche du liant d'agrégats d'enrobé (LAE) entre le granulat et la nouvelle couche du liant ;
- l'enrobé avec 0% d'AE a montré une répartition de déformations plus homogène dans le liant. Des pics de déformation ont été observés au bord de certains granulats et dans le liant ;
- la réponse mécanique des échantillons avec 20% et 40% d'AE semble présenter une sorte de combinaison des réponses mécaniques des mélanges à 0% et 100% d'AE ;
- des paramètres tels que le facteur de la localisation de déformation et le pourcentage de récupération ont été utilisés pour comparer la réponse globale des différents mélanges, ceci en se basant sur la réponse des constituants ;
- le comportement des agrégats dans l'échantillon à 40% d'AE a été examiné plus en détails. Les fillers de calcaire ont été utilisés comme des traceurs pour le liant d'apport (LA), permettant la détection des granulats qui restent enrobés avec du LAE. La répartition de la déformation sur la surface de l'échantillon a révélé l'existence de plusieurs types d'interactions entre les matériaux d'apport et les AE, à savoir : formation des nouveaux amas d'AE ; présence d'anciens amas d'AE ; rigidification du liant autour de certains GAE.

Vers une mesure de la dilatation/contraction locale des enrobés soumis à des cycles gel/dégel

Ce chapitre concerne la mesure de la dilatation-contraction locale des éprouvettes d'enrobés sous sollicitations de type de gel-dégel. L'intervalle de température qui a été considéré est de -11°C à 20°C. Ces essais constituent un nouveau champ d'application des méthodes de mesure de champs. En conséquence, plusieurs adaptations spécifiques innovantes et la mise en œuvre de plusieurs solutions dédiées ont dû être introduites afin d'obtenir des résultats fiables et exploitables. La réponse thermique a été observée à des échelles spatiales allant de celle du liant jusqu'à l'échelle globale.
Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

- la dilatation/contraction thermique des échantillons d'enrobé a été mesurée en utilisant à la fois la CIN et la MG à des fins de comparaison. Cette comparaison a révélé que la MG était plus apte à mesurer des déformations thermiques à l'échelle locale ;
- les échantillons de forme cylindriques présentent une anisotropie qui a été associée au compactage des échantillons le long de la direction verticale. La comparaison des courbes de dilatation globale en fonction de la température a montré que l'échantillon à 100% d'AE était caractérisé par un coefficient dilatation-contraction thermique (CTC/CTE) élevé par rapport aux autres mélanges. L'effet de l'incorporation des agrégats sur les réponses thermiques des éprouvettes avec 20% et 40% d'AE n'était pas aussi claire ;
- l'analyse locale a montré que les champs de déformation dans les échantillons étaient très hétérogènes en raison de la différence du CTC entre les granulats et le liant. Il a également été observé que la réponse thermique locale du liant était anisotrope en raison de son interaction avec les granulats ;
- l'interaction entre les composants d'enrobé (granulats et mastic) pendant le refroidissement thermique a été caractérisée expérimentalement en décomposant le tenseur de déformations thermiques dans la base principale. L'examen de l'orientation de déformations principales aux bords des granulats a révélé l'existence d'une contraction différentielle entre les granulats et le liant ;
- la distribution du CTC apparent dans le liant pour toutes les éprouvettes a été aussi quantifiée. Ce coefficient est nettement plus élevé pour l'éprouvette à 100% d'AE que pour les autres éprouvettes. La comparaison de la valeur moyenne de ce coefficient dans la structure de l'enrobé avec celle rapportée dans la littérature pour le liant seul a suggéré qu'en réalité la contraction du mastic était fortement restreinte par le squelette granulaire ;
- l'éprouvette à 40% d'AE a été soumise à un cycle de gel-dégel additionnel sous conditions saturées. Au cours de la phase de dégel, une contraction de l'éprouvette générée lors de la fusion de la glace a été observée. L'examen de cette contraction a révélé qu'elle était localisée aussi bien dans les vides que dans le liant. Cette dernière observation suggère que la pression interne générée par la congélation de l'eau a provoqué de fissurations dans le liant ;

Étude du comportement en traction des enrobés recyclés dans le domaine des petites déformations

Dans ce chapitre, le comportement local d'enrobés recyclés en traction a été étudié dans le domaine des petites déformations en utilisant une machine d'essai normalisée pour la mesure du module des enrobés bitumineux. La première partie du travail concerne l'amélioration des mesures de déformation avec la MG, en particulier l'introduction d'une correction spécifique pour éliminer plusieurs perturbations susceptibles de se produire pendant ce type d'essais. La deuxième partie concerne l'évaluation de l'incidence du recyclage sur la répartition des champs locaux. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit :

- la MG est en mesure de capturer les champs de déformation hétérogènes des enrobés dans le domaine des petites déformations à condition que les perturbations qui peuvent affecter les mesures de la déformation soient considérées et éliminées de manière adéquate ;
- les principales perturbations qui affectent d'une manière significative la mesure de la déformation dans le cadre des essais de traction sont les mouvements hors-plan (OPM [2]) et le bruit du capteur ;
- une méthode est proposée pour compenser de façon adéquate les effets négatifs induits par l'OPM et la distorsion de l'objectif. Cette méthode est basée sur la méthode dite de la Région de Compensation (ROC [3]) effectuée en post-traitement. Les granulats restant non-déformés pendant la phase de chargement, en raison notamment de leur haute rigidité, sont utilisés pour corriger l'OPM. Après correction, la MG et les capteurs de déformation de la Machine asservie d'essais rhéologiques (MAER) donnent des mesures globales en bonne concordance ;
- un filtrage temporel approprié est également introduit pour améliorer encore les champs de déformation et pour éliminer certaines erreurs aléatoires induites par le bruit du capteur et par les franges parasites ;
- les champs de déformation obtenus sont fortement localisés dans les bandes de liant. En outre, les niveaux de déformation ne sont pas uniformément répartis dans ces bandes de liant qui sont sollicitées aléatoirement. Cela suggère que les essais conventionnels effectués sur le liant d'enrobés seuls ont une utilité limitée pour caractériser la réponse du mélange final car ce dernier implique des effets de structure ;
- l'inclusion d'AE a une incidence remarquable sur la distribution locale des déformations. La présence des amas affecte l'homogénéité de la répartition de la déformation dans les bandes de liant. Elle contribue à l'existence de bandes de liant plus ou moins déformées.

Finalement, cette étude ouvre la voie à une meilleure compréhension des mécanismes de déformation mécanique thermique des enrobés. Elle fournit également des renseignements

2. Out-Of-Plane Motion
3. Region Of Compensation

précieux sur la réponse des composants d'enrobés qui pourraient ultérieurement être utilisés pour modéliser plus précisément leur réponse thermique. Par ailleurs, quoique les mélanges testés soient élaborés spécifiquement pour cette thèse, ils permettent de répondre à un certain nombre des problématiques qui concernent la caractérisation des enrobés, en particulier l'effet de l'inclusion des AE sur la réponse locale des mélanges d'enrobés recyclés. Les résultats viennent ainsi en complément de ceux disponibles dans la littérature. Ils sont susceptibles d'enrichir les bases de données existantes concernant la problématique de l'homogénéité des enrobés recyclés.

Perspectives

Plusieurs perspectives sont à envisager pour la poursuite des travaux de cette thèse.

D'un point de vue numérique, il serait intéressant de développer un modèle micromécanique pour étudier les propriétés des mélanges hétérogènes d'enrobé. En effet, le modèle devrait prendre en compte les propriétés et l'interaction des constituants. Ce modèle micromécanique pourrait être utilisé pour prédire les propriétés fondamentales des matériaux en fonction des propriétés des constituants tels que le liant et les granulats. À cet effet, la méthode des éléments finis ou des éléments discrets peut être utilisée pour simuler le comportement de ce matériau. Ce modèle peut également s'appuyer sur les résultats issus de mesures de champs afin d'extraire des paramètres de modèles de comportement par analyse inverse.

D'un point de vue expérimental, il serait intéressant, avant d'entamer les essais, d'avoir des informations plus complètes sur la microstructure des éprouvettes ainsi que sur la distribution de LA et de LAE. Ainsi, un couplage entre les mesures cinématiques (effectués dans le présent travail) et les méthodes optiques d'observation multi-échelle (usuellement utilisées dans la littérature) apportera des informations plus complètes sur l'interaction entre les agrégats et les matériaux d'apport dans un mélange d'enrobé recyclé. En plus, la réalisation des essais mécaniques à plusieurs niveaux de températures serait également pertinente. Par ailleurs, d'autres essais pourrait être réalisés avec la méthode de la grille, par exemple les essais de caractérisation de l'endommagement des interfaces d'enrobé. Des essais de faisabilité ont déjà été entamés mais les difficultés liées au dispositif expérimental n'ont pas encore été totalement surmontées.
Par ailleurs, le dispositif expérimental utilisé pour effectuer les essais de gel-dégel peut également être amélioré dans le but de maîtriser les conditions de saturation des éprouvettes. De plus, des essais induisant des variations de température sous forme d'une descente et d'une remontée d'un front de gel dans les éprouvettes seraient plus représentatifs des conditions réelles. Les éprouvettes présentant une multitude de couches, et qui sont plus représentatives de la structure de la chaussée, pourraient également être testées.

D'un point de vue méthode de mesure, une méthode de mesure de champs qui intègre la cinématique bien particulière des enrobés bitumineux pourrait également être développée.

En effet, on peut avantageusement tirer bénéfice d'une description cinématique adaptée au problème. Ceci peut être effectué avec la méthode de corrélation d'images numériques globale. L'idée consiste à imposer une cinématique bien définie pour chacune des phases. Ainsi aux pixels correspondant aux granulats seraient attribués un mouvement de solide rigide (translation et rotation) et le mastic serait affecté d'une cinématique plus riche. Cet enrichissement du problème de l'appariement des images permettrait d'améliorer très sensiblement la qualité de la mesure. Ces champs de déplacement et déformations pourraient également être utilisés pour identifier les propriétés du matériau.

Bibliographie

[1] "EN NF 13108-8," *Mélanges bitumimeux - Spécifications des matériaux - Partie 8 : agrégats d'enrobés*, Mars 2006.

[2] S. Bressi, M. Pittet, A. Dumont, and M. Partl, "A framework for characterizing rap clustering in asphalt concrete mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 564–574, 2016.

[3] B. S. Underwood and Y. R. Kim, "Microstructural investigation of asphalt concrete for performing multiscale experimental studies," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 14, no. 5, pp. 498–516, 2013.

[4] M. Grédiac and F. Hild, *Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics*. Hoboken, NJ : ISTE Ltd., Nov. 2013.

[5] M. Grédiac and E. Toussaint, "Studying the mechanical behaviour of asphalt mixture with the grid method," *Strain*, vol. 49, pp. 1–15, Feb. 2013.

[6] M. Grédiac, E. Toussaint, C. Petit, A. Millien, and D. C. Ngyuen, "A comparative study of the heterogeneous local mechanical response of two types of asphalt mixes," *Materials and Structures*, vol. 47, pp. 1513–1529, Sept. 2014.

[7] J. G. Speight, "Chapter 9 - Asphalt Technology," in *Asphalt Materials Science and Technology*, pp. 361–408, Boston : Butterworth-Heinemann, 2016.

[8] J. Berthier, "Les routes- Matériaux de chaussées souples et semi-rigides," *Techniques de l'ingénieur Les routes, les ponts et les joints*, vol. base documentaire : TIB235DUO., no. ref. article : c4314, 2012. fre.

[9] H. Di Benedetto and J.-F. Corté, *Matériaux routiers bitumeux 2 : constitution et propriétés thérmomecaniques des melanges*. Paris : Hermes Science Publications, 2005.

[10] "EN NF 1426," *Bitumes et liants bitumineux-Détermination de la pénétrabilité a l'aiguille, Collection AFNOR*, 2007.

[11] B. Lombardi, "Liants hydrocarbonés," *Techniques de l'ingénieur Les routes, les ponts et les joints*, vol. base documentaire : TIB235DUO., no. ref. article : c904, 2007. fre.

[12] "EN NF 1427," *Bitumes et liants bitumineux-Détermination du point de ramollissement-Méthode Bille et Anneau, Collection AFNOR*, 2007.

[13] "EN NF 12607-1," *Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air - Partie 1 : méthode RTFOT*, 2014.

[14] *The Asphalt Handbook*. Lexington, Ky : Asphalt Institute, 7th edition ed., Nov. 2007.

[15] M. Elseifi, I. Al-Qadi, S.-H. Yang, and S. Carpenter, "Validity of asphalt binder film thickness concept in hot-mix asphalt," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, no. 2057, pp. 37–45, 2008.

[16] M. N. Partl and E. Chailleux, "Introduction," in *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*, pp. 1–14, Springer, 2013.

[17] B. Underwood, "Multiscale modeling approach for asphalt concrete and its implications on oxidative aging," in *Advances in Asphalt Materials*, pp. 273–302, Elsevier, 2015.

[18] H. Baaj, "Dégradation et usure des revêtements routiers souples," *Techniques de l'ingénieur Matériaux et tribologie*, vol. base documentaire : TIB467DUO., no. ref. article : tri4620, 2012. fre.

[19] H. Di Benedetto, T. Gabet, J. Grenfell, D. Perraton, C. Sauzéat, and D. Bodin, "Mechanical testing of bituminous mixtures," in *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials*, pp. 143–256, Springer, 2013.

[20] H. Di Benedetto and X. Yan, "Comportement mécanique des enrobés bitumineux et modélisation de la contrainte maximale," *Materials and structures*, vol. 27, no. 9, pp. 539–547, 1994.

[21] "EN NF 12697-12," *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 12 : détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses*, 2008.

[22] "EN NF 12697-26," *Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud : Module de Rigidité, Collection AFNOR*, 2004.

[23] D. Jung and T. S. Vinson, *Low-temperature cracking : test selection*. No. SHRP-A-400, 1994.

[24] M. G. Bouldin, R. Dongre, G. M. Row, M. J. Sharrock, and D. A. Anderson, "Predicting thermal cracking of pavements from binder properties : theoretical basis and field validation," in *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, vol. 69, 2000.

[25] H. U. Bahia and D. A. Anderson, "The development of the bending beam rheometer ; basics and critical evaluation of the rheometer," in *Physical Properties of Asphalt Cement Binders*, ASTM International, 1995.

[26] C. L. Monismith, G. Secor, and K. E. Secor, "Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete," in *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, vol. 34, 1965.

[27] H. Bahia, H. Tabatabaee, and R. Velasquez, "Asphalt thermal cracking analyser (ATCA)," in *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, pp. 147–156, Springer, 2012.

[28] M. Marasteanu, W. Buttlar, H. Bahia, C. Williams, K. H. Moon, E. Z. Teshale, A. C. Falchetto, M. Turos, E. Dave, G. Paulino, *et al.*, "Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements national pooled fund study–phase ii," 2012.

[29] R. Velasquez and H. Bahia, "Critical factors affecting thermal cracking of asphalt pavements : towards a comprehensive specification," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. sup1, pp. 187–200, 2013.

[30] A. Stimilli, F. Canestrari, P. Teymourpour, and H. U. Bahia, "Low-temperature mechanics of hot recycled mixtures through asphalt thermal cracking analyzer (ATCA)," *Construction and Building Materials*, vol. 84, pp. 54–65, 2015.

[31] S.-S. Kim, A. Wargo, and D. Powers, "Asphalt concrete cracking device to evaluate low temperature performance of HMA," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 79, 2010.

[32] E. Dave and P. D. Koktan, "Synthesis of performance testing of asphalt concrete," 2011.

[33] M. Akentuna, S. S. Kim, M. Nazzal, A. R. Abbas, and M. S. Arefin, "Study of the thermal stress development of asphalt mixtures using the asphalt concrete cracking device (ACCD)," *Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 416–422, 2016.

[34] V. Mauduit, C. Mauduit, N. Vulcano-Greullet, and N. Coulon, "Dégradations précoces de couches de roulement à la sortie des hivers," *Revue Générale des Routes et Aérodromes*, no. 858, pp. 67–72, 2007.

[35] V. Mauduit, C. Mauduit, N. V. Greullet, N. Coulon, F. Hammoum, H. David, J. P. Kerzreho, J.-M. Piau, and A. Chabot, "Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel : Analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire," *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, no. 279, pp. pp–47, 2013.

[36] C. Mauduit, F. Hammoum, J.-M. Piau, V. Mauduit, S. Ludwig, and D. Hamon, "Quantifying expansion effects induced by freeze-thaw cycles in partially water saturated bituminous mix : Laboratory experiments," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, no. sup1, pp. 443–457, 2010.

[37] S. Lamothe, D. Perraton, and H. Di Benedetto, "Contraction and expansion of partially saturated hot mix asphalt samples exposed to freeze–thaw cycles," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 16, no. 2, pp. 277–299, 2015.

[38] S. Lamothe, D. Perraton, and H. Di Benedetto, "Deterioration of HMA partially saturated with water or brine subjected to freeze-thaw cycles," in *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*, pp. 705–717, Springer, 2016.

[39] H. Xu, W. Guo, and Y. Tan, "Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze–thaw cycles," *Materials & Design*, vol. 86, pp. 436–446, 2015.

[40] H. Xu, W. Guo, and Y. Tan, "Permeability of asphalt mixtures exposed to freeze–thaw cycles," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 123, pp. 99–106, 2016.

[41] H. M. E. Hussein and A. A. E. Halim, "Differential thermal expansion and contraction : a mechanistic approach to adhesion in asphalt concrete," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 366–373, 1993.

[42] H. El Hussein, K. Kim, and J. Ponniah, "Asphalt concrete damage associated with extreme low temperatures," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 269–274, 1998.

[43] K.-W. Kim, K.-S. Yeon, and J.-S. Park, "Damage mechanism of asphalt concrete under low temperatures," in *Proceedings of the Korea Concrete Institute Annual Conference Seoul, Korea, November. Korea Concrete Institute, Seoul, Korea*, pp. 145–150, 1994.

[44] L. Santucci, "Recycling Asphalt Pavements : A Strategy Revisited," *Tech Topics*, no. 8, 2007.

[45] "NF P98-149," *Enrobés hydrocarbonés - Terminologie - Composants et composition des mélanges - Mise en oeuvre - Produits - Techniques et procédés, Collection AFNOR*, 2000.

[46] J. Navaro, *Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques*. PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2011.

[47] C. Jones, "Survey of state rap use." PRAP ETG Meeting Presentation, Manchester,New Hampshire, 2009.

[48] K. R. Hansen and D. E. Newcomb, "Asphalt pavement mix production survey on reclaimed asphalt pavement, reclaimed asphalt shingles, and warm-mix asphalt usage : 2009-2010," *Information Series*, vol. 138, p. 21, 2011.

[49] J. Pappas, "Recycling materials survey." Recycling Materials Survey, RAP ETG Meeting Presentation, Irvine, California, 2011.

[50] A. Shah, R. McDaniel, G. Huber, and V. Gallivan, "Investigation of properties of plant-produced reclaimed asphalt pavement mixtures," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2007.

[51] Afnor, ed., *Granulats - Propriétés générales et caractéristiques géométriques, thermiques et altérabilité - Tome 2*. Afnor, 2015.

[52] K. J. Kowalski, R. S. McDaniel, and J. Olek, "Influence of reclaimed asphalt pavement (RAP) on surface friction," in *Transportation Research Board. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM*, 2010.

[53] D. Watson, A. Vargas-Nordcbeck, J. Moore, D. Jared, and P. Wu, "Evaluation of the use of reclaimed asphalt pavement in stone matrix asphalt mixtures," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2051, pp. 64–70, Oct. 2008.

[54] I. L. Al-Qadi, S. H. Carpenter, G. Roberts, H. Ozer, Q. Aurangzeb, M. Elseifi, and J. Trepanier, "Determination of usable residual asphalt binder in RAP," tech. rep., Illinois Center for Transportation (ICT), 2009.

[55] I. L. Al-Qadi, M. Elseifi, and S. H. Carpenter, "Reclaimed asphalt pavement-a literature review," *FHWA-ICT-07-001*, 2007.

[56] E. Brown, P. S. Kandhal, F. L. Roberts, Y. R. Kim, D.-Y. Lee, T. W. Kennedy, *et al.*, *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction.* NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD, 2009.

[57] L. Mohammad, I. Negulescu, Z. Wu, C. Daranga, W. Daly, and C. Abadie, "Investigation of the use of recycled polymer modified asphalt binder in asphalt concrete pavements (with discussion and closure)," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 72, 2003.

[58] R. West, A. Kvasnak, N. Tran, B. Powell, and P. Turner, "Testing of moderate and high reclaimed asphalt pavement content mixes : laboratory and accelerated field performance testing at the national center for asphalt technology test track," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, no. 2126, pp. 100–108, 2009.

[59] G. Thompson, "Investigation of the bailey method for the design and analysis of dense-graded hmac using oregon aggregates," tech. rep., Oregon Department of Transportation, Research Unit, 2006.

[60] R. Roque, P. Y. Yan, C. Cocconcelli, and G. Lopp, "Perform An Investigation of the Effects of Increased Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Levels in Dense Graded Friction Courses," 2015.

[61] R. S. McDaniel, H. Soleymani, R. M. Anderson, P. Turner, and R. Peterson, "Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method," *NCHRP Web document*, vol. 30, 2000.

[62] V. H. Nguyen, *Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures.* PhD thesis, University of Nottingham, 2009.

[63] J. Navaro, D. Bruneau, I. Drouadaine, J. Colin, A. Dony, and J. Cournet, "Observation and evaluation of the degree of blending of reclaimed asphalt concretes using microscopy image analysis," *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 135–143, Dec. 2012.

[64] E. Rinaldini, P. Schuetz, M. Partl, G. Tebaldi, and L. Poulikakos, "Investigating the blending of reclaimed asphalt with virgin materials using rheology, electron microscopy

and computer tomography," *Composites Part B : Engineering*, vol. 67, pp. 579–587, Dec. 2014.

[65] B. Huang, G. Li, D. Vukosavljevic, X. Shu, and B. K. Egan, "Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1929, no. 1, pp. 37–45, 2005.

[66] B. Huang, Z. Zhang, and W. Kinger, "Fatigue crack characteristics of hma mixtures containing RAP," in *Proceeding 5th Int. Conf. on Cracking in Pavements, RILEM*, pp. 631–638, 2004.

[67] B. Huang, W. R. Kingery, and Z. Zhang, "Laboratory study of fatigue characteristics of HMA mixtures containing RAP," in *International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, 2004, Auburn, Alabama, USA*, 2004.

[68] M. Sargious and N. Mushule, "Behaviour of recycled asphalt pavements at low temperatures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 428–435, 1991.

[69] S. Mangiafico, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, F. Olard, S. Pouget, S. Dupriet, L. Planque, and R. Van Rooijen, "Statistical analysis of the influence of rap and mix composition on viscoelastic and fatigue properties of asphalt mixes," *Materials and Structures*, vol. 48, no. 4, pp. 1187–1205, 2015.

[70] X. Shu, B. Huang, and D. Vukosavljevic, "Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1323–1330, July 2008.

[71] M. C. Cavalli, M. N. Partl, and L. D. Poulikakos, "Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt," *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 665–672, 2017.

[72] S. Bressi, A.-G. Dumont, and M. Pittet, "Cluster phenomenon and partial differential aging in rap mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 99, pp. 288–297, 2015.

[73] S. Bressi, M. C. Cavalli, M. N. Partl, G. Tebaldi, A. G. Dumont, and L. D. Poulikakos, "Particle clustering phenomena in hot asphalt mixtures with high content of reclaimed asphalt pavements," *Construction and Building Materials*, vol. 100, pp. 207–217, 2015.

[74] L. Wang, *Mechanics of Asphalt : Microstructure and Micromechanics*. McGraw Hill Professional, Oct. 2010.

[75] E. Romeo, "Two-dimensional digital image correlation for asphalt mixture characterisation : interest and limitations," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, pp. 747–763, Dec. 2013.

[76] M. Grédiac, "The use of full-field measurement methods in composite material characterization : interest and limitations," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, pp. 751–761, July 2004.

[77] P. K. Rastogi, *Photomechanics*. Berlin ; New York : Springer, 1 edition ed., Mar. 2000.

[78] H. T. Goldrein, S. J. P. Palmer, and J. M. Huntley, "Automated fine grid technique for measurement of large-strain deformation maps," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 305–318, 1995.

[79] J. S. Sirkis and T. J. Lim, "Displacement and strain measurement with automated grid methods," *Experimental Mechanics*, vol. 31, pp. 382–388, Dec. 1991.

[80] C. Badulescu, M. Grédiac, and J. Mathias, "Investigation of the grid method for accurate in-plane strain measurement," *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 9, p. 095102, 2009.

[81] M. Grédiac, F. Sur, and B. Blaysat, "The grid method for in-plane displacement and strain measurement : A review and analysis," *Strain*, vol. 52, no. 3, pp. 205–243, 2016. STRAIN-1136.R1.

[82] H. Schreier, J.-J. Orteu, and M. A. Sutton, *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*. Springer US, 2009.

[83] L. Wang, J. Frost, and J. Lai, "Noninvasive measurement of permanent strain field resulting from rutting in asphalt concrete," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1687, pp. 85–94, Jan. 1999.

[84] L. B. Wang, J. D. Frost, and J. S. Lai, "Three-Dimensional Digital Representation of Granular Material Microstructure from X-Ray Tomography Imaging," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 28–35, 2004.

[85] JCGM, "International vocabulary of metrology basic and general concepts and associated terms (VIM)," tech. rep., JCGM, 2008.

[86] A. Chrysochoos and Y. Surrel, "Basics of metrology and introduction to techniques," in *Full-field measurements and identification in solid mechanics* (M. Grédiac and F. Hild, eds.), ch. 1, pp. 1–30, Wiley Online Library, 2013.

[87] Y. Surrel, "Some metrological issues in optical full-field techniques," in *International Symposium on Optical Science and Technology*, pp. 220–231, International Society for Optics and Photonics, 2002.

[88] E08 Committee, "Guide for evaluating non-contacting optical strain measurement systems," tech. rep., ASTM International, 2010.

[89] J.-S. Chen, S. Wong, and K. Lin, "Quantification of movements of flat and elongated particles in hot mix asphalt subject to wheel load test," *Materials and structures*, vol. 38, no. 3, pp. 395–402, 2005.

[90] F. Brémand, M. Cottron, P. Doumalin, J.-C. Dupré, A. Germaneau, and V. Valle, "Mesures en mécanique par méthodes optiques," *Techniques de l'ingénieur Grandeurs mécaniques*, vol. base documentaire : TIB407DUO., no. ref. article : r1850, 2011. fre.

[91] R. Szeliski, *Computer vision : algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.

[92] B. Pan, H. Xie, and Z. Wang, "Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching," *Applied optics*, vol. 49, no. 28, pp. 5501–5509, 2010.

[93] M. Sutton, C. Mingqi, W. Peters, Y. Chao, and S. McNeill, "Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis," *Image and Vision Computing*, vol. 4, pp. 143–150, Aug. 1986.

[94] H. W. Schreier and M. A. Sutton, "Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions," *Experimental Mechanics*, vol. 42, pp. 303–310, Sept. 2002.

[95] H. Lu and P. D. Cary, "Deformation measurements by digital image correlation : Implementation of a second-order displacement gradient," *Experimental Mechanics*, vol. 40, pp. 393–400, Dec. 2000.

[96] H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton, and W. H. P. Iii, "Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction," *Experimental Mechanics*, vol. 29, pp. 261–267, Sept. 1989.

[97] O. J. Bornert, M. and R. Stéphan., "Digital image correlation," in *Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics* (M. Grédiac and F. Hild, eds.), ch. 3, pp. 61–89, Hoboken, NJ : Wiley Online Library, 2013.

[98] R. Ktari, A. Millien, F. Fouchal, I.-O. Pop, and C. Petit, "Pavement interface damage behavior in tension monotonic loading," *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 430–442, 2016.

[99] B. Birgisson, A. Montepara, E. Romeo, R. Roncella, R. Roque, and G. Tebaldi, "An optical strain measurement system for asphalt mixtures," *Mater Struct*, vol. 42, pp. 427–441, May 2009.

[100] C. Xing, Y. Tan, X. Liu, K. Anupam, and T. Scarpas, "Research on local deformation property of asphalt mixture using digital image correlation," *Construction and Building Materials*, vol. 140, pp. 416–423, 2017.

[101] D. Lecompte, A. Smits, S. Bossuyt, H. Sol, J. Vantomme, D. Van Hemelrijck, and A. M. Habraken, "Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 44, pp. 1132–1145, Nov. 2006.

[102] B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian, and Z. Wang, "Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns," *Opt Express*, vol. 16, pp. 7037–7048, May 2008.

[103] M. A. Sutton, J. H. Yan, V. Tiwari, H. W. Schreier, and J. J. Orteu, "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, pp. 746–757, Oct. 2008.

[104] M. A. Sutton, N. Li, D. C. Joy, A. P. Reynolds, and X. Li, "Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements part i : SEM imaging at magnifications from 200 to 10,000," *Exp Mech*, vol. 47, pp. 775–787, Dec. 2007.

[105] M. A. Sutton, N. Li, D. Garcia, N. Cornille, J. J. Orteu, S. R. McNeill, H. W. Schreier, X. Li, and A. P. Reynolds, "Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements part II : Experimental validation for magnifications from 200 to 10,000," *Exp Mech*, vol. 47, pp. 789–804, Dec. 2007.

[106] Y. R. Kim and H. Wen, "Fracture energy from indirect tension testing," vol. 71, pp. 779–793, SHERIDAN BOOK CO, CHELSEA MICHIGAN, 2002.

[107] T. Yi-qiu, Z. Lei, G. Meng, and S. Li-yan, "Investigation of the deformation properties of asphalt mixtures with DIC technique," *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 581–590, Dec. 2012.

[108] A. Montepara, E. Romeo, M. Isola, and G. Tebaldi, "The role of fillers on cracking behavior of mastics and asphalt mixtures," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 80, 2011.

[109] E. Masad, N. Somadevan, H. Bahia, and S. Kose, "Modeling and Experimental Measurements of Strain Distribution in Asphalt Mixes," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 127, no. 6, pp. 477–485, 2001.

[110] A. Moriyoshi, N. Takahashi, O. Ikeda, M. Kawashima, and T. Akabane, "Strain distribution in asphalt mixtures during the wheel tracking test at high temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1128–1135, 2013.

[111] Y. Seo, Y. R. Kim, M. W. Witczak, and R. Bonaquist, "Application of digital image correlation method to mechanical testing of asphalt-aggregate mixtures," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1789, no. 1, pp. 162–172, 2002.

[112] A. Montepara, E. Romeo, B. Birgisson, and G. Tebaldi, "Strain localization and damage distribution in SBS polymer modified asphalt mixtures," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, pp. 899–915, Jan. 2010.

[113] Z. Dong, X. Gong, L. Zhao, and L. Zhang, "Mesostructural damage simulation of asphalt mixture using microscopic interface contact models," *Construction and Building Materials*, vol. 53, pp. 665–673, Feb. 2014.

[114] J. M. Read, *Fatigue cracking of bituminous paving mixtures*. PhD thesis, University of Nottingham England, 1996.

[115] A. Hartman and M. Gilchrist, "Evaluating four-point bend fatigue of asphalt mix using image analysis," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 60–68, 2004.

[116] B. Birgisson, A. Montepara, E. Romeo, R. Roque, and G. Tebaldi, "Influence of mixture properties on fracture mechanisms in asphalt mixtures," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, pp. 61–88, Jan. 2010.

[117] W. G. Buttlar, B. C. Hill, Y. R. Kim, M. E. Kutay, A. Millien, A. Montepara, G. H. Paulino, C. Petit, I. O. Pop, E. Romeo, R. Roncella, S. A. Safavizadeh, G. Tebaldi, and A. Wargo, "Digital image correlation techniques to investigate strain fields and cracking phenomena in asphalt materials," *Materials and Structures*, July 2014.

[118] B. Hill and W. G. Buttlar, "Evaluation of polymer modification in asphalt mixtures through digital image correlation and performance space diagrams," *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 667–673, 2016.

[119] L. Gao, F. Ni, A. Braham, and H. Luo, "Mixed-mode cracking behavior of cold recycled mixes with emulsion using arcan configuration," *Construction and Building Materials*, vol. 55, pp. 415–422, Mar. 2014.

[120] Y. Zhao, F. Ni, L. Zhou, and L. Gao, "Three-dimensional fracture simulation of cold in-place recycling mixture using cohesive zone model," *Construction and Building Materials*, vol. 120, pp. 19–28, 2016.

[121] Y. Seo, Y. R. Kim, R. A. Schapery, M. W. Witczak, and R. Bonaquist, "A study of crack tip deformation and crack growth in asphalt concrete using fracture mechanics," in *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 73, 2004.

[122] G. Chehab, Y. Seo, and Y. Kim, "Viscoelastoplastic damage characterization of asphalt aggregate mixtures using digital image correlation," *International Journal of Geomechanics*, vol. 7, no. 2, pp. 111–118, 2007.

[123] Y. R. Kim and D. N. Little, "One dimensional constitutive modeling of asphalt concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 116, pp. 751–772, Apr. 1990.

[124] F. T. S. Aragão and Y.-R. Kim, "Characterization of fracture properties of asphalt mixtures based on cohesive zone modeling and digital image correlation technique," in *Transportation Research Board 2011 Annual Meeting*, 2011.

[125] Y. Surrel, "Moiré and grid methods : a signal-processing approach," in *International Conference on Interferometry'94*, pp. 118–127, International Society for Optics and Photonics, 1994.

[126] J. Molimard and Y. Surrel, "Grid method, moiré and deflectometry," in *Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics* (M. Grédiac and F. Hild, eds.), ch. 3, pp. 61–89, Hoboken, NJ : Wiley Online Library, 2013.

[127] M. Grediac, F. Sur, and B. Blaysat, "The grid method for in-plane displacement and strain measurement : A review and analysis," *Strain*, vol. 52, no. 3, pp. 205–243, 2016.

[128] Q. Kemao, "Windowed fourier transform for fringe pattern analysis," *Applied Optics*, vol. 43, no. 13, pp. 2695–2702, 2004.

[129] Q. Kemao, "Two-dimensional windowed fourier transform for fringe pattern analysis : principles, applications and implementations," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, no. 2, pp. 304–317, 2007.

[130] Q. Kemao, "Applications of windowed fourier fringe analysis in optical measurement : a review," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 66, pp. 67–73, 2015.

[131] X. Dai, H. Xie, and Q. Wang, "Geometric phase analysis based on the windowed fourier transform for the deformation field measurement," *Optics & Laser Technology*, vol. 58, pp. 119–127, 2014.

[132] J.-L. Piro and M. Grédiac, "Producing and transferring low-spatial-frequency grids for measuring displacement fields with moiré and grid methods," *Experimental Techniques*, vol. 28, no. 4, pp. 23–26, 2004.

[133] M. Grédiac, B. Blaysat, and F. Sur, "A critical comparison of some metrological parameters characterizing local digital image correlation and grid method," *Experimental Mechanics*, pp. 1–33, 2017.

[134] F. Sur and M. Grédiac, "On noise reduction in strain maps obtained with the grid method by averaging images affected by vibrations," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 66, pp. 210–222, 2015.

[135] C. Badulescu, M. Grédiac, J. D. Mathias, and D. Roux, "A procedure for accurate one-dimensional strain measurement using the grid method," *Exp Mech*, vol. 49, no. 6, pp. 841–854, 2009.

[136] "http ://www.thegridmethod.net/code."

[137] Y. Surrel, "Fringe Analysis," in *Photomechanics* (D. P. K. Rastogi, ed.), no. 77 in Topics in Applied Physics, pp. 55–102, Springer Berlin Heidelberg, 2000.

[138] C. Badulescu, *Calcul précis des déformations planes par la méthode de la grille. Application à l'étude d'un multicristal d'aluminium.* PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2010.

[139] S. Starodubsky, I. Blechman, and M. Livneh, "Stress-strain relationship for asphalt concrete in compression," *Materials and Structures*, vol. 27, no. 8, pp. 474–482, 1994.

[140] B. Hill, H. Wang, and W. G. Buttlar, "Effects of recycled shingle and virgin asphalt binder mixing on mixture performance," in *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*, pp. 291–297, Springer, 2016.

[141] M. Teguedi, B. Blaysat, M. Grédiac, S. Liandrat, S. Moreira, and E. Toussaint, "Applying a full-field measurement technique to study the mechanical behavior of asphalt mixtures," in *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*, pp. 705–711, Springer Netherlands, 2016.

[142] M. C. Teguedi, B. Blaysat, E. Toussaint, S. Moreira, S. Liandrat, and M. Grédiac, "Applying a full-field measurement technique for studying the local deformation in reclaimed asphalt pavements," *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 547–558, 2016.

[143] M.-C. Teguedi, E. Toussaint, B. Blaysat, M. Grédiac, S. Moreira, and S. Liandrat, "Studying the influence of the reclaimed asphalt pavement (rap) on local deformation properties of asphalt mixtures," in *Experimental and Applied Mechanics, Volume 4*, pp. 159–163, Springer, 2017.

[144] D. Middleton, "Sampling and reconstruction of wave-number-limited functions in n-dimensional euclidean spaces," *Inform. Control*, vol. 5, pp. 279–323, 1962.

[145] F. Sur, B. Blaysat, and M. Grédiac, "Determining displacement and strain maps immune from aliasing effect with the grid method," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 86, pp. 317–328, 2016.

[146] J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou, "Ncorr : Open-source 2D Digital Image Correlation Matlab Software," *Experimental Mechanics*, vol. 55, no. 6, pp. 1105–1122, 2015.

[147] "ASTM E2208-02(2010)e1, Standard guide for evaluating non-contacting optical strain measurement systems," *ASTM International*, 2010.

[148] P. Reu, "Virtual strain gage size study," *Experimental Techniques*, vol. 39, no. 5, pp. 1–3, 2015.

[149] H. Di Benedetto and M. Neifar, "Coefficients de dilatation et de contraction thermiques d'un enrobé bitumineux avec et sans chargement mécanique," *Mechanical Tests for Bituminous Materials, Di Benedetto & Francken Editors*, 1997.

[150] F. Olard, *Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé.* PhD thesis, INSA de Lyon, 2003.

[151] M. R. Islam and R. A. Tarefder, "Coefficients of thermal contraction and expansion of asphalt concrete in the laboratory," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 11, p. 04015020, 2015.

[152] I. Artamendi, B. Allen, C. Ward, and P. Phillips, "Differential thermal contraction of asphalt components," in *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, pp. 953–962, Springer, 2012.

[153] M. Alexander and S. Mindess, *Aggregates in concrete.* CRC Press, 2010.

[154] T. S. Majmudar and R. P. Behringer, "Contact force measurements and stress-induced anisotropy in granular materials," *Nature*, vol. 435, no. 7045, pp. 1079–1082, 2005.

[155] M. C. Teguedi, E. Toussaint, B. Blaysat, S. Moreira, S. Liandrat, and M. Grédiac, "Towards the local expansion and contraction measurement of asphalt exposed to freeze-thaw cycles," *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 438–450, Nov. 2017.

[156] S. Lamothe, *Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2014.

[157] F. Moutier, "Formulation des enrobés- la machine asservie d'essais rhéologiques (MAER)," *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, no. 170, 1990.

[158] "EN NF 12697-26," *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 : module de rigidité*, 2012.

[159] M. Sutton, J. Yan, V. Tiwari, H. Schreier, and J. Orteu, "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, no. 10, pp. 746–757, 2008.

[160] B. Pan, L. Yu, and D. Wu, "High-accuracy 2D digital image correlation measurements using low-cost imaging lenses : implementation of a generalized compensation method," *Measurement Science and Technology*, vol. 25, no. 2, p. 025001, 2013.

[161] L. Wittevrongel, M. Badaloni, R. Balcaen, P. Lava, and D. Debruyne, "Evaluation of methodologies for compensation of out of plane motions in a 2D digital image correlation setup," *Strain*, vol. 51, no. 5, pp. 357–369, 2015.

[162] L. Yu and B. Pan, "In-plane displacement and strain measurements using a camera phone and digital image correlation," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 5, pp. 054107–054107, 2014.

[163] R. Linder, "Comportement en traction simple des enrobés hydrocarbonés," *Rapport de recherche LPC*, no. 71, 1977.

Annexe A

Formulation des mélanges d'enrobé recyclé

Page 1

Cerema

FEUILLE D'ESSAIS

Date fin essais

ESSAI DURIEZ SUR
MELANGES HYDROCARBONES A CHAUD
NF P 12697-12

DONNEUR D'ORDRE : POLYTECH

AFFAIRE :

Date de fabrication	
Date d'immersion	
Date d'écrasement	

N° IMAG :

N° OT :

Formule 100% Calcaire

Constituants	Provenance	%	Poids
6/10	Calcaire	22,6	**3164**
4/6	Calcaire	23,6	**3304**
0/4	Calcaire	45,8	**6412**
Filler	Gannat	2,3	**322**
	TOTAL AGREGATS		**14000**
Bitume 50/70	Shell	5,7	**798 + 25**

Température de malaxage	160
Malaxeur utilisé	TYPE 2
Heure de malaxage	
Heure de début de compactage	

Le technicien responsable de l'essai

E. CREGUT

100%.xls

Cerema

FEUILLE D'ESSAIS

ESSAI DURIEZ SUR
MELANGES HYDROCARBONES A CHAUD
NF P 12697-12

Date fin essais

DONNEUR D'ORDRE : POLYTECH

AFFAIRE :

Date de fabrication	
Date d'immersion	
Date d'écrasement	

N° IMAG :

N° OT :

Formule 20% Agregats

Constituants	Provenance	%	Poids
6/10	Calcaire	22,6	**2531,2**
4/6	Calcaire	23,6	**2643,2**
0/4	Calcaire	45,8	**5129,6**
0/10	Agregats	20,0	**2800**
Filler	Gannat	2,3	**257,6**
	TOTAL AGREGATS		**11200**
Bitume 50/70	Shell	5,7	**638,4 + 25**

Température de malaxage	160
Malaxeur utilisé	TYPE 2
Heure de malaxage	
Heure de début de compactage	

Le technicien responsable de l'essai

E. CREGUT

80%.xls

Cerema

FEUILLE D'ESSAIS

Date fin essais

ESSAI DURIEZ SUR
MELANGES HYDROCARBONES A CHAUD
NF P 12697-12

DONNEUR D'ORDRE : POLYTECH

AFFAIRE :

Date de fabrication	
Date d'immersion	
Date d'écrasement	

N° IMAG :

N° OT :

Formule 40% Agregats

Constituants	Provenance	%	Poids
6/10	Calcaire	22,6	**1898,4**
4/6	Calcaire	23,6	**1982,4**
0/4	Calcaire	45,8	**3847,2**
0/10	Agregats	40,0	**5600**
Filler	Gannat	2,3	**193,2**
	TOTAL		**8400**
Bitume 50/70	Shell	5,7	**478,8 + 25**

Température de malaxage	160
Malaxeur utilisé	TYPE 2
Heure de malaxage	
Heure de début de compactage	

Le technicien responsable de l'essai

E. CREGUT

60%.xls

Cerema

FEUILLE D'ESSAIS

ESSAI DURIEZ SUR
MELANGES HYDROCARBONES A CHAUD
NF P 12697-12

Date fin essais

DONNEUR D'ORDRE : POLYTECH

AFFAIRE :

Date de fabrication	
Date d'immersion	
Date d'écrasement	

N° IMAG :

N° OT :

Formule 100% Agregats

Constituants	Provenance	%	Poids
6/10	AGREGATS	97,0	**13580**
Filler	Gannat	2,3	**322**
	TOTAL AGREGATS		**14000**
Bitume 50/70	Shell	0,7	**98 + 25**

Température de malaxage	160
Malaxeur utilisé	TYPE 2
Heure de malaxage	
Heure de début de compactage	

Le technicien responsable de l'essai

E. CREGUT

100%_Agregats.xls

Annexe B

Résultats supplémentaires pour le chapitre 3

B.1 Cartes de déformation

Cette annexe présente des cartes de déformations relatives aux éprouvettes 0% AE, 20% AE et 100% AE (*cf* Fig. B.1). Il s'agit principalement des répliques qui n'ont pas été présentées dans le chapitre 3. La Fig. B.1a-c illustre des cartes de déformation relatives à l'échantillon 100% AE. Dans ce cas, l'application de la force n'est pas uniforme et légèrement accentuée à gauche. Sur cette figure, une forte concentration de déformation est observée aux bords des granulats. Ces remarques sont en accord avec les resultats observés pour la réplique 1.
L'échantillon 0% AE présente des concentrations de déformation aussi bien dans le mastic qu'aux bords des granulats (*cf* Fig. B.1d-f). Ces remarques sont également en accord avec ceux observées pour la réplique 1.

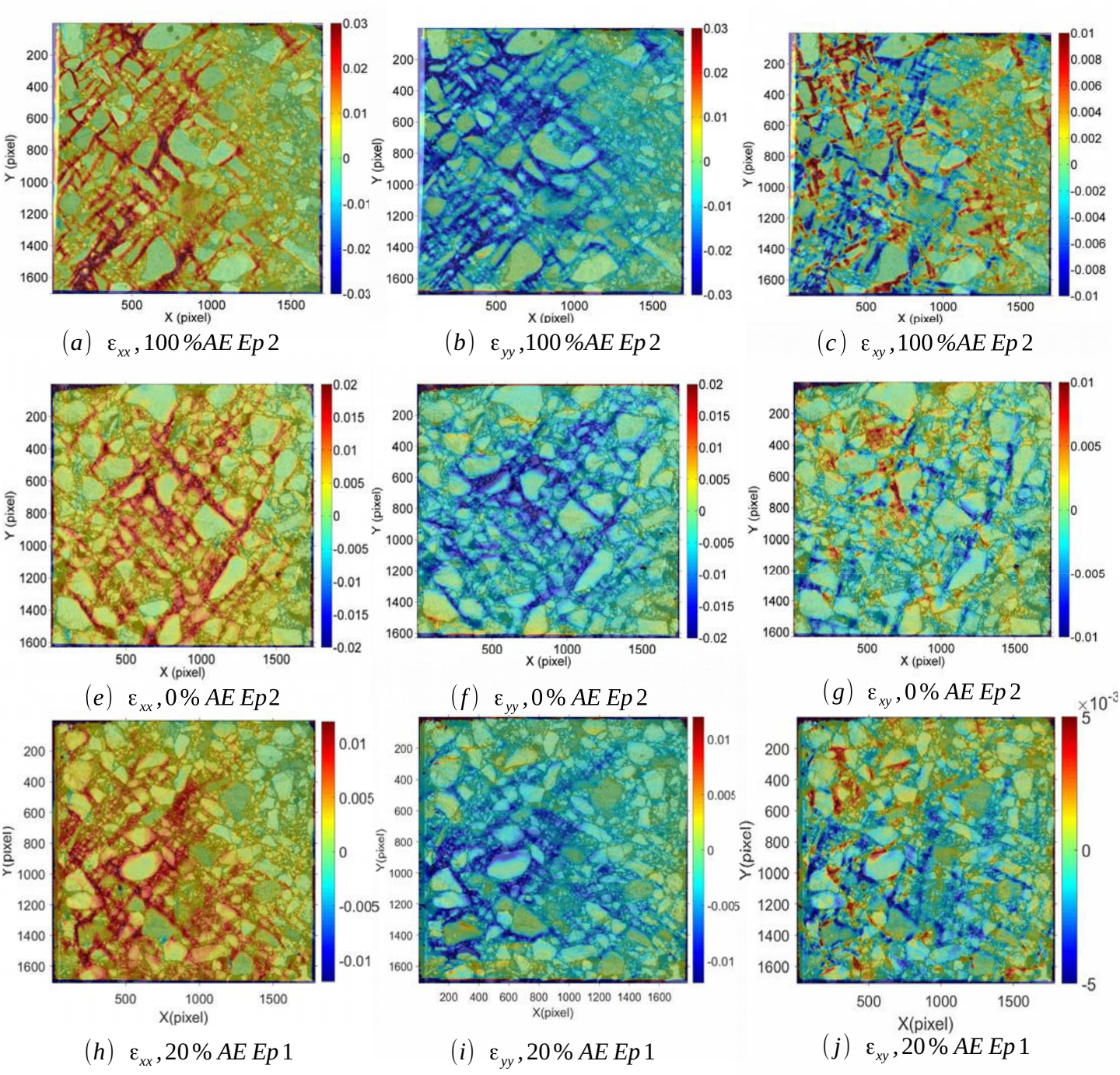


FIGURE B.1 – Champs de déformation pour les éprouvettes 0% AE, 20% AE et 100% AE.

B.2 Microstructure de l'échantillon 100% AE testée sans la grille

La Fig. B.2 montre la microstructure de l'échantillon 100% AE testée sans la grille. La figure illustre la présence de fissures aux bords de certains granulats.

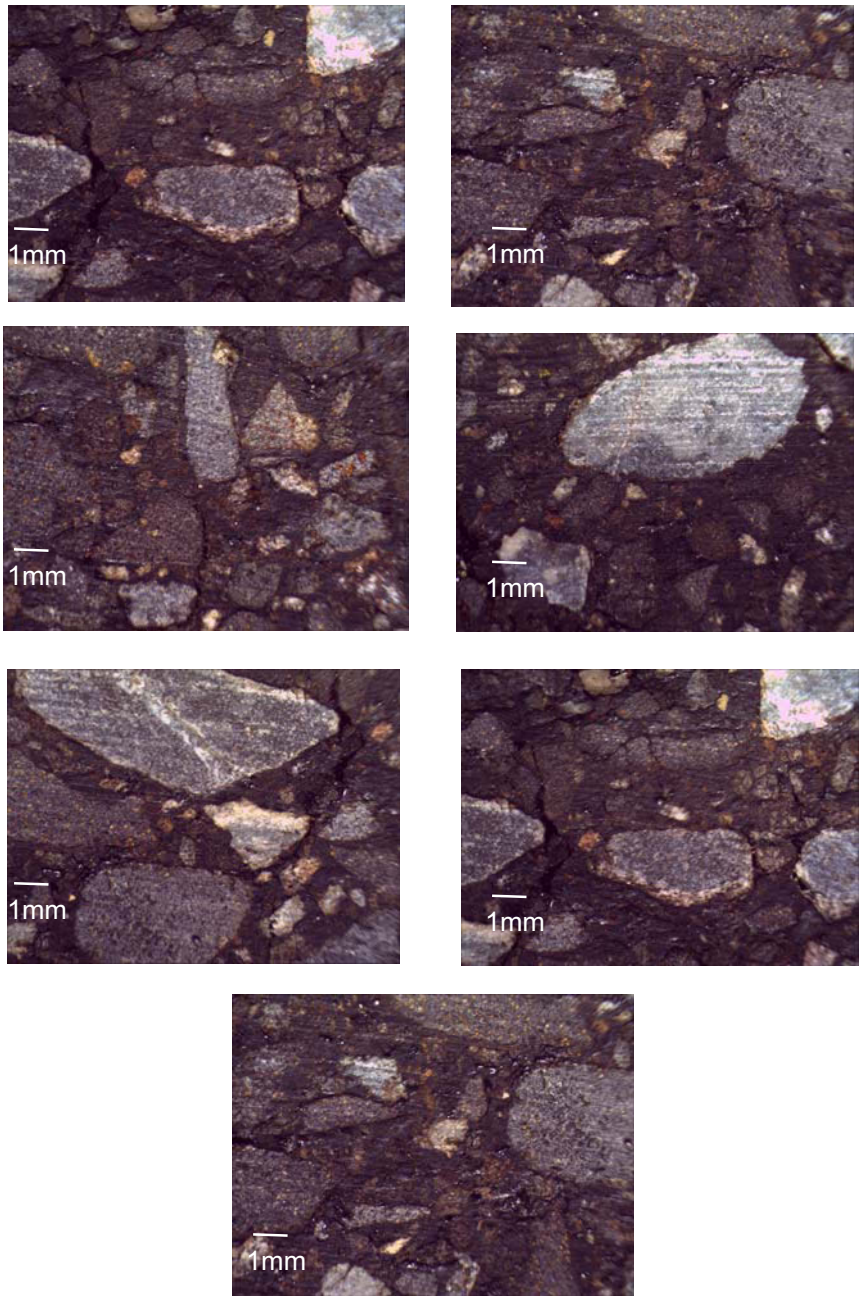
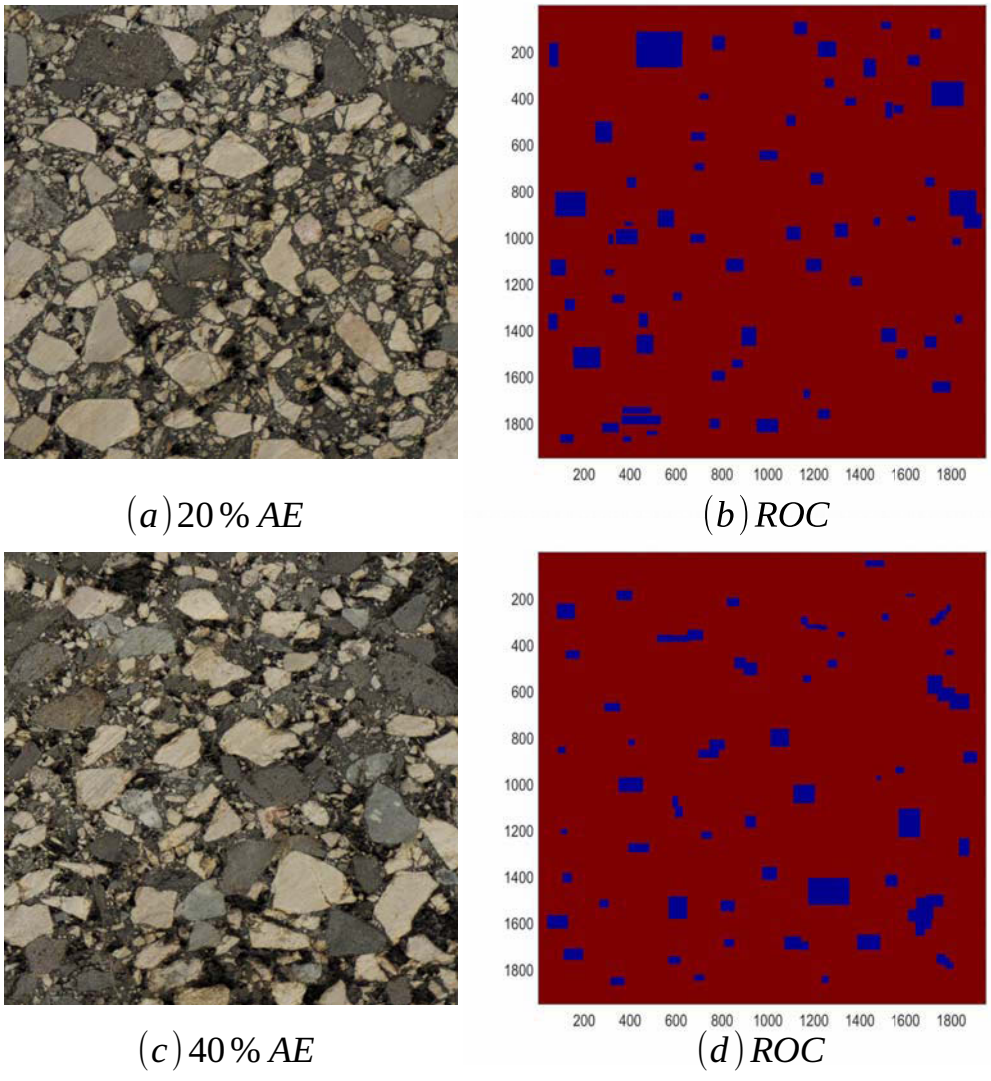


FIGURE B.2 – Microstructures de l'échantillon 100% AE testé sans la grille.

Annexe C

Résultats supplémentaires pour le chapitre 5

C.1 Exemples des régions de compensation (ROC)



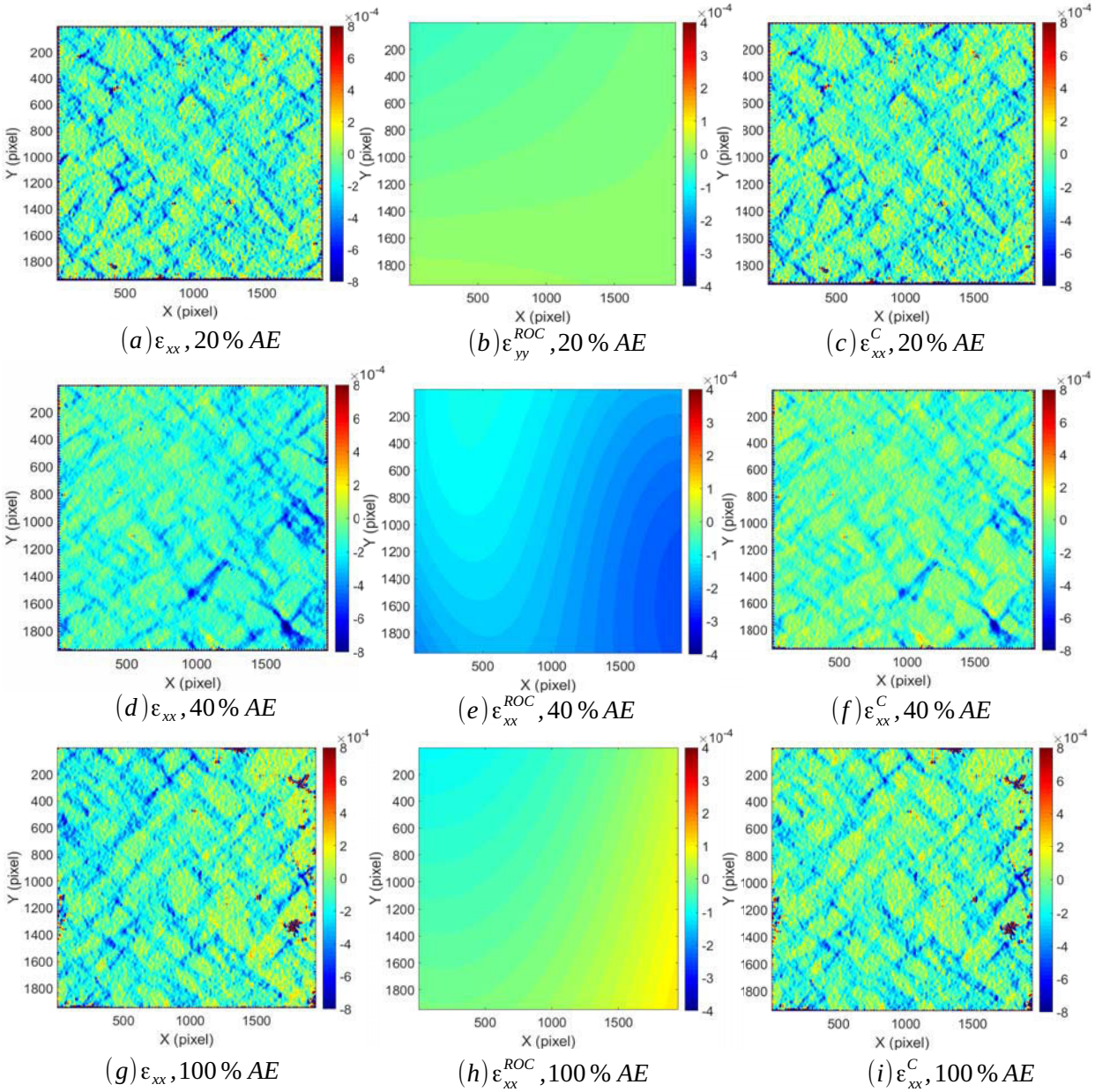
$(a)\,20\,\%\,AE$ $(b)\,ROC$

$(c)\,40\,\%\,AE$ $(d)\,ROC$

FIGURE C.1 – ROC pour les échantillons 20% AE et 40% AE .

C.2 Exemples de la compensation des OPM

Correction des OPM pour les échantillons 20% AE, 40% AE et 100% AE.

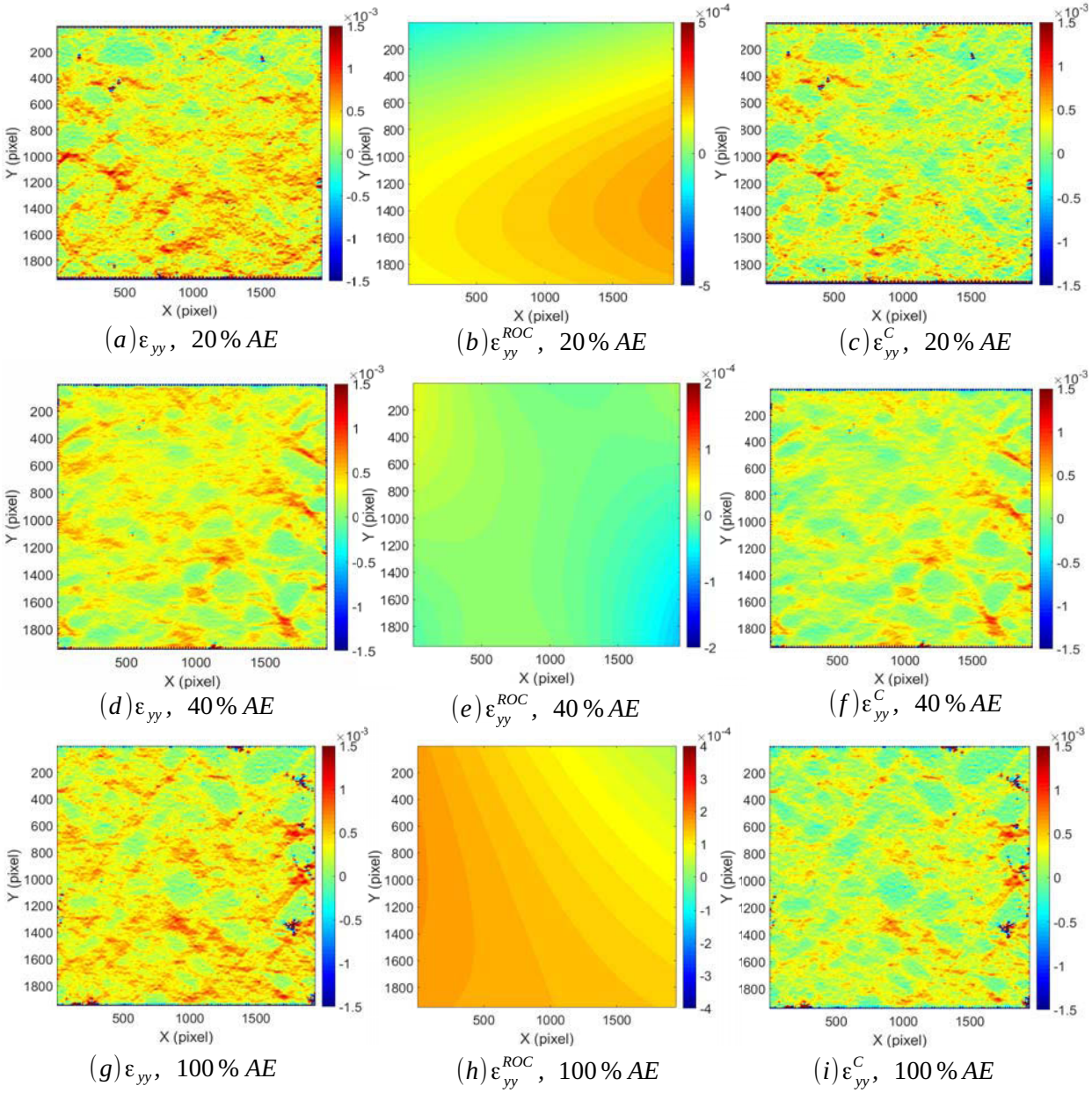


(a) ε_{xx}, 20 % AE (b) ε_{yy}^{ROC}, 20 % AE (c) ε_{xx}^{C}, 20 % AE

(d) ε_{xx}, 40 % AE (e) ε_{xx}^{ROC}, 40 % AE (f) ε_{xx}^{C}, 40 % AE

(g) ε_{xx}, 100 % AE (h) ε_{xx}^{ROC}, 100 % AE (i) ε_{xx}^{C}, 100 % AE

FIGURE C.2 – Correction des OPM suivant la direction x.



$(a)\varepsilon_{yy}$, 20 % AE $(b)\varepsilon_{yy}^{ROC}$, 20 % AE $(c)\varepsilon_{yy}^{C}$, 20 % AE

$(d)\varepsilon_{yy}$, 40 % AE $(e)\varepsilon_{yy}^{ROC}$, 40 % AE $(f)\varepsilon_{yy}^{C}$, 40 % AE

$(g)\varepsilon_{yy}$, 100 % AE $(h)\varepsilon_{yy}^{ROC}$, 100 % AE $(i)\varepsilon_{yy}^{C}$, 100 % AE

FIGURE C.3 – Correction des OPM suivant la direction y.

C.3 Comparaison entre la déformation compensée issue de la MG et celle issue des capteurs MAER

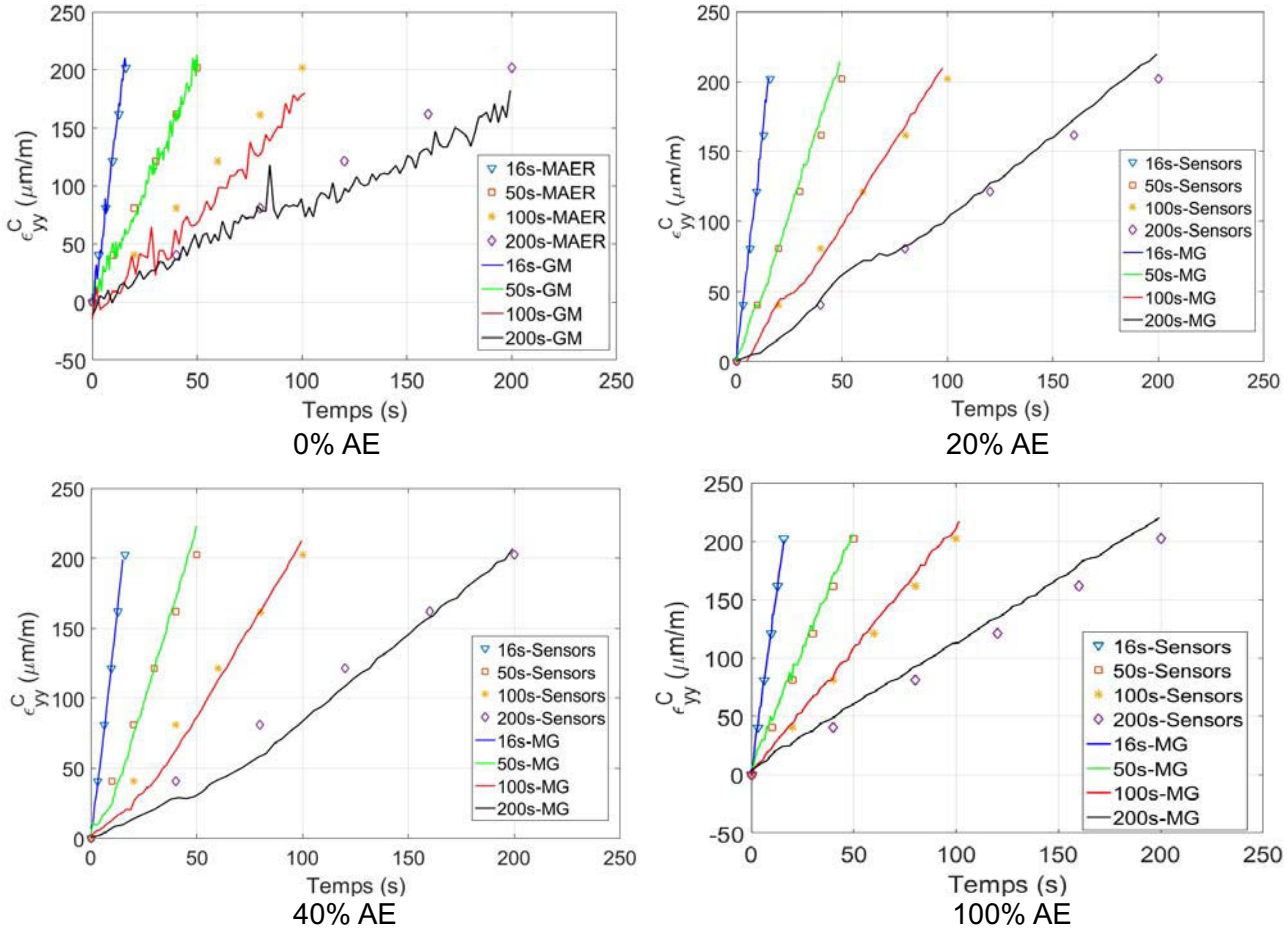
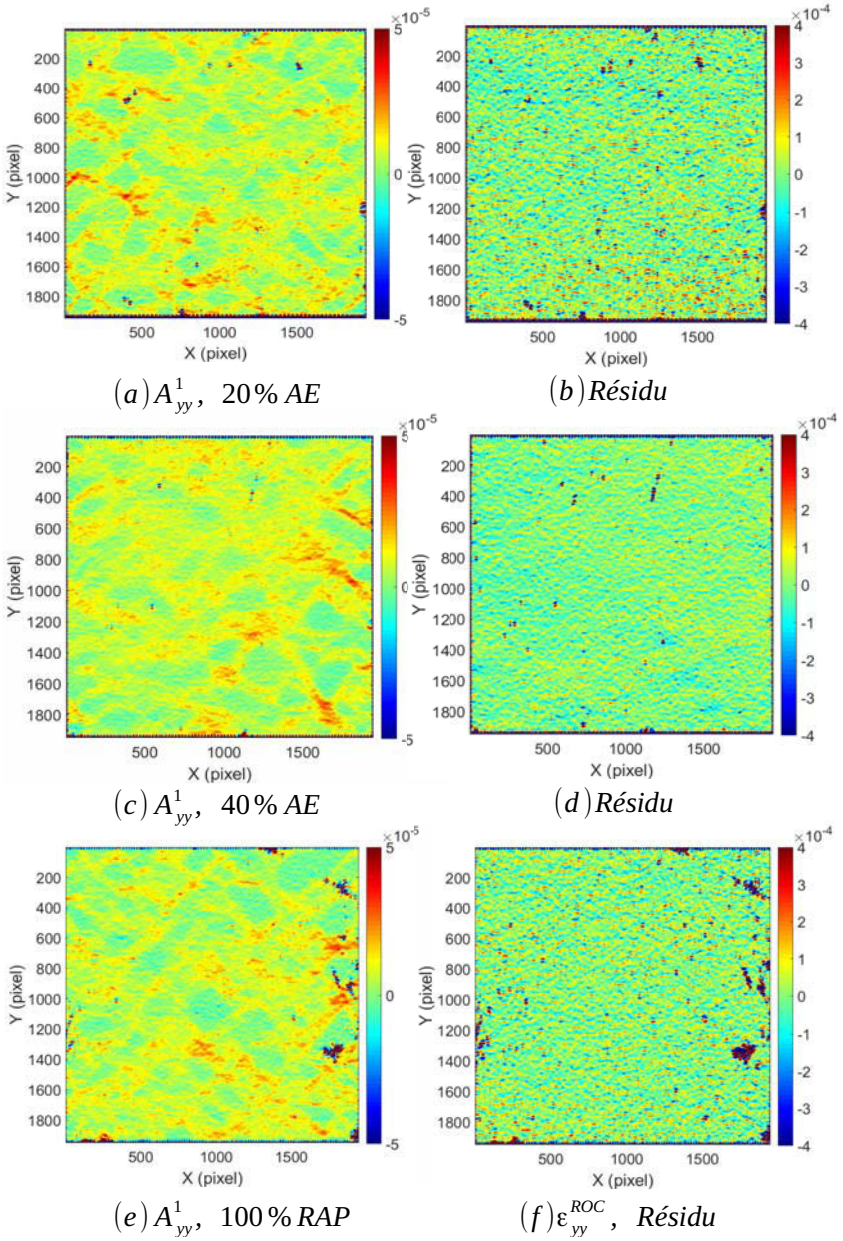


FIGURE C.4 – Comparaison entre la déformation compensée et celle issue des capteurs MAER.

C.4 Exemple des cartes de taux de déformation



$(a)\, A^1_{yy}$, 20 % *AE* (b) *Résidu*

$(c)\, A^1_{yy}$, 40 % *AE* (d) *Résidu*

$(e)\, A^1_{yy}$, 100 % *RAP* $(f)\, \varepsilon^{ROC}_{yy}$, *Résidu*

FIGURE C.5 – Cartes de vitesse de déformation suivant la direction y la distribution du résidu dans la ROI à t=16s.