



HAL
open science

Caractérisation des mélanges bitumineux à base d'agrégats d'enrobé (AE) à différentes échelles

Elio Ziade

► **To cite this version:**

Elio Ziade. Caractérisation des mélanges bitumineux à base d'agrégats d'enrobé (AE) à différentes échelles. Génie civil. Université de Limoges, 2023. Français. NNT : 2023LIMO0008 . tel-04188049

HAL Id: tel-04188049

<https://theses.hal.science/tel-04188049v1>

Submitted on 25 Aug 2023

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.

Université de Limoges

**ED 609 - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique,
Énergétique (SIMME)**

GC2D - Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges
Génie Civil

Présentée et soutenue par
ZIADE Elio

Le 6 février 2023

**Caractérisation des mélanges bitumineux à base d'agrégats
d'enrobé (AE) à différentes échelles**

Thèse dirigée par Petit Christophe.

JURY :

Président du jury

M. Pierre Horny, directeur laboratoire LAMES, Université Gustave Eiffel

Rapporteurs

M. Pierre Horny, directeur laboratoire LAMES, Université Gustave Eiffel

M. Cédric Sauzéat, professeur, ENTPE, Université de Lyon

Examineurs

Mme. Juliette Blanc, ingénieure de recherche, Université Gustave Eiffel

M. Alain Beghin, directeur technique, Spie batignolles malet

M. Christophe Petit, Professeur, Université de Limoges

M. Joseph Absi, Professeur, Université de Limoges

Mme. Anne Millien, maître de conférences, Université de Limoges

M. Fateh Fakhari Tehrani, maître de conférences, Université de Limoges

À mes parents, ma sœur et mes frères

À ma copine et mes amis

À tous les travailleurs dans le domaine

« Que veut dire travailler avec amour ? C'est tisser une étoffe avec un fil tiré de votre cœur, comme si votre bien-aimé devait porter cette étoffe. C'est bâtir une maison avec affection, comme si votre bien-aimé devait résider dans cette maison. C'est semer le grain avec tendresse, et récolter la moisson dans la joie, comme si votre bien-aimé devait en manger le fruit. »

Khalil Gibran, *Le Prophète*

Remerciements

Arrivé au bout de ce travail de recherche, je souhaite consacrer quelques mots à remercier toutes les personnes qui m'ont encouragé et aidé au cours de ma thèse et qui m'ont permis de la mener à terme.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse Pr. Christophe PETIT et mon codirecteur de thèse Pr. Joseph ABSI et mon équipe d'encadrement, Dr. Fateh FAKHARI TEHRANI, Dr. Anne MILLIEN et Dr. Philippe REYNAUD, dont je retiendrai leurs perspicacités, leurs largeurs de vues, leurs disponibilités, leurs compétences opérationnelles et techniques, et sans qui ce manuscrit ne serait pas ce qu'il est.

J'adresse mes plus grands remerciements au directeur technique de la société Spie batignolles malet Dr. Alain BEGHIN pour son encadrement, sa disponibilité, son soutien et de m'avoir intégré à son équipe R&D au sein du pôle développement tout au long de ce projet.

Je remercie les rapporteurs, Dr. Pierre HORNYCH et Pr. Cédric SAUZEAT d'avoir accepté de rapporter ce travail. J'espère être à la hauteur de vos attentes.

Je tiens à remercier également les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je ferais mon maximum afin d'honorer vos remarques et recommandations.

Je souhaite remercier l'équipe R&D de Malet Aurélia NICOLAI, Marion BROUCA, Laure LEBOUÇ, Yohan CANTEGREIL pour l'ensemble du soutien technique et opérationnel apporté durant la réalisation de ce projet.

Je remercie aussi le personnel du campus de génie civil à Egletons de m'avoir accueilli dans leur famille. Je porterai une attention particulière à Dr. Benoît PICOUX pour son soutien durant les moments d'écriture de la phase finale.

Ces quelques années sont pour moi inoubliables grâce à mes collègues doctorants Dr. Christina, Dr. Hajer, Dr. Xi, Dr. Wael, Dr. Minh, Dr. Sofiane, Dr. Yamina, Dr. Joel, Christian, Safa, Jérôme et Jad. J'ai beaucoup apprécié leur joie de vivre, les nombreuses discussions et notamment leur soutien.

Je remercie mes amis Charlotte, Lara, Liz, Nouhad, Perla, Rim, Romy, Sara, Georges AH, Georges T et Jean pour leur soutien et les bons moments qu'on a passé ensemble.

Enfin, ma plus grande reconnaissance à mes parents Najwa et Georges qui grâce à eux j'ai pu devenir ce que je suis aujourd'hui. Je remercie ma sœur Maria, mes frères Nicolas et Charbel et ma copine Alexandra pour leur support et leur patience illimitée malgré la distance qui nous sépare.

With your help, I did it!

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Table des matières

Introduction	20
Partie I. Etude bibliographique.....	24
I.1. Structure des chaussées.....	24
I.1.1. Composition des couches de chaussée en matériaux bitumineux	25
I.1.1.1. Composants minéraux	26
I.1.1.1.1. Granulats.....	26
I.1.1.1.2. Filler	27
I.1.1.2. Liants hydrocarbonés.....	27
I.1.1.2.1. Origine.....	27
I.1.1.2.2. Production	27
I.1.1.2.3. Le bitume dans l'enrobé	28
I.1.1.2.4. Composition chimique	28
I.1.1.2.5. Caractérisation chimique	29
I.1.1.2.6. Essais standards de caractérisation	30
I.1.1.3. Essais de caractérisation rhéologiques des matériaux bitumineux.....	31
I.1.1.3.1. Caractérisation des bitumes	31
I.1.1.3.2. Caractérisation des mastic et mortier.....	38
I.1.1.3.3. Caractérisation des enrobés bitumineux.....	40
I.1.1.4. Prédiction du comportement mécanique des mélanges bitumineux à partir des propriétés du liant	43
I.1.1.4.1. Generalized self-consistent schemes GSCS	43
I.1.1.4.2. Geometrical Transformation Shift-homothety-shift and time shift SHStS..	45
I.1.1.5. Modélisation du comportement LVE des mélanges bitumineux.....	46
I.1.2. La méthode française de dimensionnement des chaussées.....	47
I.1.3. Les sollicitations externes endommageant la structure routière	49
I.1.3.1. Sollicitations mécaniques	49
I.1.3.2. Sollicitations climatiques	50
I.1.4. Les dégradations des chaussées	51
I.1.5. Travaux d'entretien des chaussées	52
I.2. Recyclage des enrobés.....	53
I.2.1. Préparation au recyclage des déchets résultants	53
I.2.2. Evolution et intérêt de l'utilisation des AE	54
I.2.3. Techniques de recyclage des agrégats d'enrobé AE	56
I.2.4. Caractéristiques des agrégats d'enrobé (AE)	56
I.2.4.1. Propriétés du liant d'agrégat d'enrobé (LAE).....	57
I.2.4.1.1. Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier IRTF.....	58
I.2.4.2. Propriétés des granulats d'agrégats d'enrobé (GAE)	59
I.2.5. Taux de recyclage des enrobés.....	59
I.2.6. Formulation et fabrication des enrobés contenant des AE.....	60
I.2.6.1. Ajustement des caractéristiques du liant d'apport	60
I.2.6.2. Ajustement des caractéristiques des granulats d'apport.....	61
I.2.6.3. Mode opératoire pour la fabrication en laboratoire du mélange bitumineux contenant des AE	62
I.2.6.3.1. Séchage des constituants.....	62
I.2.6.3.2. Mise en température de bitume	62

I.2.6.3.3. Mise en température des granulats et agrégats d'enrobé	62
I.2.6.3.4. Malaxage.....	62
I.3. Performances mécaniques des enrobés contenant des AE	62
I.3.1. Notion d'homogénéité du mélange entre le liant vieux et le liant neuf.....	63
I.3.2. Méthodes de détermination du degré d'homogénéité du mélange.....	64
I.3.2.1. Essai de NGUYEN (Nguyen, 2009).....	64
I.3.2.2. Essai de Navaro (navaro,2011).....	64
I.3.2.3. Essai de Vassaux (Vassaux, 2017).....	65
I.3.2.4. Essai de Gaspar (Gaspar et al., 2020)	66
I.3.3. Facteurs influençant le degré d'homogénéité de mélange	67
I.3.4. Influence du degré de mélange sur les performances mécaniques	70
I.3.4.1. Rigidité.....	70
I.3.4.2. Fatigue.....	72
I.3.4.3. Comportement à basse température.....	74
I.4. Modélisation numérique hétérogène des mélanges bitumineux	75
I.4.1. Principe multi-échelle	75
I.4.2. Modélisation hétérogène	78
I.5. Conclusion.....	82
Partie II. Echelle matériau : Caractérisation viscoélastique multi-échelle.....	85
II.1. Introduction.....	85
II.2. Matériau.....	85
II.2.1. Propriétés du matériau	85
II.2.2. Les différentes échelles	87
II.2.2.1. A l'échelle bitume	88
II.2.2.1.1. Bitume neuf (bitume d'apport).....	88
II.2.2.1.2. Bitume vieux (bitume provenant des AE)	88
II.2.2.1.3. Bitume mélange « 100% homogène »	89
II.2.2.2. A l'échelle mastic	90
II.2.2.2.1. Mastic neuf	90
II.2.2.2.2. Mastic vieux.....	91
II.2.2.2.3. Mastic mélange	91
II.2.2.3. A l'échelle mortier.....	91
II.2.2.3.1. Mortier neuf	91
II.2.2.3.2. Mortier vieux.....	91
II.2.2.3.3. Mortier mélange (100 % homogène).....	91
II.2.2.3.4. Mortier mélange (% inconnu d'homogénéité).....	91
II.2.2.4. A l'échelle enrobé.....	92
II.3. Programme expérimental.....	92
II.4. Essais de caractérisation des échelles bitume, mastic et mortier	93
II.4.1. Dynamic Shear Rheometer DSR	93
II.4.1.1. Choix de la géométrie	96
II.4.1.2. Hauteur de l'entrefer	98
II.4.2. Procédure expérimentale.....	99
II.4.2.1. Préparation de l'échantillon	99
II.4.2.2. Choix de la géométrie	99
II.4.2.3. Placement de l'échantillon au DSR	100
II.4.2.4. Réglage de l'entrefer.....	100
II.4.2.5. Détermination de l'intervalle viscoélastique linéaire DVL.....	100

II.4.2.6. Détermination de module complexe en cisaillement et de l'angle de phase	102
II.4.2.7. Vérification de l'endommagement de l'éprouvette	102
II.4.3. Résultats	104
II.4.3.1. Présentation et analyse des résultats.....	104
II.4.3.1.1. Distorsions imposées.....	105
II.4.3.1.2. Bitume neuf B5070	106
II.4.3.1.3. Paramètres de calage du modèle 2S2P1D	108
II.4.3.1.4. Comparaison entre bitume, mastic et mortier.....	109
II.4.3.1.5. Prédiction du plan Cole-Cole par la méthode SHStS (Di Benedetto et al., 2004).....	111
II.4.3.1.6. Comparaison entre neuf, vieux et mélange.....	113
II.4.3.1.7. Prédiction des coefficients de calage des mélanges (Mangiafico,2014)	115
II.5. Essais de caractérisation à l'échelle enrobé.....	118
II.5.1. Machine d'essai hydraulique MTS	118
II.5.2. Procédure expérimentale.....	119
II.5.2.1. Préparation de l'échantillon	119
II.5.2.2. Collage.....	121
II.5.2.3. Instrumentation	122
II.5.2.4. Détermination de l'intervalle viscoélastique linéaire DVL.....	123
II.5.2.5. Détermination de module complexe en cisaillement et de l'angle de phase	124
II.5.2.6. Vérification de l'endommagement de l'éprouvette	124
II.5.2.7. Résultats	125
II.6. Conclusion	126
Partie III. Echelle matériau : Modélisation par éléments finis	129
III.1. Introduction	129
III.2. Méthode multi-échelle	129
III.3. Procédure numérique : modèle biphasique	130
III.3.1. Création des modèles numériques	130
III.3.1.1. Génération des inclusions	131
III.3.1.2. Création de l'échantillon de mortier numérique.....	133
III.3.1.3. Propriétés mécaniques.....	133
III.3.1.4. Chargement et conditions aux limites.....	134
III.3.1.5. Maillage	134
III.3.1.6. Calcul du module complexe de cisaillement.....	135
III.3.1.7. Résultats	137
III.3.1.7.1. Passage du liant au mastic	137
III.3.1.7.2. Passage du liant et du mastic au mortier	138
III.3.1.7.3. Distribution de la déformation dans le mortier	139
III.4. Prédiction du degré d'homogénéité de mélange	140
III.4.1. Modèle triphasique	141
III.4.1.1. Création des modèles numériques.....	142
III.4.1.2. Génération des différentes phases.....	143
III.4.1.3. Création de l'échantillon de mortier numérique.....	144
III.4.1.4. Propriétés mécaniques.....	145
III.4.1.5. Chargement et conditions aux limites.....	146
III.4.1.6. Maillage	146
III.4.1.7. Calcul du module complexe de cisaillement	148
III.4.1.8. Résultats	148

III.4.2. Modèle quadriphasique	149
III.4.2.1. Création des modèles numériques	150
III.4.2.2. Génération des différentes phases	151
III.4.2.3. Création de l'échantillon de mortier numérique	152
III.4.2.4. Propriétés mécaniques	153
III.4.2.5. Chargement et conditions aux limites	153
III.4.2.6. Maillage	154
III.4.2.7. Calcul du module complexe de cisaillement	155
III.4.2.8. Résultats	156
III.5. Conclusion	158
Partie IV. Echelle structure : Comportement et durabilité	161
IV.1. Introduction	161
IV.2. Construction de la planche expérimentale	163
IV.2.1. Caractéristiques de l'assise	164
IV.2.2. Caractéristiques de la couche de base	165
IV.2.3. Caractéristiques de la couche de surface	165
IV.3. Plan expérimental	166
IV.3.1. Mobile Load Simulator MLS10	166
IV.3.2. Système de chauffage	167
IV.3.3. Programme d'essai	168
IV.4. Instrumentation de la chaussée	169
IV.4.1. Capteurs de température	169
IV.4.2. Jauges de déformation	170
IV.4.3. Capteurs à fibre optique (FBG : fiber Bragg Grating)	171
IV.5. Mesure de la déflexion	173
IV.6. Résultats	173
IV.6.1. Amplitude de la déformation	174
IV.6.2. Campagne d'essais B	174
IV.6.2.1. Calcul de la vitesse exacte	174
IV.6.2.2. Calcul de la distance d'influence de la charge ou du boggie	175
IV.6.2.3. Influence du chargement (Nombre de cycles)	175
IV.6.2.4. Influence de la durée de chargement journalière	177
IV.6.2.5. Influence de la température	177
IV.6.3. Campagne d'essai D	180
IV.6.3.1. Déformations de flexion mesurées au-dessous de la couche de base	180
IV.6.3.2. Déformations mesurées au-dessus de la couche de base	182
IV.6.3.3. Modélisation par éléments finis	184
IV.6.3.4. Relations entre la déformation et la température	186
IV.6.3.5. Déformation normalisée en fonction de la température	189
IV.6.3.6. Endommagement de la couche de base	189
IV.6.4. Dommage de la couche de base en se basant sur les déflexions	191
IV.6.4.1. Rétro calcul (ALIZE-LCPC)	191
IV.6.4.1.1. Module de plateforme	193
IV.6.4.1.2. Module des couches bitumineuses	193
IV.6.4.1.3. Vérification du rétrocalcul	195
IV.7. Essai en utilisant le simulateur de trafic FABAC	197
IV.8. Conclusion	198

Conclusion générale et perspectives	200
Références bibliographiques	204
Partie V. Annexes.....	215
V.1. Annexe A.....	215
V.2. Annexe B.....	217
V.3. Annexe C.....	220
V.4. Annexe D.....	227
V.5. Annexe E.....	229
V.6. Annexe F.....	230
V.7. Annexe G	231
V.8. Annexe H.....	233

Table des illustrations

Figure 1 Constitution d'une chaussée.....	24
Figure 2 Les différentes proportions constituant un enrobé typique.....	25
Figure 3 Procédure de fabrication du bitume dans les raffineries	27
Figure 4 Module complexe d'un bitume de classe 35/50 représenté dans le plan Cole-Cole	35
Figure 5 Module complexe d'un bitume de classe 35/50 représenté dans l'espace Black	36
Figure 6 Exemple des courbes maitresses de module complexe (gauche) et d'angle de phase (droite) pour des matériaux bitumineux (Nguyen, 2011).....	37
Figure 7 Description du comportement du mélange bitumineux par un modèle triphasique selon la méthode GSCS.....	43
Figure 8 Schéma montrant la matrice non percolée piégée dans un assemblage de particules noyées dans une matrice percolée.....	44
Figure 9 Images au microscope optique de la distribution des particules de fines dans une résine époxy.....	44
Figure 10 Prédiction du module de l'enrobé à partir du liant dans le plan Cole-Cole en utilisant SHStS	45
Figure 11 Sollicitations induites par le trafic.....	50
Figure 12 Sollicitations induites par le climat	51
Figure 13 Schéma du cycle de vie des enrobés	53
Figure 14 Production des AE (photos prises lors de la visite à la centrale Ambromat pour le traitement des déchets à Toulouse, 2020).....	54
Figure 15 Les différentes techniques de recyclage des enrobés	56
Figure 16 Les spectres IR des différents bitumes modèles de concentration 0.008 g/g.....	59
Figure 17 Schéma explicatif de degrés d'homogénéité de mélange	63
Figure 18 Mélange progressif des AE en fonction du temps de malaxage (Nguyen, 2009 ; Navaro, 2012)	64
Figure 19 Photographies réalisées sur un enrobé recyclé malaxé pendant 45 s à 130°C (Navaro, 2011)	65
Figure 20 Définition de la remobilisation à partir des profils de composition des différents liants (Vassaux, 2017)	66
Figure 21 Illustration (a) de l'appareil d'extraction et (b) de la procédure d'extraction par étapes (Gaspar et al., 2020).....	67
Figure 22 Sandwich de liants bitumineux, préparation et essai (Rad, 2013)	68
Figure 23 Résultats du DSR pour les échantillons du liant à différentes températures (Rad, 2013).....	68
Figure 24 Modules des couches de liant extraites et récupérées des agrégats d'enrobé à deux températures de mélange (Xu et al., 2018).....	69

Figure 25 Modules des couches de liant extraites des agrégats d'enrobé à 150°C et à différents temps de conditionnement après le mélange (Xu et al., 2018).....	70
Figure 26 Variation de G^* à différents temps et températures de conditionnement par rapport aux échantillons sans conditionnement (Rad, 2013).....	71
Figure 27 Variation de $ G^* $ pour chaque étape d'extraction d'un enrobé tiède contenant 25% d'AE (Gaspar et al., 2020).....	71
Figure 28 Résistance à la fatigue en fonction du taux de recyclage pour une durée de malaxage de 240 s et à différentes températures (110°C en bleu, 135°C en vert, 160°C en rouge) (Navaro, 2011).....	72
Figure 29 Courbe de tendance donnant la relation entre le nombre de cycles et le DOB (Xu et al., 2019).....	73
Figure 30 Influence du taux d'AE et du DOB sur la fatigue des mélanges (Xu et al., 2019) ..	73
Figure 31 Résultats de l'essai LAS : la fatigue d'un enrobé contenant 0% AE (gauche) et 25% AE (droite) (Gaspar et al., 2020).....	74
Figure 32 Influence du taux d'AE et du DOB sur la résistance à basse température des mélanges (Xu et al., 2019).....	75
Figure 33 Modèle multi-échelle d'un enrobé en fonction des tailles des granulats.....	76
Figure 34 (a) L'image CT originale ; (b) L'image binaire à deux phases (granulat et mastic) ; (c) L'image de la géométrie ; (d) L'image du maillage EF (les éléments verts représentent le mastic ; les éléments blancs représentent les inclusions) (Chen et al., 2022).....	79
Figure 35 Modèle d'éléments finis maillé de l'échelle enrobé : (a) matrice, (b) inclusions et (c) modèle biphasé formé de la matrice et des inclusions (Fakhari Tehrani et al., 2016).....	80
Figure 36 VER 3D de μ GC (gauche) et VER 3D de GC (droite) dans Abaqus (Sow, 2018)..	81
Figure 37 Volume élémentaire représentatif utilisé pour le modèle avec $\phi = 30\%$, chargé uniaxialement (Fadil et al., 2021).....	81
Figure 38 Dommage local calculé par cycle pour un enrobé poreux (El Sawda, 2022).....	82
Figure 39 Courbes granulométriques des granulats d'apport, des AE et de la GB&E+®.....	86
Figure 40 Les différentes échelles de la GB&E+.....	87
Figure 41 L'Asphaltanalysator (gauche) et l'évaporateur rotatif (droite).....	89
Figure 42 Dispositif de malaxage : l'agitateur à hélices et la plaque chauffante.....	90
Figure 43 DSR MCR 302.....	93
Figure 44 Détails de l'essai oscillatoire avec la configuration PP (gauche) et dispositif du DSR avec la géométrie 25 mm et le capot (soulevé) (droite).....	94
Figure 45 Essai à contrainte contrôlée et la déformation résultante avec l'angle de phase (gauche) et un schéma de chargement et de déformation dans un échantillon (droite).....	95
Figure 46 Comparaison des modules complexes et angles de phase obtenus en utilisant les configurations CP et PP (Bitume) (Woldekidan, 2011).....	97
Figure 47 Comparaison des modules complexes et angles de phase obtenus en utilisant les configurations CP et PP (mastic) (Woldekidan, 2011).....	98

Figure 48 Coulage et stockage des échantillons de liant	99
Figure 49 Mise en place des échantillons sur le rhéomètre en utilisant les géométries PP25 (gauche) et PP8 (droite)	100
Figure 50 Les échantillons prêts à être testés	100
Figure 51 Etude de linéarité du B50/70 à T= 15°C	101
Figure 52 Isothermes en norme du module complexe du B50/70	102
Figure 53 Isothermes en angle de phase complexe du B50/70	102
Figure 54 Cycle de sollicitations imposé pour les bitumes	103
Figure 55 Evolution du dommage D par palier de température pour le bitume B50/70	103
Figure 56 Courbe maitresse de la norme du module complexe du bitume neuf B5070.....	106
Figure 57 Courbe maitresse de l'angle de phase du bitume neuf B5070	107
Figure 58 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes du B5070	107
Figure 59 Représentation du module complexe dans l'espace de Black du B5070	108
Figure 60 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés du B5070.....	108
Figure 61 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des matériaux neufs	110
Figure 62 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des matériaux vieux (extraits d'AE)	110
Figure 63 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des matériaux mélanges (Neuf+ vieux).....	111
Figure 64 Données expérimentales et prédites du mastic neuf.....	112
Figure 65 Données expérimentales et prédites du mortier neuf.....	113
Figure 66 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes modélisés des différents bitumes	114
Figure 67 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes modélisés des différents mastics	114
Figure 68 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes modélisés des différents mortiers.....	115
Figure 69 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés, modélisés et prédits du bitume mélange.....	116
Figure 70 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés, modélisés et prédits du mastic mélange.....	117
Figure 71 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés, modélisés et prédits du mortier mélange	117
Figure 72 Presse MTS au laboratoire GC2D	118
Figure 73 Découpage des plaques d'enrobé	119

Figure 74 Carottage et sciage des éprouvettes	120
Figure 75 Schéma de la plaque d'enrobé ainsi que les éprouvettes résultantes	120
Figure 76 Rectification des éprouvettes (phase 1 et 2)	121
Figure 77 Dimensions des éprouvettes	121
Figure 78 Collage sur les plateaux amovibles, en place	122
Figure 79 Collage sur les plateaux amovibles (après démontage).....	122
Figure 80 Capteur de rotation.....	123
Figure 81 Capteurs de déplacement.....	123
Figure 82 Isothermes en norme du module complexe de la GB \mathcal{E} +	124
Figure 83 Isothermes en angle de phase complexe de la GB \mathcal{E} +.....	124
Figure 84 Cycle de sollicitations imposé pour l'enrobé (gauche) et évolution du dommage D par palier de température (droite)	125
Figure 85 Représentation du module complexe dans l'espace de Black de la GB \mathcal{E} +.....	125
Figure 86 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés de la GB \mathcal{E} +	126
Figure 87 Principe multi-échelles.....	131
Figure 88 Géométrie granulaire du squelette générée en 3D et modèles 2D équivalents (Tehrani et al., 2013)	132
Figure 89 Les inclusions générées par MOA.....	132
Figure 90 Opérations booléennes pour un modèle de mortier tridimensionnel	133
Figure 91 Chargement et conditions aux limites du modèle selon l'essai DSR	134
Figure 92 Inclusions et matrice maillées du modèle tridimensionnel d'éléments finis	135
Figure 93 Mortier numérique soumis à la rotation ainsi que la déformation résultante	136
Figure 94 Organigramme décrivant les étapes générales de la procédure numérique.....	137
Figure 95 Comparaison de la prédiction du module de cisaillement complexe G^* à l'aide des méthodes SHStS, GSCS et de la mesure en laboratoire du mastic mélange à $T = 15^{\circ}\text{C}$...	138
Figure 96 Comparaison de la prédiction du module de cisaillement complexe G^* à l'aide des méthodes SHStS, GSCS et de la mesure en laboratoire du mortier mélange à $T = 15^{\circ}\text{C}$...	139
Figure 97 Distribution de la déformation dans l'échantillon numérique de mortier mélange	140
Figure 98 Schéma du changement de la concentration du liant neuf dans le liant vieilli en raison de phénomène de diffusion (Rad, 2013)	141
Figure 99 Le concept de la modélisation triphasique adoptée	142
Figure 100 Les différents étapes de mélange entre les mortiers neuf et vieux.....	143
Figure 101 Les deux générations obtenues par MOA.....	144
Figure 102 Opérations booléennes pour un modèle de mortier triphasique	145
Figure 103 Chargement et conditions aux limites du modèle numérique	146

Figure 104 Le mortier triphasique maillé.....	147
Figure 105 La norme du module complexe E^* en fonction du degré d'homogénéité de mélange du mortier triphasique obtenue à 15°C, 10Hz.....	148
Figure 106 Le concept de la modélisation quadriphasique adoptée.....	150
Figure 107 Les différentes étapes de mélange entre les constituants neuf et vieux.....	150
Figure 108 Les trois générations obtenues par MOA.....	151
Figure 109 Opérations booléennes pour un modèle de mortier quadriphasique	152
Figure 110 Chargement et conditions aux limites du modèle numérique	154
Figure 111 Le mortier quadriphasique maillé.....	155
Figure 112 La norme du module complexe E^* en fonction du degré d'homogénéité de mélange du mortier quadriphasique obtenue à 15°C, 10Hz.....	156
Figure 113 Rigidité en fonction du temps de mélange des enrobés (Nguyen, 2009)	157
Figure 114 La norme du module complexe E^* en fonction du degré d'homogénéité de mélange du mortier obtenue à 15°C, 10Hz par les modélisations triphasiques et quadriphasiques.....	157
Figure 115 Les différentes modélisations adoptées dans ce chapitre	159
Figure 116 Le hall de recherche (gauche) et une étape de remplissage de la fosse (droite)	164
Figure 117 Dimensions de la fosse expérimentale	164
Figure 118 Remplissage de la fosse (gauche) et l'essai de plaque (droite)	165
Figure 119 Mise en œuvre de la couche de GB&+ dans la fosse.....	165
Figure 120 Mise en œuvre du BBAO+	166
Figure 121 Simulateur de trafic MLS10	166
Figure 122 Le MLS10 dans le hall (gauche) et le schéma du système de chargement (Arraigada et al.,2014) (droite).....	167
Figure 123 Calibrage de la charge à l'aide du TekScan.....	167
Figure 124 Système de chauffage.....	168
Figure 125 Les structures testées	169
Figure 126 Sonde de température (gauche) et positionnement des sondes de températures dans la fosse expérimentale (droite).....	170
Figure 127 Système d'acquisition des températures ALMEMO 2890-9	170
Figure 128 Jauges de déformations collées sur la surface supérieure du GB&+	171
Figure 129 Positionnement des jauges de déformation dans la chaussée.....	171
Figure 130 Principe du fonctionnement des FBG (Site https://fr.scaime.com/technologie-des-reseaux-de-bragg).....	172
Figure 131 Capteurs à fibre optique intégrés dans un géotextile	172

Figure 132 Instrumentation de la structure : vue en coupe (gauche) et vue en plan (droite)	173
Figure 133 Essai FWD (gauche) et son principe de fonctionnement (droite)	173
Figure 134 Déformations mesurées par FBG pour 4 passages de pneus (gauche) et calcul de l'amplitude de la déformation (droite)	174
Figure 135 Déformations mesurées par CH1S1 en fonction du temps à 16°C	175
Figure 136 Déformations en fonction du temps à 16°C	175
Figure 137 Déformations longitudinales du capteur CH5S1 à différents nombres de cycles en fonction du temps à 16°C	176
Figure 138 Déformations longitudinales du capteur CH5S1 en fonction du nombre de cycles à 16°C	176
Figure 139 Déformations et durée de chargement en fonction du nombre de cycles à 16°C	177
Figure 140 La variation de la température en fonction de la date	178
Figure 141 Déformations en fonction du temps	178
Figure 142 Déformations en fonction du nombre de cycles pour différentes températures	179
Figure 143 Déformations en fonction du nombre de cycles et de la température pour la campagne B	180
Figure 144 Température durant le jour du 5 mars 2020 (Campagne B)	180
Figure 145 Amplitudes de déformations en fonction du nombre d'applications de la charge mesurées par le FBG de CH5 (Campagne D)	181
Figure 146 Vue de dessus de la couche de base avec la zone d'initiation de la fissure	181
Figure 147 Amplitudes de déformations en fonction du nombre d'applications de la charge mesurées par le FBG de CH6 (Campagne D)	182
Figure 148 Amplitudes de déformations en fonction du nombre d'applications de la charge mesurées par la jauge de déformation CH4S2 (Campagne D)	183
Figure 149 Aperçu de la structure fissurée (à gauche) et vue de dessus de la couche de base fissurée (à droite) avec les déformations mesurées	183
Figure 150 Vue de la modélisation de la structure non fissurée	184
Figure 151 Conditions de chargement des roues au-dessus du FBG S3 (x = 4.5 m) avec les positions expérimentales des capteurs	185
Figure 152 Modélisation d'une structure fissurée	185
Figure 153 Déformations longitudinales obtenues à partir du modèle EF pour une structure non fissurée (à gauche) et pour une structure fissurée (à droite)	186
Figure 154 Amplitude de déformation longitudinale en fonction de la température moyenne du GB&+ mesurée par CH5 (à gauche) et par CH6 (à droite)	187
Figure 155 Un exemple d'amplitude de déformation en fonction des températures moyennes des couches de surface et de base avec les coefficients de régression	188

Figure 156 Déformation mesurée par le CH5S1, déformation résultante du modèle et différence entre les deux en fonction de la température moyenne de la chaussée	188
Figure 157 Déformation longitudinale normalisée à 15°C pour la campagne D	189
Figure 158 Déformation calculée sous la couche de base en fonction de la norme de son module de Young E	190
Figure 159 Dommages de la couche de base au cours du temps pour la campagne expérimentale D	190
Figure 160 Dommages de la couche de base	191
Figure 161 Bassin de déflexion	191
Figure 162 Bassin de déflexion mesurée dans une zone non circulée à la fin de la campagne d'essai D	192
Figure 163 Modélisation de la chaussée (structure de la campagne D) dans le logiciel Alizé	192
Figure 164 E_0 calculé par Alizé.....	193
Figure 165 Bassins de déflexions	194
Figure 166 Exemple de rétro calcul en utilisant le logiciel Alizé	194
Figure 167 Déformations générées expérimentalement au début de la campagne d'essais D	195
Figure 168 Les modules équivalents utilisés ainsi que les déformations calculées dans Alizé	196
Figure 169 Machine Fabac (gauche) et structure testée (droite).....	197

Table des tableaux

Tableau 1 Type de composants granulaires- classes granulaires.....	26
Tableau 2 Constitution chimique du bitume	29
Tableau 3 Les différentes fractions chimiques du bitume	30
Tableau 4 Essais semi-empiriques de qualification des bitumes routiers.....	31
Tableau 5 Essais rhéologiques pour caractériser le bitume.....	32
Tableau 6 Les différents appareils et types de sollicitations utilisés pour les essais de module d'un bitume.....	33
Tableau 7 Caractéristiques des essais sur mastics et mortiers recensés dans la bibliographie	40
Tableau 8 Caractérisation des enrobés bitumineux	41
Tableau 9 Essais pour mesurer le module complexe des enrobés bitumineux (NF EN 12697-26).....	42
Tableau 10 Les différents modèles analogiques.....	47
Tableau 11 Les dégradations des chaussées.....	52
Tableau 12 L'utilisation d'AE en France et aux Etats Unis.....	55
Tableau 13 Essais de caractérisation d'AE.....	57
Tableau 14 Directives de sélection des liants pour les enrobés recyclés fournies par le projet NCHRP 9-46 (AASHTO, 2017).....	61
Tableau 15 Les différentes échelles d'un enrobé bitumineux.....	77
Tableau 16 Composition des différentes échelles.....	80
Tableau 17 Spécifications du matériau GB ϵ +.....	86
Tableau 18 Les constituants des différentes échelles de la GB ϵ +	87
Tableau 19 Les concentrations volumiques d'inclusions pour les différents matériaux testés	88
Tableau 20 Programme expérimental.....	93
Tableau 21 Tests oscillatoires en distorsion contrôlée	94
Tableau 22 Tests oscillatoires en cisaillement contrôlé	94
Tableau 23 Tableau comparatif entre PP et CP.....	96
Tableau 24 Les différentes géométries et températures utilisées par Woldekidan, 2011	97
Tableau 25 Distorsions imposées durant l'essai de module complexe pour les bitumes.....	105
Tableau 26 Distorsions imposées durant l'essai de module complexe pour les mastics	105
Tableau 27 Distorsions imposées durant l'essai de module complexe pour les mortiers	106
Tableau 28 Paramètres du modèle 2S2P1D pour les matériaux testés	109
Tableau 29 Paramètres 2S2P1D expérimentaux et estimés pour le bitume mélange.....	116

Tableau 30 Paramètres 2S2P1D expérimentaux et estimés pour les mastic et mortiers mélange	117
Tableau 31 Les différentes échelles ainsi que leurs pourcentages volumétriques de remplissage.....	130
Tableau 32 Propriétés de génération du MOA.....	131
Tableau 33 Pourcentage volumétrique des générations résultantes.....	143
Tableau 34 Propriétés élastiques des différentes phases.....	146
Tableau 35 Pourcentages volumétriques des générations résultantes	151
Tableau 36 Propriétés élastiques des différentes phases.....	153
Tableau 37 Les détails des différentes campagnes expérimentales	169
Tableau 38 Le ratio de déformation R_ε	179
Tableau 39 Paramètres d'entrée du MEF	185
Tableau 40 Les modules rétro calculés	195
Tableau 41 Les conditions d'essai.....	197
Tableau 42 Résultats obtenus par les rétro-calculs	198

Introduction

Le réseau routier français assure près de 87% des échanges de personnes et de biens, facilite l'accès aux services et lutte contre la désertification rurale. Il est considéré comme étant le premier réseau social. Regardé comme l'un des patrimoines les plus remarquables d'Europe, ce réseau se dégrade sous les effets conjugués d'un trafic intense et des sollicitations climatiques et il est nécessaire de veiller à sa préservation par une maintenance continue. Cependant, il est aussi riche d'innovations et de défis, qui ouvrent vers de nouvelles techniques de construction et d'entretien et de nouveaux matériaux écologiques et durables.

Les acteurs du secteur routier ont signé en 2009 une Convention d'Engagement Volontaire (CEV) afin de concevoir, construire et entretenir les infrastructures d'une manière respectant encore plus l'environnement. Cet engagement a été renouvelé en janvier 2021 en signant un Pacte d'engagement pour la transition écologique, énergétique et numérique des infrastructures. Dans ce pacte, les actions proposées ont parmi leurs objectifs à l'horizon 2025/2030 la réintroduction d'au moins 20% d'agrégats d'enrobé (AE) dans les nouvelles formules d'enrobés bitumineux.

Les agrégats d'enrobé sont des matériaux récupérés du fraisage des couches bitumineuses sur les chantiers, de la déconstruction des chantiers d'enrobé sous forme de plaques et du surplus de production dans les usines d'enrobé. Ce matériau est introduit avec un taux minimum de 15 %. En 2021, le taux moyen de réintroduction d'AE issu du recyclage des enrobés bitumineux (hors enrobés à l'émulsion) est de 19.9% avec une légère augmentation par rapport à 2020 (Routes de France, 2022). Le recyclage en usine consomme la majeure partie des dépôts d'agrégats d'enrobé recyclé disponible (plus de 75 %). Plusieurs projets de recherche (le Projet National Mure par exemple) ont permis de consolider les connaissances scientifiques et techniques dans le domaine du recyclage des chaussées. Cependant, la confiance reste limitée quant à la réutilisation des AE sans doute en raison d'un manque de connaissances scientifiques sur l'influence des AE sur les performances et la durabilité des chaussées.

Le développement d'enrobés bitumineux contenant des AE nécessite une connaissance approfondie des propriétés pertinentes à la fois dans la fabrication, la mise en œuvre et l'application pour garantir des performances aux jeunes âges et à long terme comparables à celles des enrobés à base de constituants nouveaux. Celles-ci dépendent des propriétés des matériaux initialement sélectionnés lors de la fabrication et de la qualité du mélange entre les matériaux neufs et vieux. Elles deviennent plus difficiles à contrôler quand le taux de recyclage augmente.

Afin de préserver et garantir la durabilité des routes, des études doivent être menées pour comprendre les phénomènes régissant le mélange des constituants neufs et vieux, et permettre une meilleure connaissance des enrobés recyclés.

Le but de la thèse est de caractériser la durabilité des infrastructures routières en comprenant les mécanismes régissant le mélange des constituants neufs et recyclés. Pour y parvenir, deux approches, expérimentale et numérique, ont été adoptées pour caractériser ce mélange.

Ce mémoire de thèse rapporte l'ensemble des travaux expérimentaux et numériques menés lors de ce travail de recherche. Il se décline en quatre parties dont les objectifs sont de proposer une réponse aux verrous identifiés dans les paragraphes précédents.

La première partie établit un état de l'art rapportant sur les connaissances acquises sur la microstructure, la composition et les propriétés des matériaux bitumineux. Le cycle de vie d'un enrobé est présenté depuis sa formulation, sa mise en œuvre, son vieillissement, les travaux d'entretien jusqu'à son recyclage dans les nouvelles formules d'enrobé. Pour ces nouveaux enrobés, cette partie se focalise sur le mélange entre les constituants neufs et vieux. Les méthodes de détermination du degré d'homogénéité des mélanges décrites dans la littérature y sont également rappelées. En outre, cette partie détaille les techniques numériques utilisées afin de caractériser un milieu hétérogène par une étude multi échelle.

La seconde partie présente l'approche expérimentale menée au laboratoire. Elle se focalise sur la description du matériau de l'étude (GBE+® : Grave Bitume epsilon+) et des techniques expérimentales utilisées. Elle détaille les protocoles d'essais et de conditionnement employés sur les différentes échelles du matériau de l'étude. Cette partie rapporte l'ensemble des résultats et d'analyse des mesures effectuées au laboratoire. Ces essais sont menés afin de caractériser ce matériau et trouver l'influence des AE sur ses propriétés mécaniques. Le mélange du neuf et vieux se fait au niveau du film qui existe entre les granulats de l'enrobé qui est formé de bitume et de fines, mélange appelé mastic ou de bitume, de fines et de sable, appelé mortier. Donc pour mieux comprendre ce mélange, des essais de module sont menés sur des matériaux neufs, vieux et leurs mélanges à différentes échelles (bitume, mastic, mortier et enrobé). Ces résultats serviront aussi pour alimenter et valider les modèles numériques décrits dans la partie suivante.

La troisième partie présente l'approche numérique d'un mortier mélange. Cette modélisation a comme objectif de modéliser des mélanges bitumineux et de quantifier le degré d'homogénéité de mélange des matériaux neufs et vieux. Une méthode de modélisation hétérogène biphasique de ces échelles, constituée des inclusions et d'une matrice, est développée en utilisant le logiciel d'éléments finis Abaqus. Les inclusions (granulats de différentes tailles et formes) sont générées de façon aléatoire en utilisant un nouveau logiciel MOA « Modeleur d'objets aléatoires » développé dans notre laboratoire. Cette méthode transforme l'essai expérimental (module) en essai numérique sur un échantillon digital. Concernant la détermination du degré d'homogénéité de mélange entre le matériau vieux et neuf, il existe toujours un manque de compréhension de l'effet du taux de mélange sur le comportement mécanique global du matériau obtenu. La remobilisation se fait au niveau de l'échelle de mastic et de mortier. Donc pour mieux comprendre ce phénomène, le modèle numérique développé permet de modéliser le mortier comme un milieu hétérogène triphasique ou quadriphasique. Cette approche permet de remonter au taux d'homogénéité de mélange neuf et vieux en se basant sur les résultats numériques. Ce qui permet de mieux comprendre le mélange des constituants neufs et vieux et de l'optimiser.

La quatrième partie présente l'approche expérimentale menée en chantier sur le matériau de l'étude GBE+®. Elle regroupe les résultats et l'analyse des mesures effectuées sur ce matériau en vraie grandeur. La fatigue mécanique affecte la couche de base et met en péril la structure. Dans ces travaux de thèse, une couche d'assise en GB epsilon+, matériau performant fabriqué par l'entreprise Spie batignolles malet contenant 40% d'AE, est mise en place dans la fosse expérimentale. Cette couche est sollicitée par le Mobile Load Simulator MLS10 qui sert à simuler un trafic accéléré sur une structure de chaussée. Elle est instrumentée par des fibres optiques afin de suivre sa réponse face au trafic simulé par la MLS10. Par conséquent, cette partie vise à évaluer la durée de vie du matériau étudié à l'échelle réelle.

La conclusion générale fait le bilan de l'ensemble des résultats expérimentaux et numériques obtenus durant ces travaux de recherche en soulignant la contribution de cette thèse à une meilleure compréhension de l'influence de l'ajout d'AE à différentes échelles du matériau. Le comportement mécanique de ces échelles est caractérisé par des essais de cisaillement en laboratoire et par un essai à trafic accéléré en chantier. Ainsi, une méthodologie numérique innovante est proposée. Elle permet de quantifier le degré d'homogénéité de mélange des constituants vieux et neufs en développant des modèles numériques triphasiques et quadriphasiques basés sur le principe du multi échelle. Ce manuscrit se termine en donnant quelques perspectives dont les objectifs visent à optimiser l'utilisation des enrobés recyclés dans des nouvelles formules d'enrobé.

Partie I. Etude bibliographique

Partie I. Etude bibliographique

Ce chapitre récapitule les connaissances acquises à ce jour concernant les chaussées bitumineuses contenant des enrobés recyclés afin d'établir le cadre général de cette étude.

L'enrobé bitumineux est le matériau le plus recyclé au monde dans une limite de 80% de volume. En France, les différents acteurs responsables de la réalisation des infrastructures routières ont signé une convention d'engagement volontaire (CEV) en 2009. Ils se sont engagés à réduire de 33% les émissions de gaz à effet de serre (GES) et réemployer ou valoriser 100% des matériaux géologiques naturels excavés sur les chantiers à l'horizon 2020. Cet engagement a été renouvelé en janvier 2021 en signant un pacte sous l'égide du ministère des transports et de l'IDRRIM. Ce pacte affiche de nouveaux engagements pour répondre aux enjeux de la transition écologique, énergétique et numérique. Considérant l'importance du recyclage des enrobés, le cycle de vie d'une chaussée est présenté dans ce chapitre.

Dans un premier temps, quelques généralités sur la structure d'une chaussée, sa composition en matériaux bitumineux et les essais de caractérisation mécanique de ces matériaux sont présentés. Cette chaussée subit plusieurs sollicitations telles que le trafic et les conditions climatiques provoquant son endommagement. Ce dernier peut être présent sous plusieurs formes mettant la chaussée en péril.

Lorsque la chaussée est endommagée, des travaux d'entretien sont menés. Ils consistent à remplacer toute ou partie de la structure routière par une autre neuve. Les déchets bitumineux produits lors de la déconstruction de la chaussée, appelés Agrégats d'Enrobés (AE), sont recyclés par la suite et réutilisés dans des nouvelles formulations d'enrobé. Les caractéristiques des AE et les différentes pratiques de recyclage sont discutées.

Cela étant, une partie est consacrée à une étude bibliographique sur l'influence des AE sur les propriétés mécaniques des enrobés et la sensibilité aux taux de remobilisation du constituant vieux dans le constituant neuf.

Enfin, les approches numériques utilisées dans la littérature pour caractériser les matériaux bitumineux sont présentées. Plus particulièrement la modélisation numérique hétérogène est abordée.

I.1. Structure des chaussées

La chaussée est constituée de plusieurs couches successives sur un sol support, d'épaisseurs et de matériaux différents. Le rôle des différentes couches est de résister aux nombreuses sollicitations telles que le trafic et le climat. Une structure routière est conçue pour assurer le confort et la sécurité à l'utilisateur.

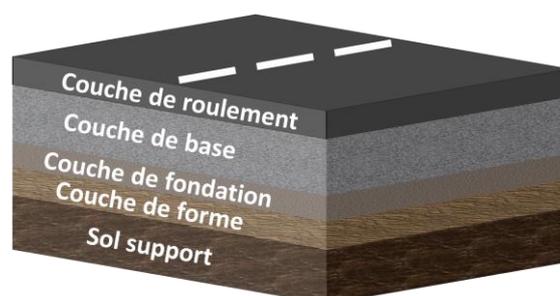


Figure 1 Constitution d'une chaussée

On retrouve en général en partant du sol support (NF P 98-086, 2019) (Figure 1) :

- **La couche de forme**, qui à court terme permet de protéger le sol support contre les intempéries et les engins lors de la construction de la chaussée. À long terme, elle permet d'assurer le drainage et l'isolation thermique du sol support.
- **La couche d'assise**, constituée d'une couche de fondation en dessous d'une couche de base. Elle permet d'apporter une résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic.
- **La couche de surface**, est constituée d'une couche de liaison en dessous d'une couche de roulement. Elle est en contact direct avec les pneumatiques et elle permet de résister aux agressions du trafic et du climat et d'assurer l'étanchéité et la protection de la couche d'assise. Cette couche a une fonction de service assurant notamment la sécurité et le confort de l'utilisateur.

Les couches de surface et d'assise sont constituées de matériaux traités aux liants hydrocarbonés (bitume) que l'on appelle, enrobés bitumineux.

I.1.1. Composition des couches de chaussée en matériaux bitumineux

Les matériaux bitumineux sont des mélanges complexes dont les caractéristiques et les propriétés mécaniques varient suivant leur composition. Un enrobé bitumineux est défini comme matériau composite constitué d'un mélange de granulats minéraux et de bitume. Les granulats sont généralement considérés comme le "squelette" du matériau, tandis que le bitume agit comme un liant. En réalité, la cohésion d'un mélange bitumineux est assurée par le mastic, qui est le mélange de bitume et de la fraction granulaire la plus fine « filler ». En fait, ce mastic forme un film plus ou moins épais entre les granulats assurant l'adhésion entre eux. L'enrobé contient également des vides entre les granulats qui ne sont pas remplis par le bitume. En termes de volume, ces vides représentent 5%, alors le bitume représente 10% et les granulats 85% d'un enrobé typique. La masse des granulats représente typiquement 94 à 95% de la masse totale d'un enrobé tandis que le bitume forme 5 à 6% de la masse d'un enrobé. Les différentes proportions sont présentées dans la Figure 2.

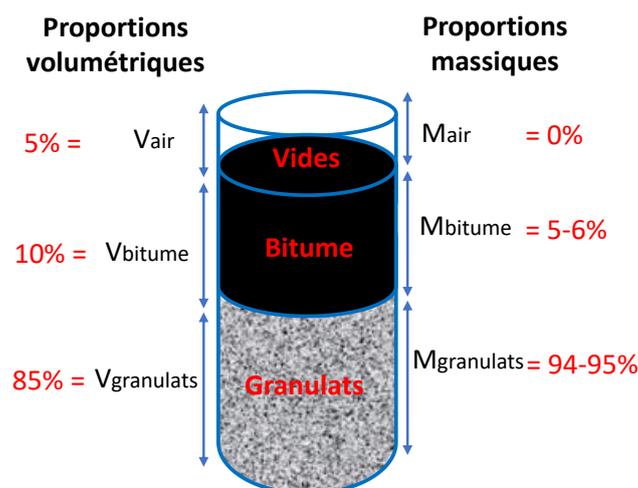


Figure 2 Les différentes proportions constituant un enrobé typique

En fonction de l'utilisation de l'enrobé en technique routière, plusieurs ajustements peuvent être faits au niveau de sa composition tels que des ajustements qualitatifs ou quantitatifs des granulats et du liant ou même des modifications concernant le pourcentage de vide dans le

but d'arriver aux propriétés souhaitées de l'enrobé. En addition, plusieurs additifs peuvent être ajoutés aux mélanges bitumineux afin d'améliorer leurs performances.

En fonction des propriétés finales du matériau, plusieurs types de mélanges bitumineux peuvent être distingués (NF EN 13108-1 :2007) :

- **Enrobés utilisés pour les couches de surface** : ces matériaux possèdent une teneur en liant élevée ($5\% \leq TL_{\min} \leq 6\%$). Ils correspondent aux « Bétons Bitumineux » ou BB selon l'appellation française de cet enrobé.
- **Enrobés utilisés pour les couches de base** : ces matériaux possèdent une teneur en liant basse ($3\% \leq TL_{\min} \leq 5.5\%$) et un module de rigidité plus élevé que celui des BB. Cet enrobé correspond aux « Graves Bitumes » ou GB selon l'appellation française. Une autre famille d'enrobé peut être identifiée « Enrobé à Module Elevé » ou EME selon l'appellation d'enrobé en France. Cet enrobé possède des caractéristiques similaires à celles d'une GB mais avec un module plus élevé et une haute performance, qui mènent à une réduction importante de l'épaisseur des couches.

I.1.1.1. Composants minéraux

I.1.1.1.1. Granulats

Le granulats est un fragment de roche, d'une taille inférieure à 80 mm (Faure, 1998) : sables, gravillons et graviers, destiné à entrer dans la composition des matériaux consacrés à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Ce composant peut être extrait de carrières ou de rivières. Les granulats subissent en générale différentes opérations avant utilisation (criblage, concassage, tamisage, dépoussiérage, lavage...). Pour constituer un squelette granulaire, plusieurs classes granulaires homogènes sont mélangées. Suivant leur granulométrie, les granulats se répartissent en plusieurs catégories dont les diamètres (notés d) minimaux et maximaux sont normalisés (NF P 98-086, 2011).

Désignation	Type de composants	Classe granulaire
Filler	Fines (ou filler)	$d < 63 \mu\text{m}$
Granulats	Sables Gravillons	$63 \mu\text{m} < d < 2 \text{ mm}$ $2 \text{ mm} < d < 45 \text{ mm}$

Tableau 1 Type de composants granulaires- classes granulaires

Vu la quantité importante de granulats dans le mélange, le comportement et la résistance de ce dernier sont influencés largement par les granulats. Un comportement mécanique élastique est considéré pour les granulats avec un module d'élasticité compris entre 60 GPA et 140 GPA en fonction de leurs natures (Mukhopadhyay et al., 2004, Fakhari Tehrani, 2013). Afin d'assurer les bonnes performances mécaniques et la durabilité d'un mélange, les granulats doivent répondre à des exigences spécifiques :

- Exempts de poussières et de matières nuisibles ;
- Angularité et forme appropriées ;
- Dureté ;
- Résistance à l'usure ;

- Résistance à l'abrasion ;
- Résistance aux chocs (Speight, 2016) ;
- Comptabilité avec le liant en termes de caractéristiques chimiques et physiques.

I.1.1.1.2. Filler

Le filler est formé de composants minéraux très fins dont le diamètre supérieur est conventionnellement pris à 63 μm (comme mentionné dans le Tableau 1). Le filler provient soit du dépoussiérage de granulats soit d'une production industrielle par mouture de roche. Possédant une grande surface spécifique ($> 1000 \text{ kg/m}^2$), le filler absorbe une partie importante du liant avec lequel il constitue le mastic. Le pouvoir rigidifiant du filler associé au liant apporte sa stabilité au mélange et améliore sa résistance à l'orniérage (Di Benedetto et Corté, 2005).

I.1.1.2. Liants hydrocarbonés

I.1.1.2.1. Origine

Le bitume est la fraction la plus lourde c'est-à-dire le résidu, obtenu à partir de la distillation dans des raffineries du pétrole brut. Il est employé dans l'industrie pour sa qualité d'isolation et d'étanchéité, mais il est majoritairement utilisé (85% de sa production) dans le domaine routier comme constituant des enrobés (USIRF Route de France, 2013).

I.1.1.2.2. Production

Le bitume, utilisé dans la construction des routes et des bâtiments, est raffiné à partir de pétroles bruts soigneusement sélectionnés.

Le processus de distillation est présenté dans la Figure 3. Dans ce procédé, le pétrole brut subit une distillation atmosphérique à 350°C afin de séparer les fractions légères du pétrole comme propane, butane, kérosène, essence. Ensuite, le résidu résultant de la distillation atmosphérique est distillé à nouveau dans une colonne à vide à 370°C pour produire du bitume utilisé dans les techniques routières. Dans une raffinerie, une large gamme de produits pétroliers est produite, le bitume étant un produit mineur par rapport aux autres produits.

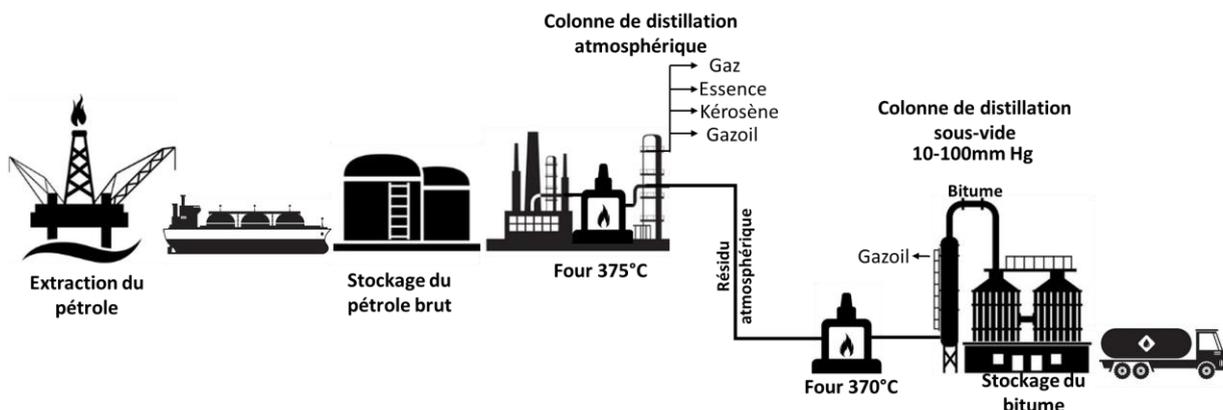


Figure 3 Procédure de fabrication du bitume dans les raffineries

Plusieurs procédés de raffinage permettent de produire différents types de bitume afin d'obtenir un produit possédant les caractéristiques requises en fonction de son application.

I.1.1.2.3. Le bitume dans l'enrobé

Le comportement des enrobés est fortement influencé par les liants malgré leurs faibles fractions dans le mélange bitumineux (3 à 7% de la masse). Cette influence peut être traduite par la viscoélasticité, la thermo-sensibilité et la dissipation énergétique des enrobés bitumineux. Elle dépend du volume du liant introduit dans la formulation d'enrobé, défini comme la teneur en liant qui est calculée à partir de la surface spécifique des granulats notée Σ (Delorme, 2007). Cette dernière correspond à la surface des granulats considérés comme sphériques.

La surface spécifique pour un mélange granulométrique donné est exprimée par la formule suivante (Delorme, 2007) :

$$100 \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 150f \text{ Équation 1}$$

Avec, Σ : Surface spécifique des granulats (m^2/kg)

G : Pourcentage massique des gravillons ($d > 6.3$ mm)

S : Pourcentage massique de gros sable ($0.25\text{mm} < d < 6.3\text{mm}$)

s : Pourcentage massique de sable fin (0.063 mm $< d < 0.25$ mm)

f : Pourcentage massique de filler ($d < 0.063$ mm)

d : Diamètre des granulats

A partir de la surface spécifique des granulats, la teneur en liant, notée TL et exprimée en pourcentage massique, est estimée en utilisant la formule suivante :

$$TL = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma} \text{ Équation 2}$$

Avec, α : Facteur dépendant du type des granulats. Il est calculé par $2.65 /$ masse volumique réelle des granulats.

k : module de richesse. Il varie entre 2.75 pour les enrobés avec une résistance maximale à la déformation et 3.5 pour les enrobés souples.

Σ : surface spécifique des granulats (m^2/kg).

I.1.1.2.4. Composition chimique

Du point de vue de l'analyse élémentaire, le bitume a une composition chimique comme indiquée dans le Tableau 2, avec une forte proportion de carbone et d'hydrogène mais aussi du soufre et de l'oxygène (Traxler, 1936). Il existe, par ailleurs, dans le bitume divers éléments métalliques à l'état de traces tels que le fer, le vanadium, le nickel, l'aluminium et le silicium (Read et Whiteoak, 2003).

Elément	Concentration en % en masse
Carbone	82-88
Hydrogène	8-11
Soufre	0-6
Oxygène	0-1.5

Azote	0-1
-------	-----

Tableau 2 Constitution chimique du bitume

La fonctionnalité du bitume dépend de la façon dont les molécules interagissent entre elles et/ou avec d'autres matériaux, par exemple, les surfaces de granulats et l'eau. La teneur de soufre, d'azote, d'oxygène et de métaux dans certaines molécules les rend légèrement polaires. L'importance des molécules contenant des hétéroatomes dans la chimie du bitume réside dans la capacité de former des associations moléculaires, ce qui influence fortement les propriétés physiques et les performances des bitumes. Les composants contenant les hétéroatomes peuvent varier en termes de teneur et de caractéristiques dans les bitumes obtenus à partir de différentes sources de pétrole brut (Asphalt Institute Inc. and European Bitumen Association–Eurobitume, 2015).

I.1.1.2.5. Caractérisation chimique

Le bitume est un matériau viscoélastique, par conséquent la polarité chimique est une propriété importante à déterminer. Trois types de composants peuvent être distingués en fonction de leur polarité :

- Les constituants les plus polaires créent des composants structurels qui attribuent au bitume les propriétés de rigidité (module).
- Les composants les moins polaires confèrent au bitume sa flexibilité et ses propriétés à basse température.
- Les composants de polarité intermédiaire du bitume rendent compatibles les composants les moins et les plus polaires.

Vu que le bitume contient une large gamme de molécules, il n'est pas pratique d'analyser composant par composant. La technique courante consiste donc à diviser le bitume en quatre grandes fractions de plus en plus polaires : les saturés, les aromatiques, les résines et les asphaltènes (SARA). Les différentes fractions chimiques sont présentées dans le Tableau 3.

Il existe plusieurs méthodes standards pour la séparation du bitume en ces quatre fractions. Parmi ces techniques (Read et Whiteoak, 2003) :

- L'extraction par solvant.
- L'adsorption par des solides finement divisés et l'élimination de la solution non adsorbée par filtration.
- La chromatographie.
- La distillation moléculaire utilisée en association avec l'une des techniques précédentes.

Fraction chimique de bitume	% en masse de bitume	Aspect	Masse molaire moyenne (g/mol)	Propriétés
Les saturés	5-20	Huiles visqueuses non polaires, de couleur claire,	470-880	Cette fraction est affectée par la variation thermique (Claudy et al., 1991)

		constituées d'hydrocarbures aliphatiques		
Les aromatiques	40-65	Liquide jaune à rouge, visqueux à température ambiante	300 -2 000	Leur vitrification se produit à des températures qui correspondent aux températures de transition vitreuse des bitumes (Claudy et al., 1991)
Les résines	13-25	Solide ou semi-solide, de couleur sombre	500-50 000	Possède une nature polaire marquée, qui est responsable des propriétés adhésives du bitume
Les asphaltènes	5-25	Solide noir, amorphe, insoluble dans le n-heptane	1000-100000	Influence la rhéologie du bitume. La dureté du liant est liée au taux d'asphaltènes

Tableau 3 Les différentes fractions chimiques du bitume

Lorsque le bitume est traité par exemple par soufflage d'air ou par oxydation, l'analyse SARA montre une transformation des résines en asphaltènes et des aromatiques en résines. Par conséquent, le bitume devient plus rigide et plus élastique que le bitume initial.

I.1.1.2.6. Essais standards de caractérisation

Connus comme des essais semi-empiriques normalisés selon les spécifications européennes, ils visent à caractériser le bitume en évaluant sa réponse face à des configurations et à des conditions de chargement spécifiques. Ces essais (présentés dans le Tableau 4) sont utilisés en Europe et offrent une caractérisation partielle du bitume sans déterminer ses propriétés mécaniques fondamentales. Pour cette raison, ils sont définis « Essais semi-empiriques ».

Essai	But de l'essai	Principe de l'essai	Paramètre mesuré
Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF-EN 1426)	Déterminer la consistance du bitume à une température donnée	Enfoncer une aiguille chargée d'une masse de 100g durant 5s dans le liant stabilisé à 25°C	L'enfoncement (pen) en dixième de mm de l'aiguille
Essai de température bille et anneau (TBA) (NF-EN 1427)	Déterminer la susceptibilité thermique du bitume : plus la TBA est faible, plus le liant est susceptible thermiquement	Placer une bille sur un disque de bitume remplissant le cercle intérieur d'un anneau placé dans un bain thermostat. Monter progressivement la température jusqu'au point où la bille passe à travers l'anneau et descend d'une hauteur de 25 mm	La température (TBA) à laquelle le bitume atteint une consistance précise

Essai de point de fragilité FRAAS (NF-EN-12593)	Déterminer la fragilité des bitumes à basse température	Appliquer une couche de bitume de 0.5 mm d'épaisseur sur une plaque d'acier mince. Cette dernière est fléchie de manière répétée tout en diminuant la température à un taux constant de 1°C/minute.	La température à laquelle le film de bitume se fissure
---	---	---	--

Tableau 4 Essais semi-empiriques de qualification des bitumes routiers.

En fonction de la pénétrabilité, des classes de bitume sont définies :

- 10/20 et 35/70 : bitumes durs ;
- 50/70 et 70/100 : bitumes semi-durs ;
- 180/220 : bitumes mous.

À titre d'exemple, un bitume de pénétrabilité 50 /70 a une pénétration qui varie de 50 à 70 1/10 mm à 25 °C.

Ces essais restent néanmoins insuffisants afin de caractériser le comportement viscoélastique global du bitume. De nombreux travaux de recherche ont été consacrés au cours des dernières années pour mieux décrire et comprendre la rhéologie des bitumes. En conséquence, les paramètres les plus importants de la rhéologie du bitume avaient déjà été mis en évidence au début du 20ème siècle : la susceptibilité au chargement, au temps de chargement et à la température (Lesueur, 2009).

I.1.1.3. Essais de caractérisation rhéologiques des matériaux bitumineux

I.1.1.3.1. Caractérisation des bitumes

Du point de vue globale, Les bitumes purs sont considérés comme des matériaux homogènes, continus et isotropes. Vu son comportement viscoélastique, les propriétés du bitume sont influencées par :

- La température
- La déformation
- Le nombre de cycles de chargement

Vu leurs constitutions d'assemblages d'atomes d'hydrogène et de carbone, les liants bitumineux développent des forces d'adhésion une fois en contact avec des particules solides notamment les granulats ; ce qui permet d'assurer une cohésion suffisante aux mélanges afin de bien résister aux sollicitations mécaniques et thermiques telles que le trafic et les conditions climatiques auxquels l'enrobé est exposé. Etudier la rhéologie des bitumes est important afin de caractériser le comportement mécanique des liants. En fait, la rhéologie est une division de la physique. Elle décrit et analyse les propriétés d'écoulement et des déformations des matériaux. Le Tableau 5 décrit les essais de rhéologies et leurs modalités.

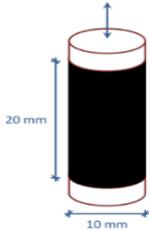
Essai rhéologique	Objective	Principe	Paramètre mesuré
Traction directe SHRP (ASTM D6816-11)	Caractériser la résistance à la rupture à basse température (PG L).	Un échantillon de 27mm de hauteur est soumis à une traction à vitesse de déformation imposée constante de 1mm/min à différentes températures maintenues constantes, jusqu'à la rupture du bitume.	La température à laquelle la déformation à la rupture est égale à 1%.
Bending Beam Rheometer BBR (NF EN 14771)	Caractériser la résistance à la rupture à basse température (PG L).	Un barreau de liant est immergé dans un bain dont la température est constante. Une charge de 100 grammes est appliquée sur la poutre pour une durée de 240 secondes et la déflexion est mesurée durant cette période.	Le déplacement au point d'application de la charge.
Viscosité rotationnelle (NF EN 13302)	Caractériser la maniabilité (PG H).	Cet essai consiste à mesurer le couple nécessaire pour faire tourner une tige immergée dans le bitume.	Mesure de la viscosité du liant à haute température.

Tableau 5 Essais rhéologiques pour caractériser le bitume

Aussi, parmi les essais rhéologiques, l'essai de module complexe permet de décrire le comportement viscoélastique du bitume.

Essais de module complexe

Un matériau viscoélastique se comporte comme un solide élastique à des très basses températures et/ou à des fréquences de chargement élevées ; et comme un liquide visqueux à des hautes températures et/ou à des fréquences de chargement basses. Afin de déterminer l'évolution du module complexe, le matériau est soumis à un chargement sinusoïdal de fréquence f à différentes températures. Plusieurs types de sollicitations peuvent être utilisés afin de déterminer le module complexe des liants bitumineux (voir Tableau 6).

Appareil utilisé		Sollicitations	Températures
Métravib®		 <p>Traction/compression</p>	-30°C à 30°C

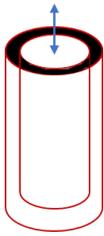
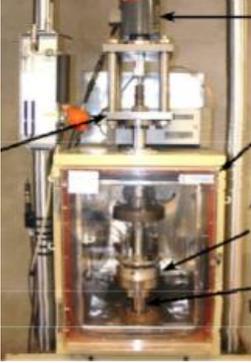
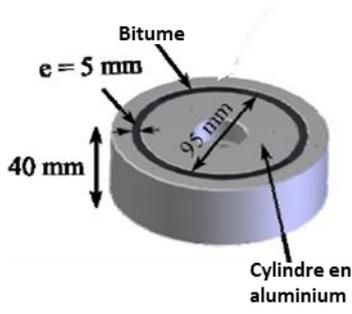
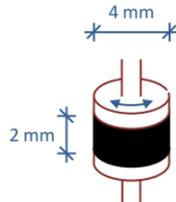
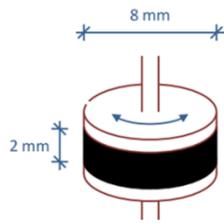
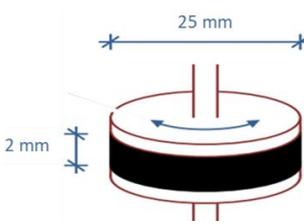
	 <p>(Olard et al., 2004) (Magnaifico, 2014)</p>	 <p>Cisaillement annulaire</p>	30°C à 80°C
<p>Rhéomètre à cisaillement annulaire (ASR)</p>	 <p>(Delaporte et al., 2007)</p>	 <p>Bitume $e = 5 \text{ mm}$ 40 mm 95 mm Cylindre en aluminium</p> <p>Cisaillement annulaire</p>	<p>-25°C à 30°C</p> <p>30°C à 80°C (Utilisation de la pression d'air pour empêcher le fluage du matériau)</p>
<p>Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR)</p>	 <p>(NF EN 14770, 2012) (Mangiafico, 2014)</p>	 <p>4 mm 2 mm</p> <p>Cisaillement</p>	-30°C à -10°C
	 <p>8 mm 2 mm</p> <p>Cisaillement</p>	-10°C à 25°C	
	 <p>25 mm 2 mm</p> <p>Cisaillement</p>	25°C à 60°C	

Tableau 6 Les différents appareils et types de sollicitations utilisés pour les essais de module d'un bitume

Le rhéomètre à cisaillement dynamique DSR (Dynamic Shear Rheometer) est aujourd'hui un instrument largement utilisé pour étudier les propriétés rhéologiques du bitume sur une gamme de températures et de fréquences dans les conditions de service des chaussées : par exemple entre -30 et 90 °C et entre 0.01 et 80 Hz. Seul un essai, réalisé avec le DSR, est accepté comme norme européenne (EN14770 Bitumes et liants bitumineux - Détermination du module de cisaillement complexe et de l'angle de phase - Rhéomètre à cisaillement dynamique). Cette norme est utilisée pour caractériser les liants à des fréquences et températures données.

Le principe de cet essai est d'appliquer une sollicitation sinusoïdale à un échantillon de bitume cylindrique placé entre deux plateaux métalliques parallèles. Un des deux plateaux est fixe alors que l'autre est sollicité par une contrainte ou un déplacement. Le module de cisaillement est mesuré à partir du moment exercé et de l'angle de rotation du plateau supérieur. L'angle de phase est identifié comme le retard de la réponse du matériau face à une sollicitation.

Détermination du module complexe

Le module complexe est obtenu à partir d'un essai dynamique en calculant le rapport entre :

La déformation imposée $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$ Équation 3

La contrainte résultante $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi)$ Équation 4

Vu le caractère viscoélastique du matériau bitumineux, un retard sur la déformation se traduit par un angle de phase φ . La déformation et la contrainte sont liées par un nombre complexe E^* .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} \text{ Équation 5}$$

Le module complexe peut s'écrire :

$$E(i\omega) = |E^*| e^{i\varphi} = E_1 + iE_2 \text{ Équation 6}$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \text{ Équation 7}$$

Avec,

E_1 : partie réelle du module, appelé module de gain, représente la partie de l'énergie emmagasinée dans le matériau et qui pourra être restituée,

E_2 : partie imaginaire du module, appelé module de perte, donne une idée de l'énergie perdue par frottement interne au sein du matériau,

φ : angle de phase qui caractérise le caractère visqueux du matériau bitumineux, il donne une idée de la prédominance élastique ou visqueuse du matériau, dans des conditions bien déterminées (pour un corps élastique $\varphi=0$),

$|E^*|$: la norme du module complexe, aussi appelé module de rigidité.

Si le comportement du matériau bitumineux est considéré comme viscoélastique linéaire isotrope, la relation entre le module complexe E^* et le module complexe de cisaillement G^* sera la suivante :

$$G^* = \frac{E^*}{2(1+\nu^*)} \text{ Équation 8}$$

Avec ν^* : coefficient de Poisson complexe.

Représentation du module complexe

Différentes représentations graphiques sont utilisées pour montrer la variation du module complexe E^* et ses composantes $|E^*|$, E_1 , E_2 et l'angle de phase ϕ avec la fréquence et la température. Les types de graphiques les plus courants sont les suivants :

- Courbe isotherme : Ces courbes sont obtenues en traçant les valeurs de la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction des fréquences d'essai correspondantes, pour chaque température d'essai. Les deux axes sont en échelle logarithmique.
- Courbe isochrone : Ces courbes sont complémentaires aux courbes isothermes. Elles sont obtenues en traçant les valeurs de $|E^*|$ en fonction des températures d'essai correspondantes, pour chaque fréquence d'essai. Le graphique est généralement tracé sur une échelle semi-logarithmique ($\log |E^*|$ en fonction de la température).
- Plan Cole-Cole : Ce graphique est obtenu en traçant les valeurs de E_1 et E_2 dans le plan complexe (partie imaginaire en fonction de la partie réelle). Comme les axes sont généralement en échelle linéaire, la grande variation de E_1 et E_2 n'est pas entièrement évidente. En particulier, les graphiques de Cole-Cole sont utiles pour mettre en évidence le comportement des matériaux bitumineux à basse température/haute fréquence. Un exemple d'un plan Cole-Cole est présenté dans la Figure 4.

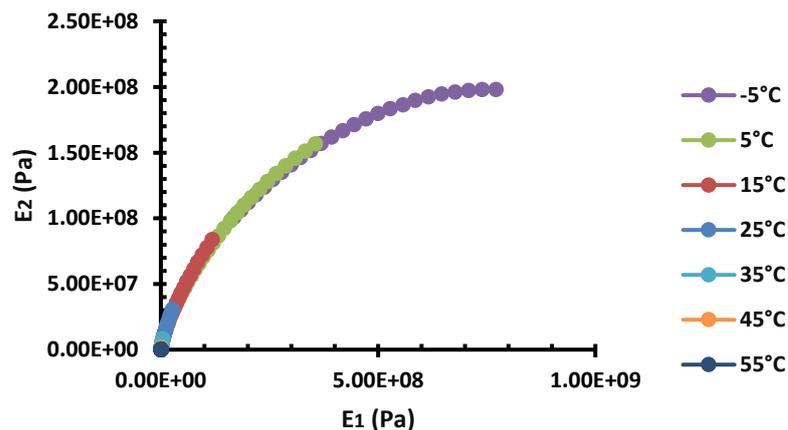


Figure 4 Module complexe d'un bitume de classe 35/50 représenté dans le plan Cole-Cole

- Diagramme Black : Ce graphique est obtenu en traçant les valeurs de $|E^*|$ en fonction des valeurs de ϕ correspondantes, dans ce que on appelle "l'espace de Black" (Figure 5). Il est généralement tracé en échelle semi-logarithmique ($\log |E^*|$ en fonction de ϕ). Pour cette raison, les diagrammes Black sont utiles pour mettre en évidence le comportement des matériaux bitumineux à haute température/faible fréquence.

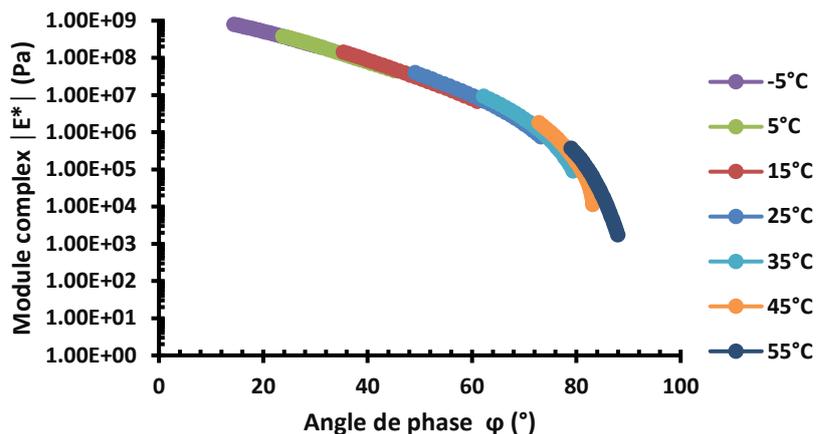


Figure 5 Module complexe d'un bitume de classe 35/50 représenté dans l'espace Black
Tous ces graphiques peuvent être tracés, en suivant une approche similaire, pour G^* .

Principe d'équivalence temps-température

Les modules complexes E^* et G^* , peuvent être exprimés en fonction de deux variables indépendantes : la fréquence f (ou la pulsation ω) et la température T . Les représentations graphiques des courbes isothermes indiquent la possibilité d'obtenir la même valeur de module complexe pour plusieurs couples (pulsation, température), ce qui se traduit par l'équation :

$$E^*(\omega_1, T_1) = E^*(\omega_2, T_2) \text{ avec } (\omega_1, T_1) \neq (\omega_2, T_2) \text{ Équation 9}$$

Vu cette équivalence des effets de fréquences et de températures sur le comportement du matériau, ce concept était appelé principe d'équivalence temps-température (PETT) ou principe de superposition temps-température (PSTT).

Ce principe permet d'utiliser des courbes isothermes de module complexe pour obtenir une courbe unique $|E^*|$, caractéristique du matériau, pour une température de référence T_{ref} choisie. Cette courbe est appelée courbe maîtresse. La procédure consiste à décaler les courbes isothermes le long de l'axe horizontal des fréquences afin de superposer tous les points ayant la même ordonnée (c'est-à-dire la même $|E^*|$). Un exemple de courbe maîtresse d'un mélange bitumineux est présenté à la Figure 6.

D'un point de vue mathématique, une fois que la température de référence T_{ref} est choisie, la translation de toutes les autres courbes isothermes est opérée en multipliant les fréquences de tous les points de chaque courbe par un coefficient $a_T(T)$, appelé facteur de décalage, dépendant de la température de la courbe isotherme à traduire :

$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega a_T(T), T_{ref}) \text{ Équation 10}$$

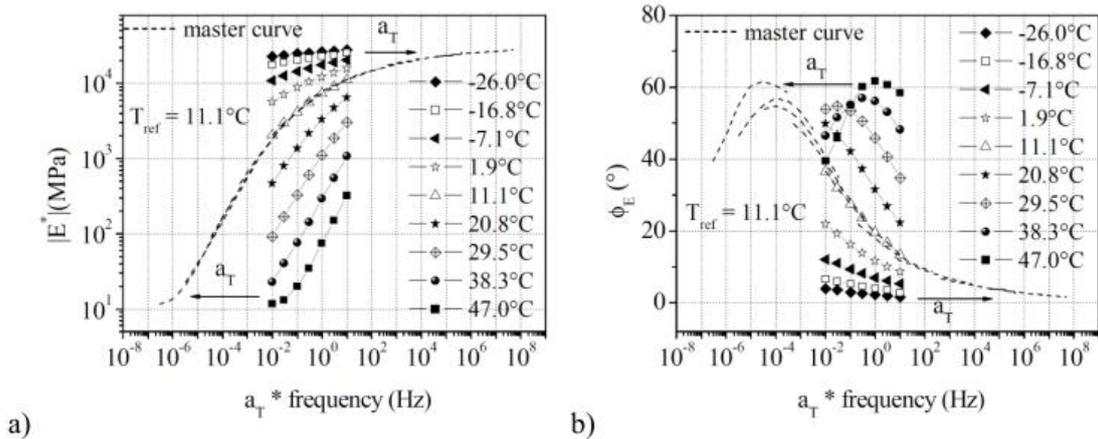


Figure 6 Exemple des courbes maitresses de module complexe (gauche) et d'angle de phase (droite) pour des matériaux bitumineux (Nguyen, 2011)

Lors de la translation des courbes isothermes pour construire des courbes maîtresses, la fréquence réduite est définie comme la fréquence modifiée, obtenue en utilisant les facteurs de décalage.

Les facteurs de décalage $a_T(T)$ vérifient la propriété suivante :

$$a_T(T) = \frac{f(T)}{f(T_{ref})} \Rightarrow a_T(T_{ref}) = 1 \text{ Équation 11}$$

Le PSTT est une propriété particulièrement intéressante, car seules des conditions d'essai limitées en température et en fréquence sont testées en laboratoire. En utilisant des combinaisons appropriées de ces deux facteurs, il est possible d'accéder à un domaine de fréquence réduit très large. Puisqu'une augmentation de la température est équivalente à une réduction de la fréquence et vice versa, par exemple, la température de l'essai peut être abaissée afin de mesurer le module complexe d'un bitume correspondant autrement à une fréquence excessive.

Deux équations sont couramment utilisées pour ajuster les valeurs d' a_T en fonction de la température. La première est connue comme la loi d'Arrhenius (Arrhenius, 1889) :

$$\text{Log}(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \text{Équation 12}$$

Avec R est la constante des gaz nobles ($8,314 \text{ J.mol}^{-1} .\text{K}^{-1}$) et δH est l'énergie d'activation du matériau. La seconde est l'équation dite de Williams-Landel-Ferry (WLF), consistant en une équation empirique de la forme (Williams, Landel, & Ferry, 1955) :

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \text{Équation 13}$$

Avec C_1 et C_2 sont des constantes, variant avec le matériau et T_{ref} .

L'équation WLF peut être appliquée sur toute la gamme des températures d'essai. Cependant, si l'ajustement est effectué sur des données obtenues uniquement pour des températures supérieures à la température de transition vitreuse T_g du matériau, elle ne peut pas être utilisée pour extrapoler des valeurs d' $a_T(T)$ pour $T < T_g$ et vice-versa.

En suivant une procédure similaire, des courbes maîtresses peuvent être obtenues également pour l'angle de phase ϕ en utilisant les mêmes facteurs de décalage déterminés pour $|E^*|$. Il a été constaté que les courbes maîtresses pour $|v^*|$ et ϕ_v peuvent également être obtenues avec les mêmes facteurs de décalage, ce qui signifie que le PSTT est valable dans le cas

tridimensionnel (Nguyen et al., 2013). En outre, le PSTT peut être appliquée également aux courbes isochrones, ce qui permet d'obtenir des courbes maîtresses isochrones. Dans ce cas, une fréquence de référence doit être choisie au lieu d'une température de référence.

I.1.1.3.2. Caractérisation des mastic et mortier

Le mastic et le mortier sont deux mélanges bitumineux. Le mastic est obtenu en mélangeant le bitume et les fines qui sont identifiées comme les particules passant au tamis 63 μm ou 80 μm selon les normes européennes NF EN 13043. Alors que le mortier est formé de bitume et des inclusions (fines et sables) qui sont définies comme les particules passant au tamis 250 μm au 315 μm .

Le mastic et le mortier jouent un rôle majeur dans les enrobés bitumineux. Ils sont considérés comme le véritable liant qui enrobe les gros granulats. L'étude de leur comportement peut combler le fossé entre le comportement du liant et celui de l'enrobé bitumineux. L'importance de leur rôle peut être liée aux interactions entre le liant bitumineux, le filler et les fractions des fines. Ces interactions peuvent être expliquées par de nombreux phénomènes physico-chimiques. Plusieurs auteurs ont étudié le mécanisme physique : l'effet des fillers minéraux sur la combinaison bitume-filler (Kavussi & Hicks, 1997 ; Chen & Peng, 1998 ; Soenen & Teugels, 1999 ; Delaporte, 2007). Alors que d'autres se sont concentrés sur le phénomène chimique : l'effet de certains types de filler qui pourraient réagir comme une matière active en raison de sa composition chimique (Little & Petersen, 2005).

Les essais standards de spécification des bitumes comme l'essai de température bille et anneau ou l'essai de pénétrabilité sont adoptés pour caractériser les propriétés physiques des mastics et mortiers bitumineux. Concernant l'essai de pénétrabilité à 25°C, Veropalumbo et al., 2021 ont montré que la valeur mesurée pour les mastics est restée quasiment constante et elle a diminué de 4% par rapport à celle mesurée pour les bitumes purs. Russo et al., 2022 ont montré que les mastics bitumineux ont atteint une température plus élevée que le liant pur (en moyenne 18%) pour l'essai bille anneau. Au fur et à mesure que le rapport filler/bitume augmente, le point de ramollissement du mastic bitumineux augmente. Ce résultat permet d'évaluer l'effet rigidifiant du filler.

Vu l'importance du mastic et du mortier, de nombreux essais expérimentaux ont été réalisés pour caractériser leur comportement mécanique. Parmi eux, l'essai oscillatoire dynamique en utilisant un DSR a été adopté. Le rhéomètre à cisaillement dynamique mesure le module complexe de cisaillement G^* et l'angle de phase ϕ des liants bitumineux. Néanmoins, son application a été élargie pour tester les pâtes bitumineuses telles que le mastic et le mortier (voir Tableau 7).

Auteur	Diamètre max. mastic (μm)	Diamètre max. mortier (μm)	Appareillage	Configuration	Température
Delaporte, 2007	100		RCA (Rhéomètre à cisaillement annulaire)	Cylindre creux d'épaisseur 5 mm sollicité grâce à une presse hydraulique MTS.	-25°C à 60°C

Woldekidan, 2011	63		DSR	CP/PP - 8 mm (-10°C à 30°C) CP - 25 mm (30°C à 60°C)	-10°C à 60°C
		500	DSR	PP-8 mm avec Colonne (Ø6 mm, h = 20 mm)	-10°C à 40°C
Liao et al., 2013	63		DSR	PP- 8 mm (5°C à 45°C) PP-25 mm (45°C à 85°C)	5°C à 85°C
El Mansouri, 2016	315 (avec particules de verre)		RCA	Cylindre creux d'épaisseur 5 mm sollicité grâce à une presse hydraulique MTS.	-15 à 45 °C
Underwood, 2016	75		DSR (TA Instruments ARG2)	PP-8mm (2 mm gap)	10°C à 40°C
Micaelo et al., 2017	63		DSR	PP-8mm PP-25 mm	25°C
Moon et al., 2017		150	DSR	PP- 8 mm (4°C à 40°C) PP-25 mm (28°C à 70°C)	4°C à 70 °C
Zhang et al., 2017		500	DSR (Anton Paar MCR702)	PP-8 mm avec Colonne (Ø6 mm, h = 20 mm)	-10°C à 30°C
Chen et al., 2019	75		DSR (Anton Paar MCR101)	PP-25 mm	30 °C à 70 °C
		0.6 mm	DSR (Anton Paar MCR101)	PP-25 mm avec Colonne (Ø25 mm, h = 2 mm)	30 °C à 70 °C
		1.18 mm	DSR (Anton Paar MCR101)	PP-25 mm avec Colonne (Ø25 mm, h = 4 mm)	30 °C à 70 °C

		2.36 mm	DSR (Anton Paar MCR101)	PP-25 mm avec Colonne (Ø25 mm, h = 7 mm)	30 °C à 70 °C
Veropalumbo et al., 2021	63		DSR (Anton Paar Smart PAVE 102)	PP- 8 mm (2 mm gap) PP- 25 mm (1 mm gap)	10°C, 20°C, 30°C, 40°C et 50°C
Russo et al., 2022	63		DSR (Anton Paar)	PP- 8 mm (2 mm gap) PP- 25 mm (1 mm gap)	10°C, 20°C, 30°C, 40°C et 50°C

Tableau 7 Caractéristiques des essais sur mastics et mortiers recensés dans la bibliographie

Avec PP : Plan-Plan et CP : Cône-Plan.

I.1.1.3.3. Caractérisation des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux doivent posséder des caractéristiques qui rencontrent des exigences précises à plusieurs niveaux (voir Tableau 8). Des essais sont réalisés sur les enrobés afin de garantir que leurs performances sont conformes en fonction de leurs utilisations, de leurs types et des sollicitations auxquelles ils sont soumis (Delorme et al., 2007).

Niveau	Essai	But de l'essai	Principe	Paramètre mesuré
1	Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) (NF EN 12697-31)	Déterminer le pourcentage des vides pour un nombre de girations donnés.	Appliquer une pression au sommet d'une éprouvette cylindrique afin d'exercer un compactage par pétrissage.	Maniabilité
	Tenue à l'eau (NF EN 12697-12)	Déterminer le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec.	Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion et une autre partie conservée immergée à des températures données. Les éprouvettes sont écrasées en compression simple ou diamétrale.	Résistance au désenrobage et à l'arrachement
2	Orniérage (NF EN 12697-2)	Mesurer la profondeur de la déformation produite par le passage de roue	Une plaque d'enrobé est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique à une température de 60°C.	Résistance à l'orniérage

		en fonction du nombre de cycles.		
3	Module complexe (NF EN 12697-26)	Calculer rapport de la contrainte à la déformation qui représente le module.	Appliquer une charge dans un domaine de petites déformations en contrôlant la température, la fréquence et la loi de chargement.	Rigidité
4	Fatigue (NF EN 12697-24)	Déterminer le nombre de cycles jusqu'à l'endommagement.	Une éprouvette est soumise à des sollicitations de fréquence et température fixes jusqu'à la rupture.	Résistance à la fissuration par fatigue
5	Essai de retrait thermique empêché (TSRST) (NF EN 12697-46)	Déterminer la température qui correspond à la rupture.	Bloquer les extrémités d'une éprouvette cylindrique soumise à une baisse de température.	Résistance à la fissuration thermique

Tableau 8 Caractérisation des enrobés bitumineux

Il existe d'autres essais qui permettent : de déterminer le module complexe des enrobés bitumineux comme la technique d'ultrason (Di Benedetto et al., 2009, Benaboud, 2022) et d'évaluer l'endommagement par fatigue du béton bitumineux à l'aide de la technique d'émission acoustique (Benaboud et al., 2021).

Essais de module complexe

La caractérisation de la rigidité des enrobés bitumineux se fait à l'aide des essais de traction directe et indirecte et des essais de flexion. Ces essais permettent de classer les mélanges bitumineux selon leurs performances mécaniques afin d'estimer le comportement structural dans les chaussées. Ces essais sont divisés en deux grandes catégories : les essais homogènes et les essais non homogènes (Di Benedetto et al., 2001) (voir Tableau 9).

- Les essais homogènes permettent un accès direct aux contraintes et aux déformations, et donc à la loi constitutive (qu'elle soit viscoélastique ou non). Parmi ces essais : l'essai de traction/compression sur une éprouvette cylindrique et quelques essais de cisaillement.
- Les essais non homogènes nécessitent d'adopter d'abord une loi constitutive (viscoélasticité linéaire) et de prendre en compte la géométrie de l'éprouvette. Ils ne peuvent être utilisés pour la détermination de module complexe que si le comportement est viscoélastique linéaire. Parmi ces essais : les essais de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales et prismatiques, les essais de flexion en trois ou quatre points sur des éprouvettes prismatiques et des essais indirects sur des éprouvettes cylindriques.

En général, pour tous les essais, à partir des valeurs de la force F et du déplacement D appliqués aux extrémités de l'éprouvette et de l'angle de phase ϕ entre ces deux signaux, le module complexe des mélanges bitumineux peut être déterminé.

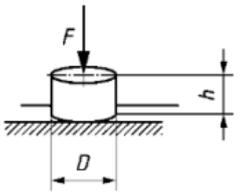
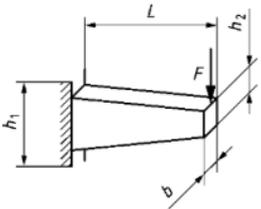
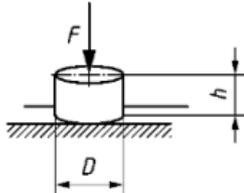
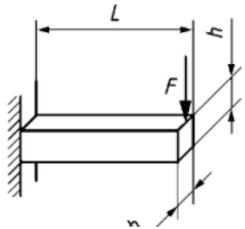
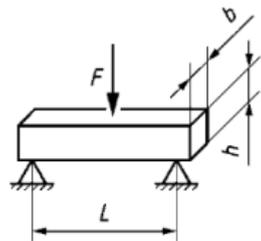
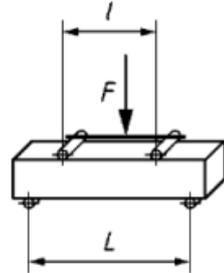
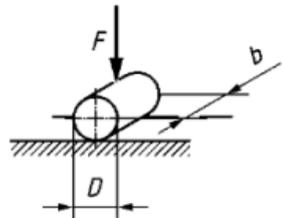
Essais homogènes		Essais non homogènes	
Type de charge		Type de charge	
Traction-compression sur éprouvette cylindrique		Flexion en deux points sur éprouvette trapézoïdale	
Traction directe sur éprouvette cylindrique		Flexion en deux points sur éprouvette prismatique	
		Flexion en trois points sur éprouvette prismatique	
		Flexion en quatre points sur éprouvette prismatique	
		Traction indirecte sur éprouvette cylindrique	

Tableau 9 Essais pour mesurer le module complexe des enrobés bitumineux (NF EN 12697-26)

I.1.1.4. Prédiction du comportement mécanique des mélanges bitumineux à partir des propriétés du liant

Plusieurs études ont été menées pour développer des méthodes permettant d'estimer le comportement mécanique des mélanges bitumineux. Vu que ces mélanges sont des matériaux hétérogènes, les méthodes développées peuvent prédire leur comportement à partir des propriétés de leurs composants de base ou même à partir d'une échelle précédemment caractérisée. Par exemple, la prédiction du comportement du mortier à partir des propriétés du mastic (Buttlar et al., 1999 ; Di Benedetto et al., 2004 ; Shashidhar & Shenoy, 2002). Ces méthodes peuvent être utilisées pour vérifier la précision de l'expérience ou même remplacer la procédure expérimentale.

I.1.1.4.1. Generalized self-consistent schemes GSCS

La méthode la plus utilisée est la GSCS (Budiansky, 1965 ; Kerner, 1956 ; Theocaris, 1987). Christensen et Lo (1979, 1986) ont appliqué cette méthode aux matériaux viscoélastiques à deux phases. La modélisation micromécanique a d'abord été faite pour décrire le comportement des composites polymères et a ensuite été étendue par Buttlar et Roque (1996) aux mélanges bitumineux. Par la suite, de nombreux chercheurs ont développé cette approche comme Shashidhar et Shenoy (1999).

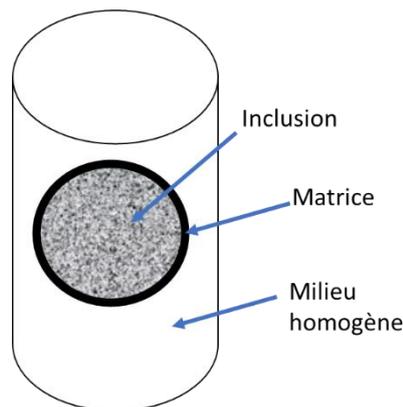


Figure 7 Description du comportement du mélange bitumineux par un modèle triphasique selon la méthode GSCS

Ce modèle est également connu sous le nom de modèle auto cohérent généralisé. Cette méthode traite le matériau comme un composite de trois phases : les inclusions qui sont considérées comme une sphère entourée d'une couche de matrice dans un milieu homogène (présentée dans la Figure 7). Elle est utilisée pour prédire le comportement viscoélastique des mélanges bitumineux en fonction du module complexe de leurs matrices et des inclusions à différentes concentrations. L'équation simplifiée de Christensen et Lo (1979, 1986) :

$$A_1 \left(\frac{G_c}{G_m} \right)^2 + B_1 \left(\frac{G_c}{G_m} \right) + C_1 = 0 \quad \text{Équation 14}$$

Avec,

G_c : module complexe de cisaillement du composite (matrice et inclusions),

G_m : module complexe de cisaillement de la matrice,

A_1, B_1, C_1 : coefficients qui dépendent des propriétés des constituants, G_f, G_m les modules des inclusions et de la matrice respectivement, ν_f et ν_m les coefficients de poisson des inclusions et de la matrice respectivement et ϕ_f le taux de remplissage des inclusions dans le mélange.

Le modèle GSCS ne tient pas compte de certains phénomènes qui augmentent la rigidité du matériau tels que la percolation. Il donne une sous-estimation du module des mélanges car il prend juste en considération le renforcement par les inclusions solides. Buttlar et al., 1999 ont observé que plus la concentration en fines accroît, plus l'écart entre le modèle et les points expérimentaux augmente. Alberola et Mele, 1997 ont trouvé des grands écarts entre les modules mesurés expérimentalement et ceux calculés par le modèle cohérent à partir de 20% de remplissage volumétrique des granulats dans le mélange. Delaporte, 2007 a testé plusieurs mastics en variant leurs concentrations en fines et il a constaté que pour des teneurs en fines de plus de 40%, les résultats obtenus par le modèle GSCS ne sont plus cohérents avec les données expérimentales. En effet, à partir d'un certain pourcentage seuil de fines dans le mélange ϕ_{fpt} , des « assemblages granulaires » de fines commencent à se former menant la matrice à être piégée dans des colonnettes de particules et donc une discontinuité dans la matrice (voir Figure 8). Ce phénomène augmente la concentration volumétrique initiale des fines dans le mélange.

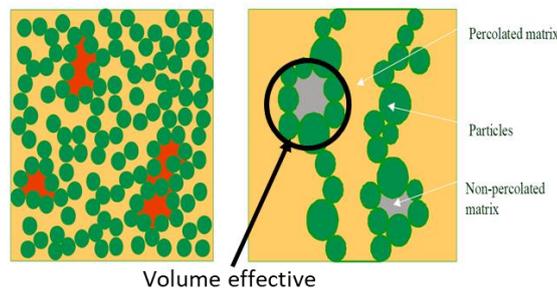


Figure 8 Schéma montrant la matrice non percolée piégée dans un assemblage de particules noyées dans une matrice percolée

Hajikarimi et al., 2019 ont utilisé un microscope optique Nikon Eclipse 50i (Minato, Tokyo) pour observer la distribution des particules de fines dans une matrice de résine. Deux mastics ont été testés avec 18% et 35% de remplissage de fines. Ils ont observé le phénomène de percolation pour le mastic avec 35% de remplissage (voir Figure 9).

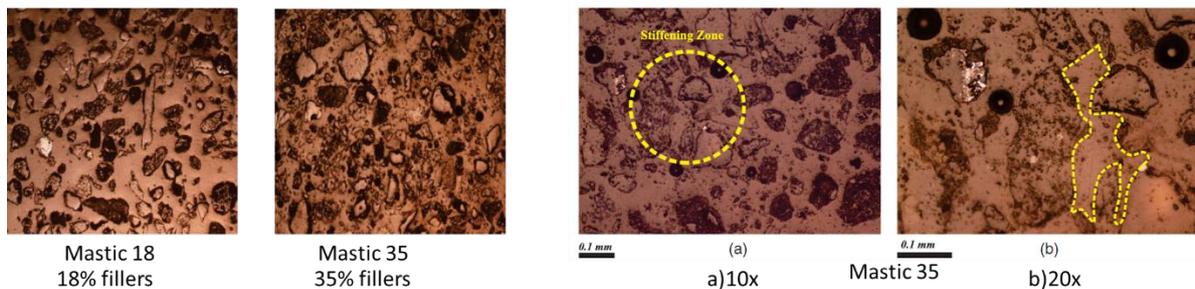


Figure 9 Images au microscope optique de la distribution des particules de fines dans une résine époxy

Shashidhar et Shenoy, 2002 ont cherché une solution pour rendre ce modèle plus réaliste et ils ont trouvé une nécessité d'impliquer la fraction volumique effective des fines ϕ_{eff} qui prend en considération les phénomènes de percolation.

$$\phi_{eff} = 1 - (1 - \phi_f) \left(\frac{1 - \frac{\phi_f}{\phi_{fmax}}}{1 - \frac{\phi_{fpt}}{\phi_{fmax}}} \right)^{0.4} \quad \text{Équation 15}$$

Avec,

ϕ_f : la concentration réelle des fines dans le mélange,

ϕ_{fmax} : taux maximal de remplissage des inclusions ($0.52 < \phi_{fmax} < 0.74$ en fonction de la forme des granulats),

ϕ_{fpt} : taux limite de remplissage des inclusions avant le phénomène de percolation ($\phi_{fpt} = 0.2$ Alberola et Mele, 1997 et $\phi_{fpt} = 0.3$ Delaporte, 2007).

1.1.1.4.2. Geometrical Transformation Shift-homothety-shift and time shift SHStS

En outre, une autre méthode analytique connue sous le nom de Shift-Homothety-Shift and time Shift (SHStS) est adoptée pour prédire le comportement des mélanges bitumineux (Di Benedetto et al., 2004). Elle est basée sur la prédiction des propriétés viscoélastiques linéaires du mélange bitumineux à partir des caractéristiques de liant et consiste à un décalage géométrique des données de bitume pour obtenir les propriétés du mélange.

Basé sur le plan Cole-Cole du liant et des mélanges, Di Benedetto a trouvé une nouvelle façon de prédire le module du mélange à partir du module du liant. Il s'agit d'une transformation géométrique du plan Cole-Cole du liant permettant d'obtenir les plans Cole-Cole des composites bitumineux. Ayant $E_{liant}^*(10^\alpha \omega, T)$ mesuré expérimentalement à $10^\alpha \omega$ comme pulsation et T comme température, $E_{enrobé}^*(\omega, T)$ peut être obtenu en appliquant trois transformations géométriques :

- 1- Translation négative suivant l'axe réel de la valeur $E_{0-liant}$.
- 2- Homothétie à partir de l'origine avec un rapport égal à $\frac{(E_{\infty-mélange} - E_{0-mélange})}{(E_{\infty-liant} - E_{0-liant})}$.
- 3- Translation positive le long de l'axe réel de la valeur $E_{0-mélange}$.

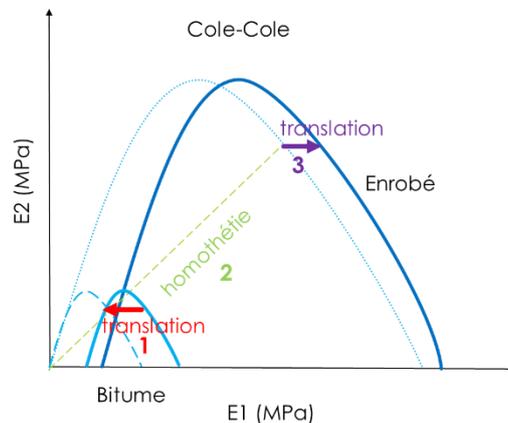


Figure 10 Prédiction du module de l'enrobé à partir du liant dans le plan Cole-Cole en utilisant SHStS
En se basant sur ces transformations, la relation suivante entre le module complexe du mélange et celui du liant peut être obtenue :

$$E_{mélange}^*(\omega, T) = E_{0-mélange} + [E_{liant}^*(10^\alpha \omega, T) - E_{0-liant}] \frac{E_{\infty-mélange} - E_{0-mélange}}{E_{\infty-liant} - E_{0-liant}} \quad \text{Équation 16}$$

Où,

$E_{0-liant}$ et $E_{0-mélange}$ sont les valeurs asymptotiques minimales de la norme du module complexe du liant et du mélange respectivement à très basse fréquence,

$E_{\infty-liant}$ et $E_{\infty-mélange}$ sont les valeurs asymptotiques maximales de la norme du module complexe du liant et du mélange respectivement à très haute fréquence,

α constante qui dépend de la formulation du mélange et/ou du vieillissement pendant le mélange,

ω pulsation,

T température.

Connaissant les propriétés du liant telles qu'elles sont mesurées expérimentalement, trois paramètres inconnus doivent être définis pour obtenir le module complexe du mélange à une pulsation ω et une température T. Ces paramètres sont $E_{0-mélange}$, $E_{\infty-mélange}$ et α .

D'après les données expérimentales, $E_{0-liant}$ et $E_{0-mélange}$ sont proches de zéro. α peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$\tau_{mélange}(T) = 10^{\alpha} \tau_{liant}(T) \quad \text{Équation 17}$$

$$\alpha = \frac{\log(\tau_{mélange})}{\log(\tau_{liant})} \quad \text{Équation 18}$$

Où,

τ : caractéristique temporelle, sa valeur varie uniquement avec la température.

I.1.1.5. Modélisation du comportement LVE des mélanges bitumineux

Plusieurs modèles analogiques sont développés pour décrire le comportement viscoélastique linéaire. Dans cette section, un bref aperçu des principaux modèles rhéologiques qui considèrent un spectre continu, utilisés pour les matériaux bitumineux est présenté : le modèle de Huet, le modèle de Huet-Sayegh et le modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic et 1 Dashpot). Le Tableau 10 représente ces 3 modèles.

Le modèle de Huet (Huet, 1963) est un modèle analogique constitué de 4 paramètres, formé d'un montage en série d'un ressort de raideur E_{∞} et de deux amortisseurs à fluage parabolique de paramètres k et h (Tableau 10).

En 1965, Sayegh a trouvé que le modèle de Huet n'était pas efficace aux basses fréquences. Il a amélioré ce modèle en ajoutant un ressort de raideur E_0 (négligeable devant E_{∞}) parallèlement au modèle de Huet (voir Tableau 10). Le modèle de Huet-Sayegh permet de représenter le comportement des enrobés bitumineux sur une large gamme de températures et de fréquences (Olard, 2003).

Pour représenter le comportement viscoélastique linéaire des bitumes, des mastics, des mortiers et des enrobés bitumineux, Olard et Di Benedetto, 2003 ont introduit le modèle 2S2P1D (2 Springs (ressort), 2 Parabolic (éléments paraboliques) et 1 Dashpot (amortisseur)). Afin de prendre en considération le comportement newtonien des bitumes purs à hautes températures et/ou basses fréquences, les chercheurs ont généralisé le modèle Huet-Sayegh en joignant un amortisseur linéaire en série avec les éléments paraboliques (voir Tableau 10).

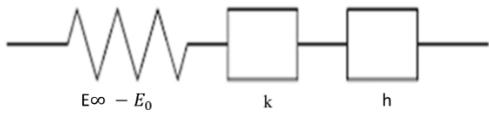
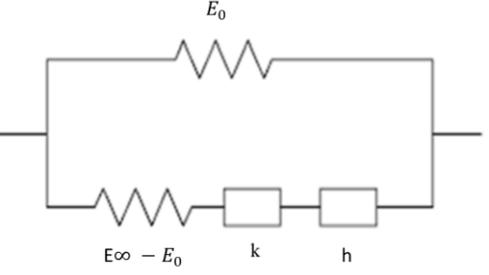
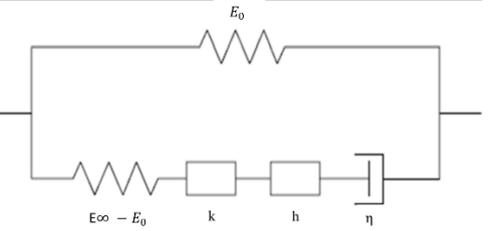
Modèle	Les éléments constituant le modèle	Module complexe E^*
Huet		$E^*(\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$
Huet-Sayegh		$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$
2S2P1D		$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$

Tableau 10 Les différents modèles analogiques

Avec,

k , h et δ : les paramètres des éléments paraboliques du modèle ($0 < k < h < 1$ pour les matériaux bitumineux),

E_∞ : le module instantané du modèle quand $\omega\tau$ tend vers l'infini (pour des fréquences élevées et/ou des basses températures),

i : nombre complexe tel que $i^2 = -1$,

$\beta = (E_\infty - E_0)\eta\tau$: une constante sans dimensions,

η : la viscosité newtonienne.

1.1.2. La méthode française de dimensionnement des chaussées

Lorsque le comportement mécanique des différents matériaux d'une chaussée est caractérisé, la structure doit être dimensionnée. La méthode Française de dimensionnement des chaussées est basée sur les points suivants (norme NFP 98-086) :

- Les calculs sont réalisés en utilisant le modèle de Burmister qui consiste à un modèle multicouche élastique, linéaire et infinie en plan (Burmister, 1963).
- Les propriétés de la structure de chaussées sont considérées comme constantes pendant toute leur durée de vie.
- Les couches bitumineuses sont caractérisées par leurs modules d'élasticité et leurs coefficients de Poisson correspondant à une température équivalente (prise égale à 15 °C) et à une fréquence de 10Hz.

- La charge utilisée pour les calculs correspond à l'essieu de référence qui est un essieu standard à roues jumelées chargé à 130 kN. En général, le dimensionnement se fait en prenant en compte un demi-essieu, donc un jumelage de deux roues appliquant une charge totale de 65 kN.
- Les champs de déformations calculés sont comparés aux valeurs admissibles, qui dépendent essentiellement du trafic cumulé et des propriétés des couches de la chaussée.
- La méthode de dimensionnement impose de définir : le nombre d'essieux de référence, la structure de chaussée et le risque de rupture r . Le dernier est défini comme la probabilité de rupture de la chaussée ; en pratique, pour une chaussée sollicitée, le risque de rupture r est assimilé au pourcentage endommagé de la structure.

Après modélisation de la chaussée, les déformations résultantes dans la structure sont comparées aux valeurs admissibles. Ces déformations doivent être inférieures aux valeurs admissibles.

Par exemple, pour les chaussées bitumineuses souples, deux mécanismes de rupture sont pris en compte :

- Rupture due à la fatigue des couches d'enrobé,
- Orniérage du sol.

Pour cela, deux critères doivent donc être vérifiés :

- Critère de fatigue : La déformation horizontale maximale obtenue à la base des couches bitumineuses doit être inférieure à la déformation maximale admissible.
- Critère d'orniérage : La déformation verticale obtenue au sommet du sol doit être inférieure à la déformation verticale admissible.

La déformation admissible en extension à la base de la couche d'enrobé $\varepsilon_{t,ad}$ est donnée par l'équation :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \sqrt{\frac{E(10^\circ C, 10Hz)}{E(15^\circ C, 10Hz)}} \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b k_r k_s k_c \quad \text{Équation 19}$$

Avec :

- $\varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz)$, déformation menant à la rupture après 1 million de cycle. Elle est déterminée à partir d'un essai de fatigue en laboratoire réalisé à 10 °C et 25 Hz ;
- NE, nombre d'essieux de référence converti à partir du trafic subi par la chaussée ;
- K_c , coefficient de calage, dépend du type de matériau bitumineux ;
- K_s , coefficient considérant les hétérogénéités causées par la portance du sol support ;
- K_r , coefficient de risque associé au risque de rupture r . Il prend en compte la variabilité de l'essai de fatigue (écart type SN, déterminé à partir de l'essai de fatigue) ainsi que la variabilité des épaisseurs des couches (écart type Sh).

K_r , donné par l'équation :

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad \text{Équation 20}$$

Où,

- u , variable de la loi centrée réduite associée au risque de rupture r (exprimé en %);
- b , pente de la droite de fatigue (loi bi-logarithmique);
- δ , définie par l'équation :

$$\delta = [SN^2 + \frac{c^2}{b^2}Sh^2]^{0.5} \quad \text{Équation 21}$$

Avec,

- c coefficient pris égal à 0.02cm^{-1} ;
- Sh généralement pris égal à 0.01m dans les conditions normales de construction.

La déformation verticale admissible au sommet du sol est définie par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{z,ad} = 0.012 (NE)^{-0.222} \quad \text{Équation 22}$$

Cette équation de $\varepsilon_{z,ad}$ est appliquée pour les chaussées à trafic moyen à fort ($\geq T3$), ce qui est le cas des chaussées expérimentées lors des essais à trafic accéléré. Pour des trafics plus faibles, les coefficients de cette équation changent.

Le dimensionnement des structures des chaussées s'effectue en utilisant le logiciel Alize (LCPC, 1994) qui est basé sur le modèle de Burmister. Cette modélisation permet d'avoir une analyse théorique du comportement mécanique de la chaussée sous l'effet du trafic.

I.1.3. Les sollicitations externes endommageant la structure routière

Lorsque la chaussée est dimensionnée et mise en place, elle subit plusieurs sollicitations externes (mécanique et climatique). L'ensemble de ces sollicitations cause la dégradation de la chaussée et met sa durée de vie en péril. Parmi ces sollicitations :

I.1.3.1. Sollicitations mécaniques

Quand un véhicule circule sur une chaussée, il applique sur cette dernière une pression à travers les essieux. Le trafic correspond à la répétition des chargements qui engendrent dans les couches de la chaussée des sollicitations de flexion, la traction dans la partie inférieure et la compression dans la partie supérieure. La compression répétée crée des déformations permanentes qui augmentent le risque de l'orniérage et la traction répétée cause l'initiation des fissures qui augmente le risque de la ruine du matériau par fatigue (voir Figure 11).

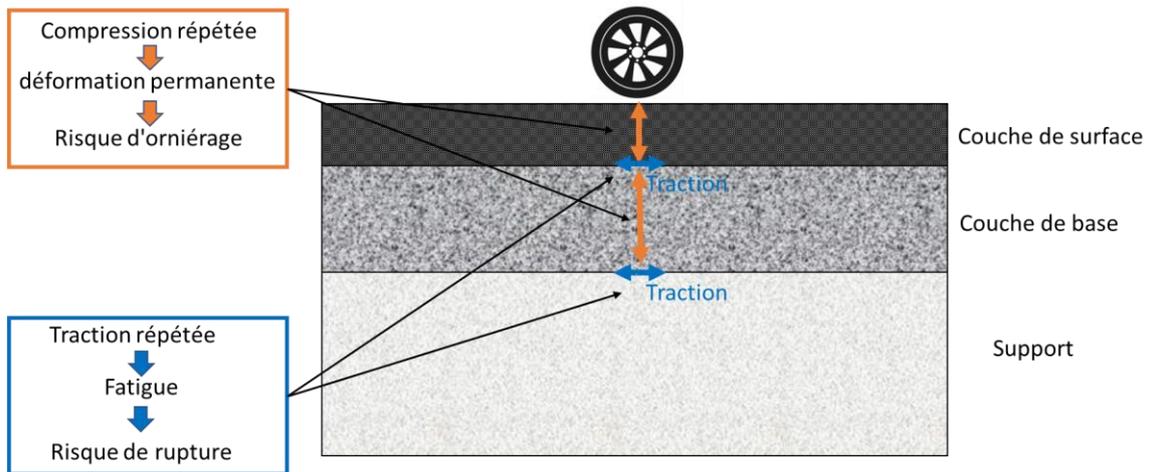


Figure 11 Sollicitations induites par le trafic

Par ailleurs, la majorité des véhicules lourds dispose d'essieux équipés de roues jumelées. Lors de leur passage, les couches bitumineuses se déforment davantage dans le sens longitudinal que transversal (Chabot et al., 2010 ; Ambassa et al., 2012). Pour cette raison, afin de dimensionner une chaussée, il est nécessaire de prendre en compte les déformations longitudinales et de prélever des échantillons dans cette direction afin de caractériser l'enrobé.

I.1.3.2. Sollicitations climatiques

La chaussée est soumise à plusieurs phénomènes météorologiques :

- L'ensoleillement ;
- La température ;
- L'humidité et la précipitation.

Plusieurs effets peuvent être engendrés par ces sollicitations (voir Figure 12). Notons :

- Changement du module du matériau. Le comportement du béton bitumineux dépend de la température. Ce matériau est dit "thermosensible" ;
- Oxydation du bitume causant son vieillissement et durcissement ;
- Apparition des cycles de gel et dégel ;
- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température.

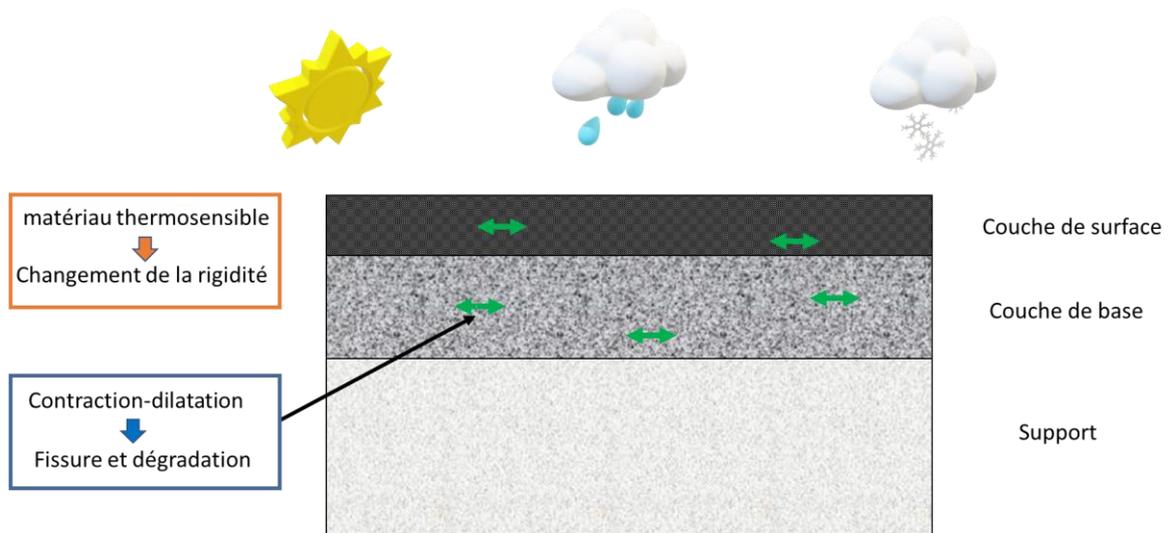


Figure 12 Sollicitations induites par le climat

Par ailleurs, compte tenu des amplitudes de variation annuelle des températures, le bitume idéal par son comportement thermosensible doit donc résister à la fois aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'ornièrage (à température élevée).

I.1.4. Les dégradations des chaussées

Les chaussées soumises à ces différentes sollicitations mécaniques et climatiques, subissent plusieurs types de dégradations (LCPC, 1998), qui sont présentées dans le Tableau 11.

Couches	Types de dégradations	Description
Roulement	Les arrachements	Désenrobage des granulats ; Départ localisé des matériaux ; Usure due aux efforts tangentiels exercés par les charges roulantes (Manyo, 2019) ; Arrachement des gravillons du revêtement ou plumage. Plusieurs machines étaient développées pour évaluer l'arrachement : Aachener Ravelling Tester, Darmstadt Scuffing Device, Rotating Surface Abrasion Test et TriboRoute Device (Nichollas et al., 2019).
	Les mouvements de matériau	Remontée du liant à la surface ; Remontée des éléments fins à la surface ; Enfoncement de gravillons dans l'enrobé pendant les temps chauds.
	Les déformations	Affaissement ; Gonflement ; Flambement ;

		Orniéage par fluage dans les conditions excessives de température et de sollicitations par trafic (Oubahdou, 2022).
	Les fissures	Fissures transversales ou longitudinales ; Fissuration par remontées des fissures des couches d'assises (Laveissiere, 2002) ; Fissuration de fatigue due à une mauvaise adhérence de la couche de roulement bitumineuse à l'assise (Ktari, 2016) ; Fissuration par fatigue thermique ou vieillissement du liant. Des essais ont été réalisés pour étudier le comportement à la rupture des liants (Beghin, 2003 ; Hammoum et al., 2009).
Assise	Les fissures	Fissuration de fatigue due à la répétition des efforts de traction par flexion aux passages du trafic ; Fissuration due aux gradients thermiques dans les couches bitumineuses ; Fissuration de prise et retrait thermique des graves traitées aux liants hydrauliques et des bétons ; Pompage et décalage de dalles dans la couche montrant des fissures de retrait ou des joints, causés par une mauvaise qualité du transfert de charge et de l'érodabilité du support.

Tableau 11 Les dégradations des chaussées

I.1.5. Travaux d'entretien des chaussées

Pour éviter ces dégradations des chaussées, ou y remédier lorsqu'elles sont effectives, des opérations d'entretien et de réhabilitation ont lieu tout au long de leur durée de vie. Dans des configurations de dégradations avancées mises en évidence par les campagnes d'auscultation, ces travaux peuvent amener à remplacer toute ou partie de la structure routière. Ces opérations consistent alors à déconstruire les couches endommagées par rabotage, et les remplacer par des nouvelles couches d'enrobé. Les sous-produits générés par ces opérations présentent un fort potentiel de réutilisation et de recyclage qui sera abordé ci-après.

Si les travaux d'entretien visent à remplacer toute la structure fatiguée et pas une seule couche, il est avantageux de procéder à des rabotages séquencés des différentes couches (broyer la couche de surface ou la couche de surface et la couche de liaison séparément de la couche de base). Les couches supérieures contiennent en effet souvent des granulats présentant des caractéristiques spéciales telles que la résistance au polissage et/ou la durabilité au gel/dégel. La taille nominale des granulats dans les couches supérieures de la chaussée est également plus petite et convient mieux à une utilisation directe dans les nouveaux mélanges de surfaces sans concassage.

I.2. Recyclage des enrobés

Les déchets bitumineux résultants des chantiers d'entretien et de réhabilitation des autoroutes, des routes et des rues sont appelés des agrégats d'enrobé (AE). Ces produits sont élaborés après fraisage, concassage, calibrage et stockage afin d'être utilisés dans les mélanges d'enrobés neufs. Les enrobés recyclés sont obtenus en incorporant des agrégats d'enrobé dans la formulation des enrobés bitumineux. Le cycle de vie d'un enrobé est présenté dans la Figure 13.

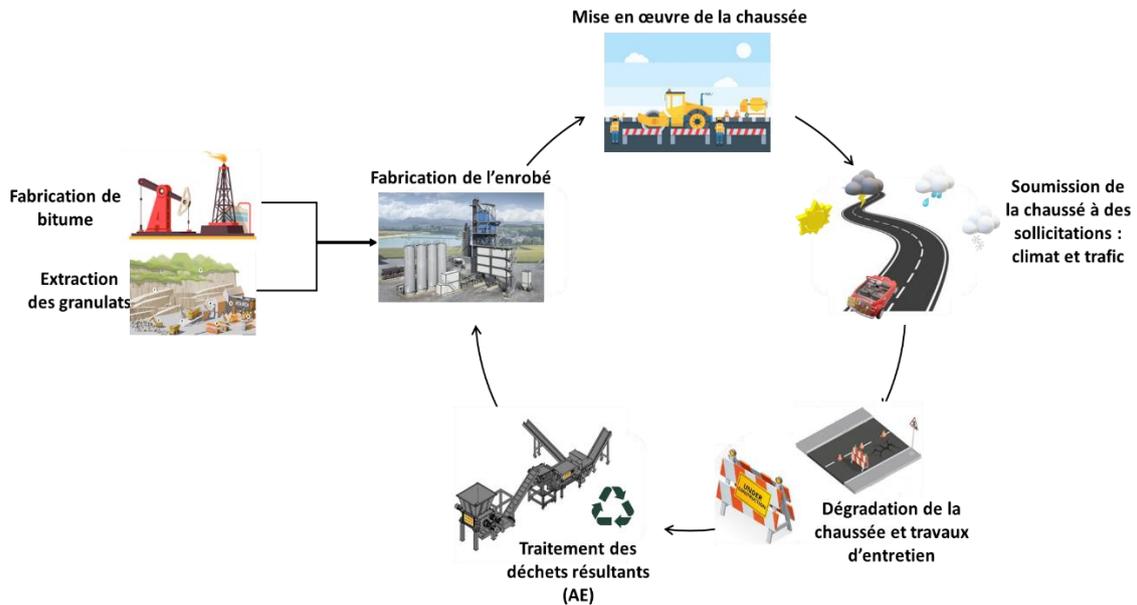


Figure 13 Schéma du cycle de vie des enrobés

I.2.1. Préparation au recyclage des déchets résultants

Comme tous déchets destinés à être réutilisés ou recyclés, les Agrégats d'Enrobés sont parfaitement caractérisés et contrôlés. Il est important notamment de vérifier l'absence des produits dangereux et polluants dans la chaussée comme l'amiante (Décret 2012-639) et les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Le recyclage d'enrobé contenant ces produits est possible mais conditionné en fonction de leurs taux (Colwill, D., 2001 ; IDRRIM Guide technique, 2021).

La production des agrégats d'enrobés (AE) se fait en trois étapes (Figure 14) :

1. **Fraisage** : Une fraiseuse vient arracher l'enrobé dans les chaussées en fin de durée de vie. Il est recommandé de fraiser couche par couche afin de bien maîtriser les caractéristiques et l'homogénéité du futur produit AE (IDRRIM Guide technique, 2021). Les plaques d'enrobé prélevées sont par la suite transportées vers des centrales de traitement des déchets bitumineux.
2. **Concassage et criblage** : C'est une opération mécanique, qui consiste en deux plaques métalliques, qui servent à écraser les plaques d'enrobés récupérées lors du fraisage. Le criblage sert à optimiser la courbe granulométrique afin d'optimiser le taux d'introduction d'agrégats d'enrobé utilisé dans les mélanges bitumineux.
3. **Stockage** : Le produit résultant du criblage est repris pour constituer un stock. Ce dernier doit être couvert pour limiter la teneur en eau.



Figure 14 Production des AE (photos prises lors de la visite à la centrale Ambromat pour le traitement des déchets à Toulouse, 2020)

I.2.2. Evolution et intérêt de l'utilisation des AE

L'enrobé bitumineux est un matériau 100% recyclable. Au départ, l'aspect économique était le principal moteur du recyclage des chaussées ou d'autres déchets. Les AE sont disponibles à faible coût, sur le chantier ou à proximité, et ils évitent d'excaver et de transporter des nouveaux matériaux granulaires vierges. Au cours des dernières décennies, la durabilité, l'environnement et l'augmentation de la réflexion sur le cycle de vie sont devenus des facteurs tout aussi importants pour le recyclage des chaussées ou d'autres déchets, pour les mêmes raisons : moins de transports de matériaux, donc moins d'émissions de gaz à effet de serre, moins d'énergie nécessaire pour préparer les matériaux à l'utilisation et la préservation des ressources naturelles (comme l'exemple de la réutilisation des coques de noix de palmiste comme alternative des granulats naturels dans la construction routière (Koti, 2022)).

Par exemple, en France, 20.7 millions de tonnes de granulats recyclés sont utilisés dans l'industrie routière en 2021 (source UNICEM). Aux Etats Unis, le département Nebraska a pu recycler, entre 2008 et 2020, 9.2 millions tonnes de granulats et 498 000 tonnes de bitume et par suite il a économisé 408 millions de dollars (DAPT Webinar, 2022).

Vu l'augmentation de la sensibilisation à l'environnement, plusieurs initiatives ont permis d'inciter au recyclage des matériaux (voir Tableau 12).

Pays	Initiatives	Les pourcentages d'AE limites	Evolution de l'utilisation
France	Directive cadre sur les déchets (2008) ; Circulaire du MEEDDM du 9 février (2009) ; Loi n° 2015-992 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, article 79 (2015) ; Pacte d'engagement des acteurs des infrastructures de mobilité (2021).	Au moins 20 % en masse des matériaux utilisés dans les couches de surface sont issus du réemploi ou du recyclage de déchets.	Le taux d'agrégat d'enrobé utilisé dans les enrobés a augmenté d'un facteur de 3.5 entre 2008 et 2018 (Source : Route de France).
		Au moins 30 % en masse des matériaux recyclés dans les couches d'assise.	
Etats Unis	Recycling Materials for Highways, NCHRP (1978); Guidelines for Recycling Pavement Materials (1980); Creation of Reclaimed Asphalt Pavement Expert Task Group RAP ETG par Federal Highway Administration FHWA (2007)	Moins de la moitié des départements utilise plus de 20 % de matériaux recyclés ; cependant, selon les spécifications des Etats de transports départementaux, il est possible d'utiliser jusqu'à 30 % de matériaux recyclés dans les couches intermédiaires et de surface des chaussées (FHWA-HRT-11-021, 2011).	La masse totale d'AE utilisée dans les mélanges d'enrobé était de 87 millions de tonnes en 2020. Cela représente une augmentation de 55.4 % par rapport à 2009. Depuis 2009, la masse totale des enrobés bitumineux n'a augmenté que de 13.8 % (NAPA 2021).

Tableau 12 L'utilisation d'AE en France et aux Etats Unis

Compte tenu de la pratique ancienne du recyclage en France, la question se pose sur le multi recyclage, c'est-à-dire du recyclage de chaussées dans lesquelles il y a déjà eu une introduction d'AE. Ainsi le Projet National MURE (2014-2021) avait comme objectif d'évaluer la durabilité des enrobés contenant des AE multi recyclés par des techniques à chaud et à tièdes. Les résultats obtenus sur l'ensemble des expérimentations mené au cours de ce projet montrent qu'à des taux de recyclage élevés, les performances des enrobés bitumineux restent conformes à la norme 13108-1 après trois cycles de recyclage. Les procédés de fabrication, à chaud et à tiède, ne semblent pas limiter la capacité au multi recyclage (Dony et al., 2019).

Cependant, il existe encore des obstacles au recyclage des enrobés, notamment :

- Le recyclage des chaussées est une activité à haut risque, ce qui peut amener à poser des questions sur la qualité des mélanges bitumineux résultants,
- Le prix des matériaux recyclés peut parfois ne pas être compétitif par rapport aux granulats naturels,
- La complexité de la lixiviation de contaminants à partir de matériaux recyclés,

- Les difficultés pratiques liées aux matériaux et aux méthodes, qui sont souvent spécifiques au site.

La plupart, sinon tous ces obstacles peuvent être surmontés. Des projets de recherche, tels que le Projet National MURE, ont largement contribué à pallier le manque des connaissances scientifiques et techniques sur le recyclage.

I.2.3. Techniques de recyclage des agrégats d'enrobé AE

Plusieurs techniques sont utilisées afin de produire des enrobés recyclés. Elles se différencient par la température de production d'enrobé (Route de France, 2016).

- Enrobés à chaud : Ce type d'enrobé est produit dans des centrales d'enrobage à des températures comprises entre 130°C et 180°C, selon le type de liant. Cette température permet de mélanger des granulats secs ;
- Enrobés tièdes : Le processus de fabrication implique l'utilisation de techniques ou d'additifs qui abaissent la température de séchage et de chauffage des granulats (par rapport aux enrobés chauds) ;
- Enrobés à froid : Cette méthode implique l'utilisation d'une émulsion bitumineuse, éliminant ainsi les étapes de séchage et de chauffage des granulats.

Ces méthodes se distinguent aussi par le lieu de mélange en centrale ou sur place. Le choix de ces techniques dépend des performances recherchées de l'enrobé fabriqué et des usages résultants du développement des techniques propres à chaque pays. Les différentes techniques sont illustrées dans la Figure 15. Bien que les techniques à froid se développent, elles ne sont pas encore utilisées pour les chaussées à forte circulation.

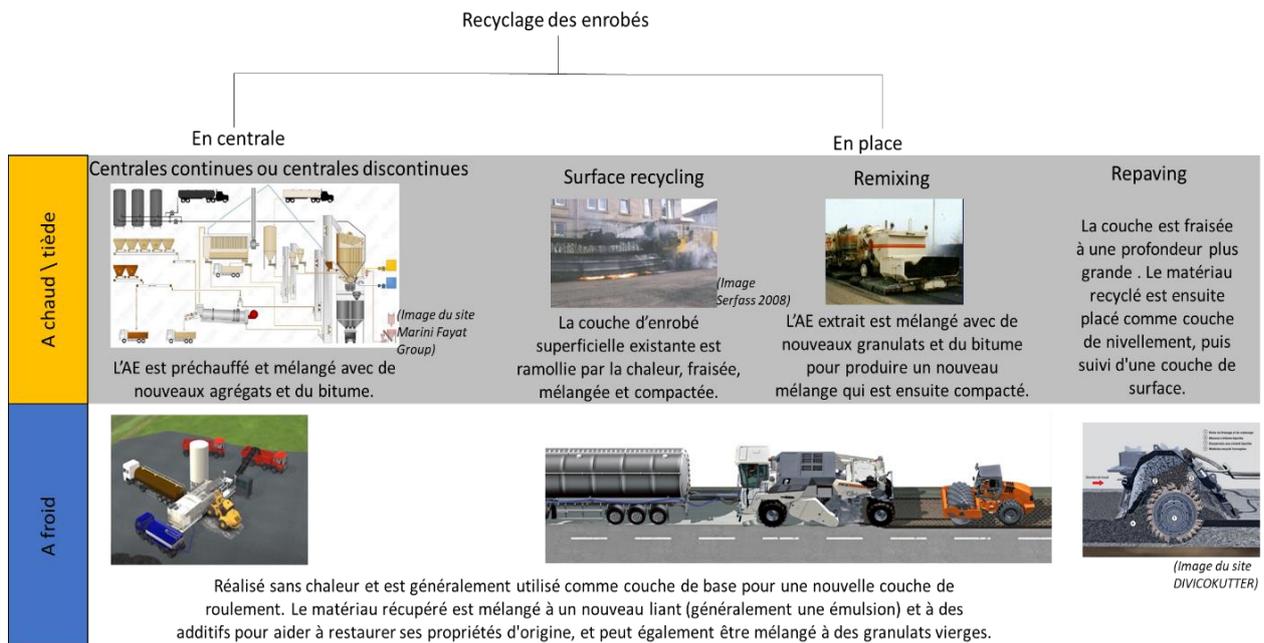


Figure 15 Les différentes techniques de recyclage des enrobés

I.2.4. Caractéristiques des agrégats d'enrobé (AE)

En dehors de l'aspect sanitaire déjà abordé (contrôle des HAP et amiante), La qualité et l'homogénéité des caractéristiques d'agrégats d'enrobé doivent être maîtrisés afin de les

incorporer dans des nouveaux mélanges. Les caractéristiques des AE doivent être considérées dans la conception des mélanges afin de garantir des performances égales à celles des enrobés neufs. Le guide technique (IDDRIM, 2021) précise le taux d'AE autorisé pour les couches de roulement, de liaison et d'assise selon les caractéristiques d'AE avec un taux allant à 40%. Les essais (IDDRIM, 2021) identifiant les stocks d'AE peuvent être divisés en 3 catégories présentées dans le Tableau 13 :

Matériaux	Essais	Normes
Agrégats d'enrobé (AE)	Teneur en matériaux étrangers (bois, béton, polystyrène... de dimension > 8 mm)	NF EN 12697-42
	Dimension apparente (Analyse granulométrique par tamisage avant désenrobage)	NF EN 933-1
	Homogénéité de la teneur en liant (TL)	NF EN 12697-1
	Masse volumique réelle (MVRe)	NF EN 12697-5
Granulats de l'AE (GAE)	Analyse granulométrique après désenrobage (tamis 1.4 D ; D ; 6.3 mm ; 2 mm ; 0.250 mm et 0.063 mm)	NF EN 12697-2
	Angularité des alluvionnaires (uniquement pour un usage en couche de roulement et de liaison)	NF EN 933-5 NF EN 933-6
	Résistance à l'usure d'un échantillon de granulats, résistance à la fragmentation d'un gravillon (Los Angeles)	NF EN 1097-1,2
	Résistance au polissage (PSV)	NF EN 1097-8
Bitume de l'AE (LAE)	Pénétrabilité à 25 °C, 100 g, 5 s après récupération du liant	NF EN 1426 NF EN 12697-3
	Point de ramollissement (TBA) après récupération du liant	NF EN 1427 NF EN 12697-3
	Présence de liant modifié par des polymères, bitume pur, bitume dur ou contenant un additif	Méthode d'essai interne

Tableau 13 Essais de caractérisation d'AE

I.2.4.1. Propriétés du liant d'agrégat d'enrobé (LAE)

En général, le liant bitumineux présente deux stades de vieillissement : à court et à long terme. Pendant la fabrication en centrale (à court terme), il est exposé à l'air chaud à des

températures allant de 135 à 163°C, ce qui entraîne une augmentation significative de la viscosité et un changement dans les propriétés rhéologiques et physicochimiques associées, telles que le module de cisaillement complexe et l'adhésion. Pendant son état de service (à long terme), le liant bitumineux vieillit et durcit aussi progressivement par divers mécanismes. Le durcissement par vieillissement pendant la fabrication et la durée de service a été associé à plusieurs mécanismes majeurs (Roberts et al., 1996 ; Tyrion, 2000 ; Karlsson et Isacson, 2006) :

- L'oxydation par réaction diffusive entre le liant et l'oxygène de l'air ;
- Volatilisation par évaporation des composants les plus légers, en particulier durant la fabrication ;
- Polymérisation par réaction chimique des composants moléculaires ;
- Thixotropie due à la formation d'une structure dans le liant bitumineux sur une longue période ;
- L'absorption des constituants huileux, des résines et des asphaltènes par des granulats minéraux.

Comme le liant bitumineux réagit et perd certains de ses composants au cours du vieillissement, son comportement rhéologique sera différent de celui des matériaux vierges. Ceci montre l'importance de contrôler le processus de mélange entre les liants recyclés et les liants vierges. Si le vieux liant est trop rigide, le mélange de liants vieux et vierges peut ne pas donner les résultats escomptés. À des faibles pourcentages (jusqu'à 20 %), un liant vieilli n'affecte pas de manière significative les propriétés du mélange de liant vierge et de liant d'AE (Kennedy et al., 1998). Cependant, lorsqu'il est utilisé à des pourcentages intermédiaires ou supérieurs, un liant vieilli peut influencer les propriétés du mélange et peut affecter le grade du liant résultant.

La rigidité plus élevée du liant des AE améliore ses propriétés de résistance à la déformation permanente à haute température. Alors qu'à basse température, le vieillissement a pour effet de fragiliser le liant et particulièrement d'affecter sa capacité de relaxation des contraintes, menant à des phénomènes de fissuration par contraction thermique. (Hajj et al., 2009, Mogawer et al., 2013a).

1.2.4.1.1. Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier IRTF

La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier est appliquée afin de distinguer entre le liant d'apport et le liant d'agrégats d'enrobé. La spectroscopie IRTF est couramment utilisée pour caractériser les changements de composition chimique des composés d'hydrocarbures pétroliers, en particulier lors des processus de vieillissement artificiel ou naturel (Lamontagne et al., 2001, Mouillet et al., 2008).

Le vieillissement des bitumes est caractérisé par la formation de fonctions chimiques oxygénées carboxyles (C=O) et sulfoxydes (S=O) générés par l'interaction entre les liants bitumineux et l'air. Ces caractéristiques chimiques particulières sont matérialisées par des pics correspondant à des nombres d'onde de 1700 cm^{-1} et 1045 cm^{-1} respectivement. Navaro, 2011 a comparé trois solutions bitumineuses de même concentration (0.0080 ± 0.0002 g/g) en utilisant la spectrométrie IRTF (voir Figure 16). La courbe en pointillés correspond à la solution du liant d'apport (non vieilli et non oxydée), celle en gras à la solution du liant extrait des AE

(oxydée) et la ligne en pointillés à la solution avec des fractions massiques égales de liant d'apport et liant provenant des agrégats d'enrobé.

D'après la Figure 16, on peut observer que le spectre du liant d'apport ne fait pas apparaître de pic autour des nombres d'ondes 1700 cm^{-1} et 1045 cm^{-1} . Alors que le liant vieux présente des pics autour de ces nombres d'ondes.

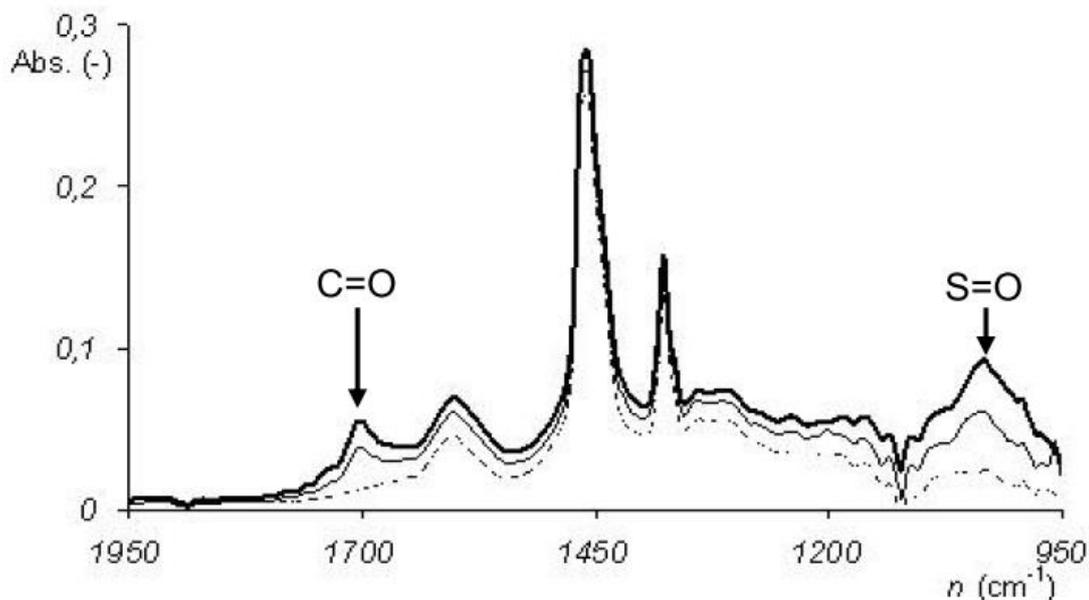


Figure 16 Les spectres IR des différents bitumes modèles de concentration 0.008 g/g

I.2.4.2. Propriétés des granulats d'agrégats d'enrobé (GAE)

Les propriétés des granulats initiaux peuvent être influencées par le passage des véhicules et les conditions climatiques et seront différentes de celles des granulats vierges. Par exemple, Kowalski et al., 2016 ont montré qu'à la suite du passage des essieux, les GAE peuvent présenter un polissage qui modifie la rugosité de la chaussée. Ce phénomène reste minime au regard de la surface concernée par ce polissage en comparaison à la surface spécifique de l'ensemble des granulats (vierge et AE).

I.2.5. Taux de recyclage des enrobés

Les enrobés recyclés sont essentiellement définis par la quantité massique d'agrégats d'enrobé qu'ils contiennent. Cette partie massique est couramment appelée « taux ou pourcentage de recyclage ». En France, les pratiques courantes actuelles utilisent un taux de recyclage allant jusqu'à 30 %. Entre 30 et 40 %, des points de vigilance existent et doivent être surveillés en attendant le retour d'expérience afin de consolider la doctrine technique (IDDRIM, 2021). D'après l'expérience française, les enrobés recyclés contenant un pourcentage d'AE allant à 20% sont considérés des enrobés à « faibles taux de recyclage » alors que les enrobés contenant entre 40% et 65% d'AE sont définis comme des enrobés à « fort taux de recyclage ».

D'après la circulaire n° 2001-39 du 18/06/01 relative à la gestion des déchets du réseau routier national, les enrobés à faible taux de recyclage allant jusqu'à 10%, ne nécessitent pas d'effectuer des essais préalables afin de caractériser les agrégats d'enrobé utilisés dans des enrobés pour les couches de liaison, de base et de fondation. Ces mélanges sont peu

influencés par la composition des AE (Xinjun et al., 2008). Pour les couches de roulement, il existe des cas en fonction du type d'enrobé et de trafic où des études préalables doivent être effectuées afin d'identifier les AE utilisées.

Pour des enrobés à moyen taux d'AE en couche de roulement, une influence sur l'adhérence des chaussées peut être identifiée. Cet effet est dû à la contribution des AE à la micro-texture et la macro-texture.

Plusieurs études ont démontré la faisabilité de produire des mélanges bitumineux à haute (plus de 40 % en masse) ou très haute (jusqu'à 100 % en masse) (Silva et al., 2012) teneur en AE. Les problèmes pratiques qui limitent la technique courante d'aller au-delà de la teneur moyenne en AE de 15-30% en masse dans les mélanges à chaud peuvent être classés en quatre catégories qui font référence à la qualité des agrégats d'AE, à la technique utilisée dans les usines de production, à la méthodologie de conception du mélange et aux performances du mélange final contenant des AE (Tarsi et al., 2020).

I.2.6. Formulation et fabrication des enrobés contenant des AE

Les enrobés contenant des recyclés doivent être formulés de façon à atteindre des performances comparables à celles d'un enrobé neuf. Ces performances sont vérifiées par des essais (déjà présentés dans le Tableau 8) sur une épreuve de formulation au laboratoire.

Afin d'atteindre les performances souhaitées, un ajustement des caractéristiques des granulats d'apport et du liant d'apport est effectué.

I.2.6.1. Ajustement des caractéristiques du liant d'apport

Vu les propriétés du liant d'AE mentionnées précédemment, le liant d'apport est adapté de façon à avoir un liant, résultant du mélange de ces deux bitumes, dont les caractéristiques sont similaires à celles d'un bitume utilisé pour fabriquer un enrobé sans AE. L'ajustement des propriétés d'un liant d'apport vise à corriger ceux d'un liant d'AE en réduisant sa rigidité.

La norme NF EN 13108-1 2007 permet de déterminer les propriétés du liant d'apport à partir des caractéristiques du liant d'AE et du liant résultant du mélange.

Détermination des pénétrabilités (pen) : Équation 23

$$\%_{\text{mélange}} \times \log(\text{pen}_{\text{mélange}}(\text{mm})) = \%_{\text{liant apport}} \times \log(\text{pen}_{\text{liant apport}}(\text{mm})) + \%_{\text{liant AE}} \times \log(\text{pen}_{\text{liant AE}}(\text{mm}))$$

Détermination des températures bille – anneau (TBA) : Équation 24

$$\%_{\text{mélange}} \times \text{TBA}_{\text{mélange}}(^{\circ}\text{C}) = \%_{\text{liant apport}} \times \text{TBA}_{\text{liant apport}}(^{\circ}\text{C}) + \%_{\text{liant AE}} \times \text{TBA}_{\text{liant AE}}(^{\circ}\text{C})$$

Détermination des viscosités (η) : Équation 25

$$\%_{\text{mélange}} \times \log(\log \eta_{\text{mélange}}) = \%_{\text{liant apport}} \times \log(\log \eta_{\text{liant apport}}) + \%_{\text{liant AE}} \times \log(\log \eta_{\text{liant AE}})$$

Ces formules considèrent que la totalité du liant d'AE et du liant d'apport se mélangent parfaitement. On parle dans ce cas, de remobilisation totale du LAE.

Aux États Unis, les directives de conception des mélanges recyclés à chaud ont été révisées et améliorées par une étude incluse dans le projet NCHRP 9-46 (National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)). Cette étude a permis d'introduire le ratio de liant d'AE. Ce dernier a permis de distinguer les mélanges contenant des AE par la proportion de liant AE par rapport au liant total. Les mélanges à une teneur élevée en AE ont été classés comme ceux dont le ratio de bitume était supérieur à 0.25, comme le montre le Tableau 14.

Grade du liant d'apport recommandé	Ratio de bitume
Pas de changement dans le choix du liant	< 0.25
A suivre les recommandations dans la norme	> 0.25

Tableau 14 Directives de sélection des liants pour les enrobés recyclés fournies par le projet NCHRP 9-46 (AASHTO, 2017)

La méthode américaine vise à déterminer les classes de performances des bitumes, Performance Grade High - Low (PG HL). Dans le cas où le grade souhaité de liant mélange, le pourcentage souhaité d'AE et les propriétés du liant d'AE récupéré sont connus, les propriétés requises d'un grade de liant d'apport peuvent alors être déterminées à chaque température (élevée, intermédiaire et basse) séparément comme suit :

$$T_{\text{liant apport}} = \frac{T_{\text{liant mélange}} - (\%AE \times T_{\text{liant AE}})}{(1 - \%AE)} \quad \text{Équation 26}$$

Avec,

T : température des classes de performances des bitumes (PG temperature).

Le problème de ces approches est qu'elles ne peuvent être utilisées pour prédire les propriétés mécaniques des mélanges de bitumes qu'à des températures et des fréquences spécifiques. Le développement d'une méthode de prédiction des propriétés viscoélastiques des mélanges de bitumes était abordé dans la thèse de Mangiafico, 2014.

Mangiafico a testé plusieurs bitumes mélanges en variant le pourcentage d'AE. Il a obtenu une relation linéaire entre les paramètres 2S2P1D et la teneur en AE dans le mélange. Conformément aux tendances observées, les paramètres 2S2P1D (y compris k et h) et les coefficients de calage de température de tous les mélanges ont été simulés en développant les équations suivantes, écrites sous une forme générale :

$$A_{x\%} = A_{0\%} + x(A_{AE} - A_{0\%}) \quad \text{Équation 27}$$

$$\log(B_{x\%}) = \log(B_{0\%}) + x[\log(B_{AE}) - \log(B_{0\%})] \quad \text{Équation 28}$$

Où A et B sont des termes génériques représentant, respectivement, tous les paramètres 2S2P1D et les facteurs de calage qui suivent des relations linéaires (E_0 , k, h, δ et β) et logarithmiques (τ_0 et a_T) avec le pourcentage de liant extrait d'AE dans le mélange, exprimé par x (variant entre 0 et 1). A titre d'exemple, $\delta_{40\%}$ est la valeur du paramètre δ pour un mélange contenant 40% d'AE, estimée à partir des valeurs de δ obtenues pour le liant de base pur ($\delta_{0\%}$) et le liant d'AE (δ_{AE}), avec x égal à 0.4.

Ces méthodes de prédiction ne prennent pas en compte le degré de mélange entre le liant d'AE et le liant d'apport qui peut influencer les caractéristiques mécaniques du liant mélange. Cette notion sera développée dans la partie suivante de ce chapitre.

1.2.6.2. Ajustement des caractéristiques des granulats d'apport

La granulométrie d'AE doit être comprise entre 0/10mm et 0/14 mm avec un pourcentage de filler variant entre 8% et 12%.

L'ajustement consiste à corriger la granulométrie des granulats d'AE en ajoutant des granulats d'apport afin d'obtenir une courbe granulométrique comparable à celle d'un enrobé neuf.

Il n'existe pas de règles de mélange permettant de prévoir les propriétés intrinsèques d'un mélange de granulats.

I.2.6.3. Mode opératoire pour la fabrication en laboratoire du mélange bitumineux contenant des AE

La formulation d'enrobé au laboratoire permet de maîtriser les conditions de mélange afin d'arriver aux performances souhaitées. La norme NF EN 12697-35 précise le mode opératoire de la fabrication d'un enrobé recyclé.

I.2.6.3.1. Séchage des constituants

Selon la norme, les granulats vierges et les fillers doivent être séchés à une température de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Les AE doivent être placés en couche mince (inférieur à 5 cm) dans une étuve ventilée. Ils sont séchés à une température de $50 \pm 5^\circ\text{C}$ avec un temps de séchage qui ne dépasse pas les 24 heures.

I.2.6.3.2. Mise en température de bitume

La température de chauffe du bitume final dépend de son grade. Plus le bitume est dur, plus cette température est élevée. Par exemple le bitume de grade 20/30 est chauffé à une température de 180°C . Si le bitume est modifié, un mode opératoire spécifique est adopté.

I.2.6.3.3. Mise en température des granulats et agrégats d'enrobé

Avant le malaxage, les agrégats d'enrobé sont chauffés dans une étuve à une température $110 \pm 5^\circ\text{C}$ pour une durée de $2\text{h}30 \pm 30$ min. Concernant les granulats d'apport, la norme précise une formule mathématique afin de déterminer la température de chauffe. Cette température dépend de la température de chauffe du bitume d'apport et le taux d'agrégat d'enrobé utilisé dans la formulation. Plus le taux d'incorporation d'AE dans le mélange augmente, plus la température maximale de chauffe des granulats vierges augmente.

I.2.6.3.4. Malaxage

Dans un premier temps, les granulats d'apport sont introduits de la fraction la plus grossière à la plus fine. Ces granulats sont malaxés pendant 15 à 45 secondes en fonction de la nature des granulats. Ensuite, les AE sont ajoutés et puis malaxés pour 15 à 45 secondes. Le temps de malaxage dépend de la quantité fabriquée et la capacité du malaxeur. Le bitume d'apport est enfin ajouté. Les différents constituants sont mélangés pour une durée maximale de 5 min (normalement 3 min pour un mélange bitumineux ne contenant pas d'AE).

I.3. Performances mécaniques des enrobés contenant des AE

L'ajout des agrégats d'enrobé dans un mélange bitumineux modifie les caractéristiques mécaniques de l'enrobé et influe sur ses performances. La modification des propriétés mécaniques du mélange est due principalement à l'incorporation du liant d'AE. Le liant résultant du mélange possède des propriétés mécaniques et une composition chimique différentes de celles d'un liant neuf. Afin d'arriver à des caractéristiques comparables, un contrôle doit être fait sur l'homogénéité du liant, en d'autres termes il faut s'assurer que le liant d'apport et le liant d'agrégats d'enrobé sont capables de s'homogénéiser dans un même mélange. L'interaction et le mélange entre ces deux liants ne sont pas encore totalement caractérisés et compris (Al Qadi et al., 2007) et peu de données sont trouvées dans la

littérature concernant les mécanismes et les phénomènes physico-chimiques qui se produisent durant la phase du malaxage (Bressi et al., 2016).

I.3.1. Notion d'homogénéité du mélange entre le liant vieux et le liant neuf

Dans la pratique, le liant d'agrégats d'enrobé se trouve en une fine couche recouvrant les granulats d'AE et n'existe pas en tant que masse libre ce qui ne favorise pas un mélange mécanique entre le matériau d'AE et le liant d'apport pendant la phase de mélange. D'autres phénomènes peuvent aider deux liants à se mélanger lorsqu'ils sont exposés à des températures précises pendant un temps donné. Ce mécanisme appelé diffusion, permet le transfert des molécules dans la matière lorsqu'elles ont suffisamment d'énergie pour se déplacer. Il dépend de la viscosité des liants à des températures données (Vassaux, 2017). La diffusion peut être affectée par plusieurs facteurs tels que la forme et la taille des molécules, la température, les forces entre les molécules, la rigidité structurale des molécules qui diffusent, etc. (Cussler, 1997). Selon Cussler, le taux de diffusion a une relation inverse avec la viscosité du fluide. La diffusion d'un matériau est définie par un coefficient de diffusion indiquant la mobilité du matériau due à ce phénomène. Théoriquement, le coefficient de diffusion est calculé en utilisant la première et la deuxième loi de Fick.

Le phénomène de diffusion gouverne le mélange des liants (Karlsson et al., 2002). En fonction du degré d'homogénéité de mélange, plusieurs cas de figure peuvent être identifiés (voir Figure 17) :

- Black Rock (Zero Blending) : le liant d'AE ne se mélange pas avec le liant d'apport, on parle de 0% d'homogénéité de mélange. Dans ce cas, les lois des mélanges des deux liants peuvent s'avérer inapplicables.
- Partial Blending : le liant d'AE se mélange partiellement avec le liant d'apport, on parle d'homogénéité intermédiaire ou indéterminée. Les granulats et le liant d'apport se mélangent avec les agrégats d'enrobé tout en gardant une couche de liant d'AE sur les granulats de ces derniers.
- Total Blending : le liant d'AE se mélange totalement avec le liant d'apport, on parle d'un mélange homogène. Les granulats d'apport et les granulats d'AE se mélangent avec un liant résultant du mélange des deux liants.

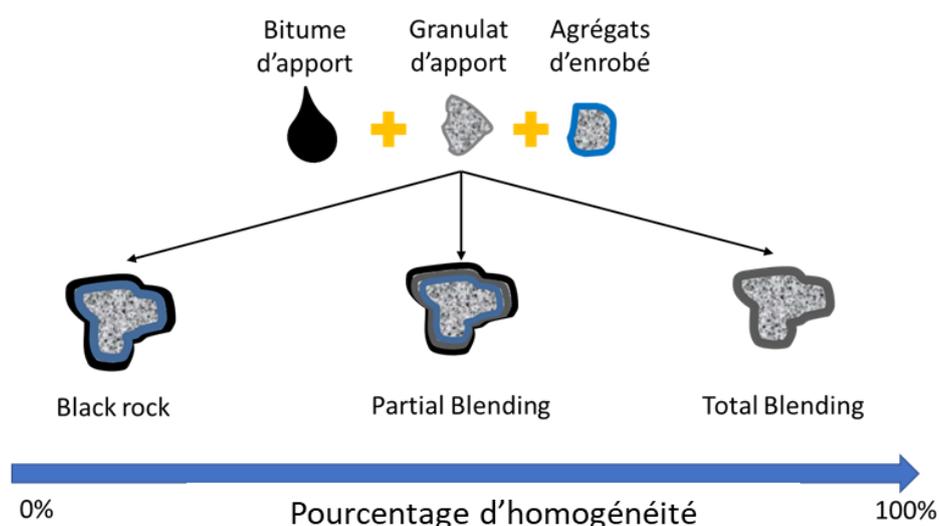


Figure 17 Schéma explicatif de degrés d'homogénéité de mélange

I.3.2. Méthodes de détermination du degré d'homogénéité du mélange

L'homogénéité du mélange entre le liant d'AE et le liant d'apport est une problématique qui influe sur les performances finales d'une chaussée. Plusieurs chercheurs ont essayé de mettre en place un essai afin de mesurer l'homogénéité du mélange ou le degré de remobilisation du constituant vieux dans le mélange. Parmi ces essais :

I.3.2.1. Essai de NGUYEN (Nguyen, 2009)

Nguyen a essayé dans ces travaux de recherche d'évaluer le degré d'homogénéité du mélange par une méthode visuelle en se basant sur la différence de couleur entre les constituants. Dans ces travaux, l'agrégat d'enrobé est artificiellement fabriqué en laboratoire. La couleur du liant d'AE est noire. Au contraire, le liant d'apport, un mélange de liant synthétique clair et 10% d'oxyde de fer en masse du liant, a une couleur rouge. Les agrégats d'enrobé sont mélangés avec le liant d'apport rouge et des granulats neufs afin d'obtenir l'enrobé mélange. Durant la même formulation, des prélèvements successifs d'enrobé sont effectués afin de fabriquer des éprouvettes cylindriques. Des disques sont découpés et puis sont enregistrés par une caméra digitale afin d'étudier la présence des amas d'agrégats d'enrobé en fonction du temps et de la température de malaxage. Plus le temps de malaxage est long moins on visualise d'amas d'agrégat (voir Figure 18). La température élevée favorise également la disparition de ces amas.

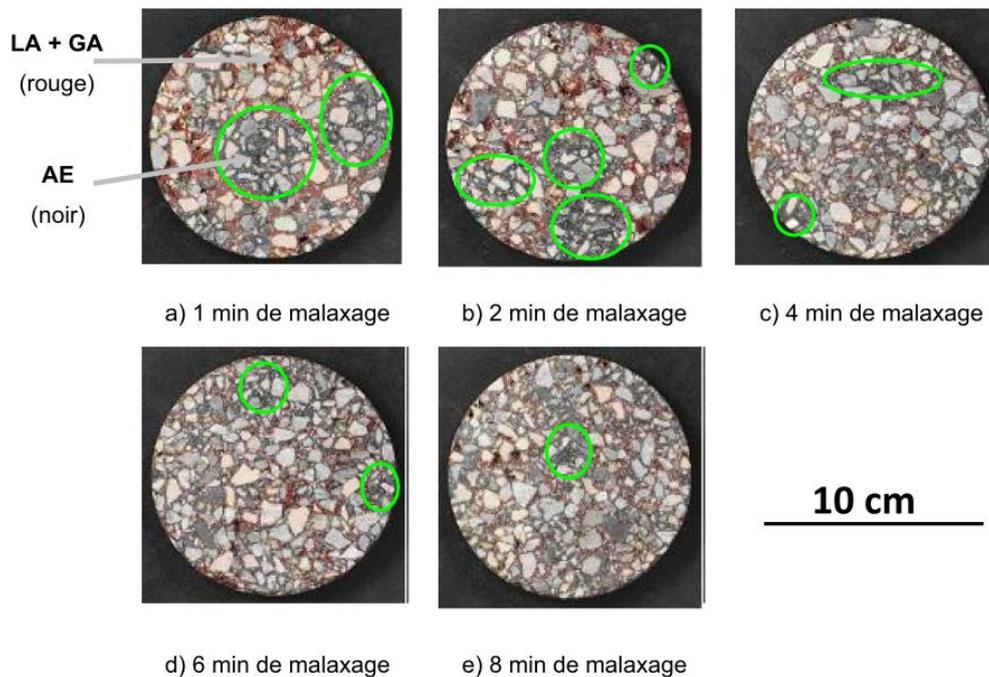
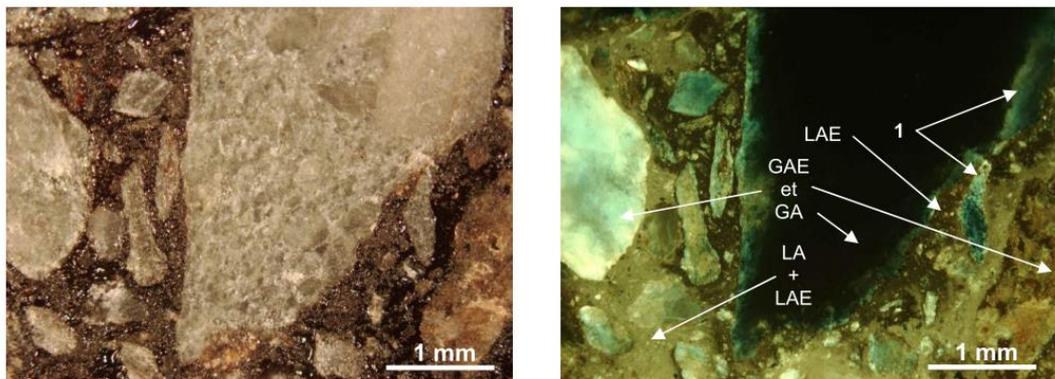


Figure 18 Mélange progressif des AE en fonction du temps de malaxage (Nguyen, 2009 ; Navaro, 2012)

I.3.2.2. Essai de Navaro (navaro,2011)

Navaro a commencé par une méthode d'observation microscopique en utilisant un liant d'apport fluorescent sous une lumière ultraviolette UV. Ce bitume sert comme un traceur afin de distinguer les deux liants dans le mélange. De la même façon que pour les travaux de Nyugen, la cinétique d'homogénéisation était quantifiée en se basant sur deux indicateurs : un

détectant la présence des amas et l'autre mesurant l'évolution de l'homogénéité du mélange en fonction de la température de fabrication et la durée de malaxage.



Photographie réalisée en lumière blanche permettant de distinguer le liant et les granulats

Photographie réalisée en lumière UV permettant de distinguer le liant d'apport et le liant d'agrégats d'enrobé

Figure 19 Photographies réalisées sur un enrobé recyclé malaxé pendant 45 s à 130°C (Navaro, 2011)

Pour déterminer le degré d'homogénéité de mélange, l'analyse doit se baser sur l'extraction du bitume mélange. Les systèmes classiques de récupérations du bitume par solubilisation mélangent les deux liants sans prendre en compte l'hétérogénéité éventuelle dans l'enrobé (Lahjiri, 2020). Navaro a adopté ensuite une méthode autre que l'observation microscopique. Il a essayé de faire face au défi des méthodes de récupération classiques en mettant en place une approche analytique. Cette dernière se fait sans recours à un liant d'apport fluorescent. Cette méthode consiste à séparer séquentiellement les couches successives du liant enrobant les granulats en utilisant la méthode de lixiviation au perchloroéthylène. Deux analyses sont faites : la première sert à déterminer la quantité du liant dans le solvant et la deuxième sert à déterminer le rapport entre le liant d'apport et le liant d'AE. La distinction entre le liant d'agrégats d'enrobé et le liant d'apport se fait en utilisant la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier IRTF. Ce spectromètre permet de suivre l'évolution des différents composants chimiques d'un mélange d'hydrocarbures d'origine pétrolière durant son vieillissement (Mouillet et al., 2008). Pendant ce vieillissement, des fonctions chimiques carboxyles (C=O) et sulphoxydes (S=O) se forment en contact avec l'air. Ces fonctions chimiques se distinguent respectivement par la présence des pics aux nombres d'onde $n = 1700 \text{ cm}^{-1}$ et $n = 1045 \text{ cm}^{-1}$. Les solutions de lixiviation récupérées sont filtrées à un seuil de $6 \mu\text{m}$ pour éliminer les particules minérales. Néanmoins, des résidus minéraux siliceux micrométriques restent présents dans la solution même après ce filtrage. La présence de ce résidu trouble la mesure infrarouge et influe sur les nombres d'ondes proches du pic caractérisant la fonction S=O à $n = 1045 \text{ cm}^{-1}$ (Silverstein 1998). La fonction carboxyles (C=O), dont le pic est non perturbé, sera donc étudié comme indicateur de l'évolution du liant. La relation entre la hauteur du pic du carboxyle et la concentration de la solution en liant d'AE permet d'obtenir la concentration du liant d'AE dans le liant mélange.

I.3.2.3. Essai de Vassaux (Vassaux, 2017)

Vassaux a étudié la remobilisation du liant d'agrégats d'enrobé en utilisant trois méthodes microscopiques. Ces méthodologies sont adaptées pour étudier l'interface "liant vierge/liant d'AE". Vassaux a montré que la microscopie infrarouge en mode Imaging ATR (Attenuated Total Reflectance) en utilisant la fonction carbonyle comme indicateur, est la meilleure

méthodologie pour caractériser la remobilisation du liant d'AE. A partir des profils verticaux de distribution des carbonyles, une longueur de zone de mélange est introduite, en tant qu'indicateur, pour quantifier la remobilisation pour des différentes conditions de fabrication (Figure 20).

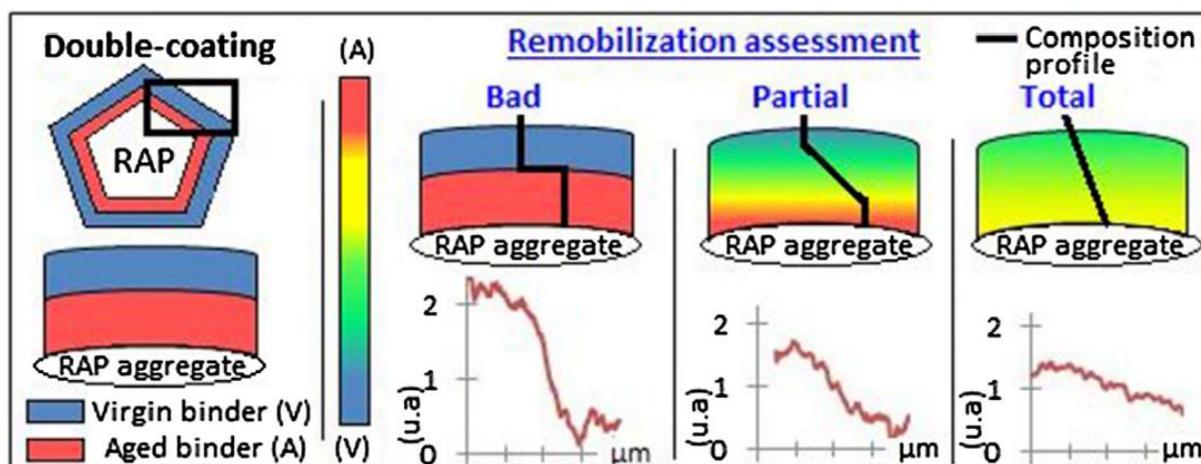


Figure 20 Définition de la remobilisation à partir des profils de composition des différents liants (Vassaux, 2017)

I.3.2.4. Essai de Gaspar (Gaspar et al., 2020)

Gaspar a utilisé la méthode d'extraction séquentielle en 3 étapes basée sur la procédure d'extraction à reflux (méthode B de la norme ASTM D2172-11). Le même appareil d'extraction est utilisé (avec un seul cône d'extraction comme représenté dans la Figure 21a), mais la procédure d'extraction standard est interrompue deux fois jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement lavé. À la fin de la première et de la deuxième étape d'extraction, la solution composée de trichloréthylène et de liant bitumineux est recueillie et remplacée par un nouveau solvant. De cette façon, le liant bitumineux qui recouvrait les particules d'agrégat de l'échantillon est supposé composé de trois couches. Comme illustré dans la Figure 21b, la couche externe est extraite au cours de la première étape (étape 1 de l'extraction), et la couche interne est obtenue lors du lavage final (étape 3 de l'extraction). L'étape 2 consiste à extraire la couche intermédiaire du bitume. La durée de chaque étape d'extraction est choisie afin d'obtenir une quantité égale de bitume pour toutes les étapes. Après l'extraction, les liants récupérés sont testés au laboratoire par des essais rhéologiques afin d'évaluer les propriétés des couches extraites et, à partir de là, d'obtenir une indication de l'homogénéité des couches de liant, qui est supposée être liée au degré de mélange des liants.

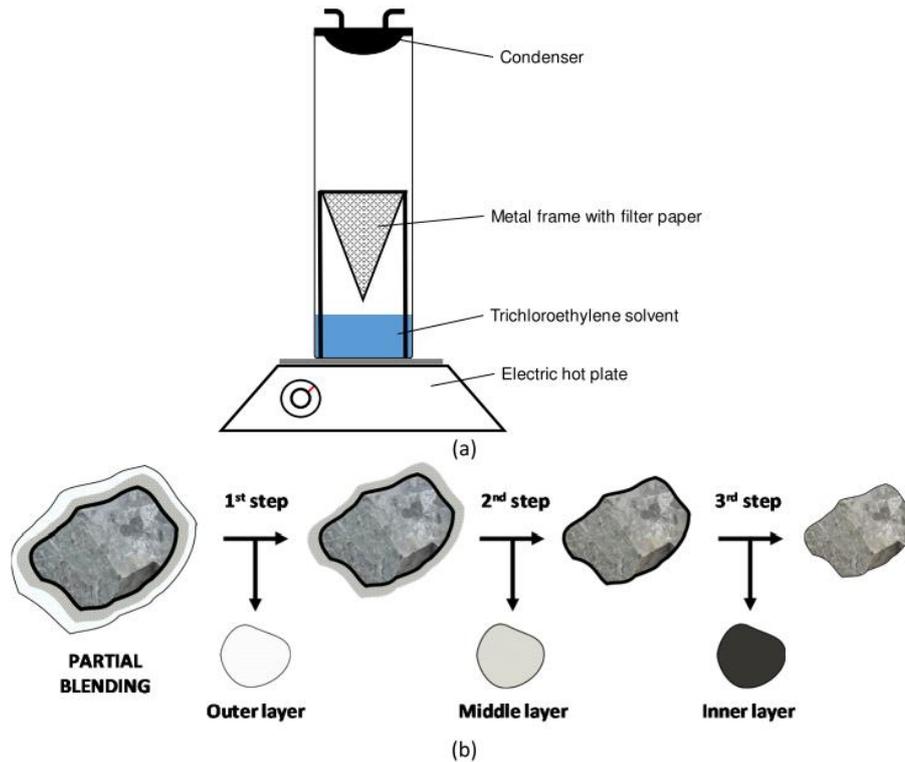


Figure 21 Illustration (a) de l'appareil d'extraction et (b) de la procédure d'extraction par étapes (Gaspar et al., 2020)

I.3.3. Facteurs influençant le degré d'homogénéité de mélange

Une bonne compréhension de l'interaction entre le liant neuf et le liant d'AE pendant le mélange et la mise en œuvre est nécessaire pour garantir une conception de chaussée plus fiable. Cependant, cela nécessite une étude approfondie des différents aspects et facteurs influençant l'homogénéité du mélange. Un mélange complet et homogène entre deux liants est censé se produire en raison de l'échange de divers composants entre eux. La durée et la température de conditionnement sont choisies de façon à obtenir un niveau d'homogénéité acceptable dans les mélanges contenant des agrégats d'enrobé. Un bon choix de ces paramètres sera efficace en termes de temps et de coût.

Rad, 2013 a étudié les interactions entre le liant d'apport et le liant d'AE, qui mènent à de nouvelles propriétés rhéologiques en considérant l'effet du temps et de la température. Pour vérifier les phénomènes de diffusion entre deux liants en utilisant les propriétés rhéologiques, il était nécessaire de trouver une condition dans laquelle les liants sont exposés l'un à l'autre sans qu'aucun facteur externe n'impose le mélange. L'extraction de liant AE a été évitée dans cette étude en raison de la problématique du changement des propriétés des liants (Johnson et Bahia 2010). Par conséquent, Rad a produit le liant " AE artificiel " en utilisant deux cycles ou plus de vieillissement sous pression (PAV). Pour étudier la diffusion entre les liants, Rad a fabriqué des sandwichs de liants bitumineux à partir de deux liants ayant des niveaux de vieillissement différents. L'épaisseur totale de l'échantillon placé dans le DSR est de 2 mm (voir Figure 22).

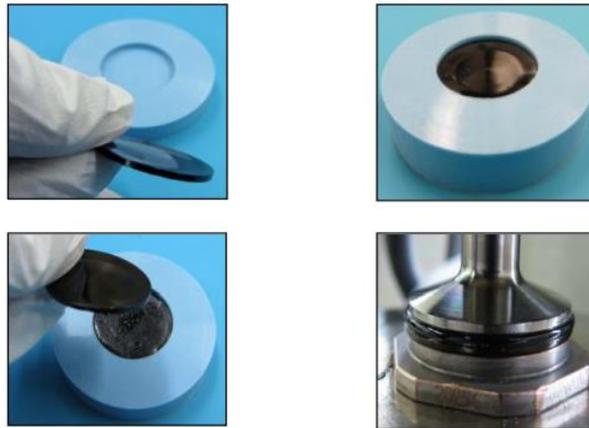


Figure 22 Sandwich de liants bitumineux, préparation et essai (Rad, 2013)

En allant un peu plus loin que le mélange liant-liant, Rad a testé aussi du mortier mélange. Les mortiers à petite échelle peuvent démontrer l'effet du mélange de matériaux d'AE et de liant d'apport dans un mélange bitumineux. La fabrication et l'essai de mortiers en laboratoire sont plus pratiques que les enrobés. La taille du gap du DSR (distance entre les deux plans) doit être supérieure à un quart ($>1/4$) de la plus grande taille de granulats (AASHTO T 315). Le mortier testé contient un granulat d'une taille maximale de 0.30 mm, ce qui indique un gap ou un espacement satisfaisant de 2 mm.

Pour étudier l'effet de la température sur la diffusion et le mélange du liant, Rad a conditionné ses échantillons à des températures allant de 40°C à 140°C. Pour certaines basses températures de conditionnement, les échantillons ont été conditionnés dans le DSR et testés immédiatement après le conditionnement vu que l'échantillon n'a pas coulé et la géométrie a pu être maintenue pendant le conditionnement. L'essai était réalisé à une température de 64°C. Les résultats de module sont présentés dans la Figure 23. Les deux températures de conditionnement les plus basses (40°C et 64°C) ne montrent aucun changement dans les résultats de G^* pour différents temps de conditionnement. Cela indique que la remobilisation ne peut pas être réalisée à de basses températures. Les échantillons conditionnés à 145°C montrent des taux de diffusion significativement plus élevés alors que les taux estimés pour 100 et 120°C étaient proches.

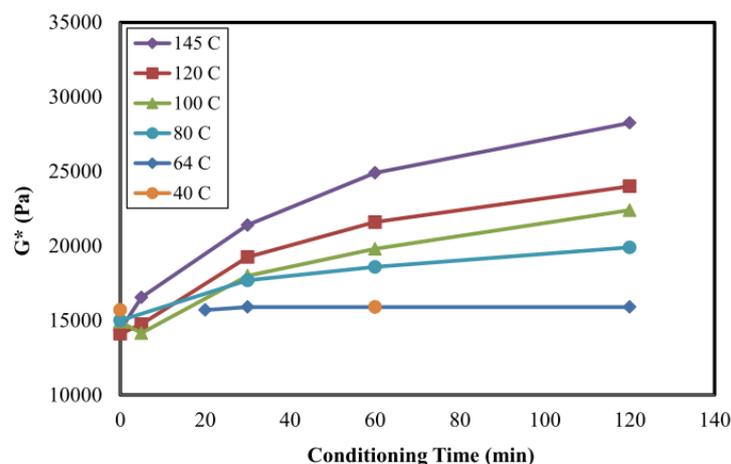


Figure 23 Résultats du DSR pour les échantillons du liant à différentes températures (Rad, 2013)

Ces résultats indiquent l'effet notable de la température sur les phénomènes de diffusion dans les liants. A des très basses températures, la mobilité moléculaire des liants est faible et ne peut pas provoquer de transfert de masse notable, par conséquent, l'homogénéité du mélange n'est pas attendue. Pour la durée de conditionnement, les résultats montrent qu'après 60 min de conditionnement, la rigidité de l'échantillon n'augmente pas significativement.

Navaro, 2011 a étudié l'effet de la température sur le degré de mélange des liants. Il a trouvé qu'une baisse de la température de malaxage de 30°C, nécessite de doubler la durée de malaxage afin d'arriver au même degré de mélange. De plus, il a démontré que plus le temps de malaxage est long, plus le degré d'homogénéité du mélange agrégats d'enrobé et matériaux d'apport est amélioré.

Xu et al., 2018 a analysé le degré de mélange des liants en adoptant une combinaison d'une méthode d'extraction séquentielle et d'une technique d'imagerie par microscopie à force atomique (Atomic force microscopy, AFM). Il a mesuré les propriétés micromécaniques des trois couches de liant extraites et récupérées successivement des granulats d'AE à une température de mélange de 130°C et 150°C. Une augmentation du module moyen et une réduction de la force d'adhérence et de la dissipation d'énergie ont été observées de la couche externe à la couche interne pour les liants récupérés (voir Figure 24). Ce gradient de propriétés le long de la profondeur du volume enrobant les granulats d'AE est dû aux différents degrés d'homogénéité du liant d'AE et du liant d'apport dans chaque couche.

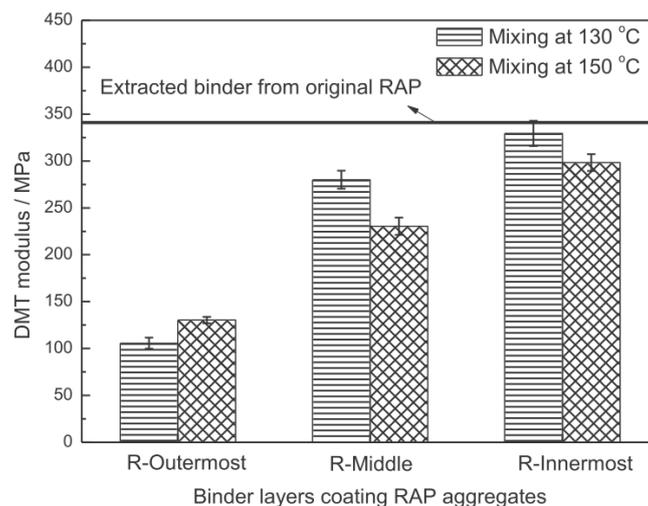


Figure 24 Modules des couches de liant extraites et récupérées des agrégats d'enrobé à deux températures de mélange (Xu et al.,2018)

D'après ces résultats, Xu a démontré qu'avec la diminution de la température de mélange, la diffusion du liant d'apport dans le liant d'AE est empêchée, ce qui entraîne une plus grande concentration du liant neuf dans les couches externes du liant d'AE et, par conséquent, moins d'interactions entre le liant d'apport et les couches internes du liant d'AE.

Concernant le temps de conditionnement après le mélange, Xu a décrit les propriétés micromécaniques pour différentes couches de liant enrobant les granulats d'AE récupérés après mélange à 150°C sans temps de conditionnement ainsi que celles récupérées après un mélange à 150°C avec un temps de conditionnement de 2 h dans une étuve à 150°C + 7 j à température ambiante. Les résultats de module sont présentés dans la figure 25.

D'après cette figure, Xu a constaté que le temps de conditionnement est un autre facteur crucial qui affecte le mélange entre les liants d'AE et les liants d'apport. Outre l'interaction au

cours du processus de malaxage, le mélange entre les liants vieux et neuf se poursuit pendant le temps qui suit le malaxage. Par comparaison avec le mélange à une température de 130°C, il faudrait un temps plus long pour atteindre le mélange complet et homogène entre les liants pour les enrobés mélangés, stockés ou utilisés à une température inférieure.

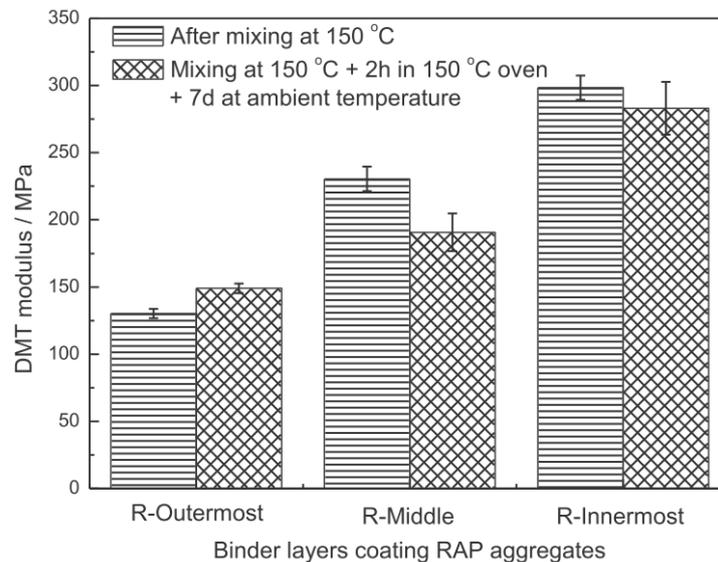


Figure 25 Modules des couches de liant extraites des agrégats d'enrobé à 150°C et à différents temps de conditionnement après le mélange (Xu et al., 2018).

I.3.4. Influence du degré de mélange sur les performances mécaniques

I.3.4.1. Rigidité

Nguyen, 2009 a testé plusieurs éprouvettes d'enrobé mélange recyclé avec différentes temps de malaxage et donc différent degré d'homogénéité. La rigidité de chaque spécimen est mesurée par un essai de module de rigidité en traction indirecte (ITSM) (BS-EN :12697-26 2004). L'essai est effectué à une température de 20°C, avec un temps de montée de 124 millisecondes et un déplacement diamétral horizontal de 5 µm pour s'assurer que le spécimen réagit comme un matériau élastique. Le chercheur a trouvé que plus le temps de mélange est important, plus la variation des propriétés mécaniques est faible. Cela pourrait être dû à l'hétérogénéité du mélange recyclé. Si le temps de mélange n'est pas suffisant, certains endroits contiennent principalement des AE et d'autres sont dominés par les matériaux d'apport. La différence entre les propriétés des matériaux recyclés et des matériaux d'apport, contribue à la variation considérable des valeurs de rigidité.

Rad, 2013 a testé des mortiers mélanges en utilisant le DSR. Tester l'échelle mortier permet de montrer l'influence du mélange des matériaux d'AE et d'apport dans l'enrobé. Les mortiers sont fabriqués par un bitume vieilli et des granulats provenant des AE avec un bitume d'apport 50/70 et des granulats d'apport avec un diamètre maximal de 0.3 mm. Le mortier est placé sur des géométries de 25 mm avec un gap de 2 mm. Un essai de module complexe à déformation imposée de 2% est réalisé à une température de 64°C et une fréquence de 10 rad/sec. Rad a estimé que le degré de remobilisation augmente avec la température et le temps de conditionnement. Ces deux derniers correspondent à la température et le temps appliqués aux deux disques de matériaux en contact placés dans le DSR avant de commencer l'essai. D'après la Figure 26, il a montré que le module G^* augmente avec le degré de mélange pour les mortiers. Le test a également démontré que l'effet du conditionnement à 140°C après deux

heures augmente le G^* total jusqu'à 20% du G^* des échantillons initiaux (échantillons sans conditionnement) (Figure 26).

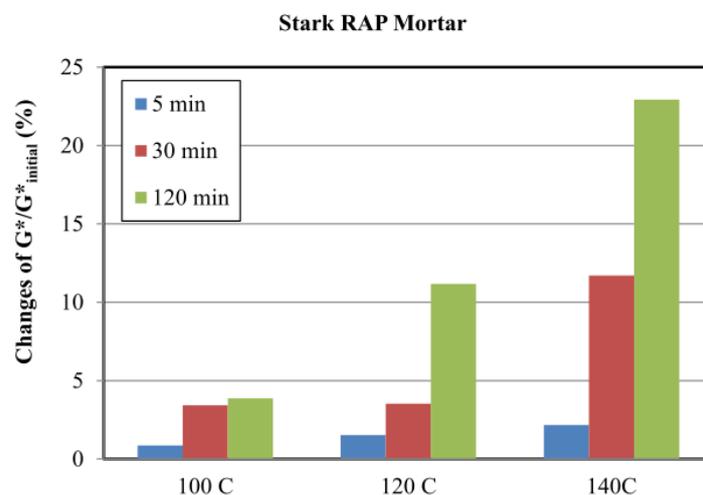


Figure 26 Variation de G^* à différents temps et températures de conditionnement par rapport aux échantillons sans conditionnement (Rad, 2013)

Gaspar et al., 2020 ont adopté des essais rhéologiques afin de caractériser les différentes couches obtenues de l'extraction séquentielle (Méthode d'extraction présentée dans le paragraphe I.3.2.4). L'extraction et les essais sont réalisés pour des enrobés contenant 25% d'AE. Dans ces travaux, ils ont montré le gradient de rigidité qui existe dans les couches de liant enrobant les granulats d'AE. D'après les résultats présentés dans la Figure 27, il est possible d'observer que le liant devient plus rigide au fur et à mesure du processus d'extraction, ce qui est cohérent avec l'hypothèse que les dernières phases d'extraction (couches internes du liant) contiennent des quantités plus élevées de liant d'AE en raison du mélange partiel entre les liants. Le liant obtenu à l'étape 1 présente des valeurs plus basses de $|G^*|$, et ce paramètre a tendance à augmenter à l'étape 2, et encore plus à l'étape 3, vu l'augmentation de la quantité de liant d'AE.

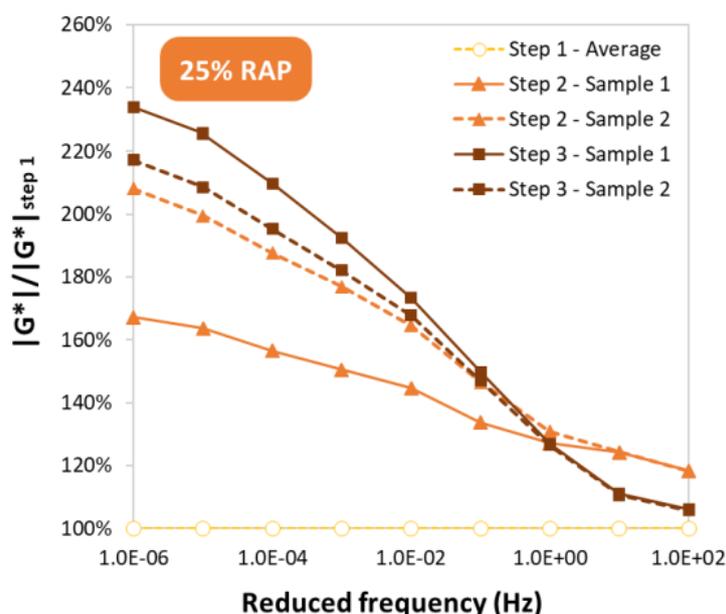


Figure 27 Variation de $|G^*|$ pour chaque étape d'extraction d'un enrobé tiède contenant 25% d'AE (Gaspar et al., 2020)

I.3.4.2. Fatigue

Navaro, 2011 a testé des éprouvettes d'enrobé contenant 20%, 45% et 70% d'AE. Ces enrobés sont fabriqués avec une durée de malaxage de 240 s et aux températures de 110, 135 et 160°C. La résistance à la fatigue de ces éprouvettes est mesurée en flexion deux points à 10°C et 25 Hz. La résistance à la fatigue en fonction du taux de recyclage pour une durée de malaxage de 240 s à différentes températures est présentée dans la Figure 28.

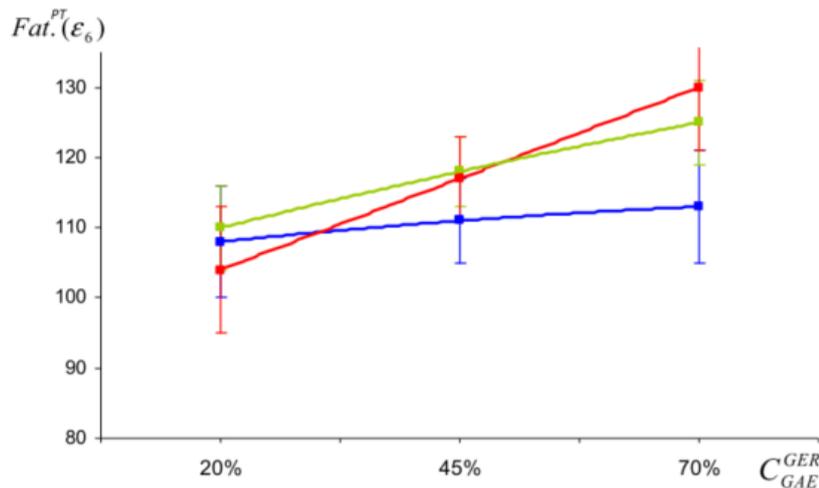


Figure 28 Résistance à la fatigue en fonction du taux de recyclage pour une durée de malaxage de 240 s et à différentes températures (110°C en bleu, 135°C en vert, 160°C en rouge) (Navaro, 2011)

L'homogénéité du mélange augmente avec l'augmentation de la température de malaxage. Par conséquent, les éprouvettes fabriquées à ces trois températures représentent trois degrés différents d'homogénéité de mélange. Pour les enrobés contenant 20% de recyclage, la résistance à la fatigue reste indépendante du degré de mélange. Alors qu'à un taux de 70% d'AE, la durée de vie augmente avec les températures que l'on peut supposer conduisant à une bonne remobilisation quand elles sont élevées. Navaro a conclu que l'homogénéité de mélange influence sensiblement la résistance à la fatigue pour les enrobés contenant des taux élevés d'AE : plus le matériau est homogène plus sa durée de vie est élevée.

En revanche, il existe dans la littérature des études qui montrent que pour les mélanges contenant des taux d'AE inférieurs à 50%, la résistance à la fatigue diminue quand le pourcentage d'homogénéité de mélange augmente. Parmi ces études :

Xu et al., 2019 ont fabriqué des enrobés contenant des taux d'AE de 30%, 40% et 50% en changeant la température de mélange (150, 165, et 180°C) de manière à provoquer des degrés de mélange DOB (degree of blending) différents sans qu'il y ait de vieillissement des liants bitumineux. Un essai de flexion quatre points (T 0739-2011 dans les normes chinoises) issu de la norme AASHTO T 321-03 est réalisé. Les éprouvettes sont testées avec un chargement sinusoïdal à une température de 15°C, une fréquence de chargement de 10 Hz, et une déformation imposée de 400 $\mu\epsilon$. Xu a commencé par étudier la relation entre le DOB et les performances de la chaussée pour la même teneur en AE. La Figure 29 présente la fatigue d'un enrobé contenant 50% d'AE à différents degrés de remobilisation. D'après ces résultats, ils ont montré qu'avec l'augmentation du DOB, la durée de vie du mélange augmente. En addition, dans ce travail de recherche, Xu a étudié l'influence du taux d'AE sur la fatigue du mélange. Une diminution de la durée de vie était observée avec l'augmentation de la teneur en AE pour la même DOB. Les résultats sont présentés dans la Figure 30.

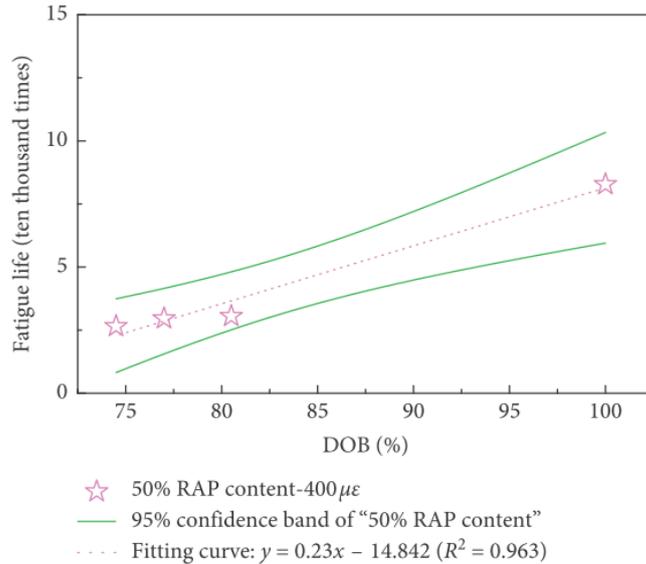


Figure 29 Courbe de tendance donnant la relation entre le nombre de cycles et le DOB (Xu et al., 2019)

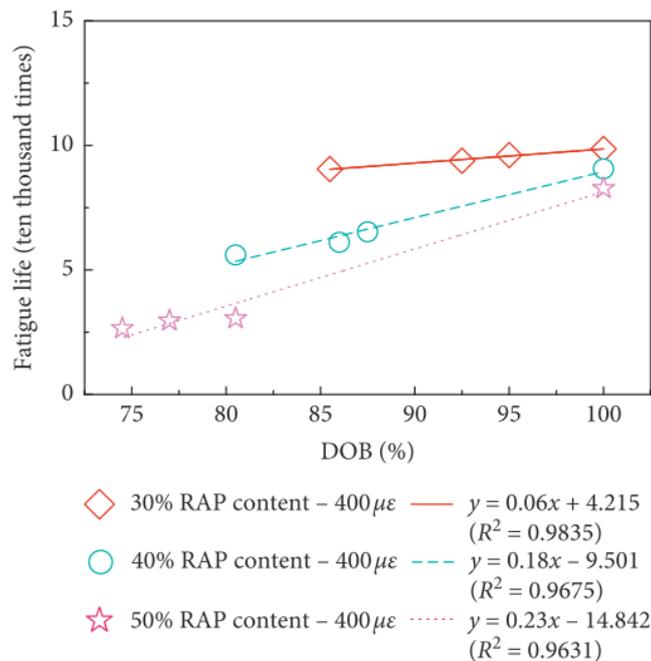


Figure 30 Influence du taux d'AE et du DOB sur la fatigue des mélanges (Xu et al., 2019)

Gaspar et al., 2020 ont évalué la fatigue des différentes couches extraites par un balayage d'amplitude linéaire LAS (Linear Amplitude Sweep). Le test LAS est également appliqué pour évaluer le comportement de l'échantillon de bitume en dehors du domaine viscoélastique linéaire, afin d'évaluer la susceptibilité à la fissuration par fatigue du liant bitumineux. L'essai suit la procédure AASHTO TP 101, et est réalisé en deux étapes. Tout d'abord, un balayage de fréquences est effectué, de 0.2 à 30 Hz et en appliquant une déformation d'oscillation de 0.1 %. Ensuite, un balayage de déformation d'amplitude linéaire est appliqué (de 0 à 30 %) à 10 Hz. L'essai est réalisé à une température de 20°C. Le critère de rupture a été défini comme le point où la contrainte de cisaillement maximale est atteinte. Les tendances observées dans

les essais de module n'étaient pas clairement présentes dans les résultats de l'essai LAS (Figure 31), bien qu'une variation de la pente des courbes soit perçue.

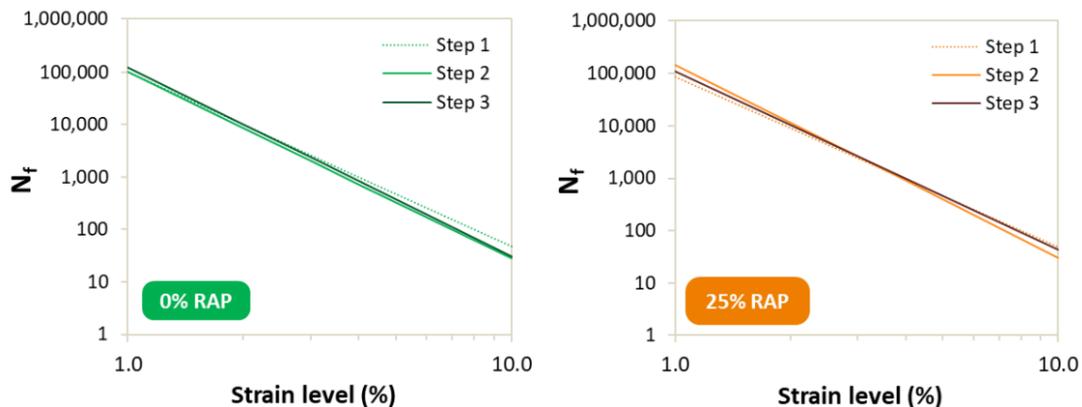


Figure 31 Résultats de l'essai LAS : la fatigue d'un enrobé contenant 0% AE (gauche) et 25% AE (droite) (Gaspar et al., 2020)

La présence d'AE affecte le comportement de l'enrobé bitumineux de différentes manières, et elle est très souvent liée à la réduction de la durée de vie en fatigue mécanique. Cela se produit parce que le liant oxydé des agrégats d'enrobé rend le mélange plus rigide et plus susceptible de se fissurer, ce qui peut devenir un problème grave pour les performances sur le terrain, en particulier à basse température (Gaspar et al., 2020). Ce phénomène est accompagné par la variation du degré de mélange qui elle aussi affecte les performances mécaniques du mélange.

I.3.4.3. Comportement à basse température

Xu et al., 2019 ont réalisé l'essai de flexion à basse température (T 0715-2011 dans les normes chinoises). Des plaques d'orniérage sont fabriquées de dimensions 300 mm × 300 mm × 50 mm. Elles sont ensuite découpées en des poutres quadrangulaires de 250 mm × 30 mm × 35 mm. La déformation de flexion-traction à la rupture de l'échantillon est mesurée dans des conditions d'essai de -10°C et à une vitesse de chargement de 50 mm/min en utilisant l'équipement UTM-25. Les déformations mesurées en fonction du taux d'AE et du DOB sont présentées dans la Figure 32. Cette figure montre que lorsque le DOB augmente, la résistance à la fissuration à basse température du mélange s'améliore. Aussi en augmentant le taux d'AE dans l'enrobé, la déformation mesurée à la rupture diminue.

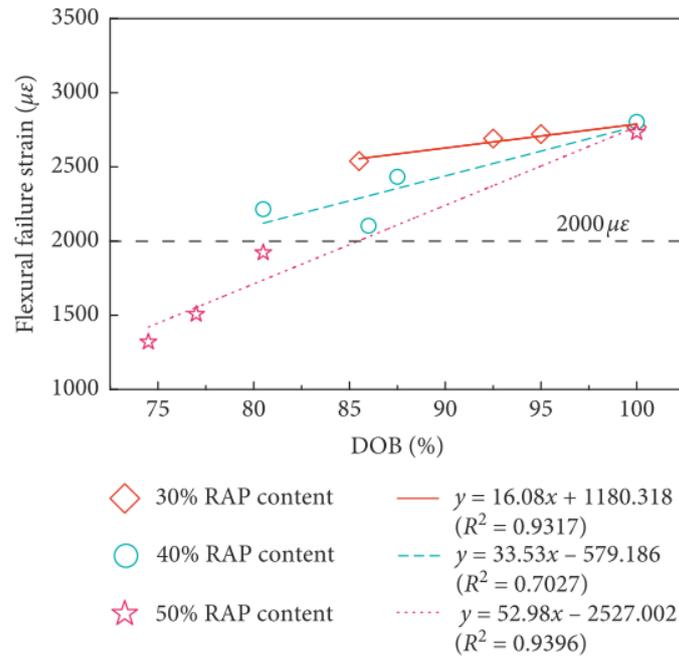


Figure 32 Influence du taux d'AE et du DOB sur la résistance à basse température des mélanges (Xu et al., 2019)

I.4. Modélisation numérique hétérogène des mélanges bitumineux

La modélisation synthétique des matériaux composites en général et du béton bitumineux en particulier peut constituer un complément et/ou une alternative utile aux méthodes expérimentales. Cependant, la complexité du matériau nécessite une grande attention lors de la phase de conception afin d'obtenir des résultats pertinents. Du point de vue morphologique, l'enrobé est un matériau hétérogène avec des inclusions de forme irrégulière et aléatoire. Du point de vue de la science des matériaux, les complexités comprennent la viscoélasticité, la plasticité, l'anisotropie, la dépendance à la température, l'interaction entre le bitume et les granulats, le mélange entre les AE et les matériaux d'apport, etc. Comprendre l'influence de tous ces paramètres est une tâche difficile et nécessite une modélisation multi-échelle pour évaluer l'effet de chaque composant.

I.4.1. Principe multi-échelle

Les enrobés bitumineux sont considérés comme des matériaux hétérogènes composés d'un liant, d'un squelette granulaire et d'un pourcentage de vides. Les constituants de ces matériaux sont caractérisés par des comportements différents : un liant viscoélastique et un granulat élastique, ce qui rend le comportement du mélange très complexe. Plusieurs mélanges peuvent être obtenus en utilisant différents types de liant et en variant la taille des granulats. Par conséquent, la méthode multi-échelle a été introduite. Ce principe considère que les relations à une seule échelle ont une utilité limitée en raison de l'existence de plusieurs mécanismes qui se manifestent à différentes échelles. Ainsi, relier les comportements mécaniques du liant bitumineux et de l'enrobé en une seule étape nécessite la prise en compte de multiples phénomènes physiques. Une telle approche limiterait alors la possibilité de développer un aperçu significatif des relations de cause/effet et, par conséquent, de formuler des stratégies pour mieux concevoir les matériaux. Les différentes échelles qui existent dans les composites bitumineux sont résumées dans la Figure 33.

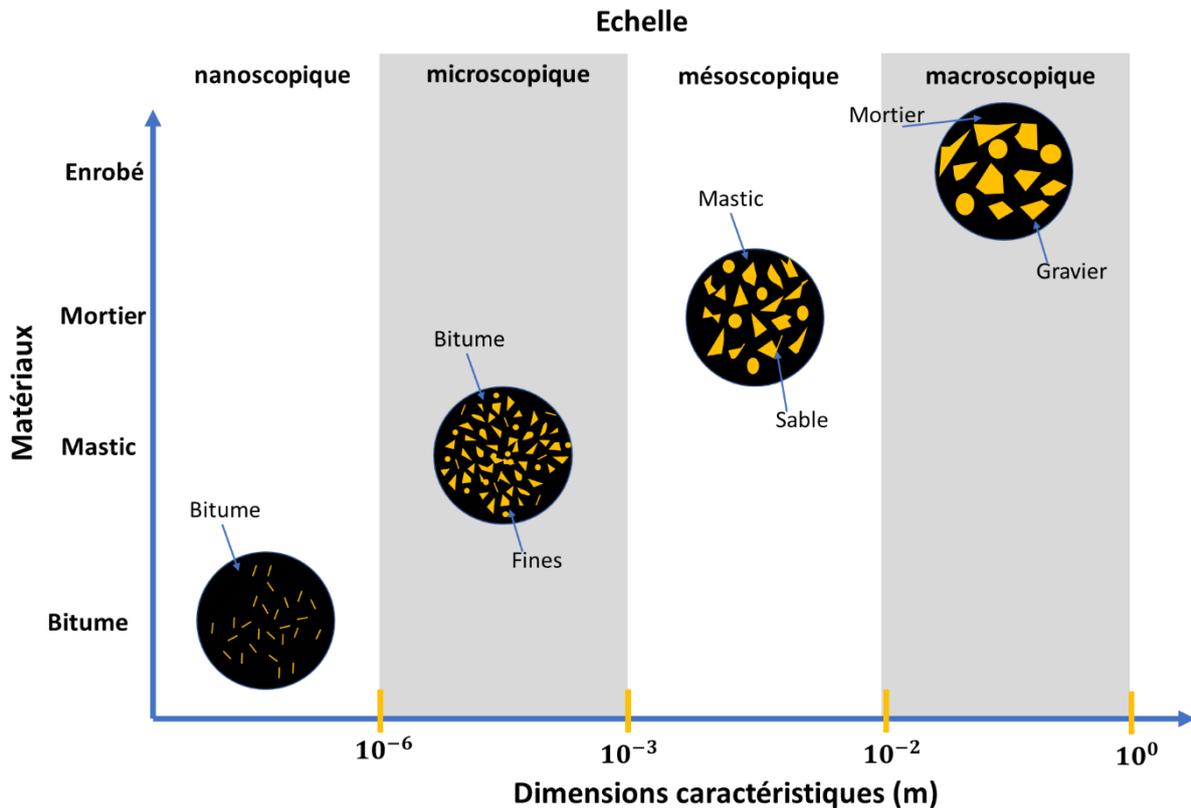


Figure 33 Modèle multi-échelle d'un enrobé en fonction des tailles des granulats

Cependant, la majorité des mécanismes qui régissent le comportement des bétons bitumineux se produisent aux échelles microscopique et mésoscopique, à travers l'interaction entre les différents composants. Les différentes échelles, leurs constituants et leurs caractéristiques sont présentés dans le Tableau 15.

Echelles	Matériaux	Constituants	Caractéristiques
Nanoscopique	Bitume	Molécules de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, de soufre et d'azote	Les constituants de cette échelle sont caractérisés par une analyse chimique pour déterminer la proportion des différentes fractions ainsi que leurs masses moléculaires moyennes. Des essais rhéologiques sont utilisés afin de comprendre l'effet de ces composants sur les propriétés mécaniques du bitume.
Microscopique	Mastic	Bitume + particules de fines	L'importance de cette échelle dans l'établissement d'un lien entre le liant et le béton bitumineux est expliquée par des interactions qui se produisent à l'interface du bitume et du granulat. Cette échelle amplifie les influences de ce phénomène en raison de la surface spécifique relativement importante des particules de remplissage.
Mésoscopique	Mortier	Mastic + particules de sable	Cette échelle existe entre les particules les plus grossières du mélange. C'est la phase qui se

			déforme sous un chargement à haute température et qui présente des fissures visibles sous une charge répétitive à des températures intermédiaires.
Macroscopique	Enrobé	Mortier + gravillons et graviers + vides	Cette échelle est considérée comme un milieu continu, homogène et isotrope. La majorité des guides et des spécifications de construction des chaussées se concentrent sur cette échelle sans prendre en compte les autres échelles.

Tableau 15 Les différentes échelles d'un enrobé bitumineux

Pour les diamètres maximaux des inclusions à chaque échelle, des différents seuils de coupures sont adoptés par les auteurs :

Fakhari Tehrani et al., 2016 ont utilisé la modélisation multi-échelle pour étudier les propriétés viscoélastiques de l'enrobé. Un modèle hétérogène d'éléments finis EF est développé afin de prédire le module dynamique du béton bitumineux. Ils sont considérés un seuil de coupure de 100 μm pour l'échelle mastic et 2 mm pour l'échelle mortier.

Chen et al., 2019 ont étudié le comportement rhéologique du bitume, mastic et mortier ainsi que les interactions entre le liant et les granulats. Ces échelles sont testées en utilisant un DSR. Le mastic contient du filler avec un diamètre $d < 75 \mu\text{m}$ alors que le mortier est formé du sable dont le diamètre $d < 2.36 \text{ mm}$.

Somé et al., 2020 ont adopté des essais expérimentaux ainsi que le principe multi-échelle afin d'évaluer les effets du vieillissement sur les propriétés rhéologiques du liant et de l'enrobé. Un modèle multi-échelle est mis en œuvre pour prédire les modules de rigidité et les angles de phase des mélanges en fonction des propriétés des bitumes et des granulats. Cette prédiction est faite avec des modèles analytiques. Somé a choisi le diamètre 125 μm comme limite de coupure pour l'échelle de mastic et 2 mm pour l'échelle de mortier.

EI Sawda, 2022 a caractérisé les différentes échelles d'un enrobé poreux par des essais expérimentaux et par la modélisation numérique. Elle a essayé de trouver une relation évaluant la fatigue d'un enrobé à partir de l'échelle mastic. Pour elle, le mastic est considéré comme un mélange de bitume avec des fines de diamètre maximal 63 μm et le mortier est formé de mastic et du sable de diamètre maximal 250 μm .

L'un des objectifs des évaluations multi-échelles est de comprendre les mécanismes physiques et chimiques qui se produisent dans un matériau en effectuant des expériences ciblées à des échelles où ces mécanismes sont les plus dominants. Un deuxième résultat, peut-être plus significatif, de ces évaluations est l'intégration des mécanismes dans la formulation analytique ou computationnelle. Un tel modèle permet alors de mieux comprendre les interactions qui se produisent au sein du matériau et de modifier la composition et la structure interne du béton bitumineux afin d'en améliorer les propriétés et les performances.

De nombreux travaux abordent la modélisation des échelles microscopique et mésoscopique. Ces modélisations se distinguent par le type de simulation (par Eléments Discrets, par Eléments Finis...), par la méthode de génération des inclusions, ou par l'approche multi-échelle retenue.

I.4.2. Modélisation hétérogène

Comme il a été mentionné dans les sections précédentes, l'enrobé bitumineux est un matériau hétérogène constitué de plusieurs phases. Le comportement mécanique de ces matériaux hétérogènes est très complexe et nécessite de prendre en compte la géométrie de la microstructure et le comportement mécanique des différentes phases.

Au cours des deux dernières décennies, des modèles numériques ont été développés pour étudier les propriétés des matériaux bitumineux hétérogènes. La plupart d'entre eux ne prennent pas en compte la granulométrie utilisée, la forme des granulats et la distribution des vides. Il est bien connu que ces paramètres jouent un rôle important dans la détermination des propriétés mécaniques des mélanges bitumineux.

Des méthodes numériques récentes, tenant compte de plusieurs facteurs morphologiques des composites bitumineux, étaient basées sur des modèles digitaux issus de deux approches principales.

La première est la technique de traitement d'images. La technique d'imagerie permet aux chercheurs de capturer la géométrie à l'échelle micro et méso avec plus de précision. Ce type d'approche nécessite une caméra de haute résolution ou un tomographe CT (Computed Tomography) pour capturer une image numérique bidimensionnelle ou tridimensionnelle d'un échantillon d'enrobé bitumineux. Cette méthode est capable de reproduire la forme et la granulométrie réalistes des granulats.

Wang et al., 2014 ont utilisé la tomographie à rayons X pour scanner les échantillons d'enrobés bitumineux afin d'obtenir des images en coupe continue à haute résolution. Un modèle numérique tridimensionnel est créé en se basant sur les images prises. Ce modèle reflète les positions et les formes réelles des granulats, du mastic et du vide. Il est utilisé pour la simulation numérique en affectant les propriétés à chaque phase dans le logiciel Abaqus.

Liu et al., 2021 ont étudié l'influence des différents types de fillers sur les propriétés mécaniques d'un enrobé poreux en utilisant un modèle micromécanique par éléments finis. La tomographie à rayons X (X-ray CT) et le traitement d'image numérique DIP (Digital Image Processing) ont été appliqués pour détecter et reconstruire la microstructure des échantillons de l'enrobé. Une analyse par éléments finis (EF) a été réalisée pour simuler un essai de traction indirecte. Les réponses mécaniques des mélanges ont ainsi été calculées et comparées avec les résultats expérimentaux.

Chen et al., 2022 ont modélisé l'initiation et la propagation des fissures. Pour obtenir des résultats plus fiables, un modèle hétérogène a été développé pour modéliser explicitement les différentes phases du matériau (inclusions et mastic) capturées par la tomographie par rayons X (CT) (avec une résolution de 0.014 mm^3). Un modèle bidimensionnel (2D) par éléments finis (EF) a été reconstruit. Ils ont trouvé que la tomographie à rayons X à haute résolution appliquée à des échantillons de petite taille est une méthode appropriée pour visualiser la géométrie détaillée des fissures dans le béton bitumineux et reconstruire une morphologie réaliste des granulats pour les simulations. Le modèle EF 2D développé a modélisé approximativement l'ensemble du processus de fissuration. Cette approche est représentée dans la Figure 34.

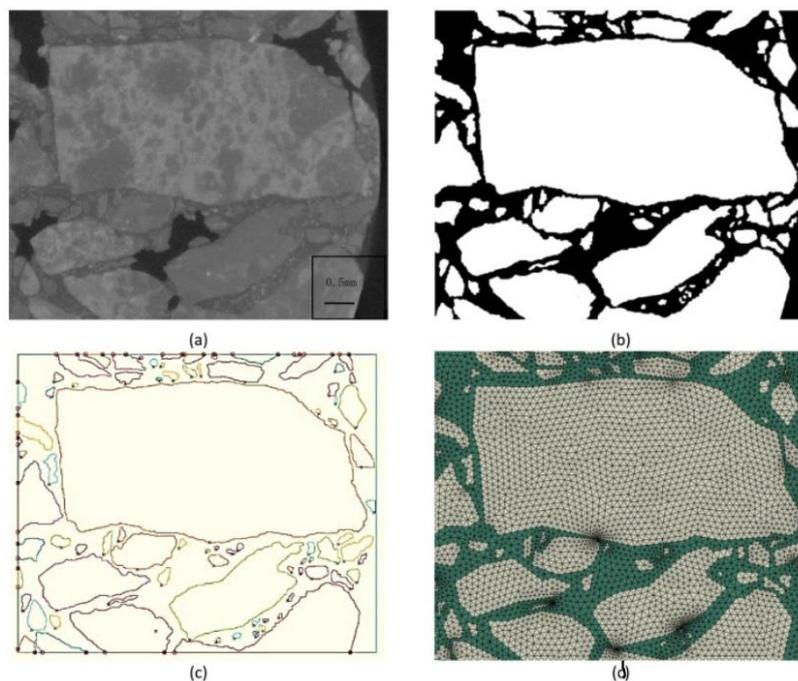


Figure 34 (a) L'image CT originale ; (b) L'image binaire à deux phases (granulat et mastic) ; (c) L'image de la géométrie ; (d) L'image du maillage EF (les éléments verts représentent le mastic ; les éléments blancs représentent les inclusions) (Chen et al., 2022)

Cependant, ce type d'approche prend du temps et il est très coûteux pour fabriquer des spécimens expérimentaux et traiter les images scannées. Il n'est donc pas adapté aux recherches qui nécessitent la fabrication d'un grand nombre de modèles.

La deuxième approche, appelée modélisation paramétrique, est basée sur l'utilisation de modèles digitaux à partir des logiciels numériques. Cette approche demande que la forme et la granulométrie des granulats ressemblent au squelette réel de l'enrobé. Par cette méthode, les inclusions sont générées et distribuées au sein de la matrice en respectant la courbe granulométrique des granulats donnés.

Fakhari Tehrani et al., 2016 ont développé une technique de modélisation multi-échelle utilisable dans l'étude des propriétés viscoélastiques des enrobés bitumineux. Cette technique est basée sur une approche biphasique. A chaque échelle le milieu hétérogène est considéré comme un matériau biphasé composé d'inclusions granulaires ayant des propriétés élastiques linéaires et d'une matrice de matériaux bitumineux présentant un comportement viscoélastique linéaire à de petites valeurs de déformation. La modélisation est réalisée en utilisant le logiciel d'éléments finis ABAQUS. La microstructure est générée en utilisant un logiciel de génération des inclusions qui est capable de distribuer de manière aléatoire différentes formes et tailles d'inclusions en 2D ou 3D dans la matrice. Toutes les inclusions générées correspondent aux courbes granulométriques des granulats choisis. Le maillage du modèle développé est présenté dans la Figure 35. Le module dynamique prédit d'un enrobé est comparé avec celui obtenu des essais expérimentaux à différentes températures.

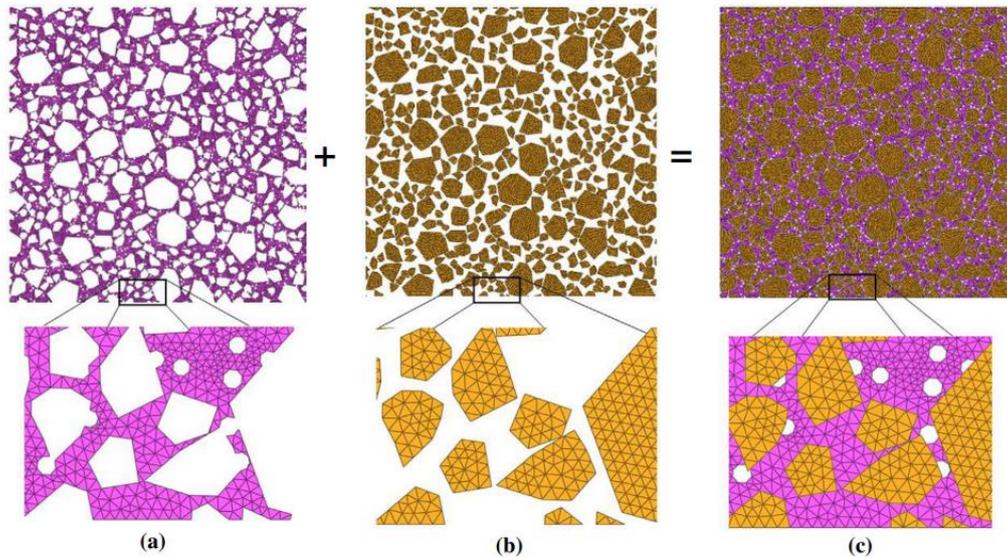


Figure 35 Modèle d'éléments finis maillé de l'échelle enrobé : (a) matrice, (b) inclusions et (c) modèle biphasé formé de la matrice et des inclusions (Fakhari Tehrani et al., 2016)

Sow, 2018 a adopté une stratégie de modélisation multi-échelle hiérarchique afin de déterminer les propriétés mécaniques de la grave traitée au ciment. Sow a utilisé un logiciel CEMHYD3D développé dans son laboratoire pour générer la microstructure de la pâte de ciment et la mesostructure du mortier. L'approche développée est du type « hiérarchique » : elle consiste à représenter l'hétérogénéité de la matière dans des volumes élémentaires représentatifs des diverses échelles d'étude. Les caractéristiques physiques et mécaniques d'une échelle sont déterminées à partir de celles de l'échelle inférieure. Pour déterminer les caractéristiques du mortier, deux Volumes Elémentaires Représentatifs (VER) sont modélisés dans Abaqus respectivement par des cubes de $(40 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$ à l'échelle microscopique et de $(100 \times 100 \times 100) \text{ mm}^3$ à l'échelle macroscopique (Figure 36). Les compositions de chaque échelle sont présentées dans le Tableau 16.

Echelle	Matrice	Inclusions
Microscopique	15% de CEMI 42.5R hydraté	85 % de granulats 0/6
Macroscopique	47.5% de Micro-grave-ciment (μGC)	52.5 % de granulats 6/25

Tableau 16 Composition des différentes échelles

Des essais mécaniques modélisés à l'échelle microscopique sont : Compression uniaxiale, compression biaxiale, compression triaxial et traction uniaxiale. Ils permettent d'identifier les paramètres du modèle d'endommagement plastique CDPM qui caractérise cette échelle. Ces paramètres servent comme données d'entrée caractérisant la matrice de l'échelle suivante. La modélisation de la dernière échelle permet de déterminer les propriétés du comportement mécanique de la grave traitée au ciment : E , ν , f_b , f_t , M_{pic} , φ , ψ .



Figure 36 VER 3D de μGC (gauche) et VER 3D de GC (droite) dans Abaqus (Sow, 2018)

Fadil et al., 2021 ont représenté les mastics bitume-chargeur comme des particules de chargeur élastiques sphériques et isotropes noyées dans une matrice viscoélastique. Les particules de chargeur sont caractérisées par une distribution et une concentration volumétrique données. Dans cette étude, une liaison parfaite est supposée entre les phases chargeur et liant. Ainsi, les nœuds d'interface sont partagés entre les inclusions et la matrice (double nœud à l'interface). Les inclusions sont générées d'une façon aléatoire en utilisant le logiciel LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator). L'utilisation de LAMMPS permet d'obtenir un VER avec une forte concentration d'inclusions sphériques (jusqu'à une fraction volumique de $\phi = 65\%$). Les inclusions générées sont importées dans Abaqus où le modèle d'éléments finis est créé. Comme le montre la Figure 37, le chargement du VER est effectué de manière uniaxiale en déformation contrôlée.

Le comportement viscoélastique des mastics bitumeux est examiné expérimentalement et numériquement. L'approche de modélisation micromécanique proposée mesure les modules de cisaillement pour les mastics à une large gamme de températures, c'est-à-dire entre -10°C et 80°C . La différence entre les modules de cisaillement calculés et mesurés est généralement de l'ordre de 30%. Cependant, la différence augmente pour des grandes concentrations de particules à des températures élevées, c'est-à-dire $T \geq 40^\circ\text{C}$. Fadil a émis l'hypothèse que cela peut être dû à l'effet des interactions entre les particules, qui n'est pas entièrement saisi en raison de la forme sphérique des particules supposée dans ce travail.

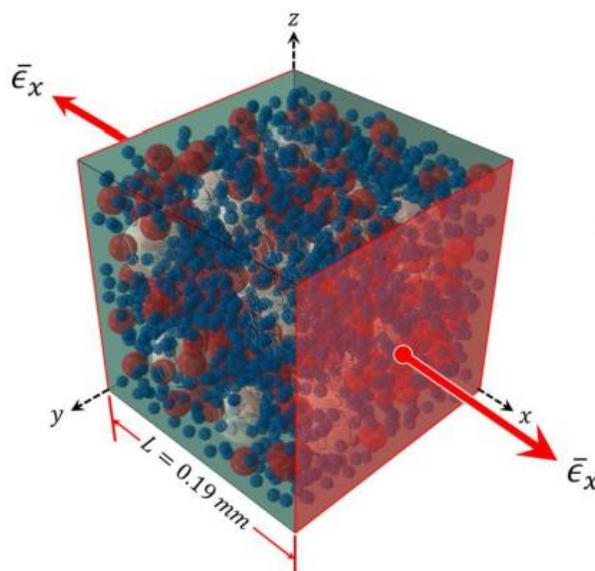


Figure 37 Volume élémentaire représentatif utilisé pour le modèle avec $\phi = 30\%$, chargé uniaxialement (Fadil et al., 2021)

El Sawda, 2022 a validé une méthode numérique capable d'évaluer l'endommagement par fatigue via une approche multi-échelle hétérogène. La modélisation a été réalisée en utilisant la méthode des éléments finis (EF). Les modèles sont constitués d'un squelette granulaire élastique et d'une matrice viscoélastique. Le squelette granulaire a été généré dans le logiciel MOA (acronyme français pour random object modeler) en respectant une courbe granulométrique propre aux matériaux étudiés. Sous ABAQUS, l'équation de fatigue a été appliquée aux modèles. Ensuite, l'endommagement par fatigue a été calculé et présenté sous forme de cartographies visuelles (voir Figure 38). En appliquant l'approche multi-échelle hétérogène, elle a développé une nouvelle méthode numérique pour définir l'endommagement des mélanges bitumineux par torsion. Pour toutes les échelles, El Sawda a remarqué que les zones les plus endommagées dans les modèles sont situées à la surface extérieure et entre les inclusions proches. Dans ces régions, il y a des zones de concentration de déformation élevée. En se basant sur la distribution des dommages dans les modèles, elle a supposé que les dommages soient localisés et non dispersés.

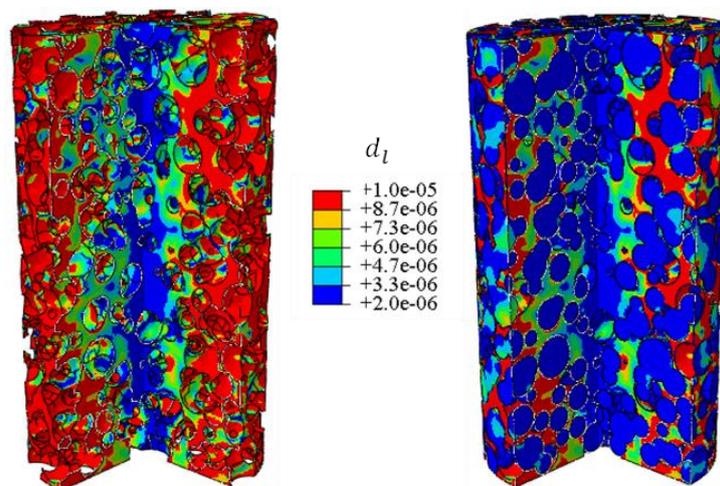


Figure 38 Dommages locaux calculés par cycle pour un enrobé poreux (El Sawda, 2022)

Comme cité précédemment, un modèle micromécanique numérique, basé sur le calcul par éléments finis est capable de prendre en compte un nombre important de facteurs, tels que la forme et la taille des granulats, le volume de remplissage de chaque phase et la discontinuité de la courbe granulométrique des inclusions.

Dans notre travail de recherche, une modélisation numérique hétérogène associée à une génération aléatoire du squelette granulaire sera utilisée.

1.5. Conclusion

Les mélanges bitumineux étaient utilisés à l'échelle industrielle il y a plus d'un siècle. Aujourd'hui, le matériau continue de tenir sa place de référence dans le domaine des routes.

Ce matériau est considéré, à l'échelle macroscopique, comme un matériau homogène et isotrope. Dans la bibliographie, plusieurs essais de caractérisation du comportement mécanique et thermique de ce matériau sont trouvés. Cependant, les principes d'homogénéité et d'isotropie ont été utilisés dans le passé en raison du manque des moyens de mesure à l'échelle microscopique. Actuellement, plusieurs chercheurs tentent de caractériser ces matériaux à l'échelle de leurs composants en adoptant le principe multi-échelle. Par ailleurs, les tendances actuelles vers le recyclage des enrobés, impliquant l'utilisation d'au moins deux

bitumes et différentes natures de granulats, font que même au niveau du liant l'hypothèse d'homogénéité n'est plus garantie.

Jusqu'à présent, le comportement mécanique de l'enrobé recyclé a été principalement étudié à l'échelle macro, mais un nombre croissant de travaux montre la pertinence de l'analyse multi-échelle. Cette dernière implique le développement et l'utilisation des outils numériques originaux qui incorporent la très forte hétérogénéité de ce matériau. Il est prouvé que ce comportement n'est pas influencé juste par le taux d'AE mais aussi par la remobilisation du liant d'AE dans le mélange.

Il est donc très utile d'approfondir les travaux de recherche sur ce phénomène, plus particulièrement sur une méthode de caractérisation du degré d'homogénéité de mélange qui ne sera pas coûteuse et de mieux apprécier également l'influence d'AE à différentes échelles.

Dans le prochain chapitre, la méthode expérimentale adoptée dans cette thèse est présentée. Cette méthode servira à caractériser les différentes échelles du béton bitumineux afin de déterminer l'influence de l'ajout d'AE dans le mélange. En outre, le chapitre 2 nous permettra de déterminer les paramètres d'entrée utilisés dans notre modélisation numérique présentée dans le chapitre 3.

**Partie II. Echelle
matériau :
Caractérisation
viscoélastique
multi-échelle**

Partie II. Echelle matériau : Caractérisation viscoélastique multi-échelle

II.1. Introduction

Les bétons bitumineux sont des matériaux hétérogènes multiphasiques. Cette propriété leur confère un comportement mécanique très complexe, tant à l'échelle de la route ou sa microstructure. Traditionnellement, la majorité des codes et directives de construction se basent sur des essais à l'échelle enrobé en quantifiant son comportement. Cependant, étant donné que le granulats se déforme à peine sous une charge mécanique, il est inapproprié d'interpréter la réponse à l'aide de mesures de déformation globale. La déformation réelle est presque entièrement prise par le mastic ou le mortier, d'où l'importance de la caractérisation de ces deux échelles.

Dans le cas de l'utilisation des agrégats d'enrobé (AE), l'étude bibliographique menée au cours du chapitre précédent a mis en évidence les problèmes inhérents au recyclage des bétons bitumineux. Notamment, les interactions entre les AE et les matériaux d'apport sont au cœur du débat et constituent un véritable verrou scientifique.

Par conséquent, la compréhension des mécanismes complexes impliqués dans le comportement mécanique des enrobés incorporant des AE nécessite des études multi échelles pour l'identification de ces interactions.

Ce chapitre décrit le matériau testé dans notre travail, les différentes échelles d'étude ainsi que les protocoles expérimentaux mis en œuvre pour la caractérisation viscoélastique à ces différentes échelles. Les modules complexes de cisaillement des échelles bitume, mastic et mortier sont déterminés par des essais de torsion en utilisant un DSR alors que pour l'échelle enrobé, ce module est mesuré par un essai de torsion en utilisant une presse hydraulique MTS. Les résultats obtenus serviront comme paramètres d'entrée pour les modèles numériques présentés dans la Partie III.

II.2. Matériau

Afin d'étudier l'ensemble des phénomènes cités ci-avant, un enrobé innovant de type GB ϵ +[®] (acronyme de grave bitume epsilon +) était fourni par ses constituants élémentaires, des plaques de contrôles et par une planche expérimentale en vraie grandeur. GB ϵ +[®] est développé par l'entreprise malet, filiale du groupe Spie batignolles, dans le but de réduire les épaisseurs des couches mises en œuvre par une optimisation des propriétés mécaniques. GB ϵ +[®] associe cette recherche de performances optimisées à une volonté de préserver les ressources naturelles par une utilisation accrue des agrégats d'enrobé (40%) issus de la déconstruction de chaussées vieillies. Ce matériau est considéré performant vu qu'il possède des performances mécaniques supérieures à celles d'un GB4 (Grave bitume de classe 4). Il a un module complexe $E^* = 14\,000$ MPa à 15°C et 10Hz et une résistance à la fatigue $\epsilon_6 = 115$ μ def à 10°C et 25 Hz.

Ce matériau performant est développé dans un objectif de satisfaire aux enjeux de l'économie circulaire puisqu'au sein d'un même chantier, il est possible de reprendre la totalité des matériaux qui ont été extraits en amont du chantier pour les réutiliser dans les nouvelles couches d'assises.

II.2.1. Propriétés du matériau

L'optimisation de la formulation de la GB ϵ +[®] est basée sur :

- une recomposition granulométrique ;
- une teneur en liant adaptée à une meilleure compactibilité ;
- un liant dont la nature et le grade sont choisis pour avoir une meilleure tenue face aux agressions extérieures (mécaniques et climatiques).

Cette GB est obtenue en mélangeant AE et granulats d'apport avec un bitume d'apport d'une teneur de 3% et dont le grade est 50/70 (selon la norme européenne NF EN 1426) et la TBA est 52°C (selon NF EN 1427). La teneur en bitume des AE est 5% avec un grade de 10/20 et une TBA de 68°C. Le Tableau 17 récapitule les spécifications du produit.

Constituants	Provenance	% Ext.
0/2	Alluvionnaire Siliceux de Garonne	12.6
2/6.3		13.7
10/14		31.6
AE 0/10	Ambromat	40
Filler	Calcaire	2.1
Bitume d'apport	50/70	3
Bitume résiduel AE	10/20	2

MVRg (Kg/m ³)	2687
MVR Maximale (Kg/m ³)	2493
Surface spécifique (m ² /Kg)	13.472
Module de richesse	3.04
Teneur en vide (%)	5.4

Tableau 17 Spécifications du matériau GBÆ+

La Figure 39 représente les courbes granulométriques des granulats d'apport, des AE et du mélange.

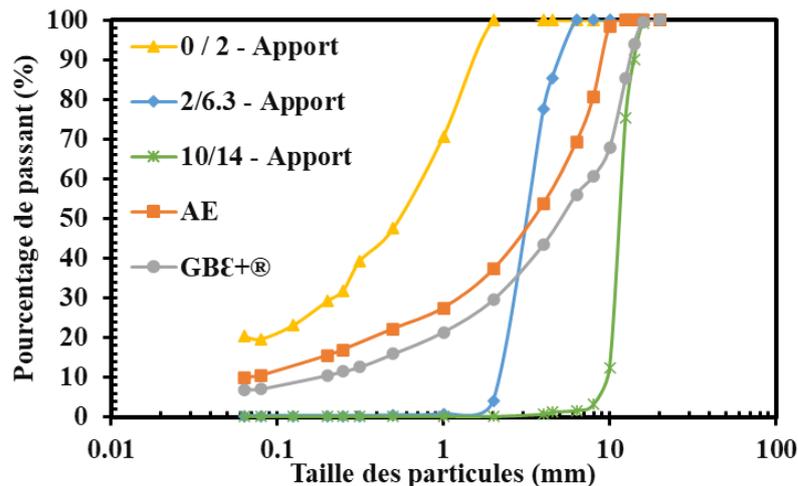


Figure 39 Courbes granulométriques des granulats d'apport, des AE et de la GBÆ+®.

En se basant sur ces données, les mélanges bitumineux tels le mastic et le mortier dans les états neufs, vieux et mélanges sont fabriqués pour être testés.

II.2.2. Les différentes échelles

Une étude multi-échelles est adoptée afin de caractériser expérimentalement le comportement des enrobés ainsi que l'influence de l'introduction des agrégats d'enrobé. Dans ce but, l'enrobé est divisé en plusieurs échelles présentées dans le Tableau 18. Le choix de diamètre de coupure de chaque échelle est expliqué dans les paragraphes qui suivent. La Figure 40 illustre les différentes échelles de la GB ϵ + mises en œuvre au laboratoire.

Echelle	Mélange	Constituants
0	Bitume	Bitume
1	Mastic	Bitume + fines ($d \leq 0.063$ mm)
2	Mortier	Mastic + sable ($d \leq 0.25$ mm)
3	Enrobé	Mortier + gravier ($d \leq 20$ mm)

Tableau 18 Les constituants des différentes échelles de la GB ϵ +

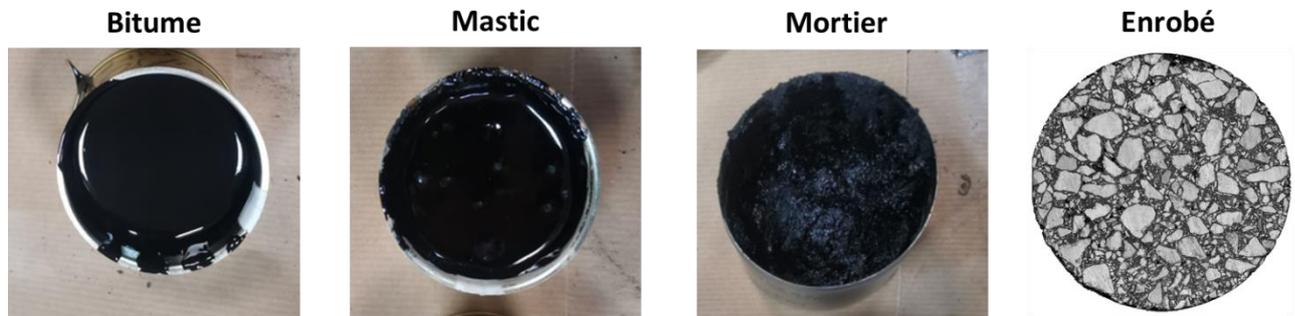


Figure 40 Les différentes échelles de la GB ϵ +

Concentration volumique d'inclusions C_i

Les différentes échelles sont caractérisées par des concentrations volumiques de leurs inclusions. Cette concentration caractérise le pourcentage volumique des particules solides dans les mélanges bitumineux. Les inclusions peuvent être : les fillers dans le cas du mastic, les fillers et le sable dans le cas du mortier et les fillers, sable et gravier dans le cas des enrobés. Cette concentration est définie par l'équation suivante :

$$C_i = \frac{V_{inclusions}}{V_{mélange\ bitumineux}} = \frac{V_{inclusions}}{V_{bitume} + V_{inclusions}} \quad \text{Équation 29}$$

Plusieurs études sont menées dans la littérature afin d'étudier l'effet de la concentration des fillers (Alberola et Mele, 1996 et Delaporte, 2007). Ces études montrent que dans le cas des mastics, l'effet des fines est négligeable quand la concentration en filler est inférieure à 25% en proportion volumique. Les différentes échelles avec les pourcentages volumiques en inclusions sont présentées dans le Tableau 19. Le calcul détaillé du taux d'inclusions pour les différents matériaux est présenté en Annexe A.

Etat	Echelle	Bitume (ou matrice)	Inclusions (mm)	Taux d'inclusions C_i (%)
Neuf	Bitume	50/70	-	0

	Mastic	50/70	0 – 0.063	28.38
	Mortier	50/70	0 – 0.25	38.09
Vieux (AE)	Bitume	10/20	-	0
	Mastic	10/20	0 – 0.063	44.03
	Mortier	10/20	0 – 0.25	56.95
Mélange	Bitume	30/45	-	0
	Mastic	30/45	0 – 0.063	35.59
	Mortier	30/45	0 – 0.25	47.34
	Enrobé	30/45	0 - 20	84.92

Tableau 19 Les concentrations volumiques d'inclusions pour les différents matériaux testés

Les différentes échelles ainsi que leur préparation aux essais de module en torsion sont présentées dans les paragraphes suivants.

II.2.2.1. A l'échelle bitume

La teneur externe en liant de la GBÆ+ est de 5%. Ce liant est un mélange d'un bitume neuf B50/70 et d'un bitume vieux provenant des AE.

II.2.2.1.1. Bitume neuf (bitume d'apport)

Un bitume neuf était fourni pour les essais de caractérisation. Ce bitume provient de la même source que le bitume utilisé afin de fabriquer l'enrobé GBÆ+. Des essais sont menés sur ce bitume pour vérifier sa température bille anneau et sa pénétrabilité selon la norme EN 1427. Ce bitume a un grade de 50/70 et une TBA de 55°C. Ce bitume est chauffé dans une étuve à 150°C pendant 30 minutes (la durée varie selon la quantité de bitume) pour atteindre un état liquide et le rendre apte au coulage (selon la norme EN 12594). L'échantillon du bitume est coulé à chaud, dans des moules en silicone, immédiatement après l'avoir sorti de l'étuve.

II.2.2.1.2. Bitume vieux (bitume provenant des AE)

Les AE contiennent une teneur en liant de 5%. Une masse de 9 000 g d'AE est désenrobée. L'extraction et la récupération des constituants d'agrégats d'enrobé sont réalisées par solubilisation à chaud du liant d'AE dans le tétrachloroéthylène. Les AE sont disposés dans un tambour maillé. De nombreux cycles de lavage peuvent être programmés en boucle fermée. Les minéraux de plus de 0.063 mm restent dans le tambour tandis que le bitume, le solvant et les fillers sont lavés et séparés dans une centrifugeuse. Les fillers sont retenus dans un godet avec un papier à surface rugueuse qui piège ces minéraux fins. Tous les minéraux passent par une étape de séchage. La solution contenant le liant d'AE et le tétrachloroéthylène est récupérée en fin d'opération. Le tambour et le godet sont mis à l'étuve sous hotte à une température de 90°C pendant 4 h, ce qui permet de s'assurer que la plus grande partie du solvant restant est évaporée. La teneur en liant et la granulométrie peuvent ensuite être analysées. Dans cette manipulation, l'Asphaltanalysator INFRATEST (Figure 41 gauche) est

utilisé en suivant la norme NF EN 12697-1. Pour chaque extraction, 1 kg à 1.5 kg d'AE est introduite dans le tambour. Les cycles de lavage sont programmés à 8 cycles et les cycles de séchage à 5.

Le solvant et le liant sont définitivement séparés par une procédure de récupération en utilisant l'évaporateur rotatif (Figure 41 droite) en suivant la norme NF EN 12697-3+A1. Afin d'éliminer le solvant de la solution, la distillation est effectuée à plusieurs températures et pressions.



Figure 41 L'Asphaltanalysator (gauche) et l'évaporateur rotatif (droite)

Si la teneur en tétrachloroéthylène résiduel est supérieure à 0.4 %, la récupération du liant d'AE est considérée comme insatisfaisante. Cette teneur est déterminée par spectroscopie IRTF. Dans ce travail de recherche, cette teneur n'a pas été vérifiée.

L'effet des solvants sur les propriétés mesurées des bitumes récupérés a été largement remis en question (Swiertz et Bahia, 2011). Cependant, dans notre étude, la récupération en utilisant un solvant a été adoptée vu qu'elle est la méthode la plus utilisée pour récupérer les liants.

Les extractions et les récupérations successives sont réalisées sur des lots homogènes d'AE fournis par la centrale Ambromat pour le traitement des déchets à Toulouse. 6 extractions et récupérations ont été réalisées. Une masse de 436 g de bitume vieux a été récupérée.

Ce bitume a un grade de 10/20 et une TBA de 70°C. Il est chauffé dans une étuve à 160°C pendant 30 minutes (en suivant la norme EN 12594) pour atteindre un état liquide et le rendre apte au coulage. L'échantillon du bitume est coulé à chaud, dans des moules en silicone, immédiatement après l'avoir sorti de l'étuve.

II.2.2.1.3. Bitume mélange « 100% homogène »

Ce bitume représente le liant de l'échelle finale GB \mathcal{E} + dans l'hypothèse d'une remobilisation de 100%. Il est obtenu en mélangeant le bitume neuf avec le bitume vieilli extrait des AE. La GB \mathcal{E} + est formée de 40% d'AE, de 2% en masse d'un bitume vieux et de 3% en masse d'un bitume neuf. Par exemple, dans un 1 kg de GB, il y a 50 g de bitume mélange (30 g bitume neuf et 20 g bitume d'AE). La formulation de ce mélange de bitumes se fait selon le protocole suivant :

1. Chauffage du bitume neuf dans une étuve à 150°C pendant 30 minutes pour le ramollir et le rendre apte au malaxage et coulage ;
2. Chauffage du bitume d'AE dans une étuve à 160°C pendant 30 minutes pour le ramollir et le rendre apte au malaxage et coulage ;

3. Un bol est chauffé sur une plaque chauffante à 80°C sous une hotte pour éviter les chocs thermiques lors du mélange.
4. Le mélange se fait manuellement à l'aide d'une spatule pendant 5 minutes. L'utilisation d'un agitateur à hélices (voir Figure 42) n'était pas très pratique vue la petite quantité de bitume à mélanger.
5. Le mélange est coulé à chaud immédiatement dans des moules afin d'être testé le lendemain en utilisant le DSR.

Ce mélange de bitumes est considéré un mélange homogène (le bitume vieux est 100% remobilisé dans le mélange) vu que les bitumes sont dans un état liquide et que le mélange se fait manuellement à 80°C pendant 5 minutes.



Figure 42 Dispositif de malaxage : l'agitateur à hélices et la plaque chauffante

II.2.2.2. A l'échelle mastic

Trois différents mastics sont testés : mastic neuf, mastic vieux et mastic mélange homogène.

II.2.2.2.1. Mastic neuf

Le mastic neuf est le mélange du bitume d'apport B50/70 et les fillers d'apport dont le diamètre est inférieur ou égale à 63 μm . Le mastic est fabriqué selon la procédure suivante :

1. Les fillers d'apport sont chauffés dans une étuve à 160°C pendant 24 heures.
2. Le bitume neuf est chauffé dans une étuve à 150°C pendant 30 minutes.
3. Un bol est chauffé sur une plaque chauffante à 80°C sous une hotte.
4. Le mélange se fait manuellement à l'aide d'une spatule pendant 5 minutes.
5. Le mélange est coulé à chaud immédiatement dans des moules afin d'être testé le lendemain en utilisant le DSR.

II.2.2.2.2. Mastic vieux

Le mastic vieux est le mélange du bitume d'AE et des fillers d'AE dont le diamètre est inférieur ou égal à 63 µm. Le mastic vieux est fabriqué selon la même procédure que le mastic neuf à l'exception de la température du chauffage du bitume d'AE qui est de 160°C.

II.2.2.2.3. Mastic mélange

Le mastic mélange est constitué de bitume d'apport, bitume d'AE, fillers d'apport et filler d'AE. Sa fabrication est réalisée selon le protocole suivant :

1. Les fillers d'apport et les fillers d'AE sont chauffés dans une étuve à 160°C pendant 24 heures.
2. **Le bitume mélange** est chauffé dans une étuve à 160°C pendant 30 minutes.
3. Un bol est chauffé sur une plaque chauffante à 80°C sous une hotte.
4. Le mélange se fait manuellement à l'aide d'une spatule pendant 5 minutes.
5. Le mélange est coulé à chaud immédiatement dans des moules afin d'être testé le lendemain en utilisant le DSR.

Ce mastic est considéré un mélange homogène vu **que le mélange est déjà fait au niveau du bitume.**

II.2.2.3. A l'échelle mortier

Quatre différents mortiers sont testés : mortier neuf, mortier vieux, mortier mélange (100 % homogène) et mortier mélange (% d'homogénéité inconnu).

II.2.2.3.1. Mortier neuf

Le mortier neuf est le mélange du bitume d'apport B50/70, des fillers d'apport dont le diamètre est inférieur ou égale à 63 µm et du sable d'apport dont le diamètre $63 \mu m < d \leq 250 \mu m$. Même procédure de fabrication que le mastic neuf en ajoutant juste l'étape de chauffage du sable d'apport dans une étuve à 160°C pendant 24 heures.

II.2.2.3.2. Mortier vieux

Le mortier vieux est le mélange du bitume d'AE, des fillers d'AE dont le diamètre est inférieur ou égale à 63 µm et du sable d'AE comprenant les particules dont le diamètre $63 \mu m < d \leq 250 \mu m$. Sa fabrication suit la même procédure que le mastic vieux en ajoutant juste l'étape de chauffage du sable d'AE dans une étuve à 160°C pendant 24 heures.

II.2.2.3.3. Mortier mélange (100 % homogène)

Le mortier mélange (100% homogène) est constitué des matériaux d'apport et ceux extraits d'AE : bitume, fillers et sable. Sa fabrication est réalisée en suivant le même protocole que le mastic mélange. Ce mortier est considéré un mélange homogène vu que le mélange est déjà fait au niveau du bitume.

II.2.2.3.4. Mortier mélange (% inconnu d'homogénéité)

Le mortier mélange (% inconnu d'homogénéité) est constitué d'un mortier neuf et d'un mortier vieux. La formulation de ce mélange se fait en suivant les étapes suivantes :

1. Le mortier neuf est chauffé dans une étuve à 150°C pendant 30 min.
2. Le mortier vieux est chauffé dans une étuve à 160°C pendant 30 min.
3. Un bol est chauffé sur une plaque chauffante à 80°C sous une hotte.
4. Le mélange se fait manuellement à l'aide d'une spatule pendant 5 minutes.
5. Le mélange est coulé à chaud immédiatement dans des moules en silicone.

Ce mélange est considéré comme non homogène vu qu'il est fait au niveau des mortiers et non pas au niveau des liants. Dans ce cas, le degré de remobilisation du liant vieux dans le mélange est inconnu.

II.2.2.4. A l'échelle enrobé

L'enrobé GB&+ représente l'échelle finale. Il est fabriqué en mélangeant le bitume et les granulats d'apport ($d \leq 20$ mm) avec les AE. Dans cette étude, des éprouvettes de GB&+ sont prélevées de la couche de base d'une fosse expérimentale à Egletons (Partie IV) pour être testées. La formulation de ce matériau a été faite dans une centrale d'enrobage en ajoutant les agrégats d'enrobé aux matériaux d'apport à une température de 160°C. Durant la fabrication de cet enrobé, il n'y a pas eu un mélange direct entre le liant neuf et le liant vieux ; le degré de remobilisation du liant d'AE dans ce mélange reste inconnu.

II.3. Programme expérimental

Le Tableau 20 donne une synthèse des essais réalisés dans le cadre de ce travail.

Essais	Echelle		Bitume	Inclusions	Conditions d'essai	
					Température (°C)	Fréquence (Hz)
Essais de module complexe par cisaillement $G^* - DSR$ (Torsion, plan/plan)	Bitume	Neuf	Apport	-	-10, 0, 10, 15, 20, 30, 40	1,3, 5, 10, 25, 50
		Vieux	AE	-		
		Mélange	Mel (100 % homogène)	-		
	Mastic	Neuf	Apport	$d \leq 63 \mu m$	-10, 0, 10, 15, 20	0.1, 1, 3, 10, 25
		Vieux	AE			
		Mélange	Mel (100 % homogène)			
	Mortier	Neuf	Apport	$d \leq 250 \mu m$	-10, 0, 10, 15, 20	0.1, 1, 3, 10, 25
		Vieux	AE			
		Mélange (100 % homogène)	Mel (100 % homogène)			

		Mélange (? % homogène)	Mel (? % homogène)			
Essais de module complexe G*-MTS (Torsion, Plan/Plan)	Enrobé	Mélange (? % d'homogénéité)	Mel (? % d'homogénéité)	$d \leq 20 \text{ mm}$	-10, 0, 10, 15, 20	0.1, 0.3, 1, 3, 10

Tableau 20 Programme expérimental

II.4. Essais de caractérisation des échelles bitume, mastic et mortier

Les essais de module complexe pour caractériser le bitume, le mastic et le mortier sont réalisés au laboratoire du Spie batignolles malet à Toulouse en utilisant un rhéomètre à cisaillement dynamique (Dynamic Shear Rheometer DSR – MCR 302 par Anton Paar).

II.4.1. Dynamic Shear Rheometer DSR

Le DSR est souvent utilisé pour déterminer les propriétés rhéologiques des matériaux viscoélastiques. Dans le domaine routier, il est utilisé afin de déterminer le module complexe de cisaillement des liants bitumineux à différentes températures et fréquences. Récemment, l'utilisation du DSR a été étendue afin de caractériser des mélanges bitumineux comme le mastic et le mortier. Le DSR est présenté dans la Figure 43.



Figure 43 DSR MCR 302

La configuration standard du DSR adoptée pour déterminer les propriétés viscoélastiques d'un bitume est le plan-plan PP. Un échantillon cylindrique du liant est placé entre deux plateaux parallèles en inox. La distance qui sépare ces deux plateaux est appelée entrefer ou gap.

Ce DSR est doté d'un dispositif intégré pour réguler la température sur une plage allant de - 30°C à 100°C pendant toute la durée de l'essai. Ce dispositif est constitué d'un système double plan Peltier avec un bain qui fait circuler un mélange glycol et eau. Le plateau inférieur est contrôlé par le premier plan Peltier qui se trouve sous le plateau, et l'échantillon est entouré par le second plan Peltier qui est le système de capot. Ce capot est utilisé pour englober les géométries utilisées ainsi que l'échantillon testé afin de conserver la température et empêcher la formation de gradients de température dans l'échantillon. Le schéma de la Figure 44 décrit le dispositif d'appareillage du DSR.

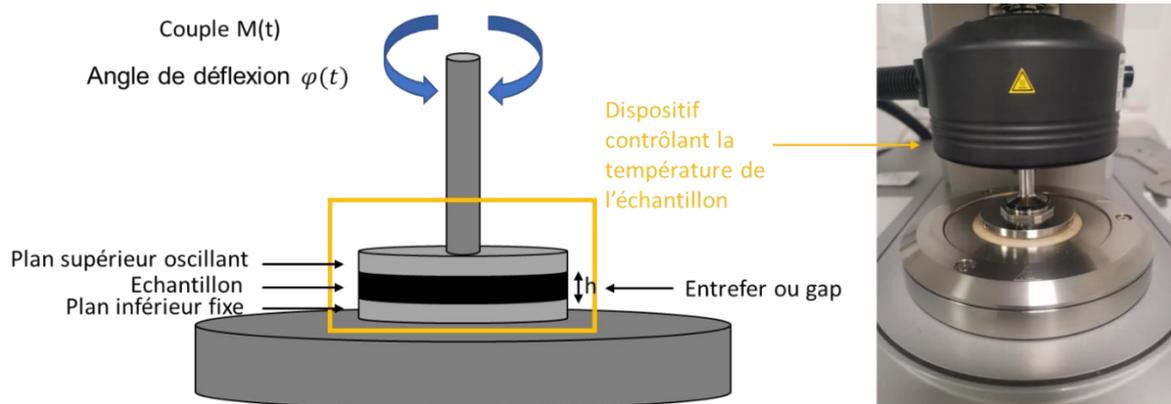


Figure 44 Détails de l'essai oscillatoire avec la configuration PP (gauche) et dispositif du DSR avec la géométrie 25 mm et le capot (soulevé) (droite)

L'un des deux plateaux est fixe tandis que l'autre tourne, imposant ainsi un cisaillement à l'échantillon. En pratique, cet essai simule le liant présent entre les granulats. Quand la chaussée est sollicitée, les granulats exercent un cisaillement sur le liant. Dans le cas du DSR, les deux plateaux représentent ces granulats. Le matériau est soumis à des sollicitations sinusoïdales cycliques à composante continue nulle. Les essais DSR peuvent être effectués selon deux modes :

- Test en distorsion contrôlée : une rotation est appliquée à l'échantillon afin de mesurer la contrainte résultante.
- Test en cisaillement contrôlé : un couple est appliqué à l'échantillon afin de mesurer la déformation résultante.

Les Tableau 21 et 22 expliquent les deux modes de fonctionnement du système de mesure.

Oscillation avec déformation de cisaillement contrôlée	Paramètres prédéfinis	Résultats
Données brutes du DSR	Angle de déflexion $\varphi(t)$ (rad)	Couple $M(t)$ (N.m) Déphasage δ (°)
Paramètres rhéologiques calculés	Déformation $\gamma(t)$ (unité = 1)	Contrainte de cisaillement $\tau(t)$ (Pa) Déphasage δ (°)

Tableau 21 Tests oscillatoires en distorsion contrôlée

Oscillation avec contrainte de cisaillement contrôlée	Paramètres prédéfinis	Résultats
Données brutes du DSR	Couple $M(t)$ (N.m)	Angle de déflexion $\varphi(t)$ (rad) Déphasage δ (°)
Paramètres rhéologiques calculés	Contrainte de cisaillement $\tau(t)$ (Pa)	Déformation $\gamma(t)$ (unité = 1) Déphasage δ (°)

Tableau 22 Tests oscillatoires en cisaillement contrôlé

Le DSR n'enregistre que deux signaux : le couple et la rotation angulaire. Toutes les autres propriétés mécaniques sont calculées en utilisant ces deux paramètres et les facteurs de correction de l'instrument. La rhéologie de cisaillement dynamique se concentre sur la détermination de la norme de module de cisaillement complexe G^* et de l'angle de phase δ . Ces deux paramètres sont utilisés pour décrire les propriétés viscoélastiques dans des conditions de chargement de cisaillement sinusoïdal.

Dans la Figure 45 (gauche), l'onde de l'oscillation est donnée pour un essai à contrainte contrôlée : un signal de couple à la fréquence f est appliqué sur l'échantillon générant une réponse (déformation) après un retard de phase. Dans la Figure 45 (droite), un schéma de chargement et de déformation dans un échantillon placé entre les deux plateaux est présenté.

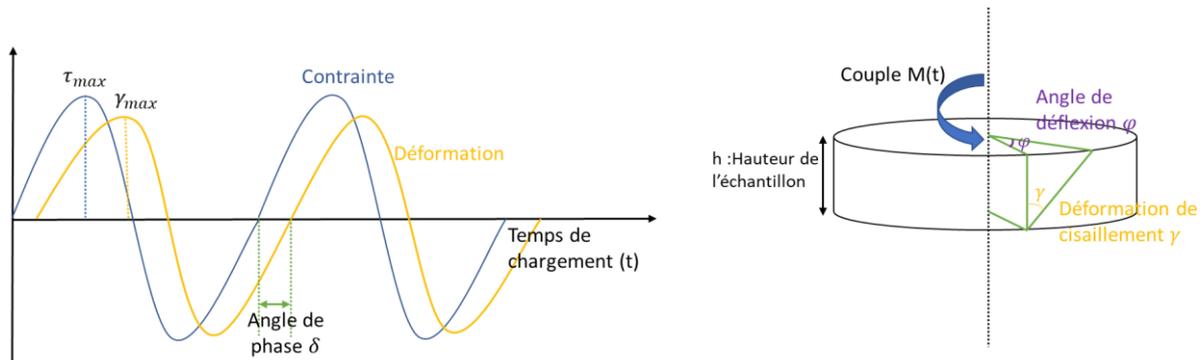


Figure 45 Essai à contrainte contrôlée et la déformation résultante avec l'angle de phase (gauche) et un schéma de chargement et de déformation dans un échantillon (droite)

Le module complexe de cisaillement G^* est calculé comme le ratio des amplitudes de la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement, donné par l'équation suivante :

$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} \quad \text{Équation 30}$$

La contrainte maximale de cisaillement et la déformation maximale de cisaillement sont calculées par les équations suivantes :

$$\tau_{max} = \frac{M \cdot r}{I} = \frac{2 \cdot M}{\pi r^3} \quad \text{Équation 31}$$

$$\gamma_{max} = \frac{\varphi \cdot r}{h} \quad \text{Équation 32}$$

Avec,

τ_{max} : contrainte maximale de cisaillement (N/mm²) ;

M : (ou T) couple (N.mm) ;

r : rayon des plateaux parallèles ou rayon de l'éprouvette (mm) ;

I : (ou J) moment d'inertie (mm⁴) ;

γ_{max} : déformation maximale de cisaillement ;

φ : (ou θ) angle de déflexion (rad) ;

h : hauteur de l'échantillon (ou entrefer) (mm).

L'angle de phase est mesuré comme le retard entre les signaux de contrainte et de déformations, présenté dans la Figure 45 (gauche) et calculé par l'équation suivante :

$$\delta = \omega \cdot \Delta t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t \quad \text{Équation 33}$$

Avec,

δ : angle de phase (rad) ;

ω : fréquence angulaire du chargement sinusoïdal (rad/s) ;

f : fréquence du chargement sinusoïdal (Hz).

II.4.1.1. Choix de la géométrie

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, la configuration la plus utilisée pour tester les liants bitumineux est la configuration plan-plan PP. Cependant, lorsqu'on utilise deux plaques parallèles (« plan-plan »), les distributions de déformation et de contrainte de cisaillement dans l'échantillon ne sont pas homogènes. En particulier, leurs magnitudes varient le long du rayon de l'échantillon et atteignent leurs valeurs maximales au bord extérieur.

Au contraire, des distributions homogènes de contraintes et de déformations sont obtenues en utilisant une plaque supérieure conique (configuration « cone-plan »). Le Tableau 23 représente une comparaison entre les deux types de configuration.

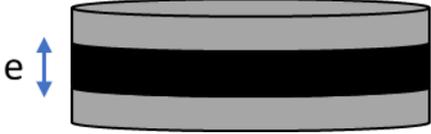
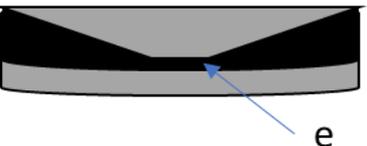
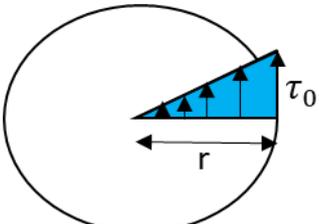
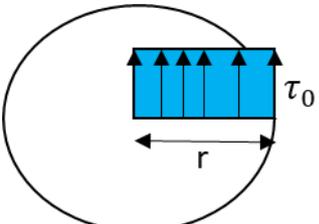
Géométrie	Plan-Plan PP	Cone-Plan CP
Schéma		
Champs de contrainte de cisaillement		
Entrefer (e)	1 mm à 3 mm	50 µm à 100 µm
La dilatation thermique des matériaux fait que l'entrefer varie énormément, cette variation est	Non importante	Importante

Tableau 23 Tableau comparatif entre PP et CP

Woldekidan, 2011 a essayé de comparer les deux géométries en testant des échantillons de bitume et de mastic. Le Tableau 24 résume les paramètres des essais réalisés.

Matériaux	Type de test	Géométrie	Diamètre (mm)	Températures
Bitume B40/60 - Mastic (B70/100+ fines $d \leq 0.063 \text{ mm}$)	Oscillation en fréquence	PP	8	-10°C à 20°C
		PP	25	30°C à 60°C
		CP	8	-10°C à 20°C
		CP	25	30°C à 60°C

Tableau 24 Les différentes géométries et températures utilisées par Woldekidan, 2011

Pour le bitume de grade 40/60, la Figure 46 montre que les mesures de la norme du module complexe et de l'angle de phase obtenues à partir des géométries CP et PP sont en accord. La Figure 47 montre la comparaison entre les résultats des tests CP et PP pour le mastic. Pour les mesures effectuées à des températures basses, l'utilisation du CP semble fournir une estimation du module complexe inférieur par rapport aux résultats de la géométrie PP. Les mesures CP effectuées à des températures plus élevées, où un cône de 25 mm de diamètre a été utilisé, montrent des résultats incohérents. Cette différence entre les résultats est claire à partir des données d'angle de phase à une température de 50 °C (Figure 47). La variation observée au niveau des résultats est due à la hauteur de l'entrefer (gap) qui est égale à 65 μm et les angles de cône utilisés de diamètre 25 mm. À la pointe du cône et en son voisinage, les particules solides dans l'échantillon, c'est-à-dire les fillers, se coincent éventuellement.

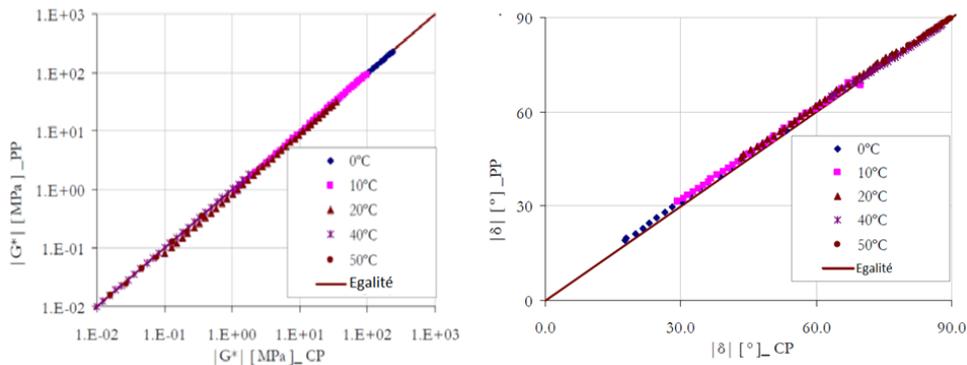


Figure 46 Comparaison des modules complexes et angles de phase obtenus en utilisant les configurations CP et PP (Bitume) (Woldekidan, 2011)

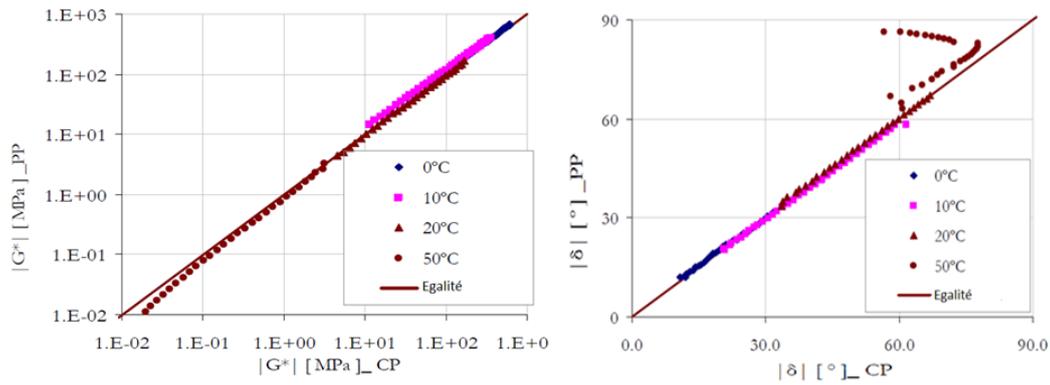


Figure 47 Comparaison des modules complexes et angles de phase obtenus en utilisant les configurations CP et PP (mastic) (Woldekidan, 2011)

Par conséquent, l'utilisation de la configuration cône-plan CP n'est pas recommandée pour tester des pâtes granulaires.

Dans cette thèse, des essais sont réalisés en utilisant un DSR équipé des plateaux parallèles PP afin de caractériser le bitume, le mastic et le mortier.

II.4.1.2. Hauteur de l'entrefer

L'entrefer (ou gap) est la distance qui sépare les deux plateaux parallèles. D'autre façon, la hauteur de l'entrefer représente la hauteur de l'échantillon. Le réglage de l'entrefer dans un intervalle de 0.5 mm à 2 mm a été trouvé satisfaisant pour des liants bitumineux à des températures variant entre 5°C à 85°C. Une valeur de 2 mm pour des plateaux de diamètre 8 mm et une valeur de 1 mm pour des plateaux de 25 mm sont recommandées (NF EN 14770). Si l'entrefer est trop petit, l'essai sera influencé plus fortement par les effets de glissement à la paroi, donnant des résultats trop faibles. Si l'entrefer est trop grand, juste une partie de l'échantillon sera cisailée et dans ce cas, les valeurs obtenues seront également trop faibles (Mezger, 2017).

Dans le cas d'un essai sur des dispersions ou sur des mélanges bitumineux contenant des particules solides, il faut respecter une règle empirique : l'entrefer doit être au moins 10 fois plus grand que la taille maximale des agglomérats de solide dans l'échantillon (Mezger, 2017). Par exemple, pour un PP de 25 mm, le réglage de l'entrefer pour la position de mesure est généralement 1 mm. En conséquence, la taille de particule maximale admissible serait d'environ 100 µm.

Après des échanges avec le fournisseur du DSR Anton Paar concernant la hauteur de l'entrefer, il a été annoncé que les essais peuvent se faire avec un entrefer e limite de 5 fois plus grand que la taille maximale des particules solides (d) dans le mélange, et qui ne dépasse pas les 3 mm ($e \leq 5d$ avec $e \leq 3mm$). Dans ce cas, la taille de particule maximale acceptable sera :

- Pour les PP de 25 mm avec un entrefer généralement de 1 mm, $d_{max} = 200 \mu m$,
- Pour les PP de 8 mm avec un entrefer généralement de 2 mm, $d_{max} = 400 \mu m$.

Dans notre recherche, la taille $d_{max} = 250 \mu m$ est adoptée pour le mortier afin de respecter l'hypothèse mentionnée ci-avant. Ce mortier sera testé juste en utilisant le PP8.

II.4.2. Procédure expérimentale

II.4.2.1. Préparation de l'échantillon

- Détermination de la TBA du matériau testé selon l'EN 1427, si elle n'est pas connue.
- Pré échantillonnage du matériau à tester dans des pots de pénétrabilité (une masse d'environ 50 g) en respectant l'EN 12594.
- Chauffage de l'échantillon à l'étuve à une température de 85 ± 5 °C au-dessus du point de ramollissement du matériau ou à 180 °C en adoptant la valeur la plus faible. Les échantillons ne doivent pas être réchauffés plus de deux fois (NF EN 14770).
- Pour des échantillons de 50 à 100 g, la durée de réchauffage est de 30 minutes.
- Après chauffage, mélange du matériau avec une spatule pour assurer l'homogénéité.
- Coulage du matériau dans des moules en silicone en fonction des dimensions de l'échantillon (voir Figure 48).
- Stockage des échantillons pour une durée de 12 heures minimum avant d'être testés. Ces pastilles sont couvertes et stockées à l'air ambiant (Voir Figure 48).



Figure 48 Coulage et stockage des échantillons de liant

II.4.2.2. Choix de la géométrie

En fonction du matériau et de la température de l'essai, le diamètre de la géométrie est choisi.

- Les plateaux de 25 mm et d'entrefer 1 mm sont généralement utilisés pour déterminer un module de cisaillement entre 1 kPa et 100 kPa,
- Les plateaux de 8 mm et d'entrefer 2 mm sont généralement utilisés pour déterminer un module de cisaillement entre 100 kPa et 10 MPa,
- Les plateaux de 4 mm et d'entrefer 1.75 mm sont généralement utilisés pour déterminer une rigidité au-delà de 10 MPa (cette géométrie n'est pas utilisée dans le cadre de ce projet).

Généralement, la géométrie PP25 est adaptée pour les essais réalisés à des températures supérieures à 20°C alors que la PP8 est utilisée à des températures entre -10°C et 20°C.

II.4.2.3. Placement de l'échantillon au DSR

Le démoulage et le chargement du rhéomètre se font après la mise en place de la géométrie. La position de pose de l'échantillon consiste à une distance de 10 mm séparant les deux plateaux parallèles. Le placement de l'échantillon sur le DSR est présenté dans la Figure 49. Les plateaux du rhéomètre sont préchauffés à une température égale à celle de ramollissement du matériau plus $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ou à $90 \pm 5^\circ\text{C}$, en adoptant la température la plus basse entre ces deux valeurs, pendant 30 minutes. Dans notre cas, pour les matériaux fabriqués avec du liant neuf, la température de préchauffage est 80°C alors que pour les matériaux contenant du liant d'AE, la température de préchauffage est de 90°C . Ce préchauffage permet une bonne liaison de l'échantillon aux plateaux.



Figure 49 Mise en place des échantillons sur le rhéomètre en utilisant les géométries PP25 (gauche) et PP8 (droite)

II.4.2.4. Réglage de l'entrefer

L'entrefer est réglé à 0.05 mm de plus de sa valeur finale. La température de liaison est maintenue pendant 5 min. Ensuite, l'arasage de l'éprouvette est effectué à l'aide d'une spatule de sorte que le liant couvre entièrement le plateau de mesure. Après arasage, le plateau opposé est baissé jusqu'à la valeur fixée pour l'entrefer (voir Figure 50). Enfin, l'échantillon est prêt à être testé.



Figure 50 Les échantillons prêts à être testés

II.4.2.5. Détermination de l'intervalle viscoélastique linéaire DVL

La rhéologie des matériaux bitumineux testés dans ce projet est étudiée dans le domaine des petites déformations. En effet, les paramètres rhéologiques $|G^*|$ et φ ne peuvent être déterminés que si le comportement des matériaux testés est viscoélastique linéaire. Il est donc essentiel de définir le domaine de linéarité en utilisant le DSR.

Pour ce faire, une étude de linéarité a été réalisée sur les bitumes, les mastics et les mortiers. Cette étude consiste à déterminer la norme du module complexe de cisaillement $|G^*|$ en sollicitant l'éprouvette progressivement à des niveaux de déformations variés (0.0005% à 10%). La limite du domaine linéaire γ_{lim} est définie comme la déformation à laquelle $|G^*|$ perd 5% de sa valeur initiale. En dessous de γ_{lim} , G^* est considéré comme indépendant du niveau de distorsion imposé à l'éprouvette (NF 14770). Pour chaque température d'essai module complexe, le DVL est déterminé.

Les valeurs de γ utilisées dans les essais de module sont choisies de façon à être inférieures à γ_{lim} . Et dans ce but et pour être sûr qu'on est dans le domaine viscoélastique linéaire, γ est choisie d'une façon à représenter 80% γ_{lim} . Il est recommandé de choisir le plus grand taux de distorsion possible vu que ce dernier permet d'avoir une meilleure résolution des signaux τ et γ (El Mansouri, 2016).

La Figure 51 présente un résultat type obtenu pour le liant neuf B50/70 testé à $T= 15^\circ\text{C}$. Elle montre l'évolution de la norme du module complexe mesurée suivant le taux de distorsion imposé. On remarque que l'évolution de $|G^*|$ est quasiment constante aux faibles niveaux de distorsion et donc, le comportement du bitume se trouve dans le domaine linéaire. Au-delà de 2.5%, on observe une chute importante de la valeur du module ce qui engendre une perte supérieure à 5% de sa valeur initiale. Dès lors, le comportement du liant devient non linéaire et l'essai de linéarité est arrêté. Les résultats de la Figure 51 montrent que le comportement du liant testé à 15°C reste linéaire lorsque la distorsion γ est inférieure à 2.5%.

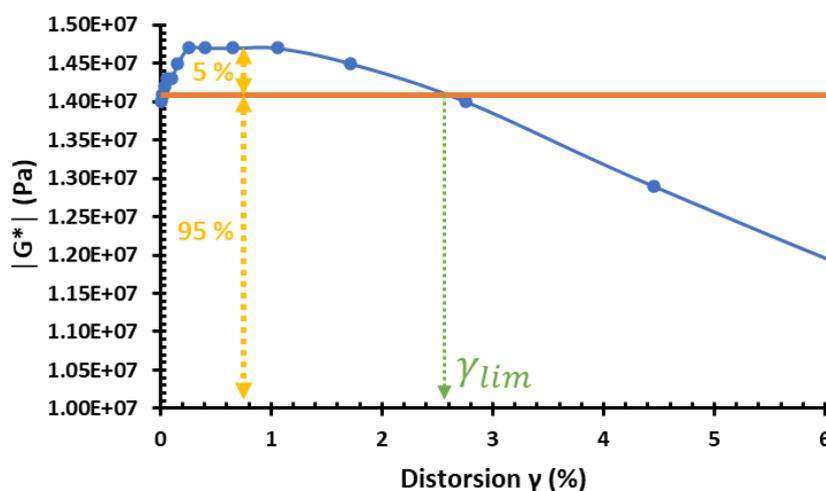


Figure 51 Etude de linéarité du B50/70 à $T= 15^\circ\text{C}$

Une fois que le domaine linéaire est défini, on choisit le taux de distorsion qui permet d'avoir des signaux de qualité de τ et γ . Le choix effectué est de seuiller la distorsion à 80% de γ_{lim} pour toutes les configurations d'essais. Dans l'exemple présenté, $\gamma_{lim} = 2.5\%$, et pour être sûr de rester dans le domaine linéaire, le taux de distorsion choisi est égal à 80% γ_{lim} donc soit 2%.

L'ensemble des résultats obtenus pour les différentes températures et matériaux est présenté dans la section résultats.

II.4.2.6. Détermination de module complexe en cisaillement et de l'angle de phase

Dans cette étude, l'essai de module complexe de cisaillement est réalisé en mode de déformation imposée. La déformation déterminée dans le paragraphe précédent $80\% \gamma_{lim}$ est imposée à l'échantillon, en faisant varier les fréquences et ceci pour différentes températures. Pour chaque température d'essai, une déformation est imposée et un balayage de fréquences est effectué en commençant par la fréquence la plus basse et en continuant vers la plus élevée. Une fois l'essai est terminé à la première température, un passage à la deuxième température est fait avec une vitesse de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A chaque température et fréquence de sollicitations, le module complexe de cisaillement et l'angle de phase sont mesurés. Un exemple des résultats d'un essai de module complexe pour le B50/70 est présenté dans les Figure 52 et 53.

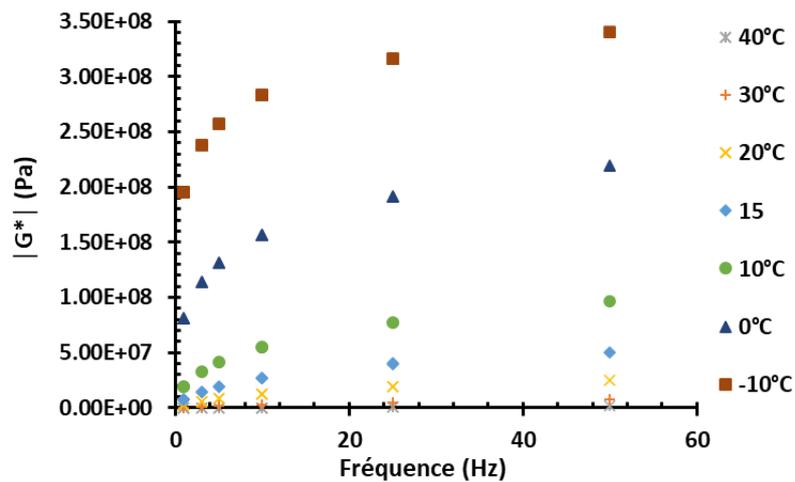


Figure 52 Isothermes en norme du module complexe du B50/70

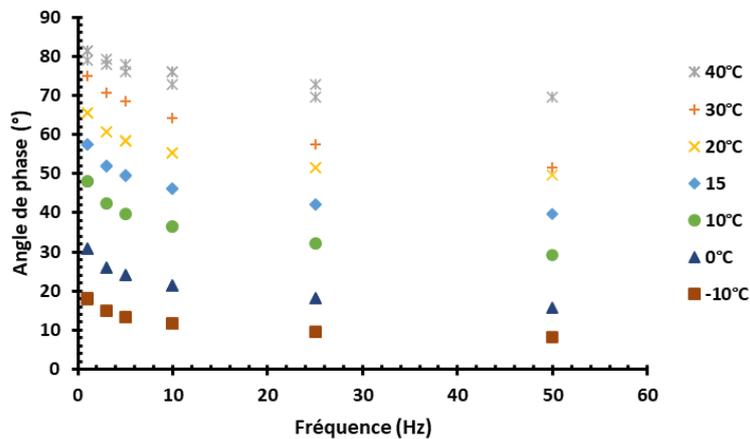


Figure 53 Isothermes en angle de phase complexe du B50/70

II.4.2.7. Vérification de l'endommagement de l'éprouvette

Dans ce paragraphe, une méthode, permettant de déterminer le dommage apparent en fonction de chaque température de mesure, est présentée. Ce dommage D est engendré par la séquence de cycles de sollicitation. Dans ce but, le matériau est testé à deux reprises à la même fréquence de sollicitation pour chaque température, soit avant et après la séquence de balayage des fréquences d'essai.

La Figure 54 présente le cycle de sollicitations imposé dans le cas des bitumes. Comparer les valeurs de $|G^*|$ mesurées à une fréquence au début (1 et 3 Hz dans ce cas) avec celles mesurées à la fin de l'essai (3 et 1 Hz retour) permet de déterminer le dommage. La norme NF EN 12697-26 précise que l'échantillon ne sera plus utilisable pour la suite de l'essai de module complexe si la différence de rigidité avant et après l'essai dépasse 3 %.

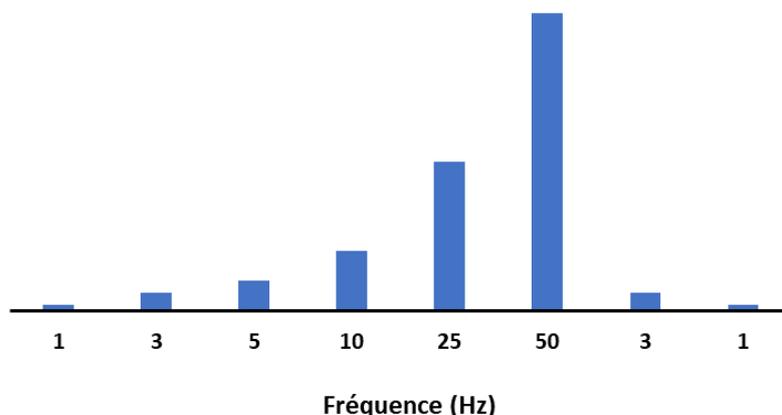


Figure 54 Cycle de sollicitations imposé pour les bitumes

Le dommage apparent peut s'exprimer par l'équation 34 suivante :

$$D = 1 - \frac{|G_{Re}^*|}{|G^*|} \quad \text{Équation 34}$$

Avec,

$|G^*|$: norme du module complexe de cisaillement obtenue à une fréquence au début de l'essai ;

$|G_{Re}^*|$: norme du module complexe de cisaillement obtenue à la même fréquence à la fin de l'essai (retour).

La Figure 55 montre le dommage apparent D généré par la séquence de cycles de sollicitation pour chaque température d'essai du B50/70. Le dommage apparent mesuré pour les autres matériaux testés est présenté dans l'Annexe B.

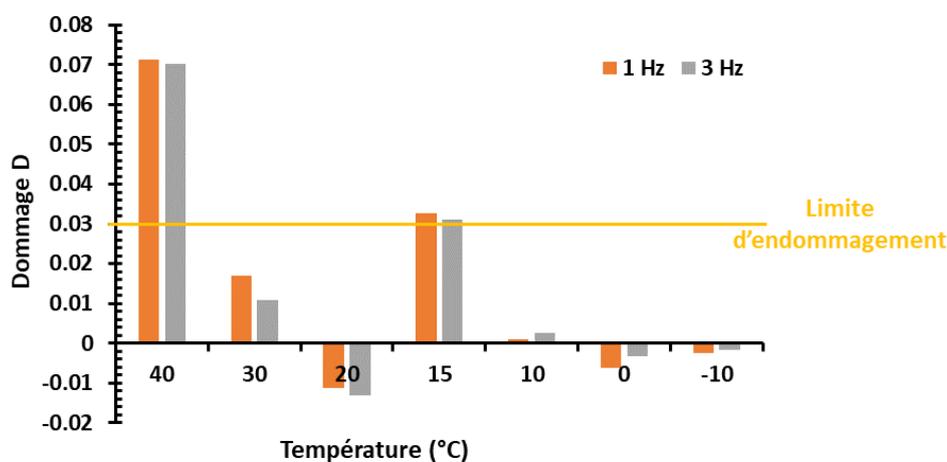


Figure 55 Evolution du dommage D par palier de température pour le bitume B50/70

D'après la Figure 55, on peut constater que pour les deux vitesses de sollicitations 1 Hz et 3 Hz, le dommage se trouve dans la limite d'endommagement imposée, à moins que le bitume

soit peu endommagé à l'isotherme 40°C. Cet endommagement peut être dû au choix inadéquat du taux de distorsion ou au fait que l'éprouvette a été très sollicitée vu que le même échantillon a subi des sollicitations à 20°C et à 30°C avant de passer à la température de 40°C. Pour les valeurs d'endommagement négatives (soit $D < 0$), une conservation de rigidité plutôt qu'un gain est considérée pour les matériaux testés (Lamothe, 2014).

Après chaque mesure à une température définie, l'endommagement de l'échantillon est vérifié. Si l'éprouvette n'est pas endommagée, l'essai continue avec le même échantillon en passant à la température suivante d'essai.

Une fois endommagé, l'échantillon est changé et remplacé par un autre qui est neuf. Dans ce cas, la mesure est refaite pour la dernière température. La même démarche est appliquée pour chaque température.

II.4.3. Résultats

Cette section est consacrée à la présentation et à l'analyse des résultats des essais de modules complexe de cisaillement réalisés sur des éprouvettes de bitume, mastic et mortier en utilisant le rhéomètre à cisaillement dynamique DSR. Les résultats de ce travail de recherche ont pour but de caractériser les différentes échelles du matériau GB ϵ +. Ils consistent à comparer le comportement du bitume à celui d'un mastic et d'un mortier et, enfin, à étudier l'influence de l'introduction d'AE sur la rhéologie des différentes échelles en comparant le comportement des matériaux neufs, vieux et mélanges dans le domaine viscoélastique linéaire. Ces résultats serviront aussi comme paramètres d'entrée pour les modèles numériques développés dans le chapitre 3 afin d'estimer le degré d'homogénéité du mélange entre les constituants neufs et vieux.

II.4.3.1. Présentation et analyse des résultats

La norme du module complexe de cisaillement et l'angle de phase sont les deux paramètres qui caractérisent le comportement thermomécanique des matériaux bitumineux dans le domaine des petites déformations (domaine viscoélastique linéaire VEL). Ces deux paramètres ne dépendent que de la température et la fréquence de chargement, si le principe d'équivalence temps-température (PETT) est respecté en tout point de l'échantillon. Ces deux données sont mesurées à des températures et fréquences déterminées en utilisant le DSR.

Afin de caractériser les matériaux sur une large gamme de températures et de fréquences, le modèle 2S2P1D est utilisé. Ce modèle est adopté pour construire les courbes représentant le comportement rhéologique des matériaux bitumineux testés durant ce projet. Les données expérimentales sont traitées en utilisant le logiciel Viscoanalyse (Chailleux, 2013) afin d'obtenir les paramètres du modèle 2S2P1D. Ensuite, ces résultats expérimentaux sont ajustés en utilisant ce modèle permettant d'obtenir les courbes maîtresses, les plans Cole-Cole et les espaces de Black des matériaux testés sur toute la gamme de températures et de fréquences.

Les courbes présentées par la suite sont à une température de référence de 15°C pour tous les matériaux testés. Un exemple de chaque courbe est présenté pour le bitume neuf dans la section II.4.3.1.2. Les isothermes correspondant aux matériaux testés sont présentés en Annexe C.

II.4.3.1.1. Distorsions imposées

Les Tableaux 25, 26 et 27 présentent les différentes valeurs de γ_{lim} obtenues par les essais de linéarité présentés dans le paragraphe II.4.2.5 pour les différents matériaux testés dans le cadre de ce projet.

❖ Pour le bitume

Géométrie	Température (°C)	γ_{lim} (%)		
		Bitume neuf	Bitume AE	Bitume mélange
PP 8 mm	-10	0.05	0.1	0.002
	0	0.16	0.4	0.1
	10	0.8	1	0.13
	15	2	1.4	0.35
	20	3	1.6	1.4
PP 25 mm	30	4	1.26	1.4
	40	7	1.5	2

Tableau 25 Distorsions imposées durant l'essai de module complexe pour les bitumes

❖ Pour le mastic

Géométrie	Température (°C)	γ_{lim} (%)		
		Mastic neuf	Mastic AE	Mastic mélange
PP 8 mm	-5	0.028	0.0008	0.008
	0	0.04	0.001	0.008
	10	0.06	0.001	0.04
	15	0.08	0.004	0.07
	20	0.47	0.1	0.3

Tableau 26 Distorsions imposées durant l'essai de module complexe pour les mastics

❖ Pour le mortier

Géométrie	Température (°C)	γ_{lim} (%)			
		Mortier neuf	Mortier AE	Mortier mélange (100 % d'homogénéité)	Mortier mélange (? % d'homogénéité)
PP 8 mm	-5	0.008	0.0001	0.01	0.01

	0	0.024	0.00096	0.012	0.015
	10	0.032	0.0016	0.02	0.02
	15	0.048	0.0016	0.1	0.06
	20	0.16	0.01	0.1	0.1

Tableau 27 Distorsions imposées durant l'essai de module complexe pour les mortiers

D'après ces résultats, on constate que :

- Les limites du domaine DVL augmentent avec la température pour tous les matériaux testés. A basse température, les matériaux bitumineux deviennent rigides et donc plus susceptibles à être fissurés à des petites valeurs de déformations. Cela explique la chute de module à des petites valeurs de γ_{lim} à des basses températures.
- Le domaine DVL des pâtes granulaires est généralement plus étroit que celui des bitumes. Delaporte, 2007 a trouvé que les limites de linéarité des mastics sont plus faibles que celles des bitumes. Cela peut être expliqué par l'effet rigidifiant des dispersions dans les mélanges (Mezger, 2017).

II.4.3.1.2. Bitume neuf B5070

❖ Courbes maitresses

Afin de tracer la courbe maitresse en module, les valeurs du module complexe de cisaillement sont translattées à une fréquence équivalente f (à une température de référence de 15°C). La courbe maitresse obtenue dans la Figure 56 est une courbe unique continue. Le liant B5070 vérifie bien le PETT.

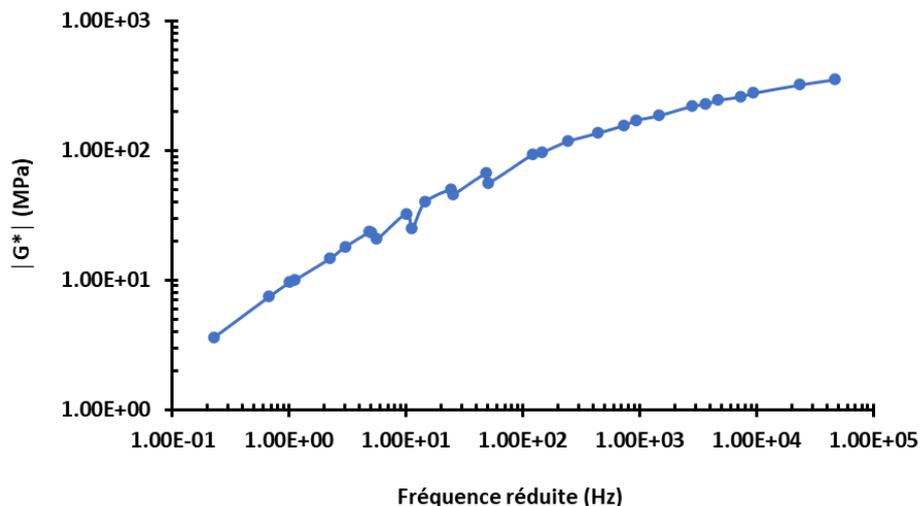


Figure 56 Courbe maitresse de la norme du module complexe du bitume neuf B5070

A partir des isothermes en angle de phase présentés dans la Figure 53, la courbe maitresse est tracée en utilisant les coefficients de translation. La Figure 57 montre que les angles de phases du bitume B5070 débutent à 65° et puis commencent à chuter avec les fréquences. On peut constater que ce bitume présente un comportement viscoélastique linéaire sur toute la gamme de températures et fréquences. A partir de ces courbes maitresses présentées dans

les Figure 56 et 57, on peut conclure que quand la rigidité diminue, la viscosité augmente, c'est l'une des propriétés primordiales d'un matériau viscoélastique.

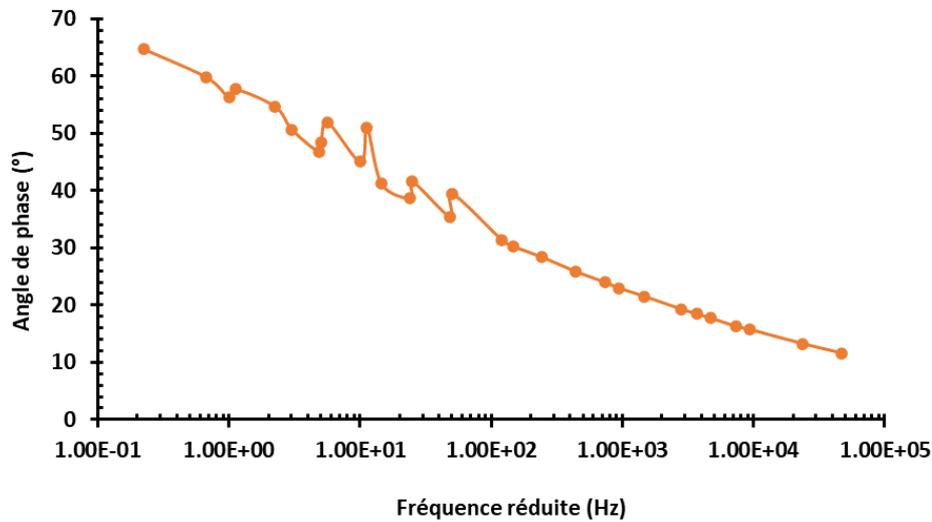


Figure 57 Courbe maîtresse de l'angle de phase du bitume neuf B5070

❖ Plan Cole-Cole

La Figure 58 présente l'évolution du G^* dans le plan Cole-Cole. Ce plan est composé de tous les points mesurés formant une cloche allant de l'origine du graphique (correspondent aux valeurs mesurées à des hautes températures et/ou basses fréquences) jusqu'à l'intersection avec l'axe des abscisses (correspondent aux valeurs mesurées à des basses températures et/ou hautes fréquences). Ce point d'intersection est noté G_∞ . Les valeurs mesurées à hautes températures ne sont pas très claires. Il est quasiment impossible de mesurer le module G_∞ d'un bitume expérimentalement. Cette valeur de module est estimée par le modèle 2S2P1D.

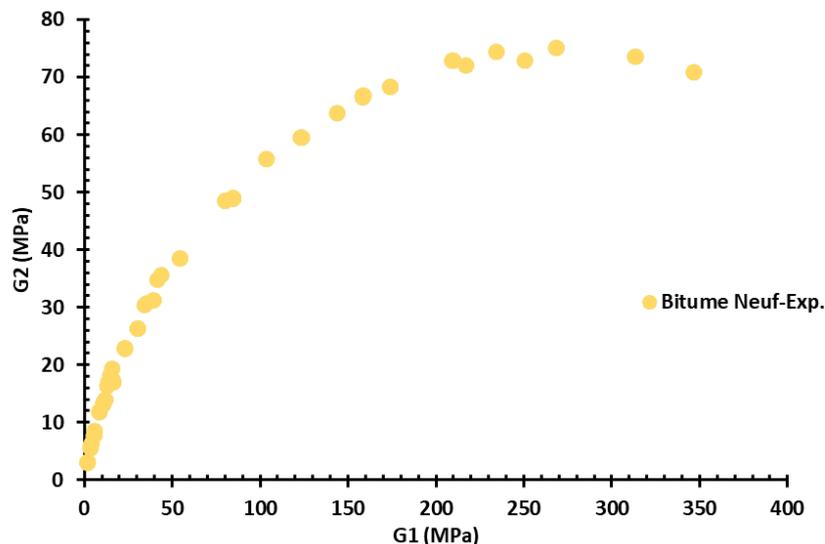


Figure 58 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes du B5070

❖ Espace de Black

La Figure 59 illustre l'évolution de $|G^*|$ en fonction de l'angle de phase φ dans l'espace de Black. Une échelle logarithmique est utilisée pour représenter le module complexe, ce qui permet de montrer l'évolution du G^* sur toute la gamme de températures.

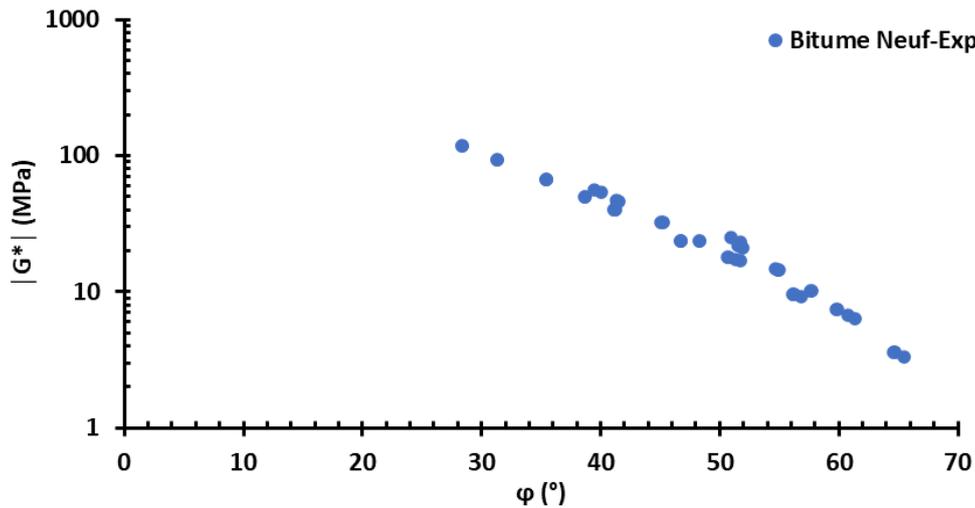


Figure 59 Représentation du module complexe dans l'espace de Black du B5070

II.4.3.1.3. Paramètres de calage du modèle 2S2P1D

Le comportement rhéologique des matériaux testé durant ce projet est représenté par le modèle 2S2P1D. Ce modèle est présenté dans le chapitre 1. Afin d'effectuer le calage des valeurs expérimentales mesurées à partir de l'essai de module complexe, les sept paramètres du modèle 2S2P1D sont déterminés par itération en utilisant le logiciel Viscoanalyse : G_0 , G_∞ , k , h , δ , τ et β jusqu'à obtention d'un calage convenable du matériau testé dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black. La Figure 60 représente le calage du bitume neuf B5070 dans le plan Cole-Cole.

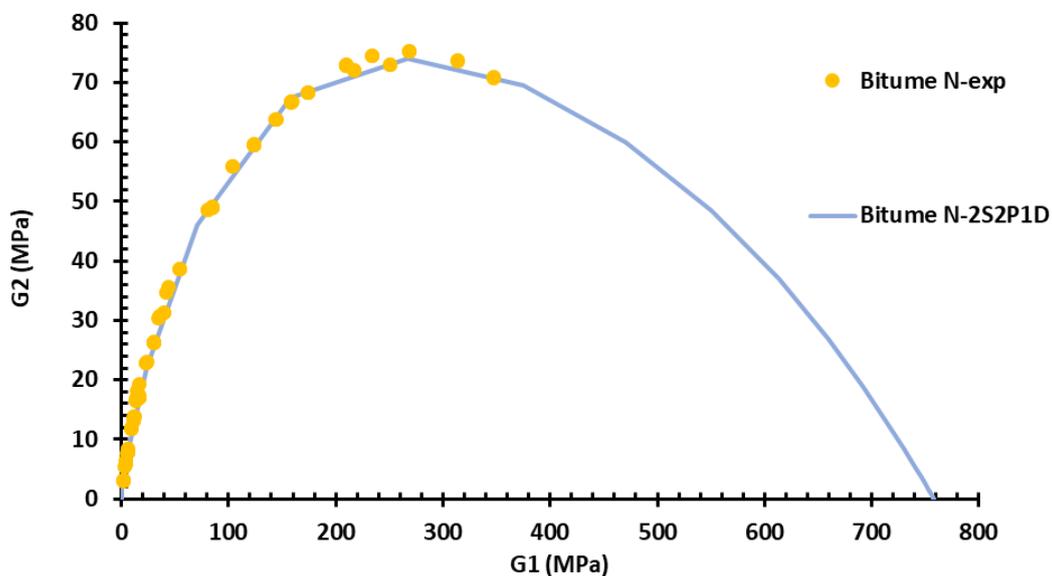


Figure 60 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés du B5070

D'après la Figure 60, on peut observer que le calage du bitume dans le plan Cole-Cole avec le modèle 2S2P1D est bon.

Après avoir calé les valeurs expérimentales du module complexe en utilisant le logiciel Viscoanalyse, les paramètres du modèle rhéologique 2S2P1D sont obtenus pour les différents matériaux testés. Ces paramètres sont résumés dans le Tableau 28.

$T_{ref} = 15^{\circ}C$		G_0 (MPa)	G_{∞} (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β
Bitume	Neuf	0.00E+00	7.58E+02	0.194	0.540	2.009	8.87E-05	7.99E+01
	AE	1.09E+01	1.10E+03	0.152	0.390	1.500	4.63E-04	2.55E+02
	Mélange	0.00E+00	8.66E+02	0.168	0.463	1.774	2.18E-04	2.07E+02
Mastic	Neuf	1.70E-01	1.41E+03	0.202	0.556	2.019	4.09E-04	3.56E+01
	AE	3.30E+01	1.86E+03	0.156	0.405	1.512	2.11E-02	6.12E+01
	Mélange	1.94E+00	1.81E+03	0.173	0.492	1.443	1.50E-03	8.47E+01
Mortier	Neuf	1.70E-01	1.72E+03	0.208	0.572	2.019	5.85E-04	2.49E+01
	AE	0.00E+00	2.24E+03	0.149	0.405	1.679	7.33E-02	1.40E+02
	Mélange (100% homogène)	1.57E+00	2.05E+03	0.172	0.483	1.540	7.58E-03	9.99E+01
	Mélange (? % homogène)	8.60E+00	1.99E+03	0.172	0.482	1.870	3.60E-03	4.73E+01

Tableau 28 Paramètres du modèle 2S2P1D pour les matériaux testés

Les valeurs minimales de la norme du module complexe G_0 sont négligeables. La valeur maximale de la norme du module complexe G_{∞} du mortier est supérieure à celle du mastic qui est aussi supérieure à celle du bitume. On peut conclure que le mortier est plus raide que le mastic qui est aussi plus raide que le bitume à basse température et/ou haute fréquence. Contrairement au travail de Forton et al., 2021, G_0 , G_{∞} , k et δ n'ont pas les mêmes valeurs constantes pour les liants neuf, vieux et mélange. D'après ce chercheur, cela est probablement expliqué par les essais qui sont effectués sur une large gamme de température (tests DSR effectués à des températures plus basses). Forton a testé le bitume à des températures allant de 25 à 85°C alors que dans notre étude le bitume est testé à des températures allant de -10 à 50°C, ce qui explique la différence.

II.4.3.1.4. Comparaison entre bitume, mastic et mortier

Des études bibliographiques ont montré que le mastic est plus rigide que le bitume qui le constitue. En effet, plus la concentration en fines augmente, plus le comportement du bitume se rigidifie entraînant un meilleur comportement du mélange bitumineux vis-à-vis de l'orniérage

et de la déformation à hautes températures. Cela est dû à des phénomènes physico-chimiques entre les granulats et le bitume (Chen & Peng, 1998, Little & Peterson, 2005).

En utilisant le DSR, on a constaté que le mortier présente une rigidité supérieure par rapport au mastic qui elle-même est supérieure à celle du bitume sur toute l'étendue de températures. Ce résultat est observable pour tous les états de matériaux : neuf (Figure 61), vieux (extrait d'AE) (Figure 62) et mélange (Figure 63). D'après ces figures, on peut remarquer que les plans Cole-Cole des mortiers sont au-dessus de ceux des mastics qui sont supérieurs à ceux des bitumes. Ceci est probablement expliqué par la présence des fillers qui absorbent les huiles des liants et forment un squelette granulaire constitué de fillers, résines et asphaltènes dans le cas de mastic et en ajoutant le sable dans le cas de mortier. Ce squelette granulaire améliore le comportement des bitumes et le rigidifie.

❖ Matériaux neufs

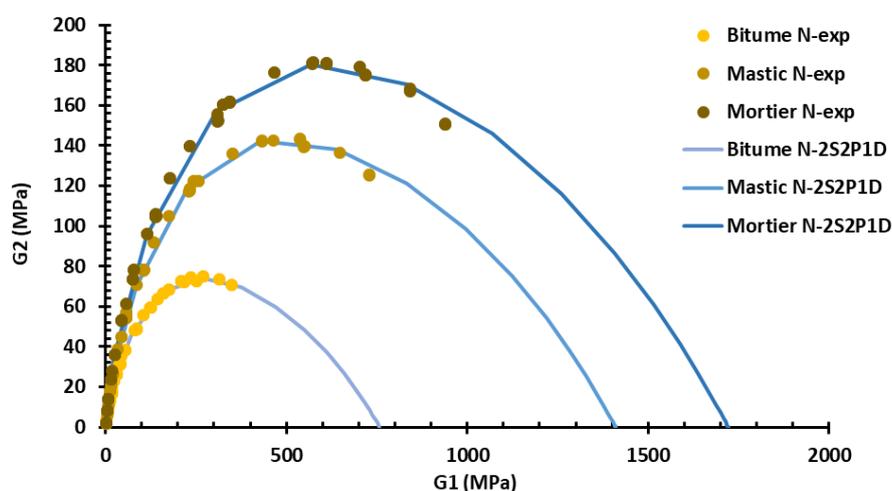


Figure 61 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des matériaux neufs

❖ Matériaux vieux (extraits d'AE)

Avant de commencer les extractions des matériaux à tester pour ce projet, une vérification est faite concernant les systèmes d'extraction (Annexe D). Pour la suite des essais, le système d'extraction en téflon est adopté pour récupérer le bitume vieux des AE.

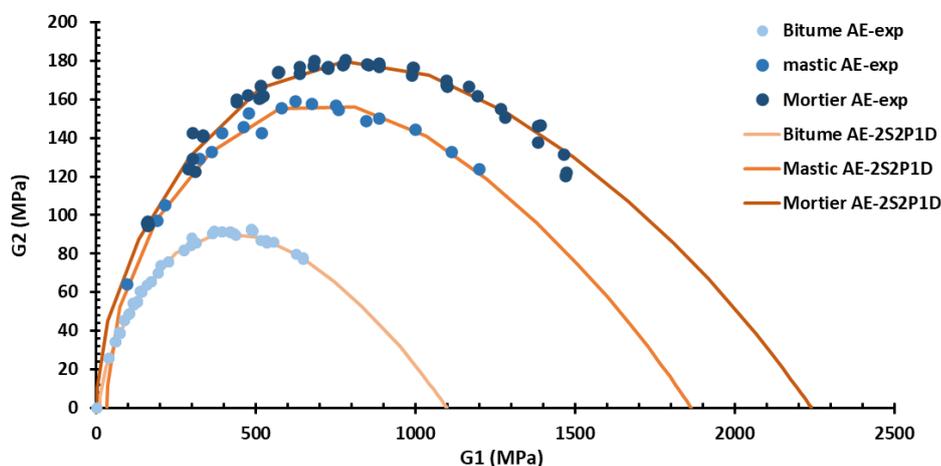


Figure 62 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des matériaux vieux (extraits d'AE)

❖ Matériaux mélanges

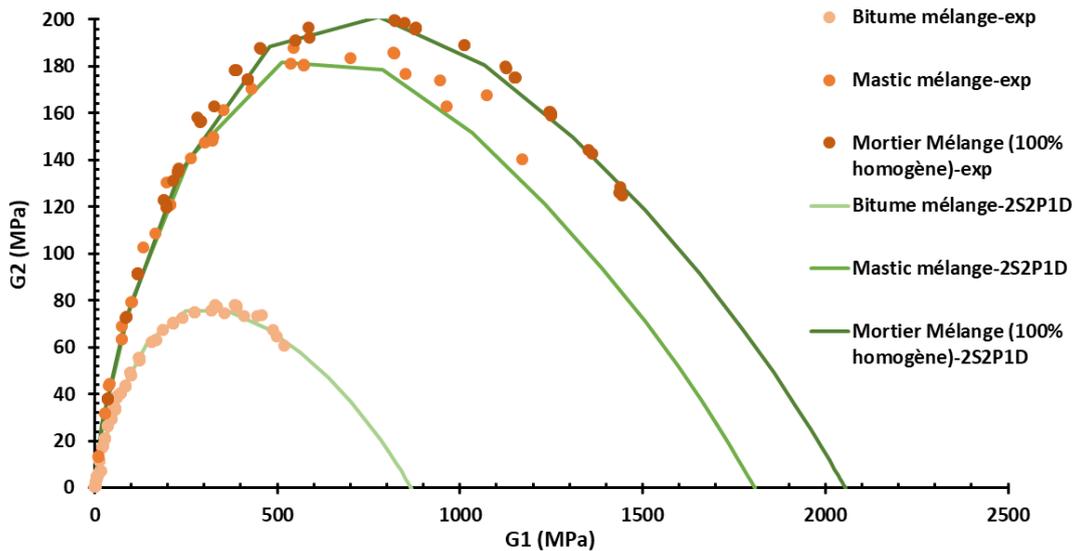


Figure 63 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des matériaux mélanges (Neuf+ vieux)

II.4.3.1.5. Prédiction du plan Cole-Cole par la méthode SHStS (Di Benedetto et al., 2004).

La méthode géométrique SHStS (Shift, Homothety, Shift and time-Shift) présentée dans le paragraphe I.1.1.4.2 consiste à prédire le module complexe d'un enrobé à partir du module complexe du liant. Dans cette section, cette méthode est appliquée afin de prédire le module complexe de cisaillement des mastics et des mortiers testés à partir de celui du bitume dont ils sont composés.

Les modules complexes de cisaillement du mastic et du mortier sont prédits en utilisant la relation suivante :

$$G_{\text{mélange}}^*(\omega, T) = G_{0\text{-mélange}} + [G_{\text{liant}}^*(10^\alpha \omega, T) - G_{0\text{-liant}}] \frac{G_{\infty\text{-mélange}} - G_{0\text{-mélange}}}{G_{\infty\text{-liant}} - G_{0\text{-liant}}} \quad \text{Équation 35}$$

Connaissant le module complexe de cisaillement du liant à une pulsation ω et une température T , le module du mélange (mastic ou mortier) peut être prédit au même couple de fréquence et température en ayant les valeurs de $G_{0\text{-mélange}}$, $G_{\infty\text{-mélange}}$ et α , où

- $G_{0\text{-mélange}}$ représente la norme du module complexe de cisaillement à hautes températures et/ou à basses fréquences ;
- $G_{\infty\text{-mélange}}$ représente la norme du module complexe de cisaillement à basses températures et/ou à hautes fréquences ;
- α est une constante qui dépend de la formulation du mélange et/ou du vieillissement du matériau pendant la fabrication. Elle représente le lien entre le temps de relaxation du mélange et celui du liant. Ce paramètre est obtenu par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\log(\tau_{\text{mélange}})}{\log(\tau_{\text{liant}})} \quad \text{Équation 36}$$

D'après le Tableau 28, les valeurs obtenues de G_0 sont négligeables. L'équation 36 peut être simplifiée :

$$G_{\text{mélange}}^*(\omega, T) = (G_{\text{liant}}^*(10^\alpha \omega, T)) \frac{G_{\infty\text{-mélange}}}{G_{\infty\text{-liant}}} \quad \text{Équation 37}$$

Cette méthode est appliquée pour prédire le comportement des mastics et des mortiers. Un exemple de prédiction du comportement du mastic neuf à partir du bitume neuf est présenté dans la Figure 64. D'après cette figure, on constate que cette transformation permet de simuler les modules expérimentaux du mastic neuf.

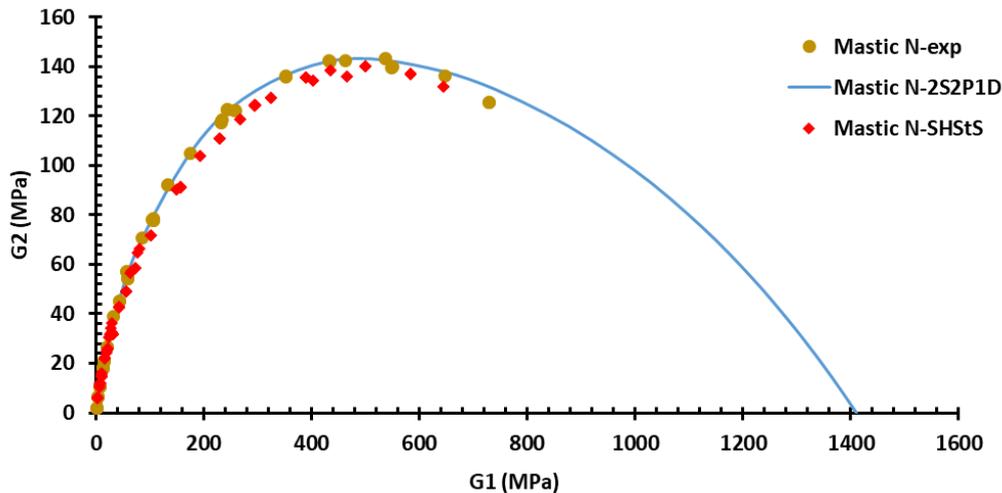


Figure 64 Données expérimentales et prédites du mastic neuf

Concernant la prédiction de la norme du module complexe de cisaillement du mortier neuf, deux transformations géométriques peuvent être adoptées :

- La première consiste à prédire le comportement du mortier (Mortier N1) à partir de celui du bitume dont il est issu,
- La deuxième consiste à prédire le comportement du mortier (Mortier N2) à partir de celui du mastic dont il est issu.

Les plans Cole-Cole résultants sont présentés dans la Figure 65 pour le Mortier N1 et le Mortier N2 respectivement. On peut observer que ces deux transformations simulent bien les valeurs expérimentales. En revanche, prédire le module complexe du mortier à partir du mastic semble donner des résultats plus proches des modules expérimentaux. Cela peut être dû au taux d'inclusions élevé dans le mortier en passant directement du bitume à l'échelle mortier par comparaison au taux d'inclusions à ajouter pour passer de l'échelle mastic à l'échelle mortier. Ces résultats montrent l'avantage d'adopter une étude multi-échelle afin de bien prédire le comportement de l'échelle finale enrobé.

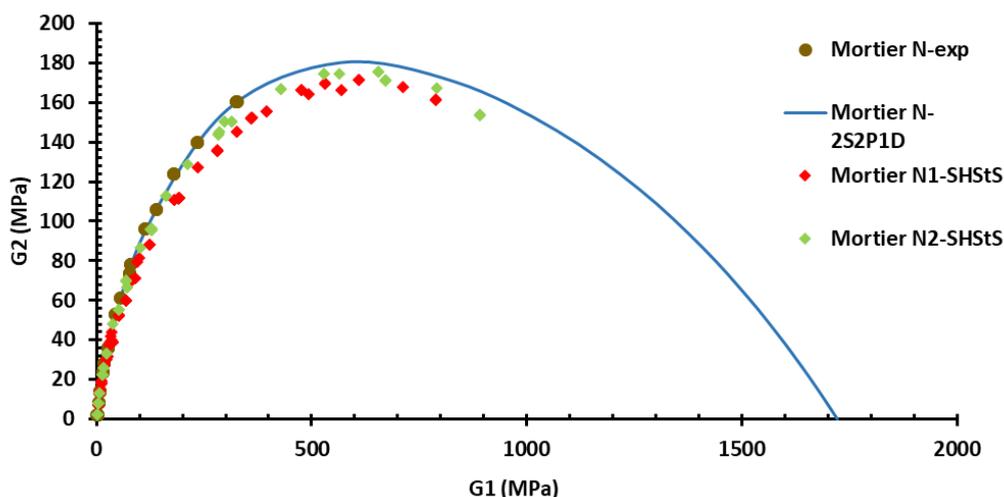


Figure 65 Données expérimentales et prédites du mortier neuf

Cette transformation était conçue afin de prédire le comportement de l'enrobé à partir de celui du liant. D'après ces résultats, elle paraît un bon outil pour prédire le module complexe de cisaillement des mastics et des mortiers bitumineux.

II.4.3.1.6. Comparaison entre neuf, vieux et mélange

L'objectif principal de cette section est d'observer les effets du mélange des matériaux neufs et extraits d'AE en termes de comportement viscoélastique des matériaux résultants.

Le rapport NCHRP (McDaniel et al. 2001) a démontré que lorsque le pourcentage de matériau recyclé utilisé dans les mélanges passe de 0 à 40 %, il entraîne des changements significatifs dans les caractéristiques mécaniques, principalement entre 20 et 40 % d'AE. Par conséquent, il augmente le module de rigidité et réduit la résistance à la fatigue. Ce résultat est aussi confirmé par les résultats des projets MURE et IMPROVMURE.

L'échelle finale GB&+ contient 40% d'AE. L'influence de ces AE est étudiée par des essais de modules à différentes échelles pour des matériaux neufs, vieux et leurs mélanges. Dans ce paragraphe, les résultats relatifs aux essais de module complexe sont présentés par les plans Cole-Cole obtenus par le modèle 2S2P1D après avoir vérifié leur conformité aux résultats expérimentaux dans les sections précédentes.

❖ Bitumes

Les résultats du bitume neuf B5070, du bitume vieux (extrait des AE utilisés dans la fabrication de la GB&+) ainsi que du bitume mélange « homogène » (en mélangeant 60% de bitume neuf et 40% de bitume vieux) sont présentés dans la Figure 66. On peut distinguer deux domaines :

- Pour les valeurs inférieures à ($G_1 = 200$ MPa, $G_2 = 65$ MPa) : pour les basses fréquences et les hautes températures, le bitume neuf est plus rigide que le bitume mélange et le bitume d'AE.
- Pour les valeurs supérieures à ($G_1 = 200$ MPa, $G_2 = 65$ MPa) : pour les hautes fréquences et les températures intermédiaires et basses, le bitume d'AE devient plus rigide que le bitume neuf et le bitume mélange.

Cela confirme le fait que l'évolution des propriétés rhéologiques dépend de la température. La tendance observée est liée à la modification de la structure colloïdale du bitume au cours du

vieillissement : le pourcentage en masse d'asphaltènes augmente, les fractions d'asphaltènes deviennent moins mobiles et s'agglomèrent plus facilement. Le bitume évolue vers un comportement de type " gel ", où les clusters d'asphaltènes s'agglomèrent. De plus, les fractions aromatiques évoluent en résines, et les résines en asphaltènes, d'où l'augmentation de la fraction asphaltène.

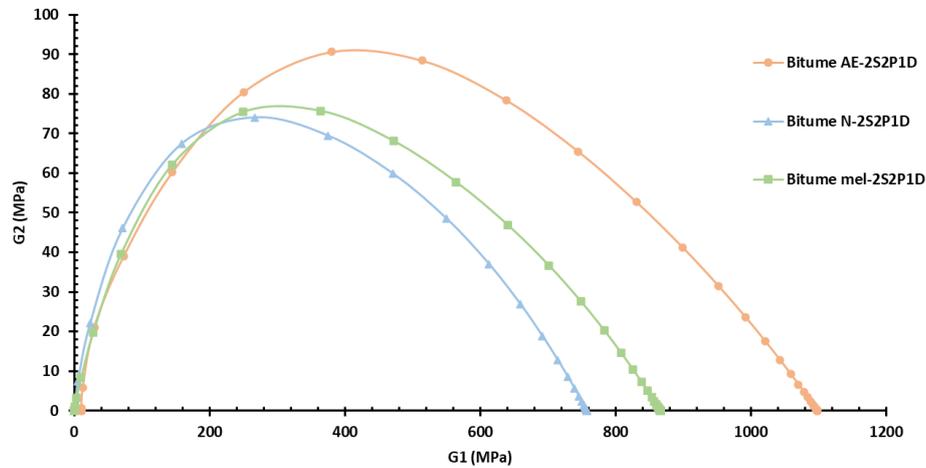


Figure 66 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes modélisés des différents bitumes

❖ Mastics

Les plans Cole-Cole du mastic neuf, mastic vieux et leurs mélanges sont présentés dans la Figure 67. Le mastic mélange est formé de 46.2% en volume des matériaux extraits d'AE (bitume et fines). Des comportements similaires aux ceux de bitumes sont observés. Le mastic vieux est le moins rigide à des températures hautes et intermédiaires et il devient le plus rigide pour les basses températures.

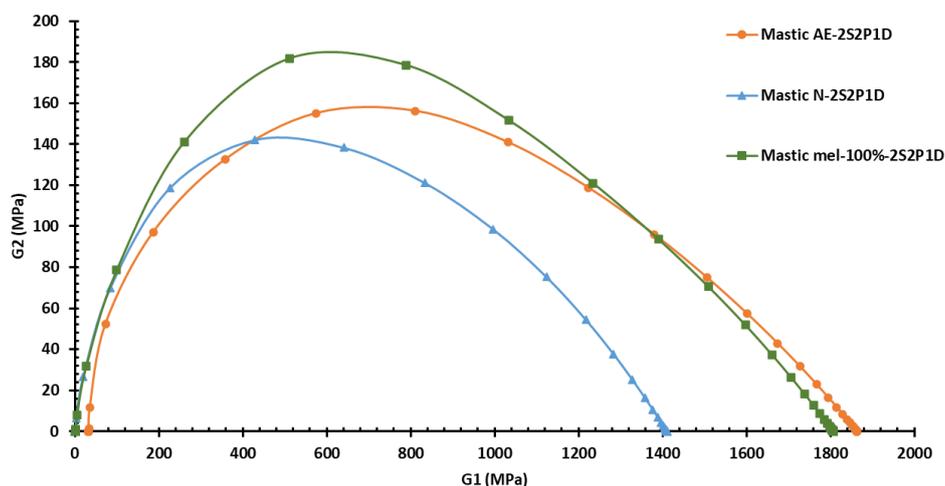


Figure 67 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes modélisés des différents mastics

❖ Mortiers

La Figure 68 illustre les plans Cole-Cole obtenus du mortier neuf, vieux ainsi que des mélanges. Comme les autres matériaux, le mortier vieux commence avec une basse rigidité à

des hautes températures et/ou basses fréquences par rapport aux mortiers neuf et mélanges. Ensuite, à des basses températures, ce matériau devient plus élastique que les autres.

Concernant le mortier avec le pourcentage inconnu d'homogénéité de mélange, il représente un plan Cole -Cole inférieur à celui du mortier avec 100% homogène. Cela permet de constater que le pourcentage inconnu est inférieur à 100%. Ce résultat confirme que la rigidité du mélange augmente avec l'augmentation de la remobilisation des constituants vieux dans le mélange.

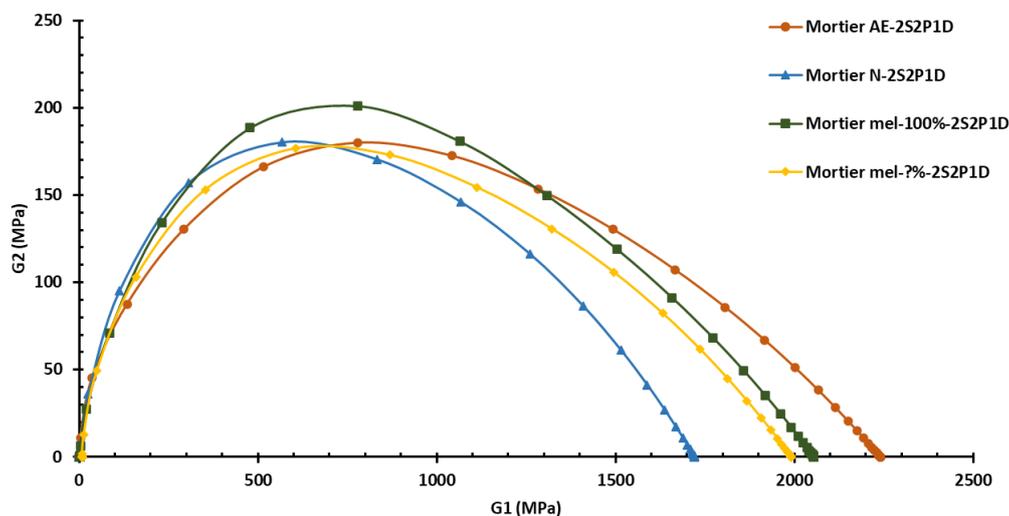


Figure 68 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes modélisés des différents mortiers

II.4.3.1.7. Prédiction des coefficients de calage des mélanges (Mangiafico,2014)

La méthode de prédiction des coefficients de calage des mélanges de liants est présentée dans la section I.2.6.1. Le comportement viscoélastique linéaire des mélanges bitumineux est simulé en utilisant les paramètres du modèle 2S2P1D prédits par les équations suivantes :

$$A_{x\%} = A_{0\%} + x(A_{AE} - A_{0\%}) \quad \text{Équation 38}$$

$$\log(B_{x\%}) = \log(B_{0\%}) + x[\log(B_{AE}) - \log(B_{0\%})] \quad \text{Équation 39}$$

où A et B sont des termes génériques représentant, respectivement, tous les paramètres 2S2P1D et les facteurs de calage qui suivent des relations linéaires (E_0 , k , h , δ et β) et logarithmiques (τ_0 et a_τ) avec le pourcentage de liant extrait d'AE dans le mélange, exprimé par x (variant entre 0 et 1).

Cette méthode est appliquée dans ce paragraphe afin de prédire les coefficients de calage du bitume mélange à partir de ceux des bitumes neuf et vieux qui se trouvent au Tableau 28. Le Tableau 29 présente les valeurs prédites et la différence entre les résultats expérimentaux et prédits.

$T_{ref} = 15^\circ C$		G_0 (MPa)	G_∞ (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β
Bitume mélange	Experimental	0	866	0.168	0.463	1.774	2.18E-04	2.03E+02
	Prédit	0	894.8	0.177	0.48	1.805	1.72E-04	1.5E+02

	Différence (%)	0	3.32	5.47	3.67	1.77	21.1	26.1
--	----------------	---	------	------	------	------	------	------

Tableau 29 Paramètres 2S2P1D expérimentaux et estimés pour le bitume mélange

D'après ce tableau, on peut observer que les valeurs estimées et les valeurs expérimentales sont significativement proches sauf pour les coefficients τ et β où la différence est de 21% et 26% respectivement. Cette différence est due probablement à une prédiction inexacte de ces deux coefficients de calage pour le bitume neuf et le bitume d'AE.

La Figure 69 présente le plan Cole-Cole obtenu par cette méthode. On peut remarquer que cette méthode surestime le comportement du mélange. En revanche, même avec la différence qui existe entre les valeurs estimées et modélisées des coefficients τ et β , le plan Cole-Cole prédit n'est pas très loin de celui mesuré expérimentalement ou modélisé. Cela confirme la validité de la méthode proposée pour estimer le comportement des liants mélanges (Mangiafico et al., 2019).

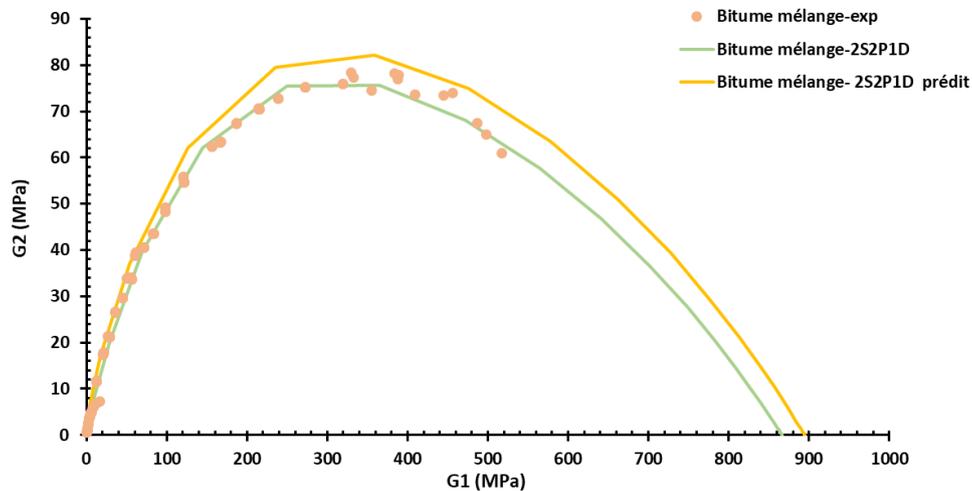


Figure 69 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés, modélisés et prédits du bitume mélange

Cette méthode est développée principalement pour prédire le comportement du mélange des liants neuf et vieux. Dans ce paragraphe, cette méthode est appliquée pour les mélanges à l'échelle mastic et mortier afin de vérifier sa validité pour prédire les comportements des pâtes granulaires bitumineuses. Le Tableau 30 présente les paramètres prédits et la différence entre les résultats expérimentaux et prédits des échelles mastic et mortier mélanges.

$T_{ref} = 15^{\circ}C$		G_0 (MPa)	G_{∞} (MPa)	K	h	δ	τ (s)	β
Mastic mélange	Experimental	1.94	1810	0.173	0.492	1.443	1.50E-03	84.7
	Prédit	0	1622	0.181	0.487	1.786	2.5E-03	48
	Différence (%)	0	-10.38	4.53	-1.1	20.66	67.2	43.32

Mortier mélange	Experimental	1.57	2.05E+03	0.172	0.483	1.540	7.58E-03	99.9
	Prédit	0	1976	0.179	0.49	1.85	6.3E-03	81.53
	Différence (%)	0	-3.6	4.05	1.41	20.13	-16.88	-18.38

Tableau 30 Paramètres 2S2P1D expérimentaux et estimés pour les mastic et mortiers mélange

D'après ce tableau, on peut observer que les valeurs estimées et les valeurs expérimentales sont significativement proches sauf pour les coefficients δ , τ et β .

Les Figure 70 et 71 montrent les plans Cole-Cole prédits par cette méthode pour les échelles mastic et mortier. On peut observer que les valeurs prédites sont inférieures aux valeurs expérimentales et modélisées. D'après ces figures, on peut constater que cette méthode initialement développée pour les liants donne des résultats inférieurs à l'expérimentation vu la présence des charges minérales dans les mélanges bitumineux testés. Il semble que cette méthode de prédiction n'est pas valable pour les mastics et mortiers mélange.

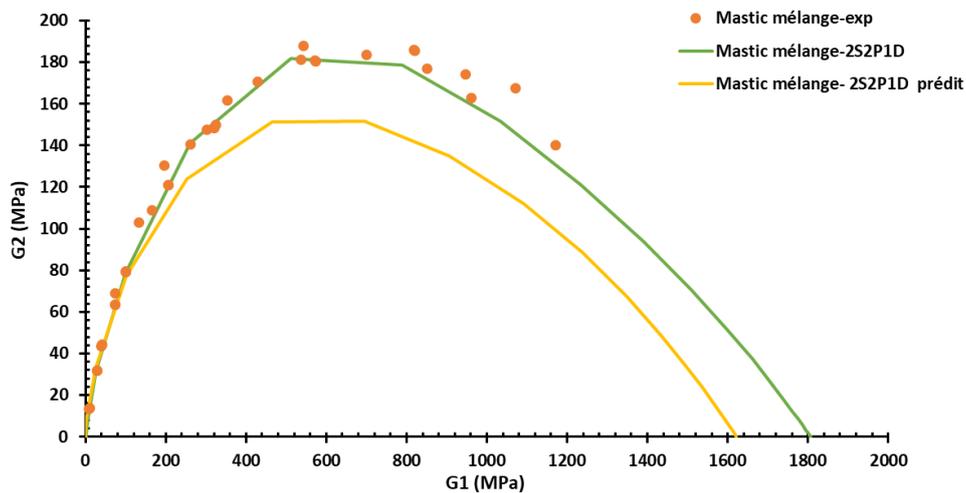


Figure 70 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés, modélisés et prédits du mastic mélange

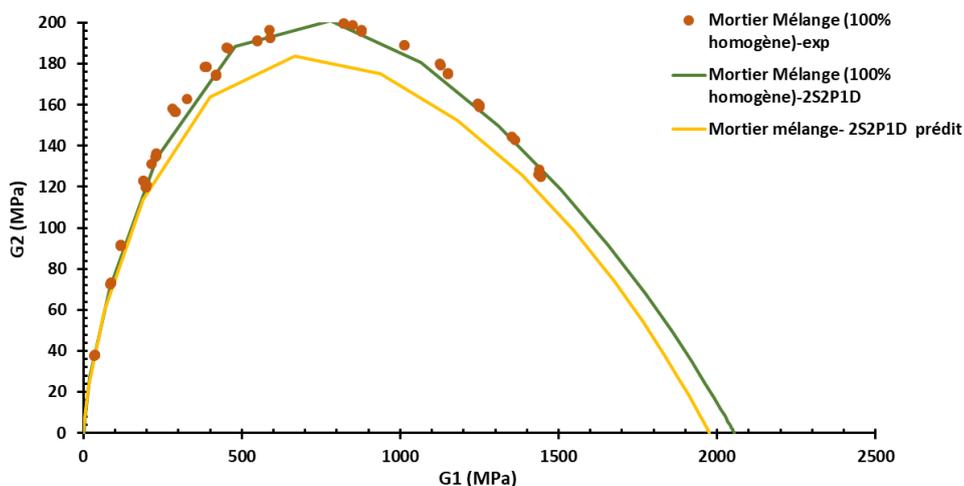


Figure 71 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés, modélisés et prédits du mortier mélange

Un graphe récapitulatif des plans Cole-Cole obtenus pour les échelles bitume, mastic et mortier testées est présenté en Annexe E.

II.5. Essais de caractérisation à l'échelle enrobé

L'essai de caractérisation du module complexe de cisaillement, en torsion, a été réalisé au laboratoire GC2D à Egletons en utilisant une machine d'essai hydraulique MTS axial/torsion.

II.5.1. Machine d'essai hydraulique MTS

Cette machine peut être utilisée pour déterminer les propriétés rhéologiques des matériaux bitumineux et caractériser leurs comportements thermomécaniques à une échelle plus grande que celle du DSR en module et/ou en fatigue. Elle permet de réaliser des essais de torsion pure, de traction/compression pures ou des essais couplés torsion et traction/compression en phase ou déphasé, pour une gamme d'efforts axiaux compris entre ± 100 kN et de couples compris entre ± 1000 N.m. Les courses totales de déplacement axial et de rotation sont respectivement de ± 75 mm et $\pm 45^\circ$. Le vérin axial/torsion, et les capteurs de déplacement et de rotation machine associés sont situés en partie haute, en liaison avec la traverse hydraulique mobile. Les capteurs de force axiale et de couple sont positionnés au niveau inférieur du bâti (point fixe) et ne sont donc pas affectés par d'éventuels effets dynamiques. En outre, pour le contrôle de la température pendant les essais, une enceinte climatique Wille (-30°C , 60°C) est couplée au système d'essai. La régulation de température est associée à une sonde PT100 spécimen, mise au plus proche de l'échantillon du matériau testé et la température mesurée par cette sonde fait partie des données acquises, lors des essais. La presse MTS est présentée dans la Figure 72.



Figure 72 Presse MTS au laboratoire GC2D

Le système de pilotage et d'acquisition de données Multi-Purpose Test Ware (MPT) a été utilisé pour le contrôle des conditions d'essais (mécaniques et thermiques), ainsi que pour l'acquisition des données.

Pour déterminer le module complexe de cisaillement de la GB \mathcal{E} +, dans des conditions comparables à celles des essais DSR, des essais de torsion ont été effectués à l'aide de ce système axial/torsion MTS, équipé, par ailleurs, de capteurs externes de déplacement et de rotation définis ci-après.

Pour la mesure du module de cisaillement, les essais sont réalisés en mode rotation-force axiale contrôlées à des fréquences de 0.1, 0.3, 1, 3 et 10 Hz et à des températures de -10, 0, 10, 15 et 20°C. Ces valeurs sont choisies afin d'avoir des conditions de températures et de fréquences communes pour les essais réalisés sur l'ensemble des échelles de la GB&+ dans le but de comparer leur comportement.

II.5.2. Procédure expérimentale

II.5.2.1. Préparation de l'échantillon

Des plaques d'enrobé (600 x 160 x 170 mm) ont été prélevées sur la planche expérimentale définie et testée en APT (Partie IV) entre les deux dernières campagnes d'essais (matériau BBAO en couche de surface). L'échelle finale de notre étude, à ce niveau, ne concerne que la GB&+, prélevée en zone non circulée (bord de planche), afin d'obtenir une référence de matériau non endommagé et dont le comportement peut être vu comme représentatif des conditions de mise en œuvre sur chantier.

La Figure 73 montre le découpage des plaques d'enrobé de la fosse expérimentale (Longueur 8 m x largeur 3 m, pour les dimensions totales de la fosse, voir Partie IV). Ces plaques ont été utilisées pour la vérification des performances d'orniérage du BBAO, des mesures de module complexe sur éprouvettes 2PBT de la GB&+ à 15°C et 10 Hz, et après carottage, des essais de caractérisation de module de cisaillement, en torsion, à l'échelle matériau de cette GB.



Figure 73 Découpage des plaques d'enrobé

Des éprouvettes cylindriques de diamètre nominal 100 mm sont extraites des plaques, par carottage perpendiculairement à la surface de la chaussée (Figure 74). Les carottes résultantes (présentées en couleur bleu dans la Figure 75) sont formées des matériaux de surface, de la GB&+ et de l'enduit de scellement en toit de la GNT. Afin d'obtenir des éprouvettes de GB&+ (présentées en couleur rouge dans la Figure 75), les carottes sont sciées (voir Figure 74) et les matériaux de la couche de surface et de l'enduit sont éliminés. La Figure

75 représente un schéma de la plaque d'enrobé ainsi que les éprouvettes obtenues après le carottage et après le sciage.



Figure 74 Carottage et sciage des éprouvettes

Carottage et sciage ayant été effectués à l'eau, les échantillons ont été séchés à l'air comprimé, puis stockés dans une salle de conservation isolée (18°C à 20°C, 50% HR), à l'abri de la lumière. Les écarts de parallélismes lors du sciage varient, en moyenne, entre 0.1 et 0.5 mm et ne sont pas compatibles avec les tolérances d'essais de traction/compression ou de torsion.

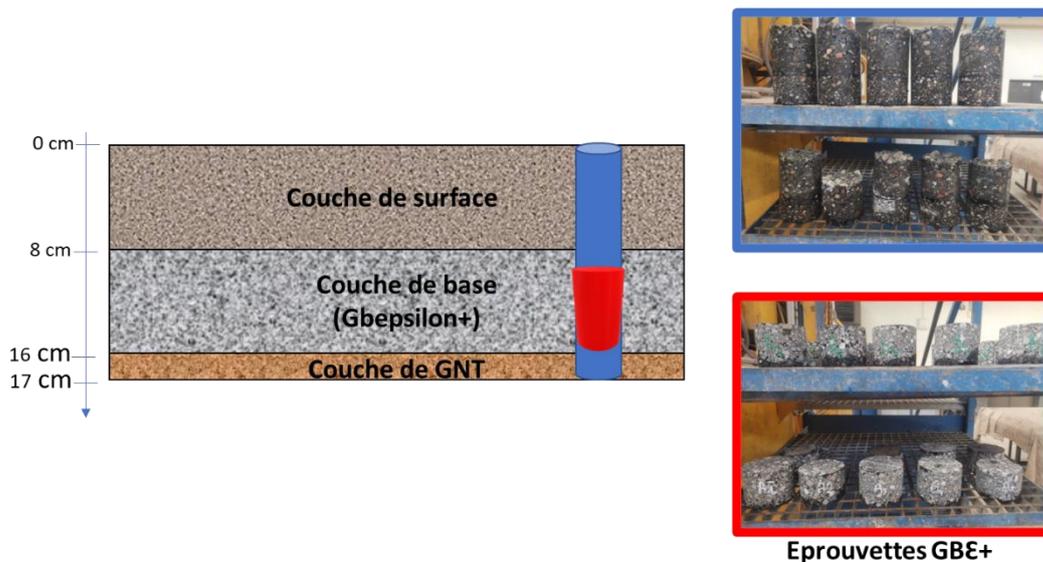


Figure 75 Schéma de la plaque d'enrobé ainsi que les éprouvettes résultantes

Avant essai, afin d'obtenir des surfaces d'appui planes, perpendiculaires aux génératrices cylindriques et parallèles entre elles, les surfaces inférieures et supérieures des éprouvettes sont rectifiées à l'aide d'une rectifieuse plane d'atelier de mécanique, sous eau, équipée d'une meule de rectification adaptée aux matériaux bitumineux afin d'obtenir des tolérances géométriques conformes aux normes d'essai (NF EN 12697-26). Tout d'abord, les génératrices de l'éprouvette sont utilisées comme référence perpendiculaire pour rectifier l'une des surfaces. La surface rectifiée est ensuite utilisée comme deuxième référence pour rectifier l'autre surface plane de l'éprouvette (voir Figure 76).



Figure 76 Rectification des éprouvettes (phase 1 et 2)

Le séchage des éprouvettes est effectué à l'air comprimé, puis dans une étuve ventilée à 25°C. Il a été vérifié selon la norme NF EN 12697-26.

Les caractéristiques physiques (longueur, diamètre, masse) des spécimens sont mesurées avant la réalisation des essais. Ces caractéristiques permettent de déterminer la teneur en vide des éprouvettes. Le taux de vide est déterminé par la méthode géométrique (NF EN 12697-29). Il s'agit d'un paramètre majeur dans la composition d'un enrobé bitumineux car il influence sa durabilité et sa rigidité. Les pourcentages de vides mesurés varient entre 7.5 et 8%. Une différence existe entre le pourcentage de vides prévu d'après la fiche technique du matériau (~ 5%) et le pourcentage mesuré. Cette différence pourrait être due au fait que la plaque d'enrobé a été prélevée au bord de la planche expérimentale pour s'assurer d'être dans une zone non circulée et/ou que la mise en œuvre globale de compactage a été inférieure à l'objectif visé. La déconstruction de la structure prévue en janvier 2023 pourra permettre d'affiner ce commentaire.

Les dimensions des échantillons sont présentées dans la Figure 77 et leurs caractéristiques géométriques et physiques sont présentées dans l'Annexe F.

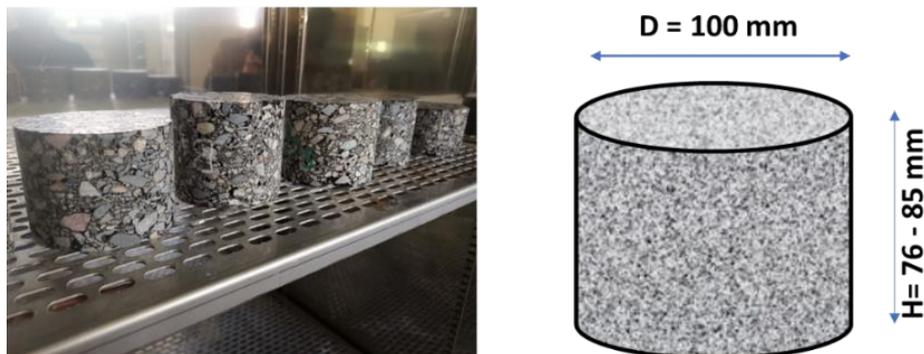


Figure 77 Dimensions des éprouvettes

II.5.2.2. Collage

La liaison d'une éprouvette aux plateaux de torsion est réalisée par collage sur des plateaux amovibles (Figure 78 et 79). Le collage est réalisé directement sur la machine d'essai, à

température ambiante à l'aide d'une colle Araldite bi-composant à prise rapide. La colle est mise en œuvre sur les surfaces rectifiées, préalablement dégraissées à l'alcool isopropylique, les plateaux en acier traité ayant été légèrement poncés au papier abrasif et nettoyés à l'acétone. L'éprouvette est centrée sur le plateau inférieur puis soumise à une charge axiale de 250 N pendant quelques minutes pour assurer une bonne répartition de la colle. Cette charge sera ensuite maintenue à 25 N (en compression) pour toute la durée des essais. Un conditionnement à température ambiante de quatre heures assure l'obtention des propriétés optimales du collage.

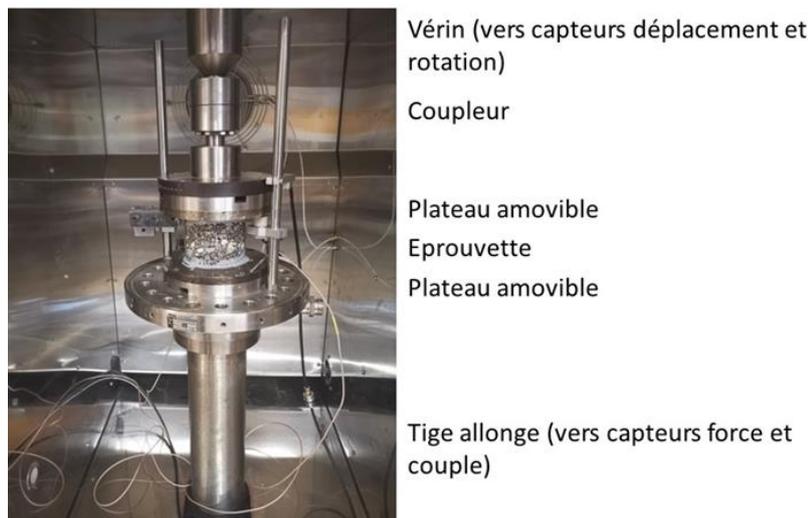


Figure 78 Collage sur les plateaux amovibles, en place



Figure 79 Collage sur les plateaux amovibles (après démontage)

II.5.2.3. Instrumentation

Outre les capteurs internes de la machine d'essai, 3 capteurs auxiliaires ont été utilisés :

- Deux capteurs de déplacement sans contact, à courant de Foucault : l'un en contrôle des déplacements axiaux entre plateaux de chargement, l'autre en mesure déportée de rotation par l'intermédiaire d'une cible métallique en liaison rigide avec le plateau supérieur ;
- Un capteur de rotation par piste magnétique Lika, associé au plateau fixe supérieur, qui compte tenu de sa résolution, n'a été retenu que pour passer de la mesure déportée de la rotation à la rotation vraie en tête d'éprouvette, dans une phase de calage préalable.

Les Figure 80 et 81 illustrent les positionnements de ces capteurs.

Ces deux conditions représentent l'état du matériau le plus 'rigide' et le plus 'mou' dans l'étude. La valeur de déformation à imposer pour les essais de module complexe de cisaillement est égale ou inférieure à la plus petite de ces deux valeurs.

II.5.2.5. Détermination de module complexe en cisaillement et de l'angle de phase

L'essai du module complexe en torsion consiste à appliquer une rotation alternée sinusoïdale à l'échantillon à différentes fréquences et températures, en maintenant une légère composante de compression (25 N). À chaque température, le module complexe est mesuré à une gamme de fréquences par ordre croissant (de 0.1 Hz à 10 Hz avec un retour à 0.1 Hz). Un temps de repos (d'au moins 300 s) est imposé après chaque changement de fréquence. La Figure 82 et la Figure 83 présentent les isothermes du module complexe de cisaillement résultant de l'essai à une température de 15°C.

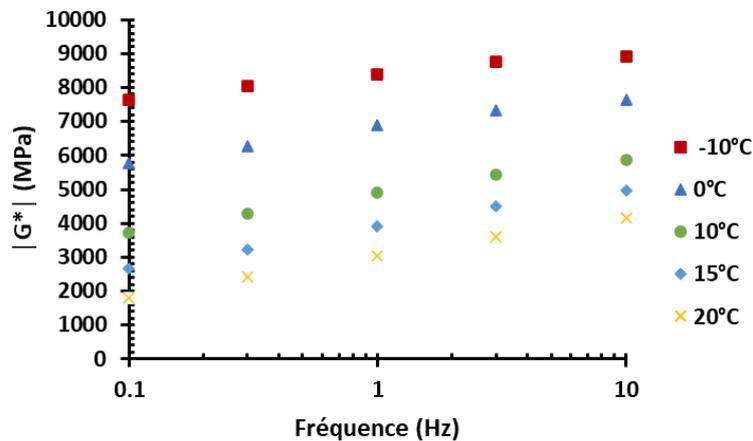


Figure 82 Isothermes en norme du module complexe de la GB&+

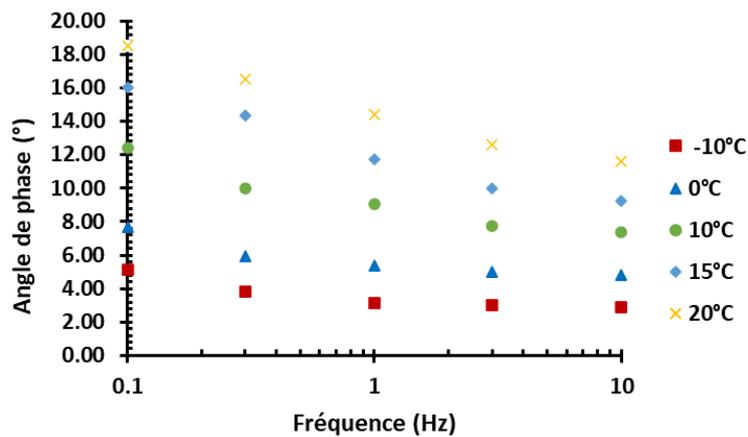


Figure 83 Isothermes en angle de phase complexe de la GB&+

II.5.2.6. Vérification de l'endommagement de l'éprouvette

Comme pour les échelles bitume, mastic et mortier, l'endommagement de l'échelle enrobé est vérifié à chaque température par un retour à la fréquence de départ (0.1 Hz dans notre étude). Si l'écart des valeurs de rigidité mesurées à une température et à une fréquence identique dépasse les 3%, l'éprouvette d'enrobé est considérée comme endommagée et elle sera plus utilisée pour la suite de l'essai. La Figure 84 représente le cycle de sollicitations imposé dans

le cas de l'enrobé et le dommage apparent D généré par ces cycles pour chaque température d'essai.

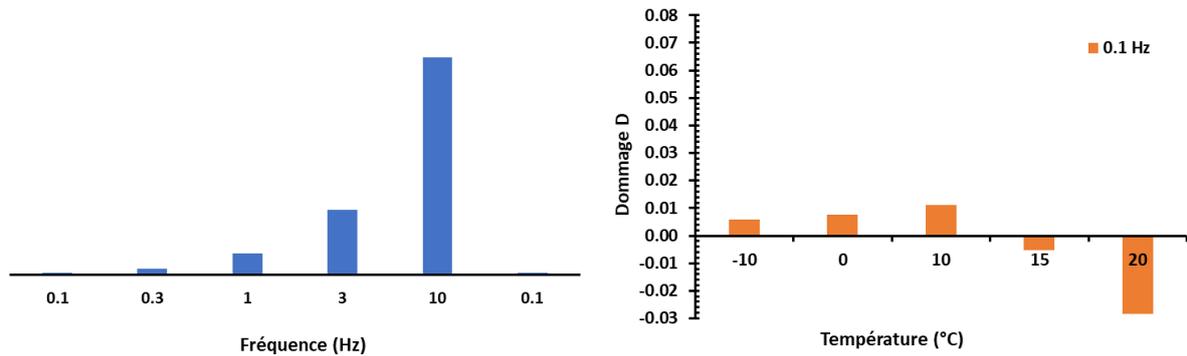


Figure 84 Cycle de sollicitations imposé pour l'enrobé (gauche) et évolution du dommage D par palier de température (droite)

II.5.2.7. Résultats

Cette section est consacrée à la présentation et à l'analyse des résultats des essais de modules complexe de cisaillement réalisés sur des éprouvettes d'enrobé en utilisant la presse hydraulique MTS. Les résultats de ces essais consistent à caractériser l'échelle finale de notre étude qui est l'enrobé GB \mathcal{E} +. Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'autres échelles afin d'étudier l'influence des inclusions ajoutées et d'examiner le pourcentage de remobilisation des liants vieux dans le mélange à l'échelle enrobé. Aussi, caractériser la rigidité de la GB \mathcal{E} + prélevée d'une zone circulée à différentes températures et fréquences sera utilisé dans le chapitre 4 de ce projet afin d'évaluer la fatigue de ce matériau à l'échelle réelle.

Les résultats sont tracés dans l'espace de Black (Figure 85) et dans le plan Cole-Cole (Figure 86). Ils présentent respectivement l'évolution de la norme d'un nombre complexe de cisaillement (échelle logarithmique) en fonction de son angle de phase et l'évolution de la partie imaginaire du module complexe en fonction de sa partie réelle soit $G^* = G_1 + i G_2$.

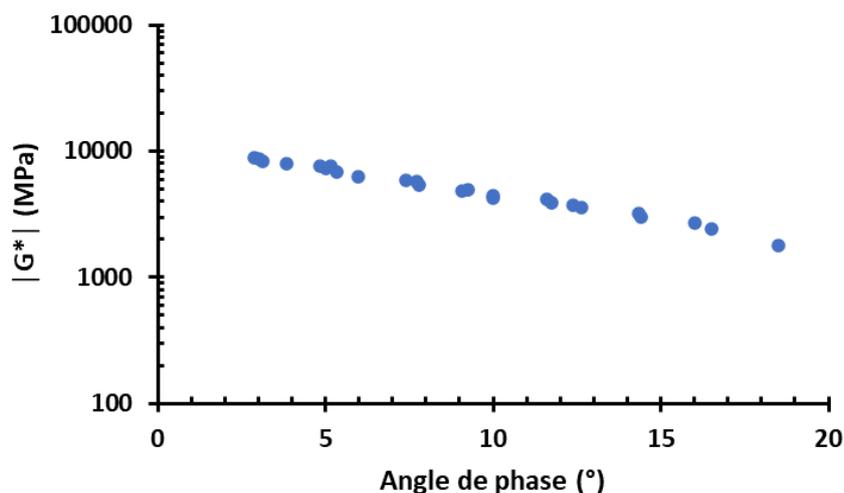


Figure 85 Représentation du module complexe dans l'espace de Black de la GB \mathcal{E} +

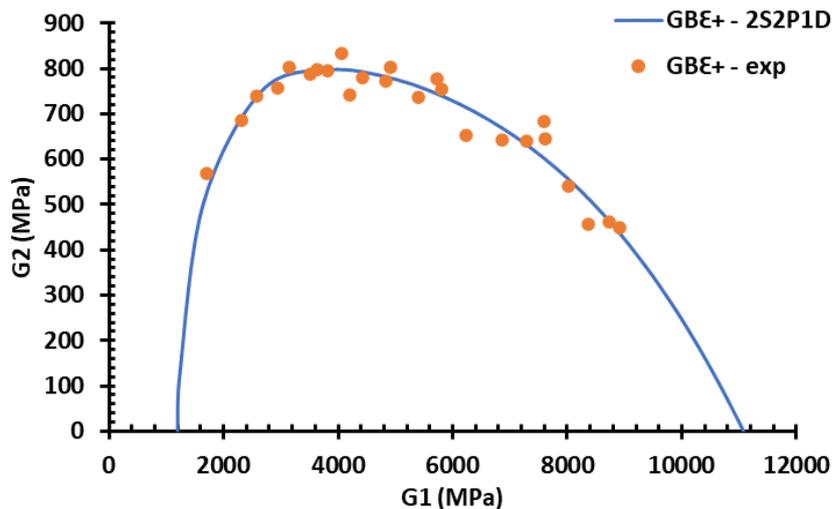


Figure 86 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés de la GBÆ+

II.6. Conclusion

Un travail expérimental important est entrepris au cours de cette étude, dont une grande partie est consacrée à la caractérisation du comportement mécanique des mélanges bitumineux à différentes échelles. Un matériau innovant GBÆ+[®] fabriqué par Malet a fait l'objet de cette étude. Des essais de module en cisaillement sont appliqués sur les différentes échelles correspondantes à ce matériau (bitume, mastic, mortier et enrobé).

L'effet rigidifiant des particules solides est mis en évidence en comparant les résultats des différentes échelles (bitume, mastic et mortier). En effet, plus la concentration en fines augmente, plus le comportement du bitume se rigidifie entraînant un meilleur comportement du mélange bitumineux. En utilisant le DSR, on a constaté que le mortier présente une rigidité supérieure par rapport au mastic qui elle-même est supérieure à celle du bitume sur toute l'étendue de températures. Ceci est probablement expliqué par la présence des fillers qui absorbent les huiles des liants et forment un squelette granulaire constitué de fillers, résines et asphaltènes dans le cas de mastic et en ajoutant le sable dans le cas de mortier. Ce squelette granulaire améliore le comportement des bitumes et le rigidifie.

L'influence des AE est caractérisée en comparant les résultats des différents états de matériaux (neufs, vieux et mélanges). En effet, l'évolution des propriétés rhéologiques dépend de la température. Le plan Cole-Cole d'un matériau neuf est supérieur à celui d'un matériau vieux (récupéré à partir d'AE) pour la première partie du plan (correspondante aux valeurs mesurées à hautes températures et/ou basses fréquences) alors que pour la deuxième partie du plan, cette tendance change et le matériau vieux devient plus rigide que le matériau neuf à basses températures (et/ou à hautes fréquences). Cette rigidification est due à l'agglomération des asphaltènes en clusters en raison du vieillissement ce qui augmente le module d'un matériau vieux.

L'influence de l'homogénéité du mélange sur la rigidité des matériaux est évaluée dans ce chapitre. Deux mortiers mélanges sont fabriqués au laboratoire : le premier avec un degré d'homogénéité de 100%, fabriqué en réalisant un mélange manuel au niveau des bitumes neufs et vieux et le deuxième avec un degré inconnu d'homogénéité, fabriqué en réalisant un mélange manuel au niveau des mortiers neufs et vieux. Les deux sont testés suivant le même

protocole expérimental en utilisant le DSR. Les résultats montrent que la rigidité du premier mortier est supérieure à celle du deuxième. Par conséquent, la rigidité augmente avec l'homogénéité du mélange ou avec la remobilisation du constituant vieux dans le mélange.

Ce chapitre a permis d'évaluer l'influence de l'ajout des AE. Les résultats expérimentaux ont servi aussi à alimenter et à valider les modèles numériques développés dans la partie suivante de notre étude.

**Partie III. Echelle
matériau :
Modélisation par
éléments finis**

Partie III. Echelle matériau : Modélisation par éléments finis

III.1. Introduction

Dans le volet calcul numérique, le travail vise à prédire le comportement et les caractéristiques d'un mélange bitumineux en connaissant le comportement et les caractéristiques de ses constituants de base. En effet, les mélanges bitumineux étant des matériaux hétérogènes au comportement mécanique complexe, ils semblent être l'objet idéal d'une modélisation multi-échelle. La prévision du comportement d'un tel matériau hétérogène est très complexe et nécessite une attention particulière quant au comportement des différentes phases. Des études récentes ont été menées pour modéliser ce matériau hétérogène en utilisant des images de tomographie par rayons X provenant d'un échantillon réel (Adhikari et al., 2008, Dai, 2011, Chen et al., 2022). Pour étudier l'effet de l'hétérogénéité, cette méthode nécessite l'utilisation de plusieurs échantillons de compositions différentes.

Dans un premier lieu, l'objectif de ce chapitre est de proposer un modèle numérique simple pour simuler le comportement global et local de ce milieu hétérogène. La stratégie adoptée est basée sur la génération d'un modèle numérique à deux phases : la matrice et les inclusions. A l'aide d'un programme développé dans le laboratoire GC2D, il est possible de contrôler la forme, la taille et le pourcentage des constituants de ce milieu hétérogène sans avoir à recourir à une étape de préparation et de caractérisation expérimentale longue et coûteuse.

Dans un deuxième lieu, ce chapitre propose des modèles numériques afin de caractériser le mélange entre les AE et les matériaux d'apport. Ce travail permet d'étudier l'effet du degré d'homogénéité de mélange sur la rigidité du matériau. De nombreux chercheurs ont essayé de déterminer le pourcentage de remobilisation du constituant vieux par des essais expérimentaux (Vassaux, 2017, Xu et al., 2018, Gaspar et al., 2020). Ces essais restent compliqués et il est quasiment impossible de contrôler ce pourcentage expérimentalement. Dans ce chapitre, des modèles numériques triphasiques et quadriphasiques sont développés dans ce but.

L'intérêt majeur de cette approche réside dans le fait qu'il est possible de générer des modèles aléatoires rapidement, simplement et en complément de l'inévitable phase de validation expérimentale. Dans ce chapitre, le processus numérique adopté est décrit et les résultats qui en découlent à l'échelle du mortier sont présentés.

III.2. Méthode multi-échelle

La méthode multi-échelle est basée sur le concept que les matériaux peuvent être représentés comme des échelles successives en fonction de la taille de coupure choisie de la courbe granulométrique des granulats. Chaque échelle est représentée par un modèle biphasique formé d'une matrice et des inclusions. Les différentes échelles ainsi que leurs pourcentages volumétriques de remplissage sont présentés dans le Tableau 31.

	Echelle	Matrice	Diamètres des inclusions (mm)	% de remplissage volumique
Neuf	Mastic	Bitume	0/0.063	28.38
	Mortier	Bitume	0/0.25	38.09

		Mastic	0.063/0.25	13.78
Vieux	Mastic	Bitume	0/0.063	44.03
	Mortier	Bitume	0/0.25	56.95
		Mastic	0.063/0.25	23.45
Mélange	Mastic	Bitume	0/0.063	35.59
	Mortier	Bitume	0/0.25	47.34
		Mastic	0.063/0.25	18.52
	Enrobé	Bitume	0/20	84.92
		Mastic	0.063/20	79
		Mortier	0.25/20	75.15

Tableau 31 Les différentes échelles ainsi que leurs pourcentages volumétriques de remplissage

III.3. Procédure numérique : modèle biphasique

Cette méthode consiste en une modélisation numérique hétérogène par éléments finis (EF) des composites bitumineux en utilisant une approche biphasique : matrice et inclusions. Elle est capable de modéliser le comportement mécanique des éprouvettes des mélanges bitumineux dans les mêmes conditions expérimentales. Par cette méthode les essais DSR sur les composites bitumineux sont modélisés en faisant appel à des spécimens digitaux afin de prédire le comportement de ces mélanges. En conséquence, ce travail numérique permettra de gagner du temps de préparation des échantillons et évitera les erreurs humaines et systémiques. En outre, cette approche hétérogène est l'une des seules façons d'étudier les déformations internes à une micro-échelle, ce qui est impossible avec l'approche homogène. Cette section est consacrée à la modélisation biphasique du mortier mélange.

III.3.1. Création des modèles numériques

Comme mentionné précédemment, le mastic est une combinaison de bitume et des fines ($d < 0.063\text{mm}$) tandis que le mortier est le mélange de mastic et de particules de sable ($0.063\text{mm} < d < 0.25\text{mm}$). Le mastic est considéré comme un milieu homogène puisque les particules de remplissage sont uniformément distribuées dans le bitume et leur taille est suffisamment faible. Ainsi, l'objectif principal est de modéliser le mortier mélange en utilisant l'approche biphasique : la première phase est la matrice (le mastic mélange dans notre cas) et la deuxième phase est constituée des inclusions rigides (les particules de sable dans notre cas). Le concept multi-échelle est présenté dans la Figure 87.

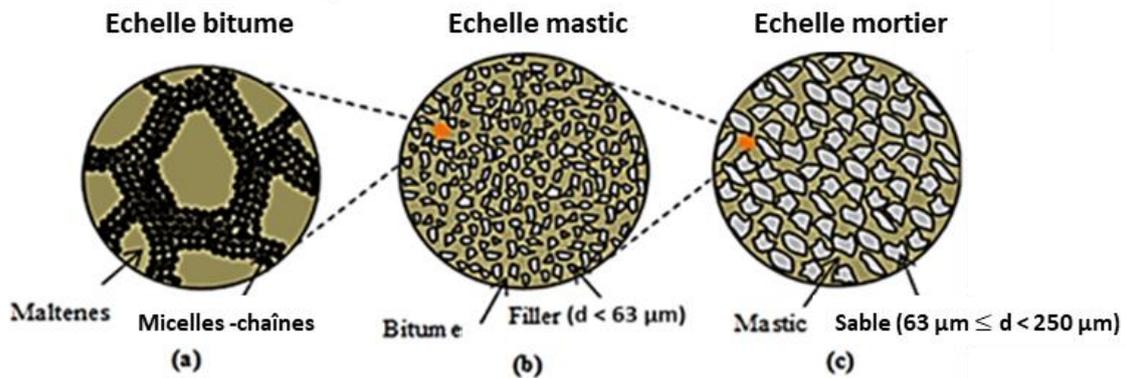


Figure 87 Principe multi-échelles

III.3.1.1. Génération des inclusions

Le logiciel ABAQUS est utilisé pour réaliser les calculs numériques basées sur la méthode des éléments finis. Vu que les granulats possèdent des formes irrégulières, des angularités complexes et des tailles différentes, ABAQUS est incapable de créer ces agrégats et de les distribuer aléatoirement dans un domaine donné. C'est pourquoi un logiciel appelé MOA (acronyme de random object modeler) est introduit. Ce logiciel est développé dans notre laboratoire et est écrit en langage C++. Il a été validé dans le travail de Tehrani et al., 2013 et il a été utilisé par El Sawda et al., 2019. Cet outil permet de générer des objets de manière aléatoire dans un espace défini en deux ou trois dimensions avec différentes options comme le montre le Tableau 32.

	2D	3D
Forme des inclusions	Circulaire -Polygonale	Sphérique -Polyédrique
Forme du conteneur	Rectangle	Parallélépipède-Cylindre
Taux maximal de remplissage volumétrique	77%	50%

Tableau 32 Propriétés de génération du MOA

Les intersections et la distance entre les particules peuvent également être imposées par l'utilisateur. Les fichiers résultants du MOA peuvent être enregistrés dans différents formats tels que STEP ou IGES permettant d'importer la structure générée dans le logiciel ABAQUS. Ce programme de génération de domaines de calcul représentatifs des milieux hétérogènes est codé sur la base de la technique de triangulation de Delaunay. Il s'agit d'une triangulation où aucun sommet ne reste à l'intérieur du cercle circonscrit d'un triangle. Ce dernier est le cercle qui traverse les sommets des triangles (www.cdsimpson.net). Le MOA fragmente le domaine original en triangles finis (2D) ou en nombre de tétraèdres (3D). Ensuite, en 2D, le logiciel réassemble les triangles pour créer les polygones. Tandis qu'en 3D, le MOA réunit les tétraèdres pour générer les polyèdres. Concernant les cercles et les sphères, le triangle élémentaire résultant d'une triangulation de Delaunay produit le cercle circonscrit (Fakhari, 2013). Pour calculer la surface ou le volume d'un modèle, on calcule le volume ou la surface des inclusions. Leur nombre et leurs dimensions dépendent de la courbe de gradation introduite dans le logiciel. La Figure 88 montre des exemples de modèles numériques générés par MOA avec différents taux de remplissage de volume.

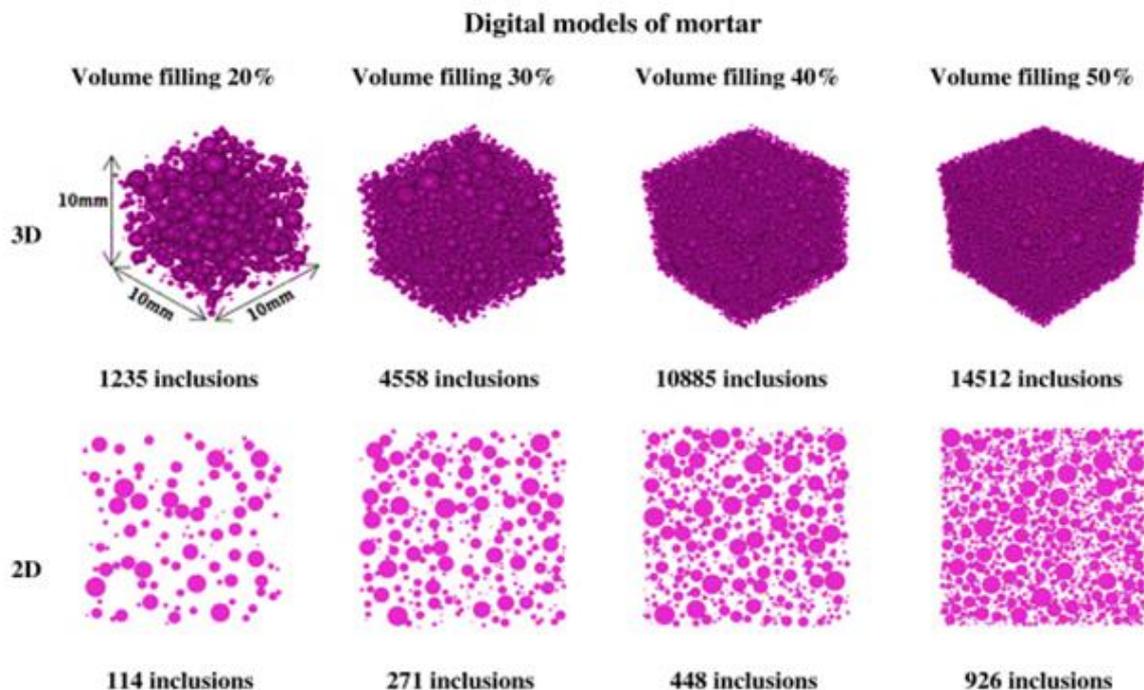


Figure 88 Géométrie granulaire du squelette générée en 3D et modèles 2D équivalents (Tehrani et al., 2013)

Pour la modélisation du mortier mélange, le mastic mélange est considéré comme phase de matrice et les particules de sable ($0.063 \text{ mm} < d < 0.25 \text{ mm}$) comme inclusions. Ainsi, le taux de remplissage volumique dans le mortier est égal à 18.5% présenté dans le Tableau 31. Dans le processus de modélisation, le taux de remplissage volumique est obtenu grâce à la formule : $V \text{ inclusions} / (V \text{ matrice} + V \text{ inclusions})$ où V est le volume.

Le travail présenté est principalement axé sur les modèles 3D. En se basant sur la courbe granulométrique des granulats de la Figure 39, les inclusions ($0.063 \text{ mm} < d < 0.25 \text{ mm}$) sont générées à l'aide de MOA sous forme d'objets sphériques (voir Figure 89). Le fichier résultant contient 4000 objets, qui sont importés dans ABAQUS pour y achever la modélisation et le calcul associé.

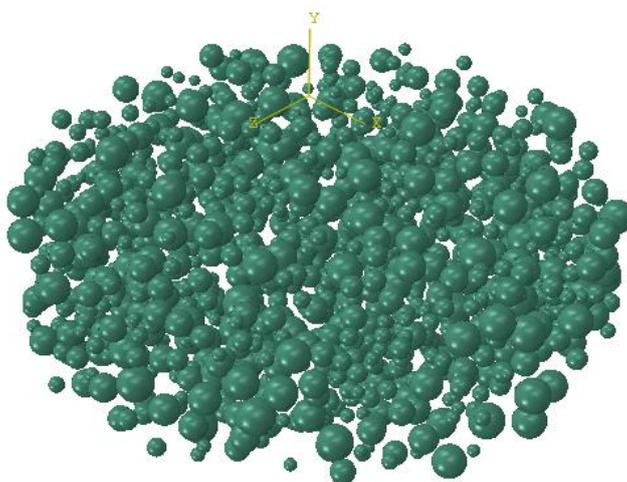


Figure 89 Les inclusions générées par MOA

III.3.1.2. Création de l'échantillon de mortier numérique

Après avoir importé les inclusions, la deuxième phase (matrice) est créée et ainsi le mortier numérique est obtenu en combinant la matrice et les inclusions. Dans ce but, des opérations booléennes sont effectuées comme le montre la Figure 90. Le modèle est assimilé à un cylindre de 4 mm de diamètre et de 1 mm de hauteur afin de représenter l'échantillon de mortier bitumineux de 1 mm par 4 mm posé entre les deux plaques parallèles du rhéomètre pour l'essai expérimental.

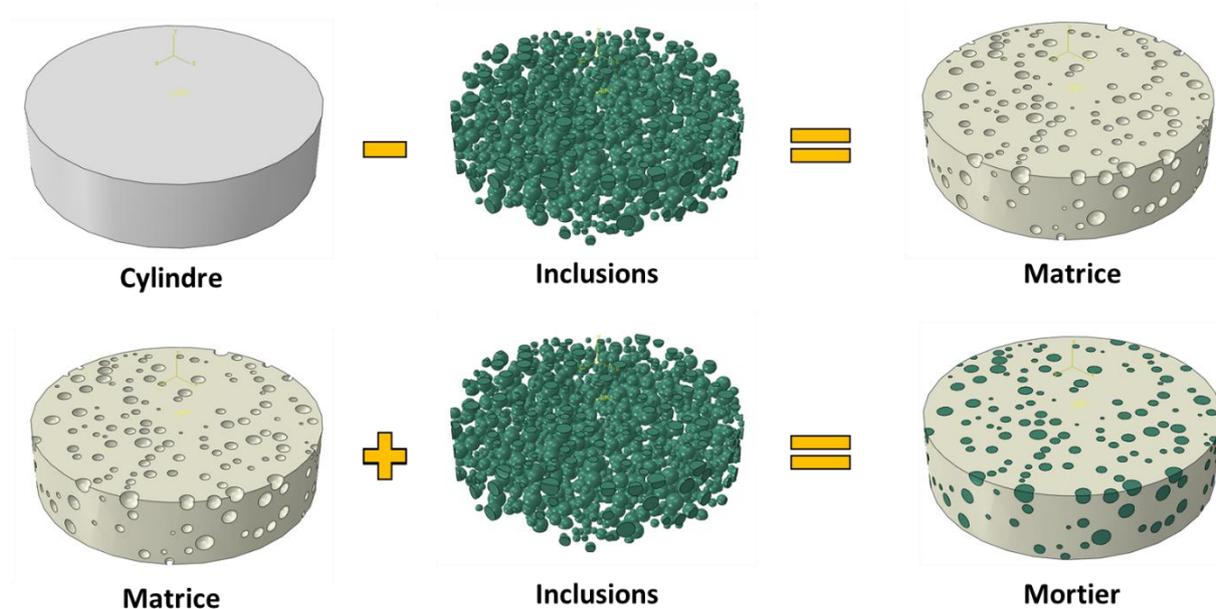


Figure 90 Opérations booléennes pour un modèle de mortier tridimensionnel

Les interfaces entre la matrice et les inclusions sont considérées comme liées en utilisant le "Tied Contact", une fonction préprogrammée dans le logiciel d'éléments finis. Elle impose un état de cohésion totale sur les surfaces des inclusions. Cette fonction relie les nœuds qui appartiennent à deux domaines adjacents. Par conséquent, il n'existe aucun degré de liberté entre ces nœuds, ce qui assure la continuité du déplacement et la transmission égale des contraintes à l'interface matrice/inclusion.

III.3.1.3. Propriétés mécaniques

Après avoir créé la structure du modèle, chaque phase est affectée par les propriétés mécaniques adéquates. En ce qui concerne les inclusions, elles sont considérées élastiques, linéaires et isotropes. Ces propriétés sont définies par le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν . Ces derniers sont mesurés par une technique ultrasonique sur 8 échantillons de roches (Fakhari Tehrani et al., 2013). La moyenne des résultats pour les inclusions est de 50 GPa pour le module d'Young E et de 0.15 pour le coefficient de Poisson ν . Le comportement de la matrice est défini comme viscoélastique linéaire pour de petites valeurs de déformation ($\gamma \leq 0.07\%$ ou $700 \mu\text{def}$ d'après le Tableau 26). Une analyse pseudo-élastique est appliquée, ce qui signifie que le module complexe attribué à la matrice correspondant à une certaine température et fréquence. Le coefficient de Poisson est supposé égal à 0.4 indépendamment de la température et de la fréquence. Ce comportement est défini en utilisant les résultats expérimentaux du mastic mélange à 15°C , pour une caractérisation du comportement du mortier mélange à cette température.

III.3.1.4. Chargement et conditions aux limites

Comme pour les essais expérimentaux DSR, l'échantillon numérique est soumis à une déformation de cisaillement oscillatoire. Cette déformation varie dans le temps de manière sinusoïdale. Cependant, au niveau de la surface supérieure, un point de référence est créé au centre de la surface supérieure du modèle. Ensuite, une fonction « couple » prédéfinie dans ABAQUS est appliquée pour fournir l'action d'un couple et la distribution de la contrainte sur la surface (Abaqus guide 2011 et 2013). Afin de respecter l'hypothèse du comportement viscoélastique linéaire du mortier, un déplacement rotatif θ générant une déformation égale à 0.06% a été imposé à la surface supérieure du cylindre.

Pour la surface inférieure du modèle, les déplacements sont bloqués selon les conditions expérimentales de l'essai DSR où le spécimen est fixé à la plaque inférieure du rhéomètre. La modélisation fournit le module de cisaillement à différents taux de chargement en imposant différentes fréquences de déplacement sinusoïdal à la surface supérieure de l'échantillon à différentes températures. Après l'application de 4 fréquences : 0.1, 1, 10 et 100 Hz à 15°C, les résultats de la modélisation sont présentés. Ceci peut être fait après avoir défini la fonction sinusoïdale en utilisant un fichier qui est introduit dans ABAQUS grâce à ses sub-routines. La Figure 91 montre la charge imposée et les conditions aux limites du modèle numérique.

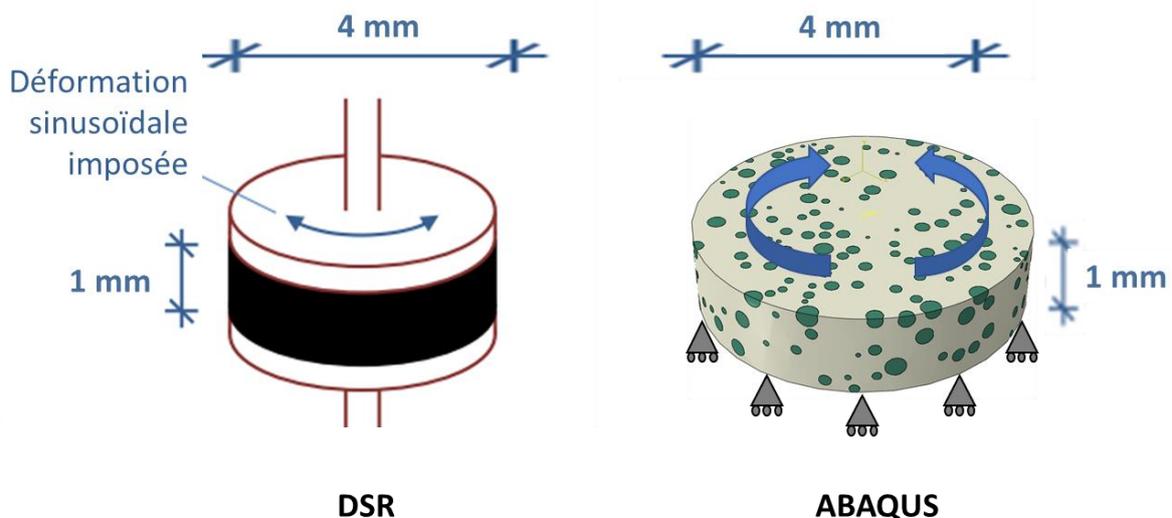


Figure 91 Chargement et conditions aux limites du modèle selon l'essai DSR

III.3.1.5. Maillage

En ce qui concerne le modèle 3D, des éléments tétraédriques quadratiques à dix nœuds sont utilisés (C3D10M dans le code ABAQUS). La fonction de forme quadratique donne un ordre d'interpolation plus élevé du champ de déplacement et donc des distributions de contrainte et de déformation plus précises. La taille du maillage est choisie de manière que les plus petites particules soient maillées. Puisqu'une approche hétérogène est adoptée, un film mince de matrice existe entre les inclusions. De nombreux essais ont été menés pour trouver la taille de maillage optimale pour discrétiser ce film mince et les inclusions avec suffisamment d'éléments. Cette densité de maillage donne des résultats précis en post-traitement, liés principalement à la distribution des déformations et des contraintes dans la matrice. Après ces essais, la taille de 0.02 mm est jugée adéquate pour mailler l'ensemble du modèle. Cette faible

valeur entraîne une densité de maillage élevée et donc une augmentation du temps de calcul et de la taille de la mémoire nécessaire au bon fonctionnement du calcul numérique. Pour résoudre ce problème, différentes tailles de maillage sont utilisées pour les deux phases. Comme les inclusions sont des matériaux rigides ($E = 50 \text{ GPa}$), leur taille de maillage est étendue à 0.05 mm , tandis que pour la matrice, elle est restée la même, soit 0.02 mm . Si certaines inclusions ne peuvent pas être maillées, Abaqus affine automatiquement la taille du maillage. L'adoption de l'interaction "surface à surface" entre la matrice et les inclusions au lieu de "nœuds à nœuds" permet d'optimiser la taille du maillage. Les inclusions et la matrice maillées sont présentées dans la Figure 92.

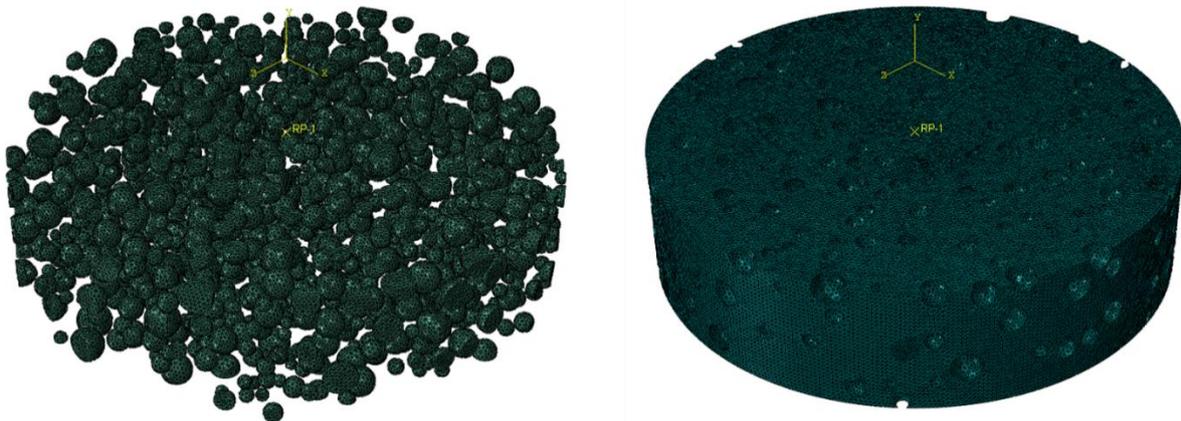


Figure 92 Inclusions et matrice maillées du modèle tridimensionnel d'éléments finis

III.3.1.6. Calcul du module complexe de cisaillement

La réponse principale qui nous intéresse est de calculer le module complexe G^* . Puisque le mortier est modélisé comme un échantillon soumis à un essai DSR virtuel, G^* est le rapport entre la contrainte et la déformation en valeur absolue.

$$|G^*| = \left| \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \right| \text{Équation 40}$$

où τ_{\max} et τ_{\min} sont respectivement la contrainte maximale et minimale obtenue par post-traitement FEM du modèle. γ_{\max} et γ_{\min} sont respectivement les déformations maximales et minimales imposées initialement à l'échantillon numérique. Ces paramètres peuvent également être définis à l'aide des équations suivantes :

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3} \text{Équation 41}$$

$$\gamma = \frac{\theta r}{h} \text{Équation 42}$$

Où,

T couple,

r rayon de l'échantillon,

θ angle de déviation,

h hauteur de l'échantillon.

Dans cette modélisation, un déplacement rotatif θ (ou UR dans Abaqus), générant une déformation (U dans Abaqus) égale à 0.06% (ou 6×10^{-4}), a été imposé à la surface

supérieure du cylindre. La Figure 93 représente le mortier numérique soumis à la rotation ainsi que la déformation résultante par le post-traitement.

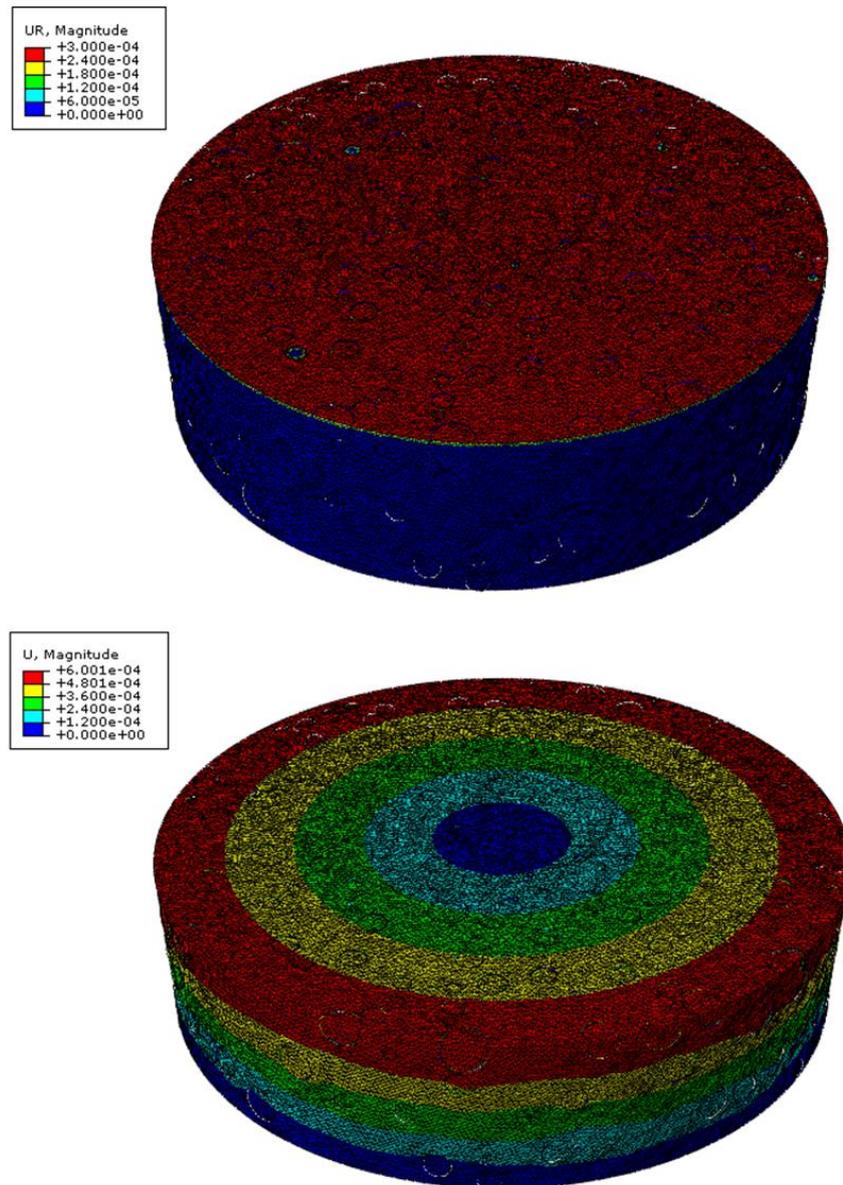


Figure 93 Mortier numérique soumis à la rotation ainsi que la déformation résultante

Le module complexe, G^* dépend du temps, donc de la fréquence angulaire ω . La déformation de cisaillement γ et la contrainte de cisaillement τ varient de manière sinusoïdale avec le temps, de sorte que le module de cisaillement complexe G^* est obtenu à partir des valeurs absolues de contrainte et de déformation (Anderson, et al., 1991).

Lorsqu'on applique une contrainte de cisaillement à un échantillon, la réponse est instantanée. La contrainte de cisaillement résultante peut être en phase avec la déformation de cisaillement appliquée lorsque le matériau testé se comporte comme un solide élastique, ou déphasée par rapport à la déformation de cisaillement appliquée lorsque le matériau testé se comporte comme un matériau visqueux. L'angle de phase δ , est le décalage de la réponse « contrainte de cisaillement » par rapport à la déformation de cisaillement appliquée, et c'est donc un indice

important pour décrire le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux (Goodrich, 1988, Anderson et al., 1991, Christensen et Anderson, 1992).

Pour chaque température et fréquence, cinq modèles numériques de mortiers sont réalisés, chacun est créé avec une génération différente d'inclusions. Cette dernière a été achevée d'une façon aléatoire à l'aide du logiciel MOA pour un taux de remplissage volumique constant égal à 18.5% ($V_{\text{inclusions}} / (V_{\text{matrice}} + V_{\text{inclusions}})$). Les modules complexes des mortiers résultants sont similaires avec une différence inférieure à 5%. Enfin, les valeurs calculées sont la moyenne des modules complexes de ces cinq modèles. Les étapes générales du processus numérique sont présentées dans la Figure 94.

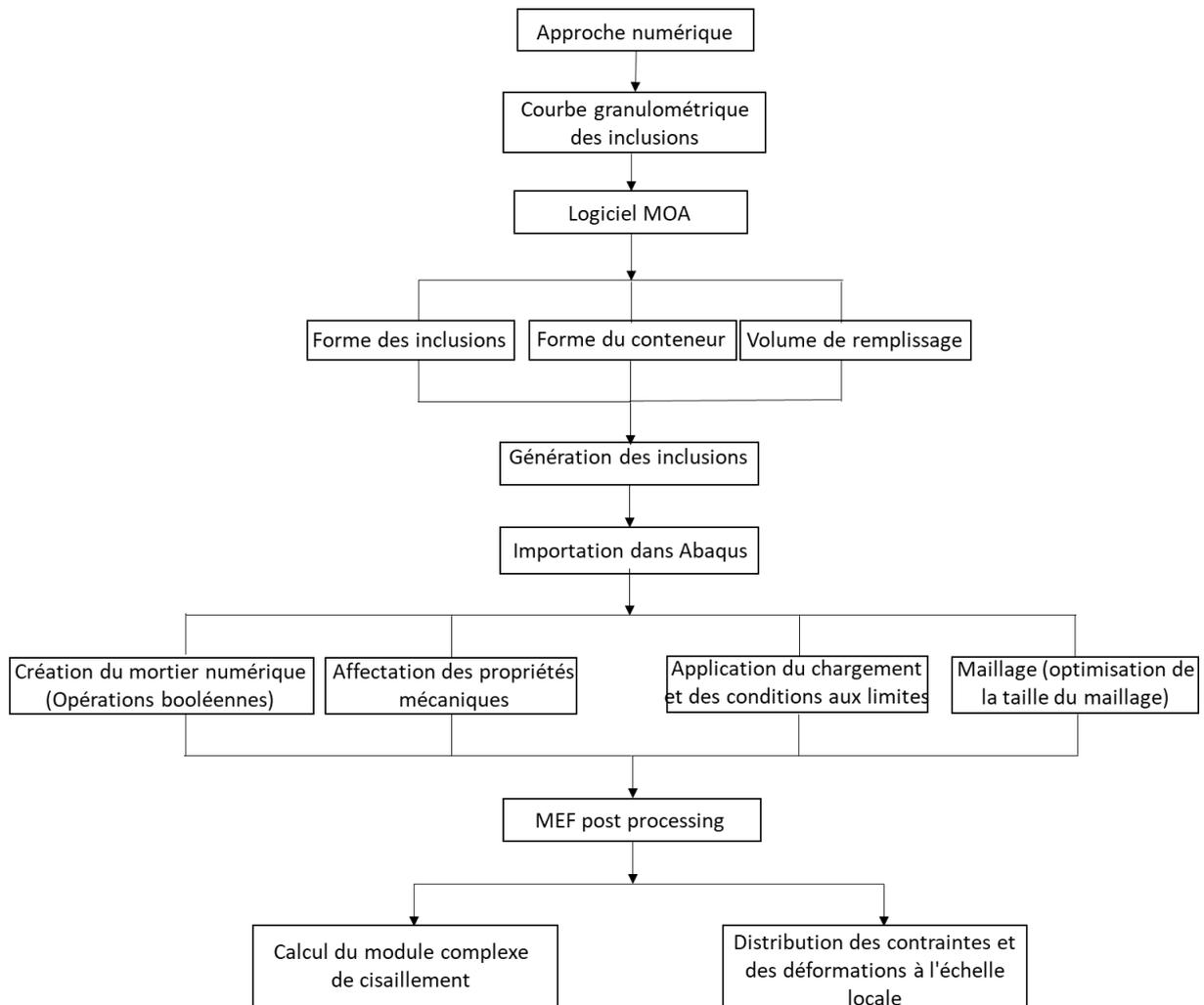


Figure 94 Organigramme décrivant les étapes générales de la procédure numérique

III.3.1.7. Résultats

Valider l'approche numériques en comparaison avec l'approche analytique et expérimentale.

III.3.1.7.1. Passage du liant au mastic

Afin de prédire le comportement du mastic, ainsi que l'approche expérimentale, deux méthodes GSCS et SHStS de l'approche analytique (présentées dans les sections I.1.1.4.1 et I.1.1.4.2) sont utilisées. Selon les résultats expérimentaux, le module du mastic est plus élevé que celui du bitume. Ce changement de comportement peut être expliqué par la concentration

volumique élevée de particules rigides dans le mastic et les phénomènes physico-chimiques qui se produisent entre les inclusions et le liant. La modélisation de ce composite bitumineux par l'approche numérique est compliquée par le fait qu'il contient un taux de remplissage volumique élevé égal à 36% de très petites particules ($d < 0.063$ mm) entraînant une génération d'environ 15 000 inclusions, et donc une augmentation du temps de calcul et de la taille de la mémoire rendant cette approche difficile à utiliser. La Figure 95 montre des comparaisons du module de cisaillement complexe $|G^*|$ mesuré en laboratoire et prédit par les méthodes GSCS et SHStS à une température de 15°C. Le module complexe obtenu expérimentalement et celui prédit analytiquement présentent des valeurs qui diminuent avec la diminution des fréquences, c'est-à-dire que plus la fréquence de chargement est élevée, plus le module complexe du mastic bitumineux est élevé. Cependant, la différence entre les valeurs mesurées et prédites est inférieure à 10% pour les fréquences allant de 0.1 à 100 Hz.

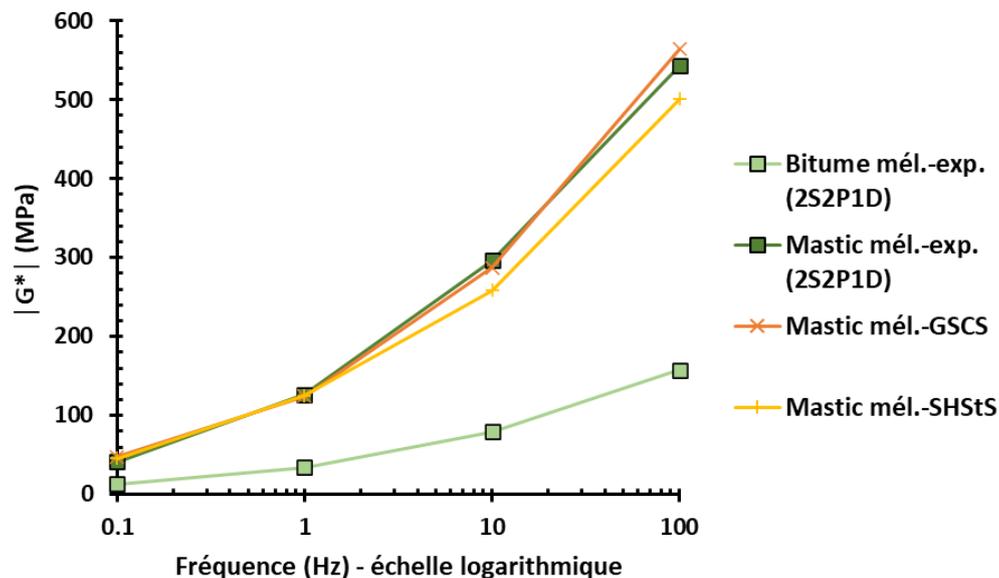


Figure 95 Comparaison de la prédiction du module de cisaillement complexe G^* à l'aide des méthodes SHStS, GSCS et de la mesure en laboratoire du mastic mélange à $T = 15^\circ\text{C}$

III.3.1.7.2. Passage du liant et du mastic au mortier

Concernant le comportement du mortier mélange, trois approches sont appliquées : expérimentale, analytique et numérique. Pour l'approche numérique, le mastic mélange est considéré comme la matrice et les particules de sable ($0.063 \text{ mm} < d < 0.25 \text{ mm}$) comme inclusions avec une fraction volumique de 18.5%. La Figure 96 montre la comparaison du module de cisaillement complexe $|G^*|$ mesuré en laboratoire et prédit par les méthodes GSCS et SHStS ainsi que par les modèles MEF 3D à une température de 15°C. D'après les Figure 95 et 96, on peut remarquer que les graphiques SHStS, GSCS ainsi que les courbes des résultats numériques convergent avec une différence inférieure à 10%. De plus, ils sont similaires aux résultats expérimentaux. Par conséquent, le modèle numérique réussit à définir les propriétés du mortier, validant ainsi l'approche susmentionnée.

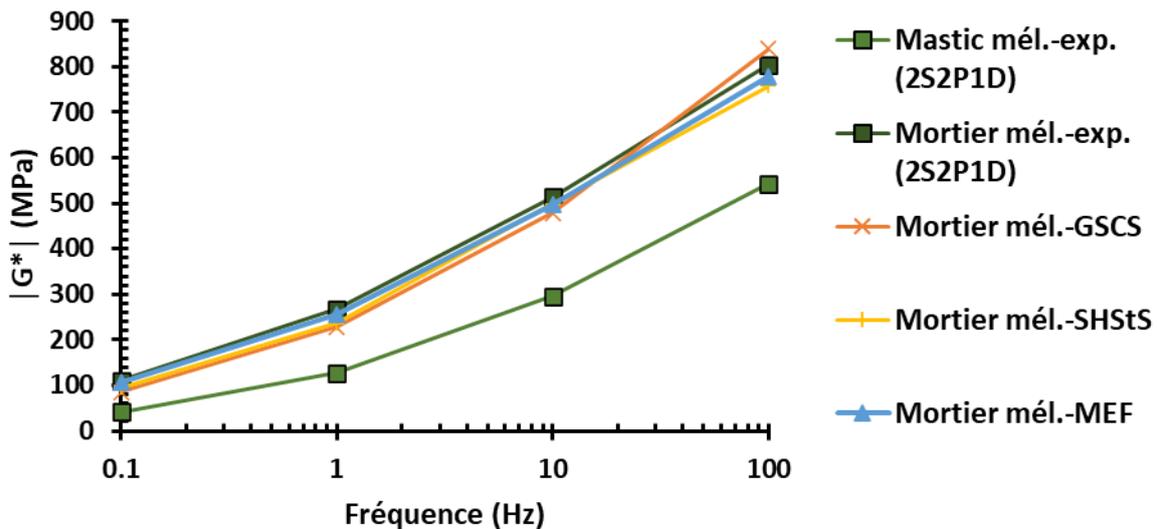


Figure 96 Comparaison de la prédiction du module de cisaillement complexe G^* à l'aide des méthodes SHStS, GSCS et de la mesure en laboratoire du mortier mélange à $T = 15^\circ\text{C}$

III.3.1.7.3. Distribution de la déformation dans le mortier

De plus, en utilisant l'approche numérique, il est possible d'étudier la microstructure interne du modèle numérique, c'est-à-dire visualiser la distribution des déformations au sein de la matrice de l'échantillon. La Figure 97 montre la distribution locale de la déformation γ à une échelle microscopique au sein de l'échantillon résultant du post-traitement du calcul EF du mortier. Dans cette figure, la couleur grise présente la valeur γ la plus élevée. Cette valeur diminue et le bleu représente la valeur de déformation la plus faible. On peut observer qu'au centre de l'échantillon, la déformation est colorée avec le bleu représentant la valeur la plus faible. Ceci peut être expliqué par la rotation appliquée au centre de la surface supérieure de l'échantillon. On peut également voir que les valeurs γ les plus élevées, représentées par le rouge et le gris, ne sont pas limitées aux extrémités de l'échantillon mais également près du centre. En focalisant l'observation sur cette zone, il est évident que la couleur rouge existe entre deux particules proches l'une de l'autre, présentant des zones localisées de forte déformation, ce qui peut être lié à la présence d'un corps flexible viscoélastique (matrice) entre deux corps rigides (inclusions).

De plus, cette approche montre une distribution des déformations au sein de l'échantillon. Ainsi, l'hétérogénéité des valeurs de déformation γ , est mise en évidence dans la cartographie de γ , permettant d'identifier l'endommagement du modèle et donc la fatigue de l'échantillon. Ce résultat peut être expliqué dans la Figure 97 qui montre que les données obtenues à l'échelle locale ($4495 \mu\text{def}$) sont 8 à 10 fois plus importantes que la déformation globale ($600 \mu\text{def}$). Par conséquent, l'initiation de la fracture peut se produire non seulement sur le bord de l'échantillon mais aussi dans sa structure interne. Ce résultat peut être validé par Ragne et al., 2019. En appliquant la technique d'émission acoustique (EA), il évalue les dommages sur les spécimens d'enrobé en finissant par l'identification que l'initiation de la fracture peut se produire dans le corps interne et non sur le bord. Cependant, ces résultats ne sont réalisables qu'en utilisant l'approche hétérogène, ce qui lui donne plus de privilèges que l'approche homogène. Ces résultats sont validés dans l'article de Ziade et al., 2021.

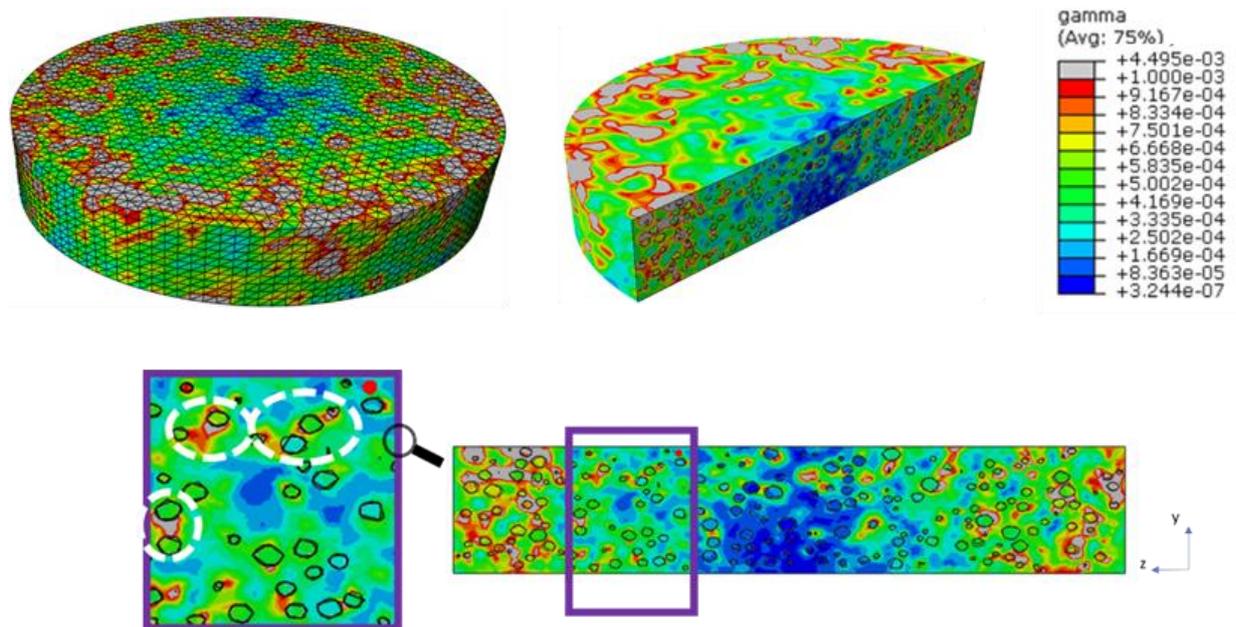


Figure 97 Distribution de la déformation dans l'échantillon numérique de mortier mélange

III.4. Prédiction du degré d'homogénéité de mélange

La procédure utilisée dans cette étude est conforme à la théorie des matériaux composites. En fonction des modifications de la structure du composite, les propriétés mécaniques varient. Le module de cisailment complexe (G^*) est une bonne indication des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux.

Rad, 2013, a essayé d'étudier le degré de mélange entre le liant neuf et le liant vieilli. Il a fabriqué un sandwich de liants bitumineux décrit dans la bibliographie. Il a considéré que dans le cas initial, le sandwich est considéré comme un liant à deux phases : le liant neuf et le liant vieilli. L'épaisseur des deux liants est supposée être égale et une liaison appropriée est assurée par la pression du DSR pour les échantillons non conditionnés. En se basant sur la théorie de la diffusion, les deux phases de liant commenceront à se mélanger dans les limites intermédiaires si les conditions appropriées sont fournies. Dans ce cas, une troisième phase qui est un mélange de liant neuf et vieilli se formera dans le composite. Comme la diffusion dépend du temps et de la température, la phase diffusante se déploie progressivement dans le milieu et le gradient de la substance diffusante n'est pas uniforme dans toute l'épaisseur du matériau. Par conséquent, la procédure suppose que le composite est formé d'une couche de liant neuf (en tant que substance diffusante) et d'un milieu de liant vieilli avec un gradient de concentration de liant neuf dans celui-ci qui change avec le temps et la température. En d'autres termes, pendant le conditionnement, l'épaisseur du liant frais diminue continuellement tandis que l'épaisseur du liant mélange augmente jusqu'à ce que l'équilibre entre les deux liants soit atteint. L'état d'équilibre est une indication d'un mélange complet entre deux liants, forcé par les phénomènes de diffusion. La Figure 98 illustre changement de la concentration du liant neuf dans le liant vieilli en raison du phénomène de diffusion.

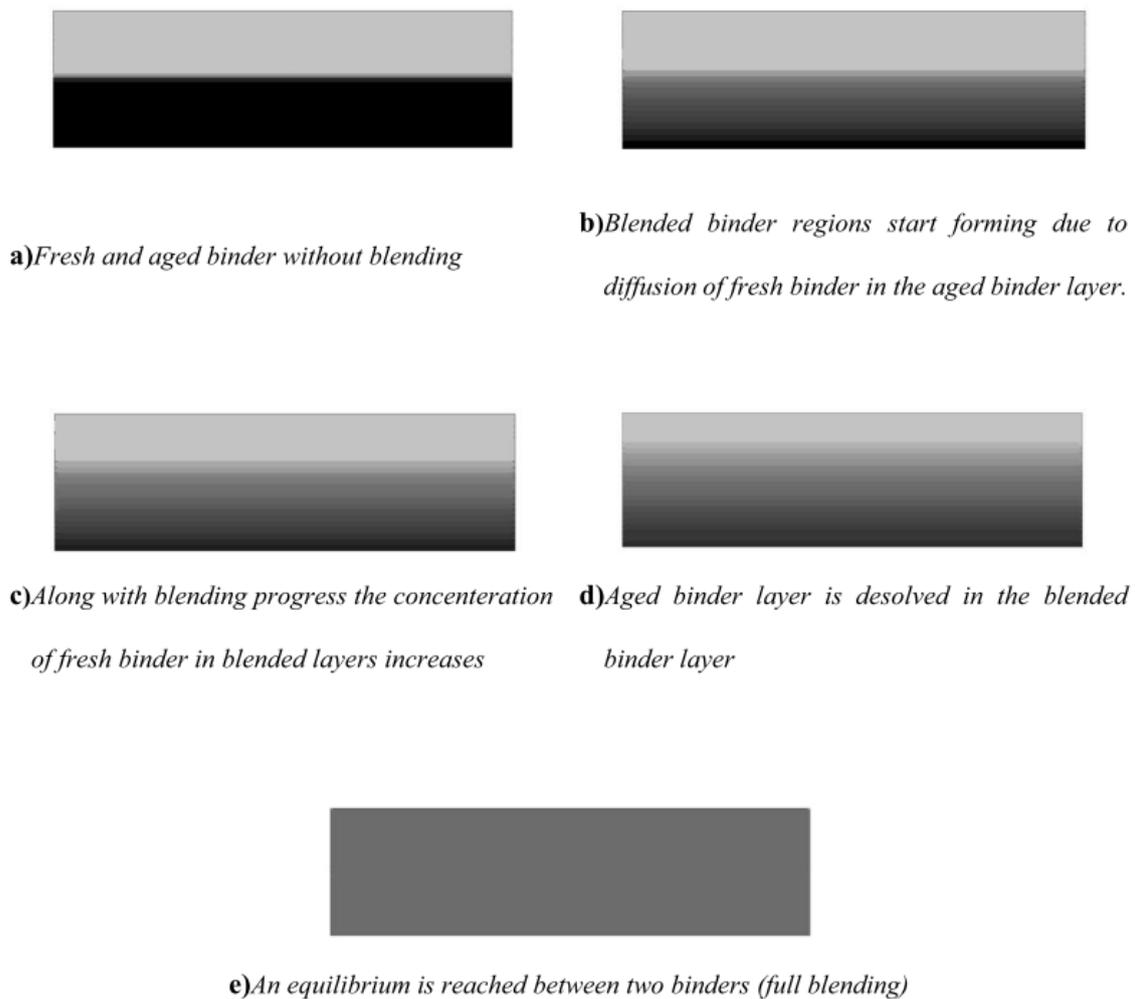


Figure 98 Schéma du changement de la concentration du liant neuf dans le liant vieilli en raison de phénomène de diffusion (Rad, 2013)

Dans le cadre de ce travail de recherche, le mortier mélange, dans le cas initial, peut être considéré comme un composite à deux phases, le constituant neuf et le constituant vieilli. En s'inspirant du travail réalisé par Rad, les deux phases commenceront à se mélanger au niveau des surfaces de contact. Dans ce cas, une troisième phase, qui est un mélange de matériau neuf et vieux, se formera dans le composite. Comme la diffusion dépend du temps et de la température, les phases diffusantes se diffusent progressivement dans le milieu. Par conséquent, la procédure suppose que le composite est formé d'une couche de matériau neuf, d'une couche de composant vieux et d'une couche correspondante à leur mélange. En d'autres termes, en fonction du temps, les épaisseurs des composants neuf et vieux vont diminuer continuellement tandis que l'épaisseur du mélange augmente jusqu'à ce que le mélange complet entre eux soit atteint. Dans notre étude, le phénomène est simulé sans prendre en compte le temps et le coefficient de diffusion de chaque constituant.

III.4.1. Modèle triphasique

Cette modélisation consiste à déterminer le degré d'homogénéité de mélange des constituants vieux et neuf. Le mortier mélange est formé du mortier neuf et du mortier vieux. Dans le cas

où un mélange existe entre ces deux constituants, un troisième composant apparaît. Ce dernier représente la partie mélangée (100% homogène) des constituants vieux et neuf.

Ainsi, l'objectif est de modéliser le mortier mélange en utilisant l'approche triphasique :

- La première phase est constituée des inclusions 1 (le mortier d'AE dans notre cas),
- La seconde phase est constituée des inclusions 2 (le mortier mélange 100% homogène dans notre cas)
- La troisième phase est la matrice (le mortier neuf dans notre cas).

En variant le volume de chaque phase, le pourcentage d'homogénéité de mélange est piloté. En comparant le module du mélange numérique au module d'un mortier mélange testé au laboratoire, le degré d'homogénéité de mélange expérimental du constituant vieux est déterminé.

Le concept de la modélisation triphasique, afin de déterminer le pourcentage de mélange, est présenté dans la Figure 99.

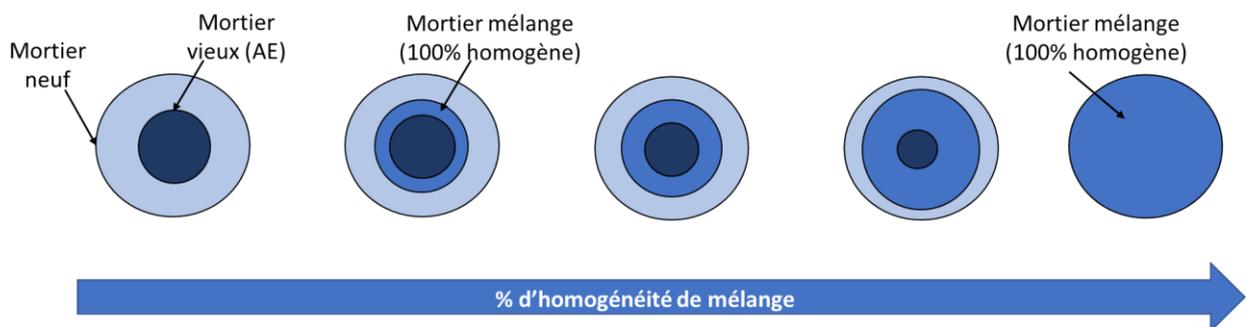


Figure 99 Le concept de la modélisation triphasique adoptée

III.4.1.1. Création des modèles numériques

Le mortier mélange correspondant au matériau GBÉ+ est formé de 51% de volume d'un mortier neuf (d'apport) et 49% de volume d'un mortier vieux (d'AE). Variant les volumes des différents mortiers, le degré d'homogénéité de mélange est piloté. 12 modèles numériques d'un mortier mélange sont développés en simulant 12 étapes de mélanges entre les constituants neufs et vieux. La Figure 100 illustre ces étapes de mélange. A chaque étape, 5% du mortier vieux est mélangé avec 5% du mortier neuf donnant un mortier mélange homogène. La cinétique de diffusion est prise égale pour les différents constituants dans ce travail de recherche. Le premier modèle correspond à 0% d'homogénéité et peut être présenté par un modèle biphasique. Ensuite, des modèles triphasiques sont développés représentant les différents degrés d'homogénéité de mélange entre les constituants. Enfin, le dernier modèle formé d'une seule phase (le mortier 100% homogène) correspond à un mélange homogène entre les mortiers neuf et vieux.

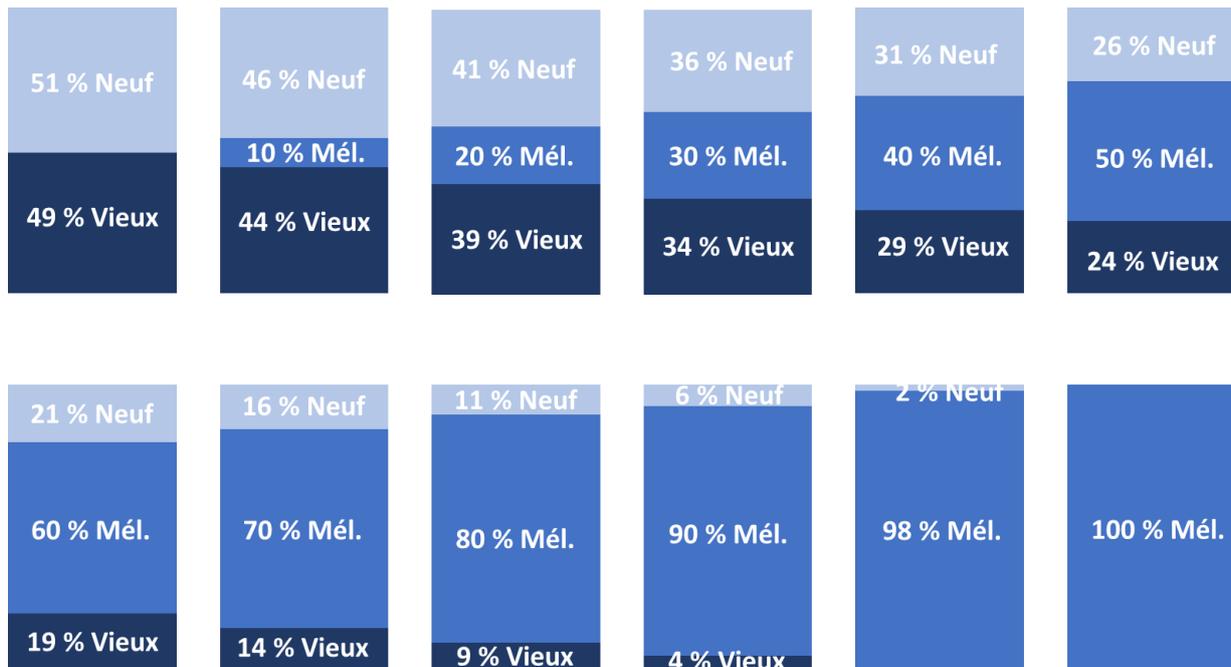


Figure 100 Les différents étapes de mélange entre les mortiers neuf et vieux

III.4.1.2. Génération des différentes phases

En adoptant cette méthode, le mortier vieux est considéré comme des inclusions et le mortier neuf comme la matrice. Le mortier (100% homogène) correspond à la couche de mortier qui existe entre le mortier neuf et le mortier vieux. Ce mortier est obtenu en réalisant une deuxième génération des inclusions en utilisant le logiciel MOA. La première génération correspond au pourcentage volumétrique du mortier AE et la deuxième correspond à la somme des pourcentages volumétriques des mortiers vieux et mélange (100% homogène) (Voir Tableau 33). Les générations résultantes sont présentées dans la Figure 101. Afin d'obtenir le mortier mélange, une opération booléenne est faite dans Abaqus en coupant les objets obtenus de la première génération par ceux obtenus de la deuxième génération. Cette opération est présentée dans le paragraphe suivant. Un exemple d'un mortier triphasique correspondant à la 4ème étape de mélange (36% neuf, 30% mélange et 34 % vieux) est présenté dans cette thèse.

Générations	Phase	Diamètre des sphères (µm)	Pourcentage volumétrique (%)
1	Mortier AE	50/250	$V_{\text{mortier AE}}$
2	Mortier AE+ Mortier mélange (homogène)	100/400	$V_{\text{mortier AE}} + V_{\text{mortier mél}}$

Tableau 33 Pourcentage volumétrique des générations résultantes

Plusieurs modèles sont générés en variant la taille des objets tout en respectant le pourcentage volumétrique de chaque phase. Ces modèles donnent des résultats de module complexe très proches avec des différences de moins de 3%.

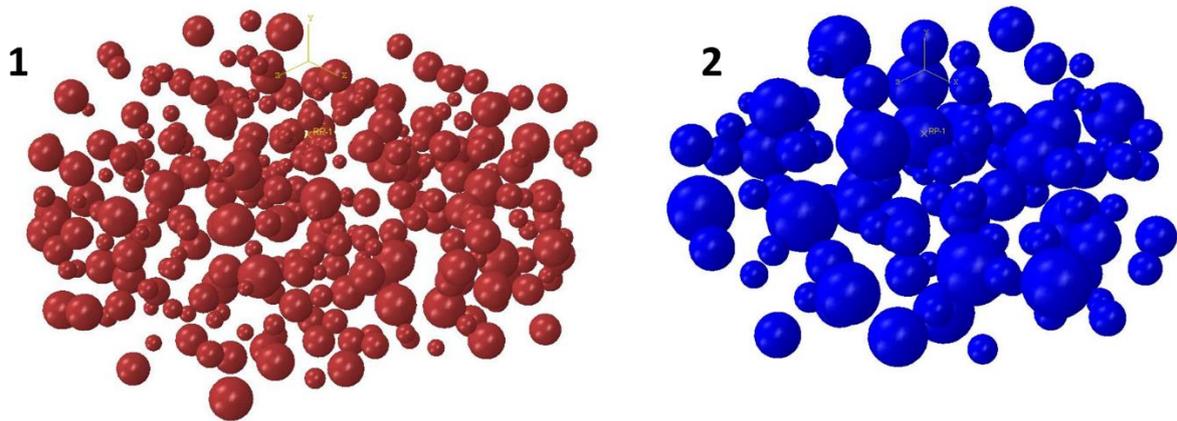


Figure 101 Les deux générations obtenues par MOA

III.4.1.3. Création de l'échantillon de mortier numérique

Après avoir importé ces deux générations, les trois phases sont créées et enfin le mortier numérique est obtenu en les combinant. Dans ce but, des opérations booléennes sont effectuées comme le montre la Figure 102. Ces opérations sont :

- Une première qui sert à créer le mortier avec un degré d'homogénéité de mélange de 100%.
- Une deuxième qui sert à créer la troisième phase qui est le mortier neuf.
- Une troisième qui sert à créer le mortier mélange triphasique.

Le volume de chaque phase est vérifié après chaque opération booléenne afin de respecter les pourcentages volumétriques souhaités.

Le modèle est assimilé à un cylindre de 4 mm de diamètre et de 1 mm de hauteur afin de représenter l'échantillon expérimental de mortier bitumineux.

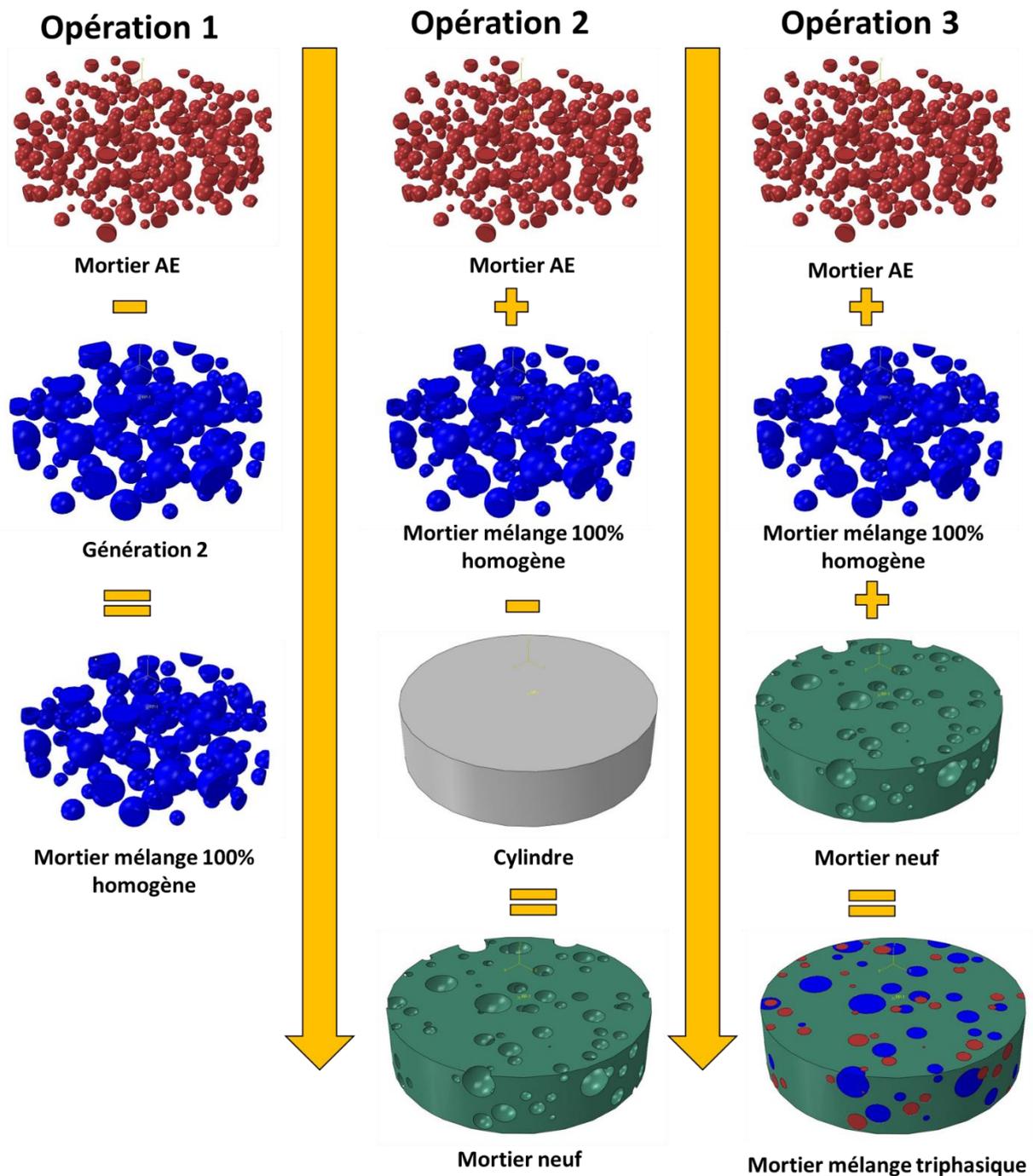


Figure 102 Opérations booléennes pour un modèle de mortier triphasique

III.4.1.4. Propriétés mécaniques

Après avoir créé la structure du modèle, chaque phase est affectée par des propriétés mécaniques différentes. L'exemple présenté dans cette section concerne la simulation d'un mortier à une température de 15°C et une fréquence de 10Hz. Les différentes phases sont affectées par des propriétés élastiques linéaires pour de petites valeurs de déformation. Ces propriétés sont définies par le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν à chaque température et fréquence en utilisant nos résultats expérimentaux des mortiers (voir Tableau 34 pour l'exemple présenté).

Phase	Module complexe E* (MPa) à 15°C et 10 Hz	Coefficient de poisson
Mortier AE	2236	0.4
Mortier mélange 100% homogène	1366	0.4
Mortier Neuf	413	0.4

Tableau 34 Propriétés élastiques des différentes phases

III.4.1.5. Chargement et conditions aux limites

Pour définir les conditions aux limites à fixer numériquement, les conditions expérimentales sont simulées. Expérimentalement, les éprouvettes sont fixées à une extrémité et une charge ou un déplacement est imposé à l'autre extrémité. En général, la surface inférieure des modèles est encastrée, ce qui signifie que les déplacements sont annulés. Cependant, à la surface supérieure, un point de référence est créé au centre de la surface supérieure du modèle. Un déplacement rotatif θ de 0.0003 (correspondant à $\gamma = 0.06\%$, trouvée expérimentalement) est imposé à ce point de référence.

L'essai de module complexe de cisaillement est simulé à différents taux de chargement en imposant différentes fréquences de déplacement sinusoïdal à la surface supérieure de l'échantillon à différentes températures. Après avoir appliqué 4 fréquences : 0.1, 1, 10 et 100 Hz à 15°C, les résultats de la modélisation sont présentés. La Figure 103 montre le point de référence, la charge imposée et les conditions aux limites du modèle numérique.

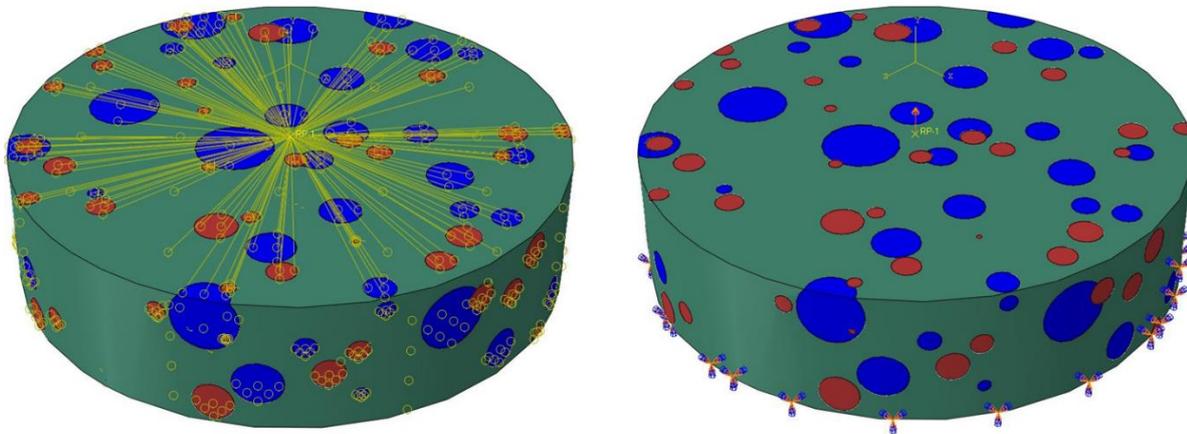


Figure 103 Chargement et conditions aux limites du modèle numérique

III.4.1.6. Maillage

Pour obtenir un état de cohésion entre la matrice et les inclusions, une fonction de liaison, prédéfinie dans le logiciel ABAQUS, est imposée, assurant un degré de liberté nul entre les nœuds, garantissant une distribution égale des déformations et une transmission égale des contraintes aux interfaces, ainsi que la continuité d'un déplacement (Abaqus guide, 2013). Le modèle est maillé en utilisant des éléments de même taille. Pour obtenir une distribution uniforme des contraintes et des déformations dans le modèle, l'opération de maillage est effectuée en choisissant l'élément tétraédrique quadratique à dix nœuds (C3D10). Cet élément

de maillage choisi permet d'obtenir une interpolation d'ordre supérieur du champ de déplacement. Le maillage de chaque phase ainsi que le modèle final maillé sont présentés dans la Figure 104.

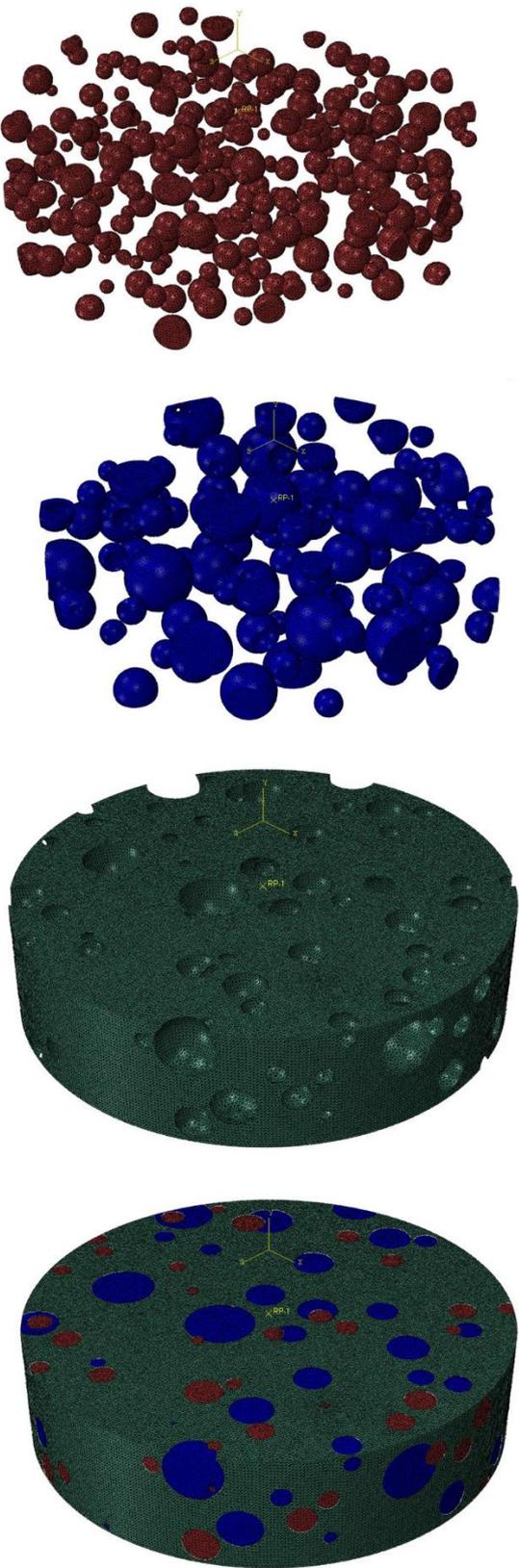


Figure 104 Le mortier triphasique maillé

III.4.1.7. Calcul du module complexe de cisaillement

Une analyse pseudo-élastique est appliquée, ce qui signifie que le module complexe de chaque phase est attribué à un modèle correspondant à une certaine température et fréquence. Le coefficient de Poisson a été supposé égal à 0.4 indépendamment de la température et de la fréquence. L'analyse pseudo-élastique est adoptée pour étudier la validité et l'efficacité des modèles triphasiques. Ces derniers sont considérés comme des modèles très complexes vu qu'ils correspondent à 3 phases de propriétés différentes et à un nombre d'éléments très important. Le module complexe de cisaillement du mortier triphasique est calculé à chaque température et fréquence, en utilisant l'équation 45 déjà présentée dans le cas de la modélisation biphasique.

III.4.1.8. Résultats

Les modules complexes E^* sont mesurés en variant le degré de mélange entre le mortier vieux et le mortier neuf. Ce module E^* est obtenu à partir de module complexe de cisaillement G^* à l'aide de l'équation 48 en prenant le coefficient de poisson $\nu = 0.4$ pour les mortiers.

$$G^* = \frac{E^*}{2(1+\nu)} \quad \text{Équation 43}$$

La Figure 105 représente les résultats obtenus à 15°C et à 10 Hz en fonction du degré de mélange du mortier triphasique.

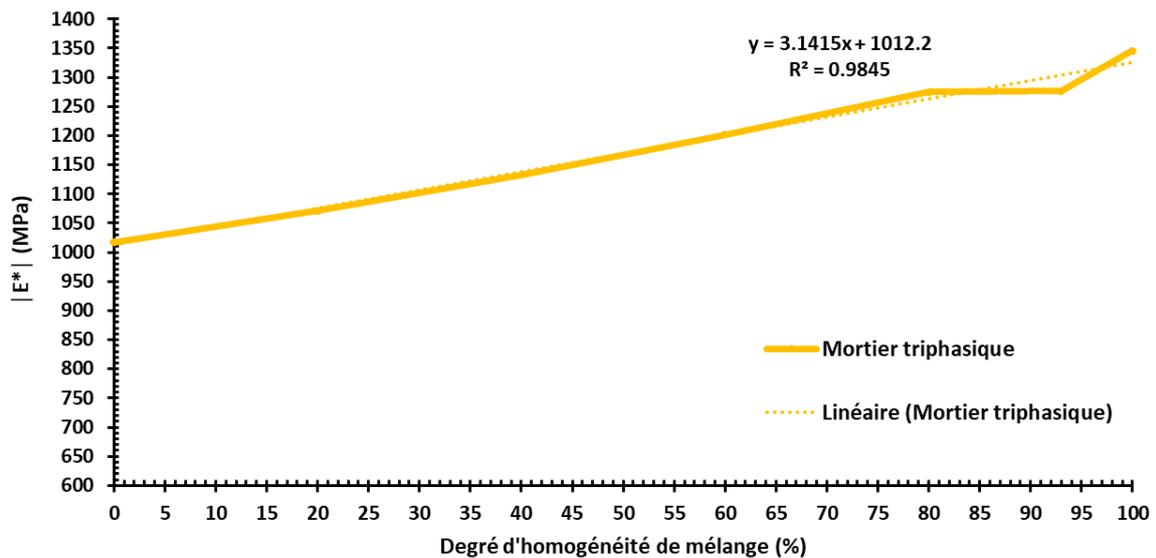


Figure 105 La norme du module complexe E^* en fonction du degré d'homogénéité de mélange du mortier triphasique obtenue à 15°C, 10Hz.

Le module mesuré représente une fonction linéaire avec le degré d'homogénéité de mélange. Cette fonction est représentée par l'équation suivante :

$$E^*_{\%mélange} = 3.14 \times \%mélange + E^*_{0\%mélange} \quad \text{Équation 44}$$

Avec, $\%mélange$ est le pourcentage d'homogénéité de mélange.

A partir de cette équation, on trouve que le module augmente de 3 MPa pour chaque degré d'homogénéité de mélange. On peut conclure que plus le mélange est homogène c'est-à-dire plus le constituant vieux se remobilise dans le mélange, plus la rigidité du mélange augmente.

D'où l'importance d'estimer et de contrôler le pourcentage d'homogénéité de mélange entre les différents constituants.

A partir d'un mélange 90% homogène, des irrégularités sont observées concernant la linéarité de la droite. Cela pourrait être expliqué par le passage d'un modèle triphasique à un modèle biphasique à partir de ce pourcentage vu que le constituant vieux se remobilise en totalité dans le mélange et il ne reste qu'un petit volume du mortier neuf qui n'est pas encore mélangé. A 100% d'homogénéité de mélange, tous les constituants sont mélangés et le modèle correspond à un mortier monophasique dont les propriétés sont égales à celles mesurées expérimentalement du mortier mélange 100% homogène.

Ce modèle est développé afin de prédire le taux d'homogénéité d'un mortier mélange. Ayant le module calculé en fonction du pourcentage d'homogénéité, on compare ce module numérique au module d'un mortier mélange testé au labo et on obtiendra le degré d'homogénéité de mélange expérimental entre les constituants neuf et vieux. Prenons l'exemple du mortier mélange avec le pourcentage inconnu d'homogénéité fabriqué en mélangeant le mortier neuf et le mortier d'AE. Il est testé au laboratoire et le comportement résultant est présenté dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** de cette thèse. Ce mortier a un module $E^* = 1076$ MPa (à 15°C et 10Hz). En plaçant ce module sur le graphe de la Figure 105, on peut estimer que le degré de mélange entre les constituants est de 21%.

Chaque étape de notre modélisation est basée sur une hypothèse de simplification : 5% de volume de mortier vieux se mélange avec 5% de volume du mortier neuf. Notre modèle peut être optimisé en considérant différentes vitesses de mélange pour les constituants neuf et vieux afin de mieux représenter le mélange. La validation de ce modèle est impossible vue la complexité des essais déjà existant pour déterminer le degré de mélange et qui sont présentés précédemment (Navaro, 2011, Gaspar et al., 2020).

III.4.2. Modèle quadriphasique

Une autre approche utilisée afin de prédire le pourcentage d'homogénéité de mélange est la modélisation quadriphasique. Le mortier mélange est formé du mastic neuf, mastic vieux, sable d'apport et sable d'AE. Quand le constituant vieux se diffuse dans le constituant neuf, un troisième composant apparaît qui est le mastic mélange 100% homogène. Cette modélisation consiste à représenter le mortier mélange en 4 phases.

Ainsi, l'objectif est de modéliser le mortier mélange en utilisant l'approche quadriphasique :

- La première phase est constituée des inclusions 1 (le sable dans notre cas),
- La deuxième phase est constituée des inclusions 2 (le mastic d'AE dans notre cas),
- La troisième phase est constituée des inclusions 3 (le mastic mélange homogène dans notre cas),
- La quatrième phase est la matrice (le mastic neuf dans notre cas).

Les sables d'AE et d'apport sont considérés comme une seule phase vue que leurs propriétés mécaniques ne varient pas en fonction du vieillissement du matériau. En variant le volume de chaque phase de mastic, le pourcentage d'homogénéité de mélange est piloté. En comparant le module du mélange numérique au module d'un mortier mélange testé au laboratoire, le degré de mélange expérimental pourrait être déterminé.

Le concept de la modélisation quadriphasique, afin de déterminer le pourcentage d'homogénéité de mélange, est présenté dans la Figure 106.

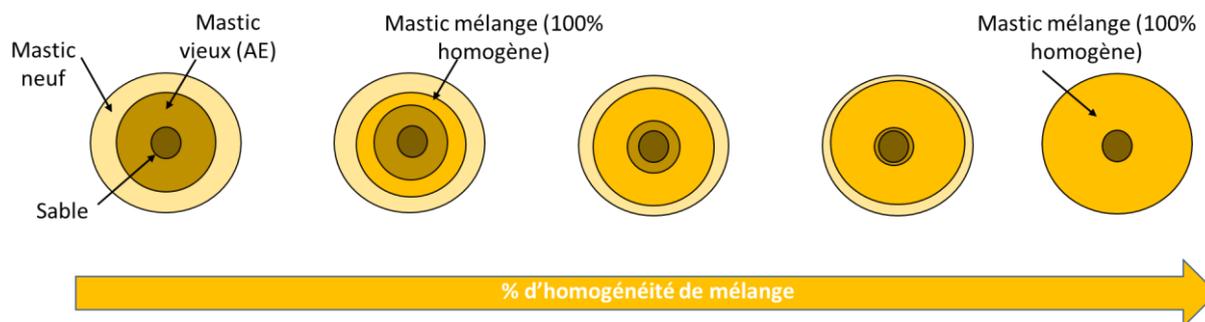


Figure 106 Le concept de la modélisation quadriphasique adoptée

III.4.2.1. Création des modèles numériques

Le mortier mélange correspondant au matériau GB&+ est formé de 44% de volume d'un mastic neuf (d'apport) et 37.5% de volume d'un mastic vieux (d'AE) et 18.5% de volume du sable. Un mastic mélange apparaît quand le constituant vieux commence à se remobiliser dans le mélange. Variant les volumes des différents mastics, le degré d'homogénéité de mélange est piloté. 12 modèles numériques d'un mortier mélange sont développés en simulant 12 étapes de mélanges entre les constituants neufs et vieux. La Figure 107 illustre ces étapes de mélange. Chacune correspond à une étape de mélange du modèle triphasique présenté dans le paragraphe précédent mais au niveau du mastic. La cinétique de diffusion est égale pour les différents constituants dans ce travail de recherche. Le premier modèle correspond à 0% de mélange et peut être présenté par un modèle triphasique. Ensuite, des modèles quadriphasiques sont développés représentant les différents degrés d'homogénéité de mélange entre les constituants. Enfin, le dernier modèle formé de deux phases (le mastic mélange 100% homogène et le sable) représente un mortier dont le mélange entre les constituants vieux et neufs est 100% homogène. Cette dernière étape correspond à l'exemple présenté dans le paragraphe de la modélisation biphasique.



Figure 107 Les différentes étapes de mélange entre les constituants neuf et vieux

III.4.2.2. Génération des différentes phases

En adoptant cette méthode, le sable est considéré comme des inclusions. Le mastic mélange (100% homogène) correspond à la couche de mastic qui existe entre le mastic neuf et le mastic vieux. Ce mastic et le mastic vieux sont obtenus en réalisant deux autres générations en utilisant le logiciel MOA. La première génération correspond à la somme du pourcentage volumétrique du mastic AE et du sable et la deuxième générée à partir de la somme des pourcentages volumétriques du sable et des mastics vieux et mélange (100% homogène) (voir Tableau 35). Les générations résultantes sont présentées dans la Figure 108. Afin d'obtenir les mastics vieux, mélange et neuf, des opérations booléennes sont réalisées dans Abaqus. Ces opérations sont présentées dans le paragraphe suivant. Un exemple d'un mortier quadriphasique correspondant à la 6ème étape de mélange (18.5% sable, 24% neuf, 40% mélange et 17.5 % vieux et 18.5% sable) est présenté dans cette thèse.

Génération	Phase	Diamètre des sphères (µm)	Pourcentage volumétrique (%)
1	Sables	63/250	V_{sable}
2	Mastic AE+ sables	63/400	$V_{\text{mastic AE}} + V_{\text{sable}}$
3	Mastic AE + Mastic mélange + sable	100/500	$V_{\text{mastic AE}} + V_{\text{mastic mél.}} + V_{\text{sable}}$

Tableau 35 Pourcentages volumétriques des générations résultantes

Plusieurs modèles sont générés en variant la taille des objets tout en respectant le pourcentage volumétrique de chaque phase. Ces modèles donnent des résultats de module complexe très proches avec des différences de moins de 3%.

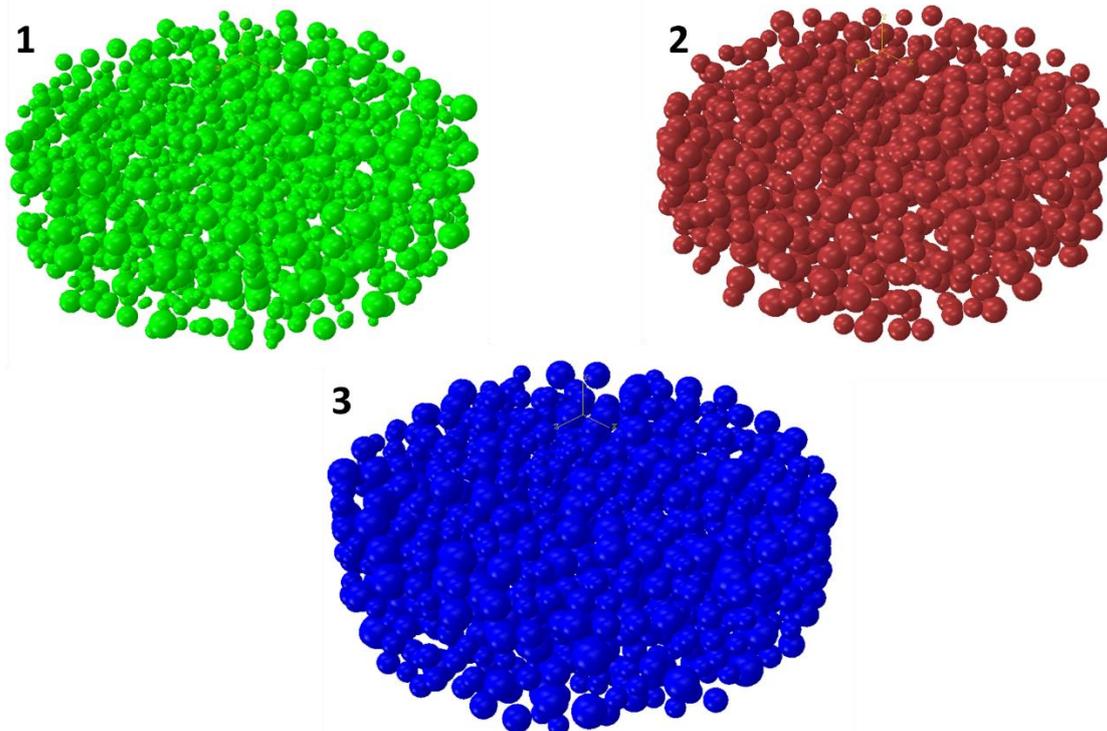


Figure 108 Les trois générations obtenues par MOA

III.4.2.3. Création de l'échantillon de mortier numérique

Après avoir importé ces trois générations, les quatre phases sont créées, et en dernier, le mortier numérique est obtenu en les combinant. Dans ce but, des opérations booléennes sont effectuées comme le montre la Figure 109. Ces opérations sont :

- Une première qui sert à créer le mastic vieux.
- Une deuxième qui sert à créer le mastic mélange 100% homogène.
- Une troisième qui sert à créer la quatrième phase qui est le mastic neuf.
- Une quatrième qui sert à créer le mortier mélange quadriphasique.

Le volume de chaque phase est vérifié après chaque opération booléenne afin de respecter les pourcentages volumétriques souhaités.

Le modèle est assimilé à un cylindre de 4 mm de diamètre et de 1 mm de hauteur afin de représenter l'échantillon expérimental de mortier bitumineux.

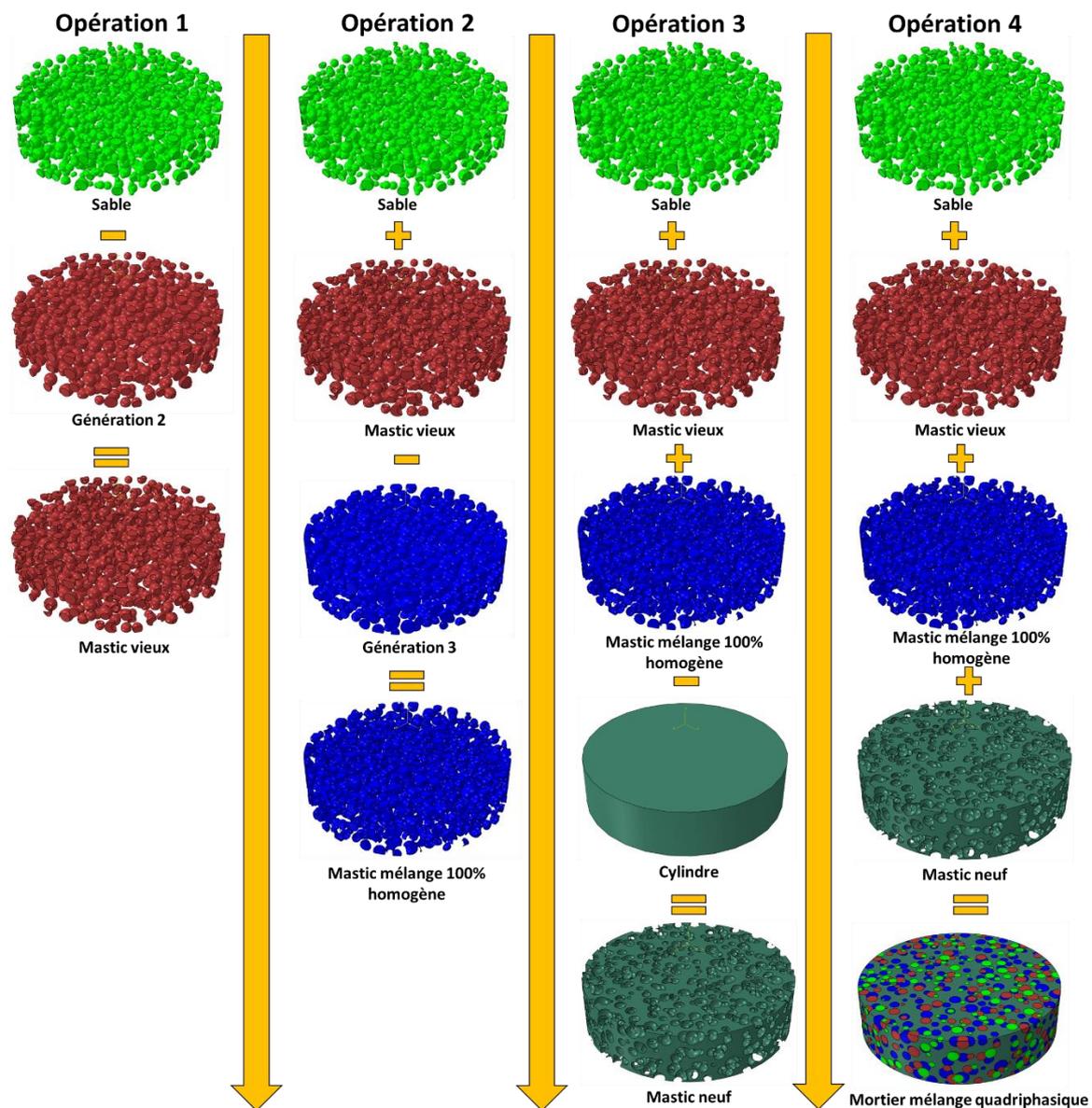


Figure 109 Opérations booléennes pour un modèle de mortier quadriphasique

III.4.2.4. Propriétés mécaniques

Après avoir créé la structure du modèle, chaque phase est affectée de propriétés mécaniques différentes. L'exemple présenté dans cette section concerne la simulation d'un mortier à une température de 15°C et une fréquence de 10Hz. Les différentes phases sont affectées par des propriétés élastiques linéaires pour de faibles valeurs de déformation. Ces propriétés sont définies par le module d'Young E^* et le coefficient de Poisson ν à chaque température et fréquence en utilisant les résultats expérimentaux des mastics (voir Tableau 36 pour l'exemple présenté).

Phase	Module complexe E^* (MPa) à 15°C et 10 Hz	Coefficient de poisson
Mastic AE	1669	0.4
Mastic mélange 100% homogène	840	0.4
Mastic Neuf	305	0.4
Sable	50 000	0.15

Tableau 36 Propriétés élastiques des différentes phases

III.4.2.5. Chargement et conditions aux limites

Pour définir les conditions aux limites à fixer numériquement, les conditions expérimentales sont simulées. Expérimentalement, les éprouvettes sont fixées à une extrémité et une charge, ou un déplacement, est imposée à l'autre extrémité. En général, la surface inférieure des modèles est encastree, ce qui signifie que les déplacements sont annulés. Cependant, à la surface supérieure, un point de référence est créé au centre de la surface supérieure du modèle. Un déplacement rotatif θ de 0.0003 (correspondant à $\gamma = 0.06\%$) est imposé à ce point de référence.

L'essai de module complexe de cisaillement est simulé à différents taux de chargement en imposant différentes fréquences de déplacement sinusoïdal à la surface supérieure de l'échantillon à différentes températures. Après avoir appliqué 4 fréquences : 0.1, 1, 10 et 100 Hz à 15°C, les résultats de la modélisation sont présentés. La Figure 110 montre le point de référence, la charge imposée et les conditions aux limites du modèle numérique.

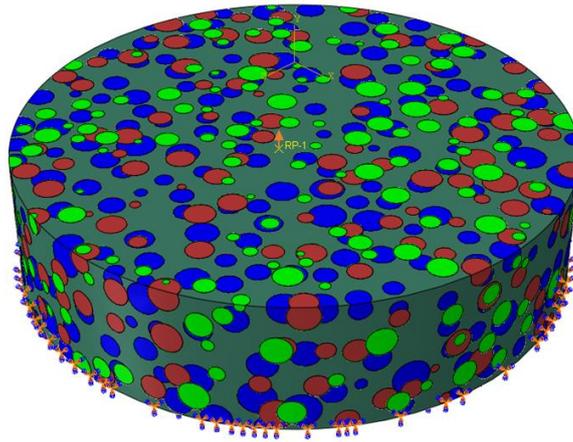


Figure 110 Chargement et conditions aux limites du modèle numérique

III.4.2.6. Maillage

Pour obtenir un état de cohésion entre la matrice et les inclusions, une fonction de liaison prédéfinie dans le logiciel ABAQUS est imposée, assurant un degré de liberté nul entre les nœuds, garantissant une distribution égale des déformations et une transmission des contraintes aux interfaces, ainsi que la continuité d'un déplacement (Abaqus guide, 2013). Le modèle est maillé en utilisant des éléments de même taille. Pour obtenir une distribution uniforme des contraintes et des déformations dans le modèle, l'opération de maillage est effectuée en choisissant l'élément tétraédrique quadratique à dix nœuds (C3D10). Cet élément de maillage choisi permet d'obtenir une interpolation d'ordre supérieur du champ de déplacement. Le maillage de chaque phase ainsi que le modèle final est présenté dans la Figure 111.

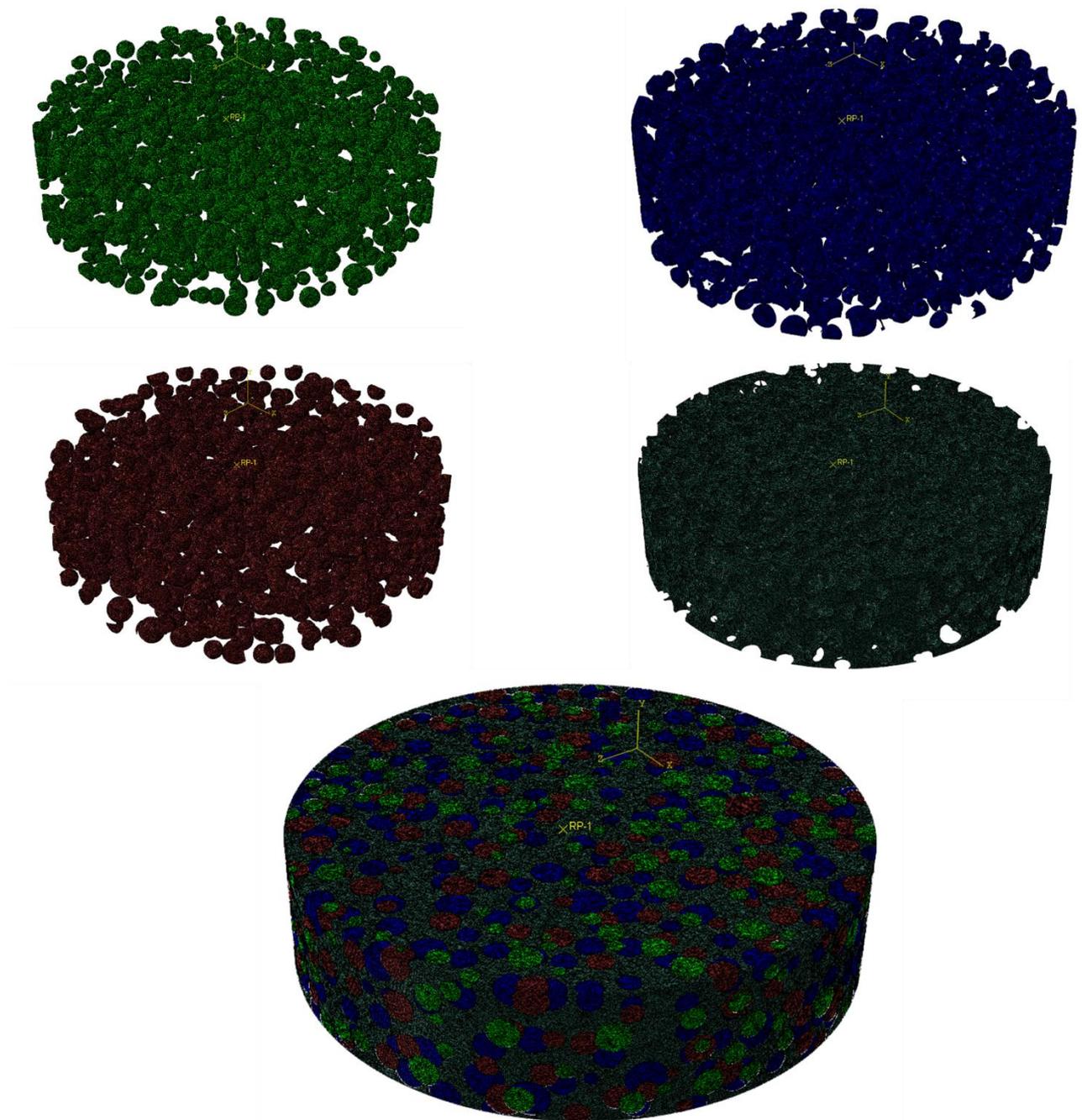


Figure 111 Le mortier quadrphasique maillé

III.4.2.7. Calcul du module complexe de cisaillement

Une analyse pseudo-élastique est appliquée, ce qui signifie que le module complexe de chaque phase est attribué à un modèle correspondant à une certaine température et fréquence. Le coefficient de Poisson est supposé égal à 0.4 indépendamment de la température et de la fréquence. L'analyse pseudo-élastique est adoptée pour étudier la validité et l'efficacité des modèles quadriphases. Ces derniers sont considérés comme des modèles très complexes vu qu'ils correspondent à 4 phases de propriétés différentes et à un nombre d'éléments très important. Le module complexe de cisaillement du mortier quadriphase est calculé à chaque température et fréquence en utilisant l'équation 45 déjà présentée dans le cas de la modélisation biphasique.

III.4.2.8. Résultats

Les modules complexes E^* sont mesurés en variant l'homogénéité de mélange entre le mastic vieux et le mastic neuf. Ce module E^* est obtenu à partir de module complexe de cisaillement G^* à l'aide de l'équation 48 en prenant le coefficient de poisson $\nu = 0.4$ pour le mortier mélange.

La Figure 112 représente les résultats obtenus à 15°C et à 10 Hz en fonction du degré d'homogénéité de mélange du mortier quadriphasique.

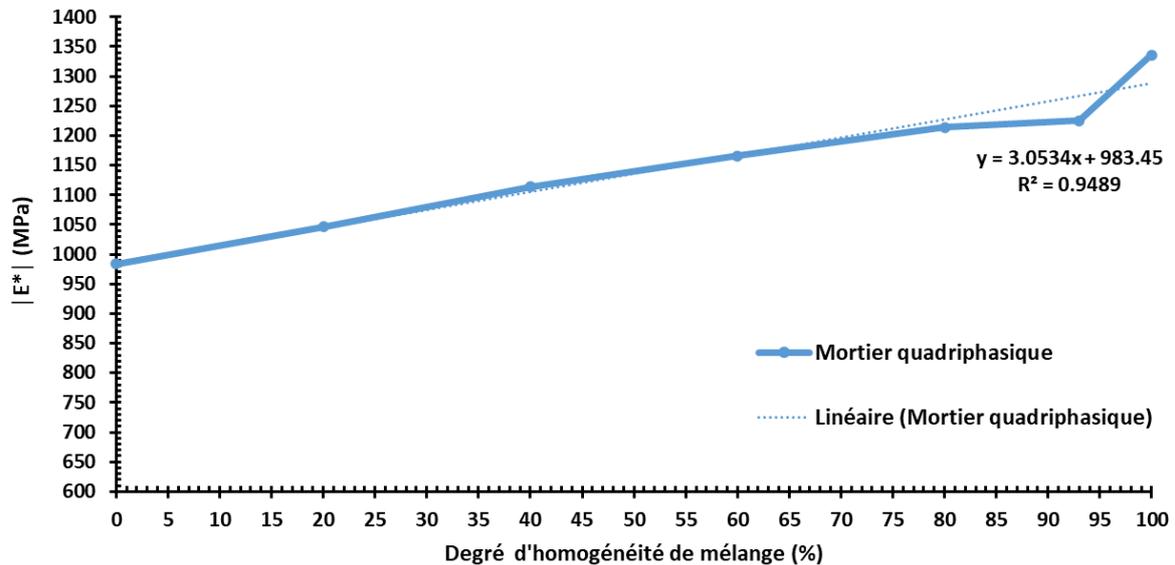


Figure 112 La norme du module complexe E^* en fonction du degré d'homogénéité de mélange du mortier quadriphasique obtenue à 15°C, 10Hz.

Le module mesuré représente une fonction linéaire avec le taux de mélange. Cette fonction est représentée par l'équation suivante :

$$E^*_{\%mélange} = 3.05 \times \%mélange + E^*_{0\%mélange} \quad \text{Équation 45}$$

A partir de 80% de mélange, des irrégularités sont observés sur la droite. Cela est expliqué par le passage d'un modèle quadriphasique à un modèle triphasique à partir de ce pourcentage vu que le constituant vieux se remobilise en totalité dans le mélange et il ne reste qu'un petit volume du mastic neuf qui n'est pas encore mélangé. A 100% de mélange, tous les constituants sont mélangés et le modèle correspond à un mortier biphasique dont les propriétés sont égales à celles mesurées expérimentalement du mortier mélange 100% homogène. Pareille, une augmentation linéaire de la rigidité en fonction de l'homogénéité de mélange est observée dans le travail de recherche de Nguyen, 2009. La Figure 113 représente la rigidité d'un enrobé mélange en fonction du temps de malaxage. Nguyen a déjà montré que plus la durée de mélange augmente, plus le matériau est homogène. Par conséquent, cette figure montre une légère augmentation linéaire de la rigidité moyenne de 1244 à 1720 MPa en fonction de l'homogénéité de l'enrobé.

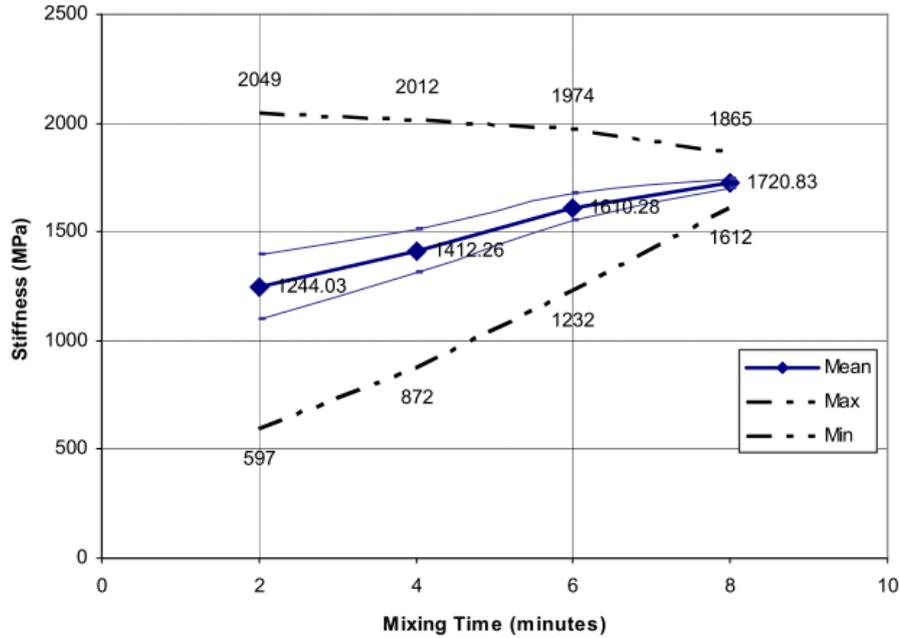


Figure 113 Rigidité en fonction du temps de mélange des enrobés (Nguyen, 2009)

En comparant les résultats obtenus des deux modélisations triphasiques et quadriphasiques (voir Figure 114), on peut remarquer que les modules mesurés par les deux approches se différencient de 2% à 7% et elles donnent des estimations proches du degré d'homogénéité de mélange d'un mortier. Ce résultat peut valider la modélisation triphasique en termes de calcul de module complexe du matériau mélange. Cette modélisation triphasique peut être une bonne alternative à la modélisation quadriphasique qui est plus compliquée, qui contient un grand nombre d'objets et qui nécessite un temps de calcul plus élevé.

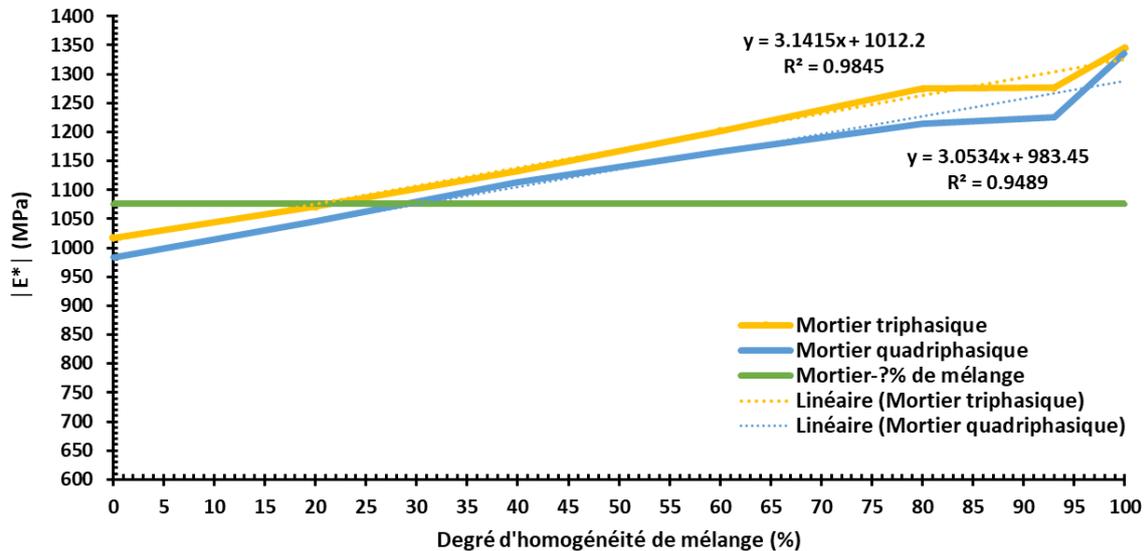


Figure 114 La norme du module complexe E^* en fonction du degré d'homogénéité de mélange du mortier obtenue à 15°C, 10Hz par les modélisations triphasiques et quadriphasiques.

A partir des équations des deux droites de la Figure 114, on peut trouver que le module augmente de 3 MPa pour chaque degré de mélange dans les deux cas de modélisation. Cela confirme que la rigidité du matériau augmente quand le pourcentage d'homogénéité de

mélange augmente (Nguyen, 2009). D'où l'importance de contrôler le taux de mélange entre les différents constituants afin de contrôler la rigidité du mélange.

L'objectif de cette modélisation est de prédire le degré de mélange d'un mortier. Prenons l'exemple du mortier avec le pourcentage inconnu de mélange fabriqué à partir du mortier neuf et du mortier d'AE. Il est soumis à un essai de module au laboratoire en utilisant le DSR. Ce mortier a un module $E^* = 1076$ MPa (à 15°C et 10Hz). D'après le graphe de la Figure 114 (droite verte), on peut estimer que le taux d'homogénéité de mélange entre les constituants correspondant à ce module est environ 28% pour la modélisation quadriphasique. La différence entre les deux pourcentages obtenus par les deux approches triphasique et quadriphasique revient aux incertitudes liées aux valeurs de modules mesurées expérimentalement de chaque phase dans les modèles. Cependant, avec ces deux degrés de mélanges, on peut estimer que pour le mortier testé, ce pourcentage est entre 21% et 28%.

Ces résultats ne sont pas validés expérimentalement vu que les méthodes utilisées pour déterminer le taux de mélange sont compliquées et nécessitent des dispositifs spécifiques : la lixiviation (Navaro, 2011), les différents microscopes tels que la microscopie infrarouge en mode Réflectance Totale Atténuée ATR (Vassaux, 2017), la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier IRTF (Navaro, 2011) et la microscopie à force atomique AFM (Xu et al., 2018).

Les deux approches proposées présentent une étude préliminaire afin de trouver le pourcentage d'homogénéité de mélange entre les différents constituants au sein d'un même matériau. Elle nécessite quelques améliorations au niveau de la cinétique de mélange entre les constituants neuf et vieux. Pour cela, des essais doivent être menés afin de mesurer le coefficient de diffusion du matériau vieux dans le neuf. Ce coefficient doit être adapté à la température du conditionnement ou du malaxage du matériau (Rad, 2013).

III.5. Conclusion

En conclusion, les modèles numériques développés aboutissent à des résultats optimistes. Une modélisation biphasique hétérogène est adoptée pour simuler l'essai de module complexe de cisaillement sur des mélanges bitumineux. En ce qui concerne les résultats, cette modélisation est capable de déterminer avec précision le module complexe de cisaillement pour les mélanges bitumineux tel que le mortier. La différence entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux ne dépasse pas 10%.

Cette méthode a permis d'étudier la microstructure du matériau et d'évaluer à une échelle locale l'influence de l'application d'une charge mécanique et la distribution des déformations. En général, on a remarqué que les zones les plus endommagées dans les modèles sont situées entre les inclusions voisines. Dans ces zones, il existe des valeurs de concentration de déformation élevée.

En addition, des modèles triphasiques et quadriphasiques sont développés pour simuler l'essai de module sur des mélanges bitumineux dans le but de déterminer le degré d'homogénéité de mélange entre les différents constituants. Les deux approches ont abouti à des résultats proches. Par conséquent, le modèle triphasique peut être adopté sans passer par la modélisation quadriphasique afin de gagner du temps de calcul. En adoptant ces approches, le pourcentage de mélange entre les composants vieux et neuf d'un mortier mélange est prédit. Cette approche peut être optimisée en prenant en compte le coefficient de diffusion du constituant vieux dans le neuf, et en la validant expérimentalement. Enfin, cette

méthode semble être un bon outil pour caractériser l'homogénéisation des constituants vieux et neufs au sein d'un matériau mélange vu qu'elle ne nécessite pas de fabriquer l'échelle finale à tester, donc elle sert à économiser de ressources et elle est simple à réaliser en comparaison aux essais expérimentaux qui sont compliqués et qui ne sont pas encore normalisés.

Les différentes modélisations adoptées dans ce chapitre sont présentées dans la Figure 115.

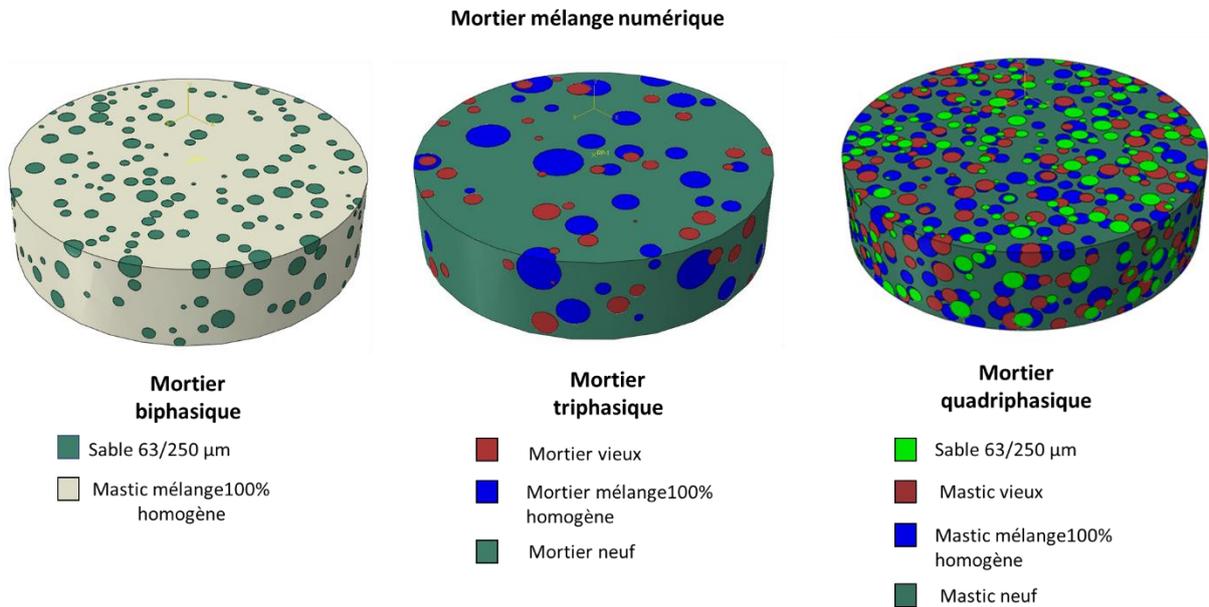


Figure 115 Les différentes modélisations adoptées dans ce chapitre

**Partie IV. Echelle
structure :
Comportement et
durabilité**

Partie IV. Echelle structure : Comportement et durabilité

Après avoir caractérisé la rigidité des différentes échelles par des essais au laboratoire et par la modélisation numérique, une étude est menée afin de déterminer la durée de vie du GB ϵ + en couche de base en utilisant des essais en vraies grandeurs. Ces essais consistent à reproduire le comportement réel d'une structure routière en la soumettant régulièrement à une charge de trafic. Les essais en vraie grandeur peuvent être effectués, sous des conditions environnementales et des conditions de charge, contrôlées.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la durée de vie et la résistance à la fissuration par fatigue d'un matériau innovant contenant 40% d'AE en couche de base. Elle est réalisée en analysant les données recueillies à partir d'une planche expérimentale construite dans un hall, sollicitée par un simulateur de trafic en grandeur réelle (Mobile Load Simulator MLS10) à Egletons. Une instrumentation importante est intégrée dans les couches de surface et de base. Quatre campagnes expérimentales sont menées avec environ 1 100 000 passages de charges cumulées appliquées à la couche de base dans différentes conditions climatiques. La température de surface est contrôlée par un système de chauffage qui a aussi permis d'étudier l'orniérage de plusieurs couches de surface. Les déformations sont mesurées par des jauges de déformation, placées entre les couches de surface et de base, et par des capteurs à fibre optique intégrés dans le géotextile sous la couche de GB ϵ +

Ce chapitre détaille la démarche expérimentale qui est suivie au cours des différentes campagnes d'essais. Le chantier expérimental, les différents types d'instrumentation et les résultats mesurés au cours de ces campagnes expérimentales sont décrits dans la première partie du chapitre. Il présente par la suite une étude des déformations longitudinales mesurées au toit et à la base de la GB ϵ + pour l'ensemble des conditions d'essais. Les mesures expérimentales présentées dans ce chapitre correspondent en majorité aux résultats mesurés durant la dernière campagne d'essais. Ces résultats servent à évaluer la fatigue du matériau testé.

IV.1. Introduction

Les chaussées sont conçues pour avoir une longue durée de vie. Leur intégrité structurelle est censée durer plus de 20 ou 30 ans (selon la méthode française de dimensionnement), alors que seule la couche de surface sera régulièrement fraisée et remplacée. Cette couche rabotée peut être recyclée et réutilisée dans de nouveaux mélanges afin d'économiser les ressources naturelles. La durée de vie en fatigue est définie comme l'état de service du matériau avant l'apparition de fissures conduisant à la rupture. Elle est affectée par le trafic, la température et l'introduction des agrégats d'enrobé AE. Dans les paragraphes suivants, l'effet de chaque facteur sera détaillé.

En ce qui concerne l'effet du trafic, lorsque les chaussées subissent des charges de trafic répétées, leur couche inférieure est endommagée en raison de la déformation induite par le passage des charges. Par conséquent, des fissures commencent à se développer dans la couche inférieure et se propagent ensuite vers le haut, atteignant la couche de surface. Ces fissures ne sont pas seulement générées par la charge cyclique du trafic, mais aussi par les conditions de températures.

En ce qui concerne l'effet de la température, les matériaux bitumineux sont connus pour avoir une susceptibilité thermique importante. Ainsi, toute variation de température peut entraîner une modification importante de leurs propriétés. Aujourd'hui, en France, la conception des

chaussées repose sur l'évaluation de la performance en fatigue des enrobés bitumineux à une température fixe de 15°C. Cependant, les scientifiques ont prédit qu'en raison du changement climatique, une augmentation de 2.2°C de la température moyenne de l'air est prévue entre 2010 et 2050 (Meyer et al., 2014). Après avoir testé des enrobés bitumineux à 4 températures différentes, de 0°C à 30°C pour une large gamme de niveaux de chargement, jusqu'à des niveaux élevés pour les revêtements aéronautiques. Bodin et al., 2010 ont constaté une augmentation de la performance en fatigue à basse et haute températures. Bien que de nombreuses études ont été menées pour évaluer l'influence de la température sur le comportement de fissuration de l'enrobé (Otto et al., 2018, Ktari et al., 2020), plus d'analyses sont nécessaires pour évaluer la dépendance des paramètres de dommages à la variation de la température.

Outre que le trafic et la température, la durée de vie est affectée par un autre facteur important, lié aux matériaux. En particulier, l'utilisation d'anciennes chaussées rabotées et récupérées dans les futurs mélanges affecte les propriétés mécaniques des enrobés à chaud. L'augmentation des prix mondiaux du pétrole brut et la limitation des ressources naturelles comme les granulats minéraux entraînent une augmentation de la quantité de matériaux récupérés réutilisés ou recyclés dans les chaussées. Les agrégats d'enrobé deviennent couramment utilisés dans l'industrie des chaussées comme une solution environnementale et économique. Cependant, l'utilisation d'une teneur élevée en matériaux recyclés n'est pas toujours une pratique durable, à moins que la durabilité des structures de la chaussée ne soit garantie. Le rapport du NCHRP (McDaniel et al., 2001) a démontré que lorsque le pourcentage de matériau recyclé utilisé dans les mélanges passe de 0 à 40 %, il entraîne des changements significatifs dans les caractéristiques mécaniques, principalement entre 20 et 40 % de matériau d'AE. Le module de rigidité augmente et la résistance à la fatigue est réduite. Mannan et al., 2015 ont réalisé des essais de fatigue en flexion sur une poutre pour deux mélanges bitumineux : l'un sans ajout d'AE et l'autre avec 35% d'AE. Les liants extraits de ces deux mélanges ont été testés à l'aide de tests de balayage temporel et de balayage d'amplitude linéaire (LAS). Il a démontré que l'ajout de matériaux récupérés aux mélanges bitumineux diminue leur durée de vie, alors qu'il augmente la fatigue des liants correspondants. Cependant, l'étude du comportement des mélanges contenant plus de 30 % de matériau recyclé est encore limitée aux expériences en laboratoire (Al Qadi et al., 2012, Mangiafico et al., 2013, Barco Carrión et al., 2015). Bien que l'AE soit bien utilisé dans l'enrobé à chaud, il y a toujours une confusion sur les performances du mélange sur le terrain. L'adoption d'essais en vraie grandeur sur des chaussées réelles en service présente plusieurs limites : La caractérisation de la performance sur le terrain peut prendre de nombreuses années (allant parfois jusqu'à 20 ans d'essai) pour être réalisée, la complexité de la fermeture des routes pour les essais et l'inspection et la difficulté à maintenir la route en service, jusqu'à l'apparition d'une défaillance, par les départements de transport. Par conséquent, l'essai accéléré de chaussée (Accelerated pavement testing, APT) est considéré comme la meilleure option en termes de coût et de temps pour déterminer la performance mécanique du matériau sur le terrain (Rapport NCAT 2009, RGRA N°914-915, 2013, Ozer et al., 2018).

Les essais de trafics accélérés (APT) sont définis comme l'application de charge de roues roulantes sur des chaussées construites dans des conditions réelles. Cela permet de déterminer la réponse mécanique de la chaussée sous une accumulation accélérée et contrôlée de dommages dans un temps court (Arraigada et al., 2016, Aguiar-Moya et al., 2016, Partl et al., 2015). Homsí et al., 2017 ont utilisé un équipement APT placé à l'extérieur pour déterminer l'effet de la température sur les déformations en traction mesurées au fond des

couches d'enrobé. Ils ont utilisé trois configurations différentes de charge allant de la roue unique au tandem et au tridem (triauxle) à différentes vitesses de chargement. Blanc et al., 2019 ont utilisé une machine d'APT, le manège de fatigue, placé à l'extérieur au laboratoire IFSTTAR à Nantes. Ils ont comparé quatre sections de chaussée : trois sections d'essai avec des biomatériaux innovants et une section de référence avec un enrobé classique à module élevé (EME2). Ils ont trouvé que les trois mélanges de bio-enrobé se sont comportés de manière similaire ou plus performante que le mélange témoin, en termes d'évolution des propriétés et de durabilité. Arraigada et al., 2018 ont utilisé le dispositif APT MLS10 pour évaluer la performance sur le terrain des mélanges avec une teneur élevée en AE. Les mélanges avec 60% d'AE ont fini par avoir une manifestation plus précoce de la fissuration par rapport aux mélanges sans AE. Ces derniers ont présenté une meilleure performance que les mélanges contenant un taux élevé de matériaux récupérés. Dans l'étude mentionnée ci-dessus, les expériences ont été réalisées dans une installation extérieure, ce qui rend impossible le contrôle des conditions climatiques. Berraha et al., 2020 ont utilisé le système ATLAS (Accelerated Transportation Loading System) pour étudier une structure de chaussée en enrobé fissurée à des températures contrôlées. Ce dispositif est équipé de panneaux en polyester couvrant tous les côtés de son cadre. En outre, un système de refroidissement est utilisé pour réguler la température de l'air confiné au-dessus de la chaussée testée. Cela permet de contrôler la température de l'expérience entre -10°C et +30°C. En adoptant cette installation, ils ont étudié le comportement de la chaussée près d'une fissure transversale. D'après la mesure des déformations longitudinales, l'amplitude de la déformation en traction autour de la fissure transversale est inférieure à l'amplitude mesurée dans une section de référence.

L'objectif de ce projet est de déterminer la durée de vie d'un mélange bitumineux contenant d'AE dans la couche de base à différentes températures d'essai. Le mélange d'enrobé est soumis à une expérience à l'échelle réelle en utilisant le dispositif MLS10 de l'APT. La couche de base est soumise à un essai de près de deux ans visant à accélérer la fissuration par fatigue du matériau testé tout en contrôlant sa température.

IV.2. Construction de la planche expérimentale

Les essais en vraie grandeur sont réalisés sur une planche expérimentale. Dans ce but, une fosse est construite dans un hall de recherche (voir Figure 116 (gauche)) au laboratoire GC2D à Egletons. Afin de réaliser des essais dans des conditions environnementales contrôlées, ce hall est parfaitement isolé suivant la réglementation thermique RT2012. La structure de la chaussée repose sur une dalle en béton rigide portée par deux pieux. La fosse a été construite en 2018 (voir Figure 116 (droite)).



Figure 116 Le hall de recherche (gauche) et une étape de remplissage de la fosse (droite)

La structure de la chaussée a une longueur, une largeur et une profondeur de 8 m, 3 m et 2 m, respectivement (voir Figure 117). Cette fosse est équipée d'un système de drainage pour de possibles études permettant de faire varier le niveau de la nappe dans le sol et dans l'assise de chaussée.

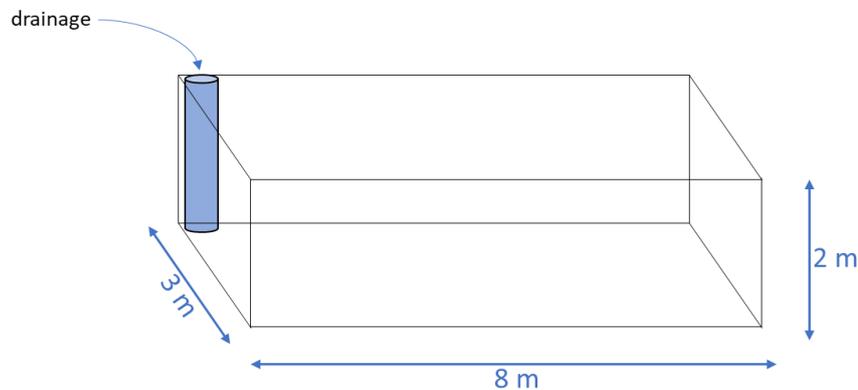


Figure 117 Dimensions de la fosse expérimentale

IV.2.1. Caractéristiques de l'assise

La structure est conçue selon les spécifications françaises du catalogue de conception (SETRA, 1998). La fosse est remplie par une couche de 0.2 m d'un gravier de drainage 20/40 recouvert de géotextile. Ce matériau assure le drainage de la chaussée. Cette couche est recouverte par 0.77 m d'arène granitique compactée (B_{5h} selon le GTR). Le choix du matériau et son épaisseur sont choisis selon la norme NF P11-300. Au-dessus de ces deux couches, une GNT (grave non traité) d'épaisseur 0.85 m est placée (voir Figure 118 (gauche)). Trois mesures de la portance des matériaux granulaires sont effectuées dans l'axe de la chaussée tous les deux mètres en utilisant l'essai à la plaque selon les normes françaises (NF P94-117-2) (voir Figure 118 (droite)). Les résultats sont compris entre 74 et 84 MPa à la surface des matériaux granulaires correspondant à une classe de portance PF2.

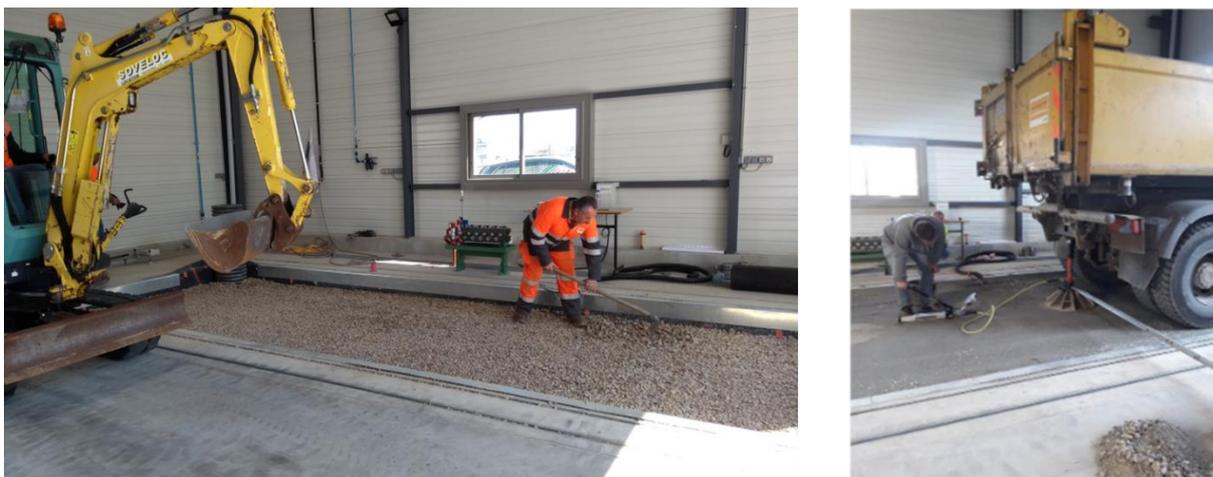


Figure 118 Remplissage de la fosse (gauche) et l'essai de plaque (droite)

IV.2.2. Caractéristiques de la couche de base

Ce chapitre vise à étudier le cycle de vie d'un béton bitumineux contenant des agrégats d'enrobés dans une couche de base. Ce matériau est la GB ϵ +[®]. La mise en place de la couche de GB ϵ + dans la fosse est présentée dans la Figure 119.

Un essai de flexion deux points est effectué sur des échantillons trapézoïdaux prélevés dans la couche de base. Les essais sont réalisés pour déterminer le module complexe du matériau selon les normes européennes (NF EN 12697-26, 2018) et les paramètres de fatigue de l'échantillon selon les spécifications européennes (NF EN 12 697-24, 2018). La GB ϵ +[®] a un module complexe de 13 000 MPa à 15°C et 10 Hz, et une performance en fatigue de $\epsilon_6 = 104$ μ déformation à 10°C et 25 Hz en considérant le risque de 50% (ϵ_6 représente l'amplitude de déformation à laquelle la rupture se produit après 1 million de cycles).

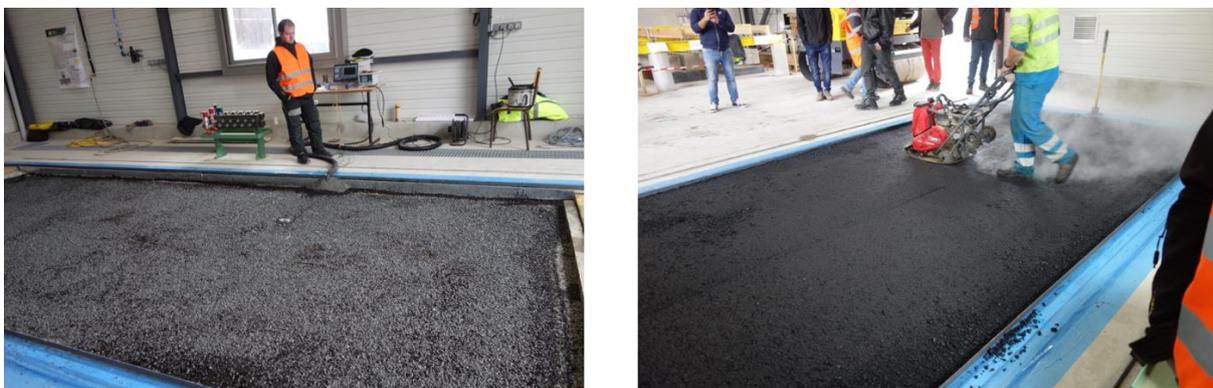


Figure 119 Mise en œuvre de la couche de GB ϵ + dans la fosse

IV.2.3. Caractéristiques de la couche de surface

Quatre couches de surface sont utilisées durant l'essai. Les différents matériaux utilisés sont :

- BBSG 0/10 : béton bitumineux semi – grenu.
- Agreco 0/14 : béton bitumineux à l'émulsion.
- BBAO 0/10 : béton bitumineux anti-ornière.
- BBAO+ 0/10 : béton bitumineux anti-ornière modifié.

Avant la mise en place de la couche de surface, une couche d'accrochage est dispersée. Cette couche est formée d'émulsion de bitume (émulsion à 60% de bitume 35/50). Elle assure le collage entre la couche de surface et la couche de base. Des essais PMT (Profondeur moyenne de texture) sont réalisés, selon la norme NF P98-150-1, afin de contrôler la qualité de la rugosité des couches de roulement. Ces couches ne sont pas étudiées dans le présent travail. Elles ont fait le sujet d'un projet national ANR MACADAM (Oubahdou, 2022). La Figure 120 présente la mise en œuvre du BBAO+.



Figure 120 Mise en œuvre du BBAO+

IV.3. Plan expérimental

IV.3.1. Mobile Load Simulator MLS10

Pour évaluer la fatigue d'un matériau en couche de base, un essai de trafic accéléré (APT) en grandeur réelle est réalisé. Un dispositif MLS10 est utilisé pour charger la chaussée expérimentale à l'intérieur de la halle d'essais. Il sollicite la chaussée de manière canalisée sur une longueur d'environ 4.2 m. Le simulateur fait 10.7 m de long, 2.9 m de large, 3 m de haut, et a une masse de 32 tonnes. Ce simulateur est présenté dans la Figure 121.

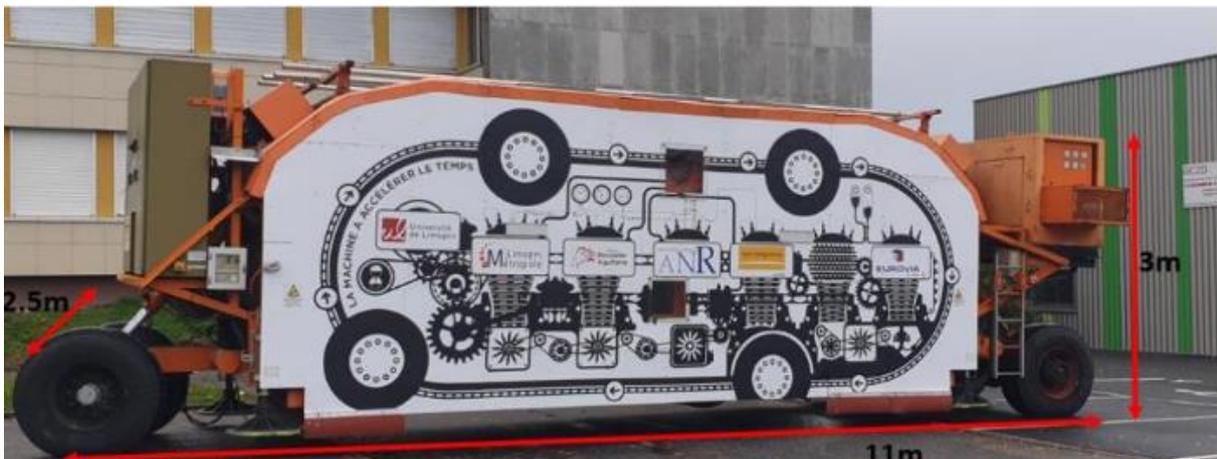


Figure 121 Simulateur de trafic MLS10

Il est équipé de quatre bogies. La vitesse de roulement maximale des pneus est de 22 km/h, ce qui équivaut à plus de 6000 cycles de charge, appliqués par heure. Cette machine peut être équipée de roues simples ou jumelées. Dans cette étude, le MLS10 est utilisé avec une configuration à pneus jumelés pour être conforme à l'essieu standard français de référence. Une charge à l'essieu de 65 kN est appliquée, correspondant à 32.5 kN par pneu de façon

unidirectionnelle (voir Figure 122). La charge est appliquée à l'aide d'un système hydraulique. De plus pour des raisons de maintenance et de fatigue du simulateur, la vitesse de roulement est réduite à 7 km/h, reproduisant l'application d'environ 2000 charges par essieu par heure.

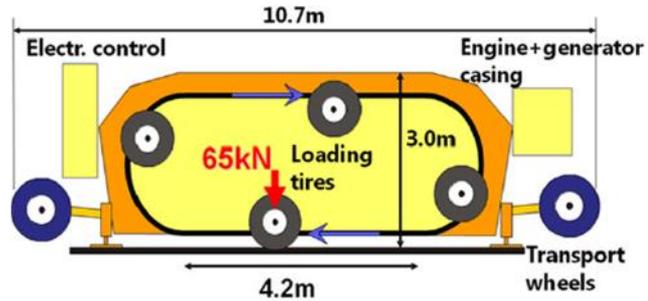


Figure 122 Le MLS10 dans le hall (gauche) et le schéma du système de chargement (Arraigada et al.,2014) (droite)

La charge est ajustée à l'aide d'un capteur de pression Tekscan (voir Figure 123). Ce capteur comporte deux feuilles comprenant des éléments sensibles qui permettent de mesurer la pression de contact lors des essais statiques et dynamiques. Deux capteurs piézorésistifs sont placés parallèles à équidistance sur la première feuille. Sur la deuxième feuille, ils sont placés d'une façon perpendiculaire à la première feuille. Les lignes de ces capteurs se croisent pour former une matrice des éléments sensibles. Ces capteurs mesurent la charge avec une précision de $\pm 5\%$. Le capteur de pression est présenté dans la Figure 123.



Figure 123 Calibrage de la charge à l'aide du TekScan

IV.3.2. Système de chauffage

Comme la chaussée est testée dans une salle intérieure, des panneaux chauffants sont utilisés pour contrôler la température. Le système de chauffage consiste en 6 panneaux rayonnants, avec des lampes infrarouges IR, placés de chaque côté de la chaussée. Ces panneaux fonctionnent la nuit lorsque le simulateur est à l'arrêt et placé en position haute soit 1 mètre au-dessus de la chaussée permettant au rayonnement de frapper la surface de chaussée à chauffer. Un capteur de température, de type PT100, est placé à la surface de la chaussée pour contrôler la régulation des panneaux. Cette température est fixée pour étudier l'orniérage des couches de surface du projet MACADAM (ce qui n'entre pas dans le cadre de cette thèse).

Compte tenu de l'inertie thermique, l'opération de chauffage prend environ 7 h pour atteindre le point de consigne en surface, ensuite il faut entre 24 et 48 heures pour atteindre le régime permanent de température dans les couches de chaussée. Pendant la journée, le simulateur MLS est en fonctionnement et produit lui-même l'énergie nécessaire au maintien de cette température toute la journée. Pour faire varier la température durant la journée, l'ouverture des portes de la halle est pilotée. Selon la température à l'extérieur de la halle, l'ouverture des portes peut s'avérer nécessaire et le pilotage devient manuel grâce à une surveillance des températures et à l'optimisation de l'ouverture des portes de la halle par l'opérateur. Seules des conditions de température extérieures ne permettant pas un refroidissement suffisant pour le maintien de température visée amènent à interrompre l'essai. Cependant, le chauffage de la surface de la chaussée affecte la température de la couche de base qui est contrôlée par deux capteurs de température placés à la surface supérieure et inférieure de cette couche. La température moyenne de cette dernière est la température moyenne issue de ces deux capteurs. En utilisant ces panneaux rayonnants, la température moyenne maximale enregistrée de la GBE+® est de 50°C et la minimale est de 5°C. Ces paramètres d'essai pourraient aider à étudier la fatigue et la résistance à la fissuration du matériau bitumineux soumis à différentes conditions de températures. Le système de chauffage est présenté dans la Figure 124.



Figure 124 Système de chauffage

IV.3.3. Programme d'essai

Les premières couches bitumineuses ont été mises en place en mai 2019. Quatre campagnes expérimentales sont menées à des moments différents pour la même structure mais des couches de surface différentes. Cette dernière est rabotée à la fin de chaque campagne, et elle est remplacée par une nouvelle. Ces couches de surface ne seront pas étudiées dans ce travail. Cependant, la couche de base n'est pas modifiée jusqu'à la fin des expériences pour l'évaluation de ses performances à long terme. La première campagne a débuté le 13 juin 2019. La structure de la chaussée pour chaque campagne est présentée à la Figure 125.

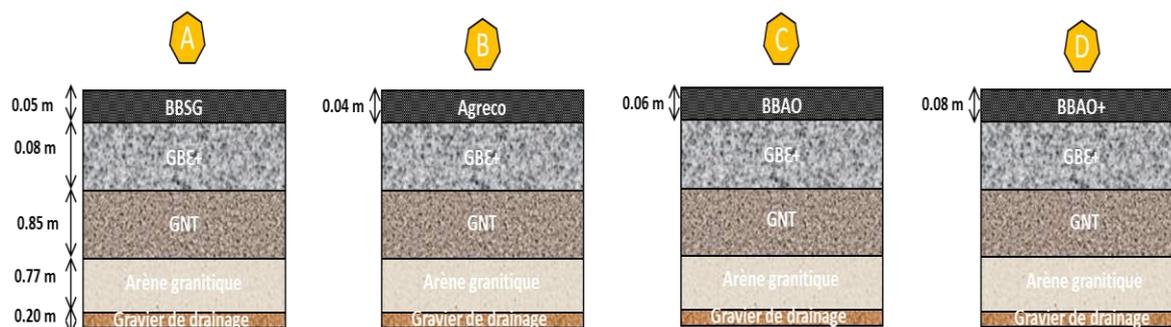


Figure 125 Les structures testées

Chaque campagne s'est terminée lorsque la profondeur d'ornièrre maximale de la couche de surface est atteinte. Globalement, la couche de base a subi un total de 1 100 000 cycles de charge. Plus de détails sont disponibles dans le Tableau 37.

Campagne	Date	Couche de surface		Couche de base		Nbre. de cycles	Contrôle de T°	GBε+ T _{moy} (°C)	
		Mat.	Ep.	Mat.	Ep.			Min	Max
A	Juin 2019	BBSG	5 cm	GBε+	8 cm	100 000	Non	16	35
B	Janvier 2020--> Mars 2020	AGRECO	4 cm	GBε+	8 cm	355 000	Non	8	18
C	Janvier 2021	BBAO	6 cm	GBε+	8 cm	154 000	Système de chauffage	20	50
D	Octobre 2021--> Janvier 2022	BBAO+	8 cm	GBε+	8 cm	240 000	Système de chauffage	20	34
						260 000	Non	5	20

Tableau 37 Les détails des différentes campagnes expérimentales

La distribution des températures moyennes de la GBε+ (en pourcentage) pendant les phases de chargement est présentée en Annexe G.

IV.4. Instrumentation de la chaussée

Pour atteindre l'objectif de la recherche, la structure est instrumentée avec des capteurs de température, des jauges de déformation et des fibres optiques de déformation.

IV.4.1. Capteurs de température

La température est surveillée par trois thermocouples de type K (voir Figure 126 (gauche)) installés dans la structure le long de l'axe transversal de la chaussée à différentes profondeurs et un capteur PT100 en surface. Le positionnement des sondes de températures dans la fosse expérimentale est présenté dans la Figure 126 (droite).

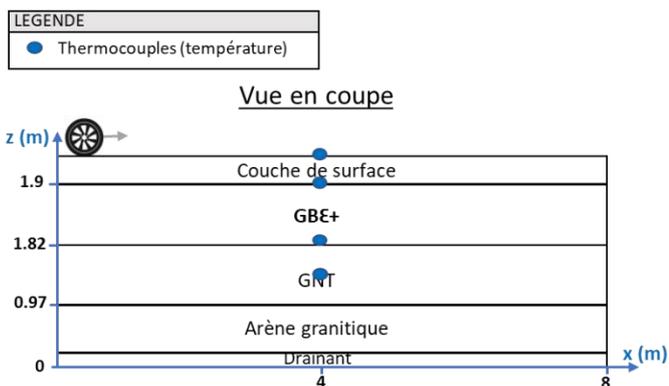


Figure 126 Sonde de température (gauche) et positionnement des sondes de températures dans la fosse expérimentale (droite)

Les relevés de températures sont récupérés par une centrale d'acquisition de type ALMEMO 2890-9 (voir Figure 127). Ce système comprend 9 entrées de mesure et une mémoire interne pour le stockage. Les températures sont mesurées tout au long de l'essai toutes les 10 minutes.



Figure 127 Système d'acquisition des températures ALMEMO 2890-9

IV.4.2. Jauges de déformation

Pour mieux comprendre la réponse de la couche de base face aux sollicitations, des jauges de déformations sont collées à la surface supérieure de la couche de base.

Les jauges utilisées (modèle LY-43-50/120, HBK) sont des jauges résistives d'une résistance de 120 Ω et d'une longueur de grille active de 50 mm, compensées en température à 23 ppm/K. Pour protéger ces jauges lors de la mise en œuvre de la couche de surface, une couche mince de résine résistant aux températures élevées est appliquée sur les jauges (voir Figure 128).



Figure 128 Jauges de déformations collées sur la surface supérieure du GBE+

Avant chaque campagne d'essai et avant la mise en œuvre d'une nouvelle couche de surface, des nouveaux capteurs sont collés et protégés. Dans le cas de la campagne D, des jauges de déformations longitudinales et transversales sont placées perpendiculairement et longitudinalement à la direction du trafic (CH4, pour les capteurs, canal numéro 4) à l'interface entre la couche de surface et la couche de base. Le positionnement des jauges est présenté dans la Figure 129. Pour d'autres campagnes, des extensomètres en H ont également été utilisés.

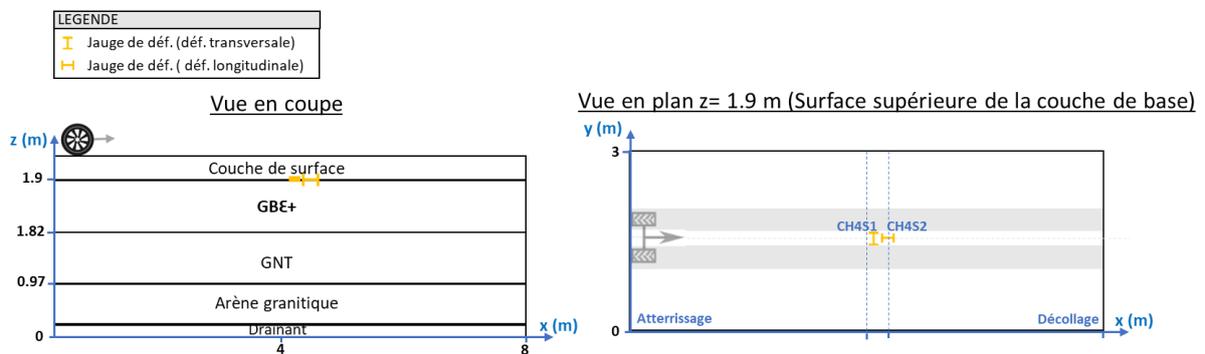


Figure 129 Positionnement des jauges de déformation dans la chaussée

IV.4.3. Capteurs à fibre optique (FBG : fiber Bragg Grating)

Les déformations longitudinales sont mesurées à l'aide de capteurs à réseau de Bragg (FBG). Le réseau de Bragg se comporte comme un miroir en réfléchissant des longueurs d'onde très précises et en transmettant les autres (Dupont, 2002). Lorsque la fibre optique est soumise à une élongation ou un raccourcissement, la longueur d'onde réfléchi varie proportionnellement. Le principe de fonctionnement des FBG est présenté dans la Figure 130.

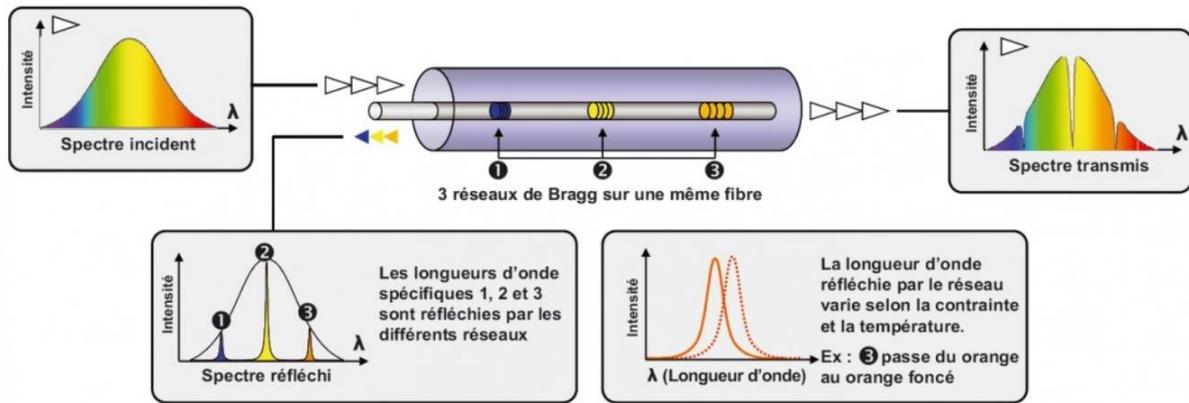


Figure 130 Principe du fonctionnement des FBG (Site <https://fr.scaime.com/technologie-des-reseaux-de-bragg>)

Huit FBG sont installés dans la base du matériau d'étude GB ϵ +®. Les capteurs à fibres optiques sont des réseaux de Bragg d'une longueur active de 10 mm. Ils sont intégrés dans un tissu géotextile (Figure 131). Il s'agit d'un produit innovant qui améliore les performances des capteurs de déformation optiques lorsqu'ils sont appliqués en contact avec un enrobé (Artières et al., 2012). Les deux lignes de capteurs optiques sont connectées au système d'acquisition de données des deux côtés, par conséquent, toute interruption des fils des capteurs ne pourrait pas affecter la collecte des déformations.

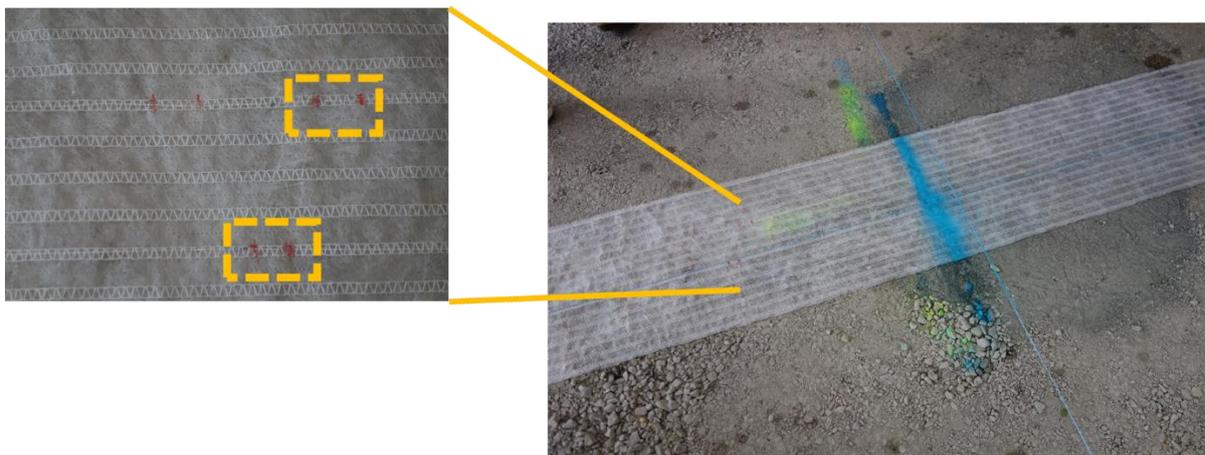


Figure 131 Capteurs à fibre optique intégrés dans un géotextile

Quatre capteurs sont positionnés sur deux lignes parallèles : l'une coïncidant avec l'axe de la chaussée (CH5) et l'axe des roues jumelées. L'autre est placée avec un décalage de 0.1 m de manière à être située sous le canal de circulation (CH6). Tous les capteurs sont intégrés dans la longueur de roulement de 4.2 m du MLS10. La Figure 132 montre le positionnement de l'instrumentation dans la chaussée avec la numérotation de chaque capteur.

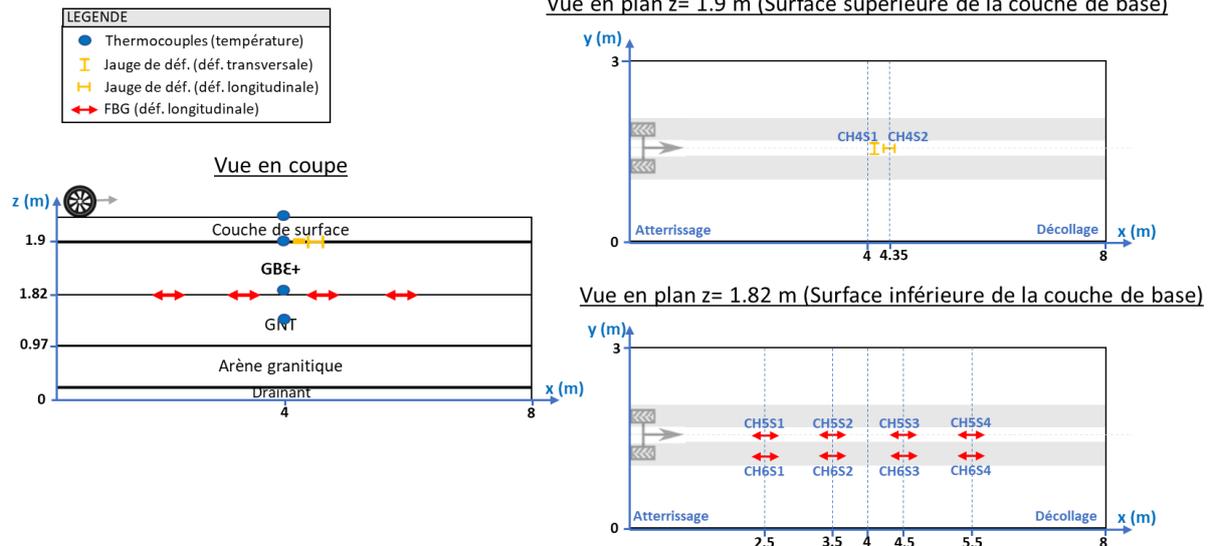


Figure 132 Instrumentation de la structure : vue en coupe (gauche) et vue en plan (droite)

IV.5. Mesure de la déflexion

Le déflectomètre à masse tombante (Falling Weight Deflectometer, FWD) est utilisé pour mesurer le bassin des déflexions provoqué par une masse tombante appliquée sur une plaque segmentée de diamètre 30 cm (voir Figure 133 (gauche)). Après la mise en station du FWD au droit du point de mesure, la masse est libérée d'une hauteur, variant de 2 à 40 cm, qui provoque une force variable de 7 à 120 kN. La charge est transmise par des patins élastomères dont la constante de raideur permet de fixer la durée du chargement. Les déflexions sont mesurées à l'aide de 9 géophones situés sur une longueur de 2.4 m du point d'application de la charge (voir Figure 133 (droite)). Dans le domaine routier, les caractéristiques de chargement sont ajustées afin de simuler la durée de charge d'un poids lourd circulant à une vitesse moyenne d'environ 70 km/h. Ce bassin de déflexion sert à rétro calculer les modules des différentes couches afin de suivre leur état d'endommagement.

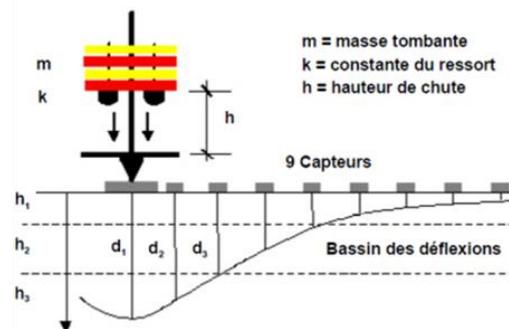


Figure 133 Essai FWD (gauche) et son principe de fonctionnement (droite)

IV.6. Résultats

Étant donné que la couche de base est sollicitée à différentes températures avec différentes couches de surface, il sera compliqué d'établir un état de sollicitation comparable. De plus, l'évaluation visuelle des fissures de la couche de base n'est pas possible en raison du changement continu des couches de surface. Par conséquent, l'évaluation de la durée de vie

de GBε+ est basée sur l'analyse des déformations et des déflexions mesurées lors de la campagne D. Quelques observations de la campagne d'essais B sont également présentées.

IV.6.1. Amplitude de la déformation

Des jauges de déformation et des FBG sont intégrés au-dessus et au-dessous de la couche de base pour obtenir sa réponse mécanique lors des essais MLS10. Par souci de concision, on ne présente qu'une sélection de résultats de mesures des campagnes d'essai B et D. Les données de déformation sont mesurées à des intervalles réguliers. Les déformations négatives correspondent à un raccourcissement et les déformations positives à une élongation. Les déformations enregistrées dans la direction du trafic par FBG présentent un pic de compression mineur suivi d'un pic de traction plus important et puis d'un pic de compression. La Figure 134 présente un exemple de signaux de déformation mesurés par les capteurs de CH5. L'amplitude de la déformation en traction induite par chaque passage de pneus correspond au pic de traction. Les données mesurées par S1 et S4 ($x=2.5$ m, $x=5.5$ m ; $z=1.82$ m) sont inférieures à celles fournies par S2 et S3 ($x=3.5$ m, $x=4.5$ m ; $z=1.82$ m). Ceci peut être expliqué par la position des capteurs S1 dans la zone d'atterrissage des pneus et des capteurs S4 dans la zone de décollage des pneus.

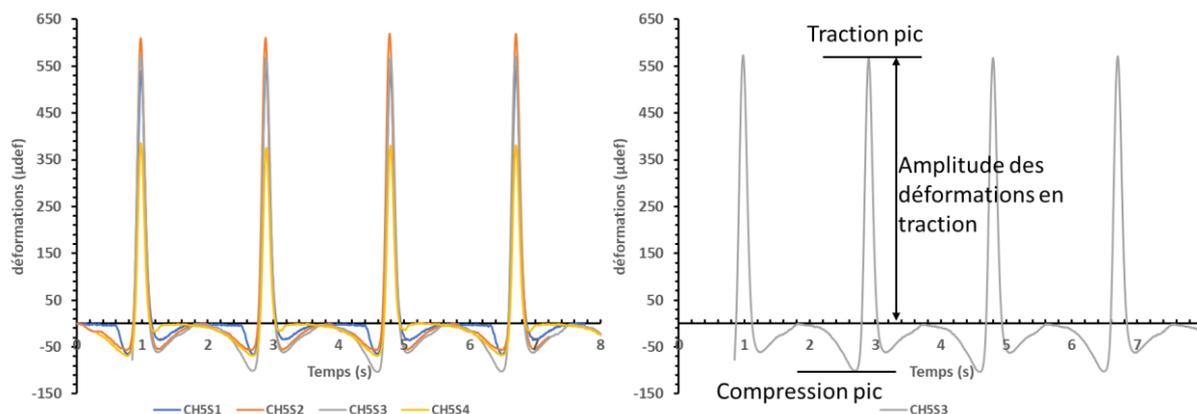


Figure 134 Déformations mesurées par FBG pour 4 passages de pneus (gauche) et calcul de l'amplitude de la déformation (droite)

IV.6.2. Campagne d'essais B

Pour la campagne d'essais B, les essais sont réalisés à la température ambiante ce qui a rendu l'analyse des signaux difficile vu la variation de température durant l'essai entre les mois de janvier et mars 2020. Pour cela, un filtrage des signaux est tout d'abord réalisé à une température de la couche de base qui correspond à 16°C (la température 16°C est choisie puisque c'est la température la plus fréquente durant tout l'essai, ce qui permet d'avoir plusieurs signaux à différents nombres de cycles).

IV.6.2.1. Calcul de la vitesse exacte

La vitesse est fixée à 2 m/s (2000 passages/heure). La vitesse exacte est vérifiée en calculant le temps séparant deux signaux consécutifs. En calculant le temps séparant 2 signaux successifs, une durée de 1.83 s est trouvée (voir Figure 135). Or la distance qui sépare le passage d'un boggye à l'autre vaut 4.2 m qui est la longueur de la chaussée chargée par MLS. Donc la vitesse exacte est $d/t = 4.2/1.83 = 2.2$ m/s. Pour s'assurer que la vitesse est constante

tout au long de l'essai, plusieurs signaux à différents nombres de cycles sont traités. Des valeurs proches de 2 m/s sont obtenues.

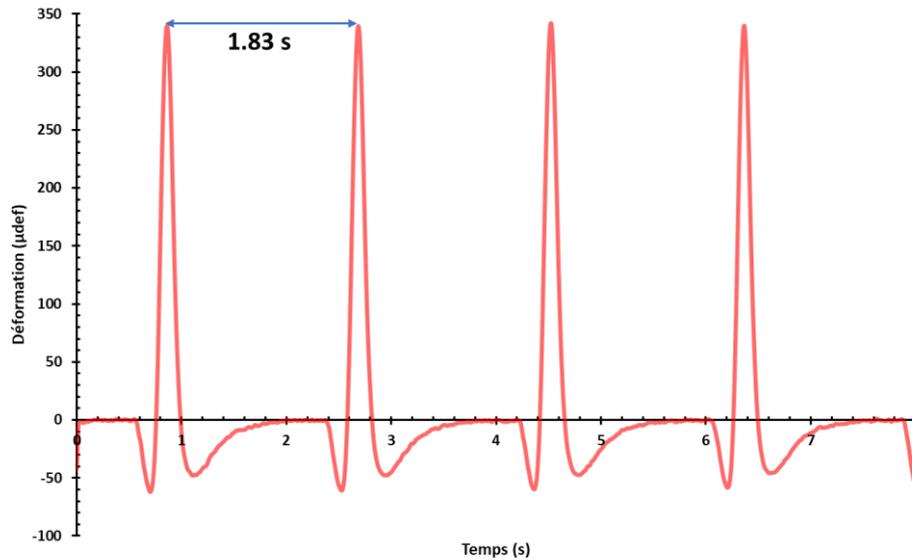


Figure 135 Déformations mesurées par CH1S1 en fonction du temps à 16°C

IV.6.2.2. Calcul de la distance d'influence de la charge ou du boggie

Dans la Figure 136, la durée d'influence de la charge est mesurée. C'est le temps où la GBÉ+ réagit à la suite du passage du boggie, c'est-à-dire où la déformation n'est pas nulle. Une durée de 1.4 s est trouvée. Avec la vitesse de 2 m/s, la distance d'influence du boggie est calculée à 2.8 m. Donc le matériau commence à réagir quand le boggie est à une position avant le capteur et il continue à réagir jusqu'à ce que le boggie dépasse le capteur d'une distance totale de 2.8 m.

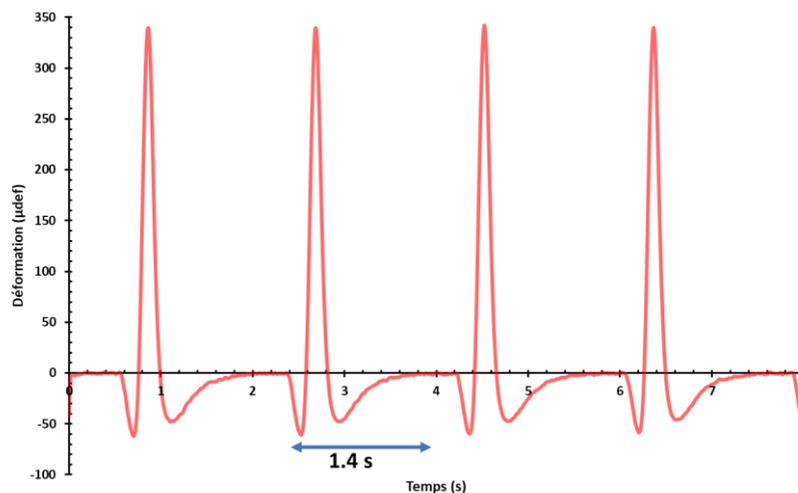


Figure 136 Déformations en fonction du temps à 16°C

IV.6.2.3. Influence du chargement (Nombre de cycles)

La Figure 137 présente des signaux du capteur CH5S1 induits par le passage d'un seul pneu à une température constante de 16°C et à différents nombres de cycles. Comme mentionné dans le paragraphe précédent, deux pics de compression sont observés : un premier juste

avant que le pneu soit en dessus du capteur là où est exercée une traction et un deuxième lorsque le pneu quitte cette position. D'après la Figure 137, l'amplitude des déformations n'a pas changé avec le nombre de cycles. Les parties compression et traction sont donc restées les mêmes indiquant une même réponse de la couche de base quelle que soit la sollicitation. Ce dernier point semble un indice de non-endommagement de la GBepsilon après l'application de 355 320 cycles de chargement (jusqu'à la fin de la campagne B).

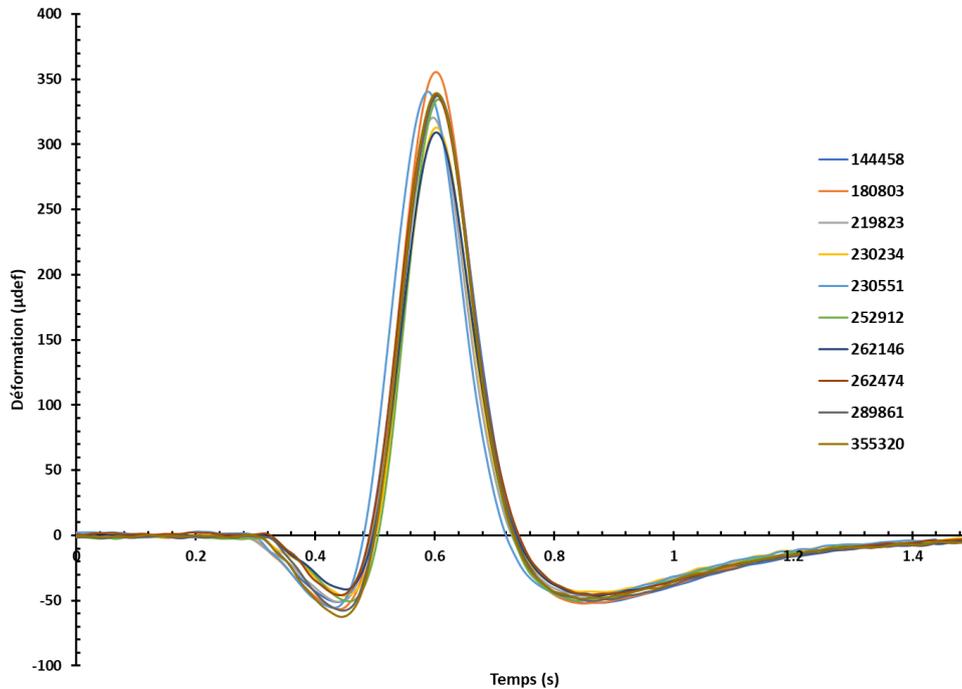


Figure 137 Déformations longitudinales du capteur CH5S1 à différents nombres de cycles en fonction du temps à 16°C

L'amplitude de déformation en fonction du nombre de cycles est présentée sur la Figure 138. Ce graphique permet de mieux voir qu'à différents cycles et à une température moyenne constante de 16°C, la déformation est presque constante variant entre 335 µdef et 355 µdef, ce qui permet de dire que la couche de base réagit de la même manière dès le début jusqu'à la fin de l'essai B.

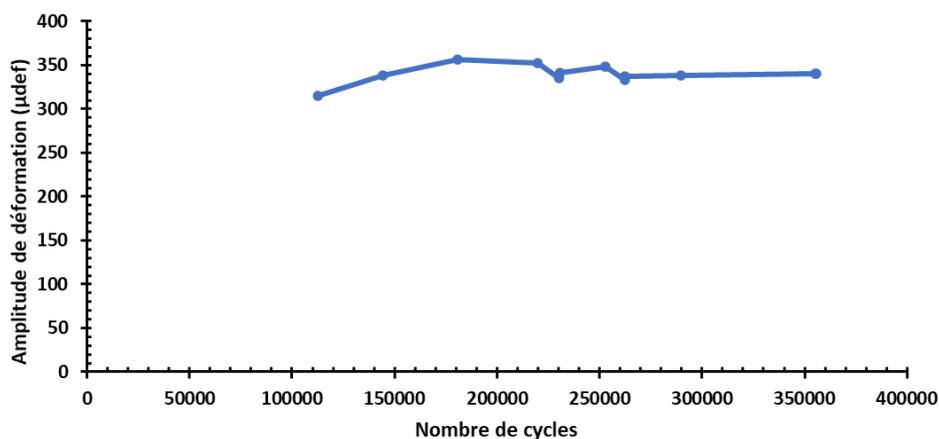


Figure 138 Déformations longitudinales du capteur CH5S1 en fonction du nombre de cycles à 16°C

Pour mieux comprendre la légère variation de déformation, un autre paramètre est introduit : le temps de chargement de la structure.

IV.6.2.4. Influence de la durée de chargement journalière

La durée de chargement est la durée d'application de la charge après un temps de repos (dès le lancement de l'essai du matin jusqu'au temps d'acquisition du signal). La Figure 139 représente un agrandissement de la Figure 138 et l'apport de la durée de chargement en fonction du nombre de cycles. On remarque que l'amplitude de déformation et la durée de chargement ont la même allure et par suite on peut conclure sur l'influence de ce paramètre sur la déformation. Cette influence peut alors être traduite par une légère augmentation de la déformation de l'ordre 10 à 20 μdef avec l'augmentation des heures de sollicitations.

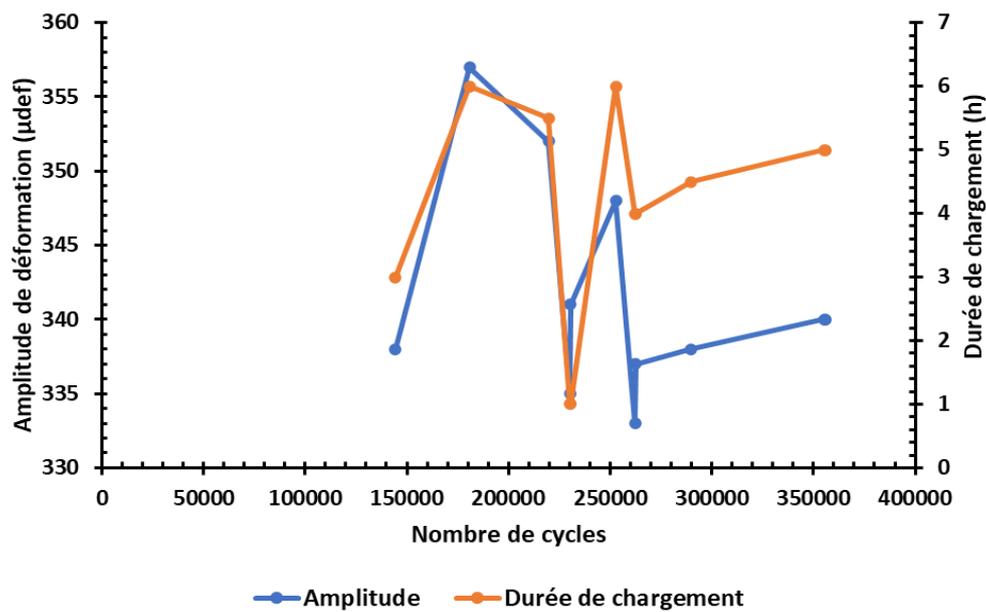


Figure 139 Déformations et durée de chargement en fonction du nombre de cycles à 16°C

IV.6.2.5. Influence de la température

Les relevées de températures de la campagne B sont présentées dans la Figure 140. La température en base (mesurée par le thermocouple placé dans la couche de GNT) est presque toujours constante. La température de la couche de GB correspond à la moyenne des températures mesurées par les capteurs de température placés en dessus et en dessous de la couche.

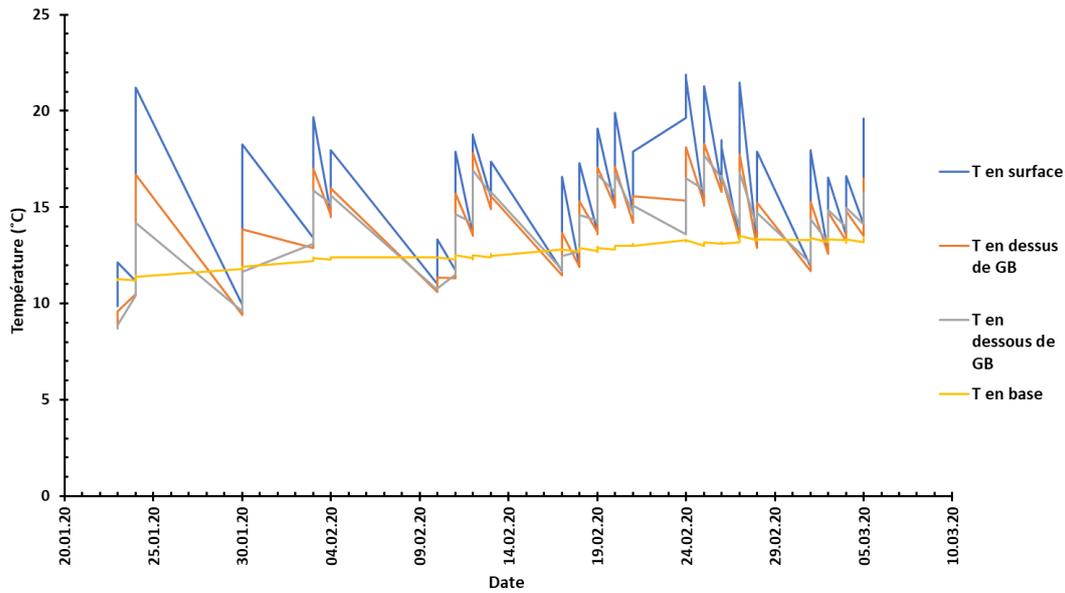


Figure 140 La variation de la température en fonction de la date

❖ Ratio de déformation R_ϵ

Le rapport de déformation longitudinale instantanée est défini comme le rapport de la déformation de compression maximale ϵ_{\min} et la déformation de traction maximale ϵ_{\max} c.à.d. le rapport creux/pic dans le graphique de la Figure 141.

$$R_\epsilon = \frac{\epsilon_{\min}}{\epsilon_{\max}} \text{ Equation 40}$$

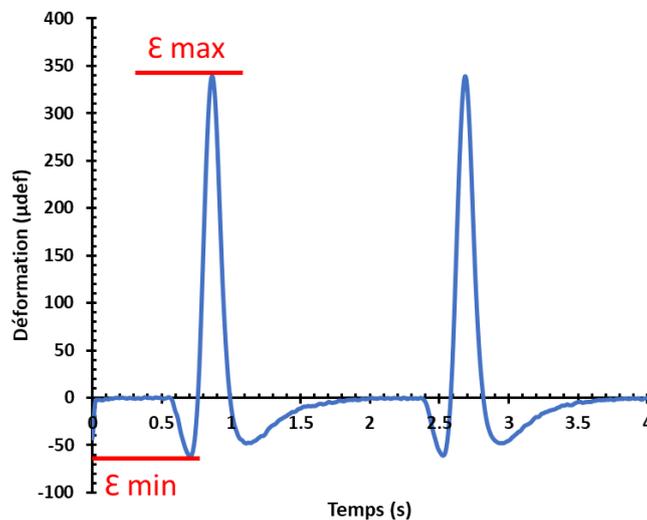


Figure 141 Déformations en fonction du temps

Le ratio de déformation R_ϵ est présenté dans le Tableau 38. Dans ce tableau, plusieurs signaux sont choisis d'une façon aléatoire à différents nombres de cycles et différentes températures. On remarque que le ratio de déformation reste constant entre 0.15 et 0.18 quelle que soit la température et le nombre de cycles. On peut conclure que la variation de température influe sur la partie de traction autant que sur la partie de compression d'où un ratio quasi constant.

Nombre de cycles	Date	T GB ϵ^+ (°C)	ϵ_{max} (μdef)	ϵ_{min} (μdef)	R
0	13/06/2020	16	242.56	-36.58	0.15
102437	23/01/2020	9	195.63	-33.08	0.17
144458	03/02/2020	16	338.19	-52.59	0.16
180803	12/02/2020	16	357.30	-60.33	0.17
193818	17/02/2020	12	275.09	-44.81	0.16
204434	18/02/2020	14	314.05	-52.73	0.17
215796	19/02/2020	15	323.45	-54.45	0.17
219823	19/02/2020	16	351.61	-58.62	0.17
230551	20/02/2020	16	341.05	-55.22	0.16
252912	24/02/2020	16	348.26	-57.51	0.17
272925	25/02/2020	18	369.00	-65.00	0.18
355656	05/03/2020	16	339.09	-62.45	0.18

Tableau 38 Le ratio de déformation R_{ϵ}

Afin d'évaluer l'influence de la température, les amplitudes de déformation mesurées à 3 températures différentes tout au long de la campagne B sont présentées dans la Figure 142. D'après ce graphe, la déformation longitudinale augmente en fonction de la température. Ceci s'explique par la sensibilité du comportement thermo-viscoélastique des enrobés bitumineux à la température (susceptibilité thermique).

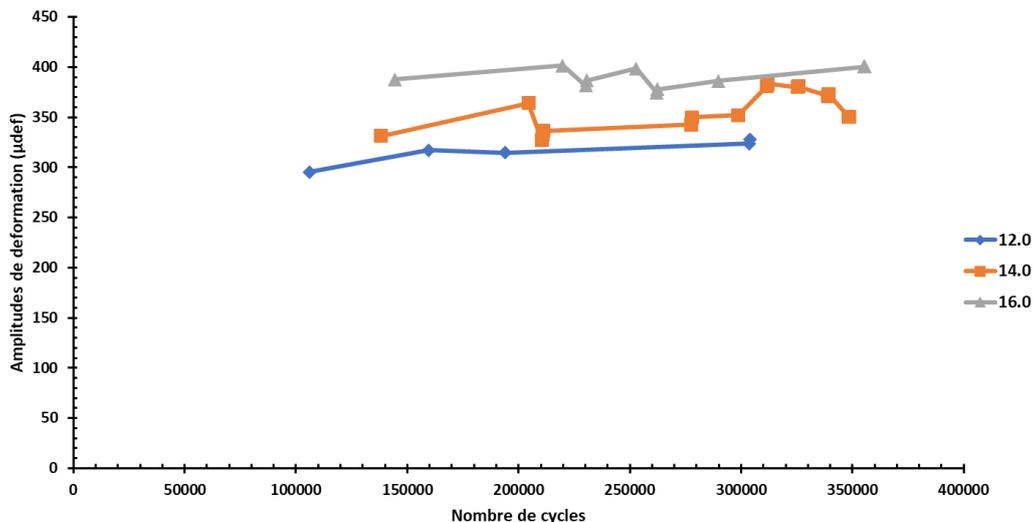


Figure 142 Déformations en fonction du nombre de cycles pour différentes températures

De même, sur la Figure 143, l'influence de la température sur la déformation peut être observée. L'augmentation de la température (en rouge) implique une augmentation de la déformation (en bleu). Les discontinuités sur ce graphe sont dues au temps de repos du matériau ou de relaxation pendant l'arrêt de la machine la nuit. Le comportement viscoélastique du matériau peut être évalué puisque le matériau ne revient pas toujours au point zéro après le temps de relaxation. Globalement, on remarque sur le graphe un nuage de déformations qui est relativement constant tout au long de l'essai indiquant que l'endommagement n'est pas encore atteint.

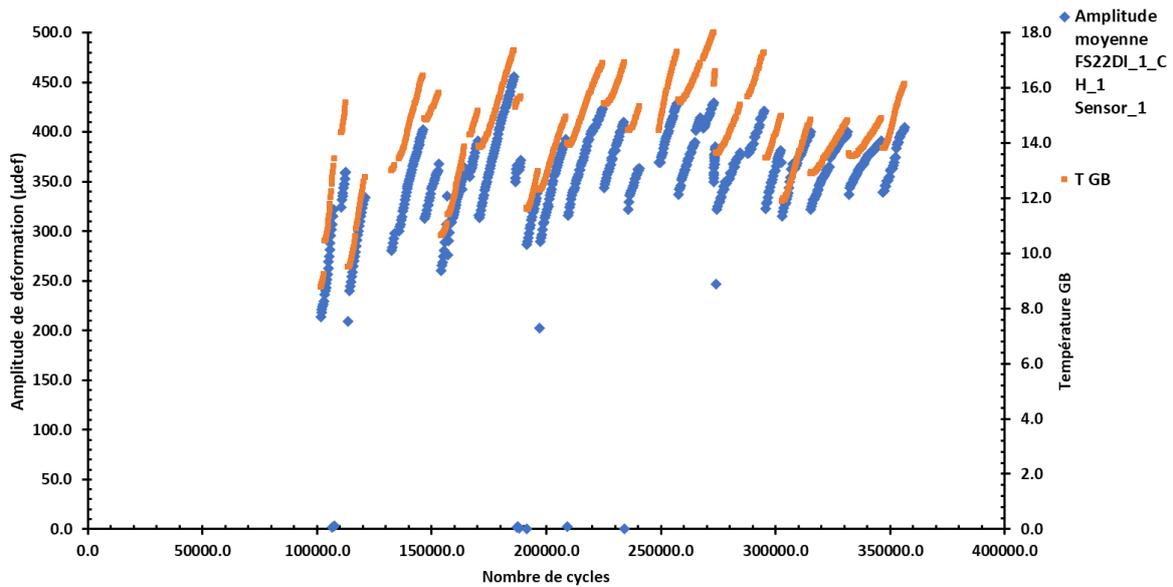


Figure 143 Déformations en fonction du nombre de cycles et de la température pour la campagne B

L'essai est réalisé dans un hall à la température ambiante. Cependant, il ne faut pas oublier le réchauffement causé par la machine. Une augmentation de 4°C est observée (voir Figure 144) alors que la température ambiante en dehors du hall était quasi constante. Donc on peut conclure que le MLS chauffe la chaussée de 4°C à cause de ses moteurs linéaires à inductions qui dégagent de la chaleur.

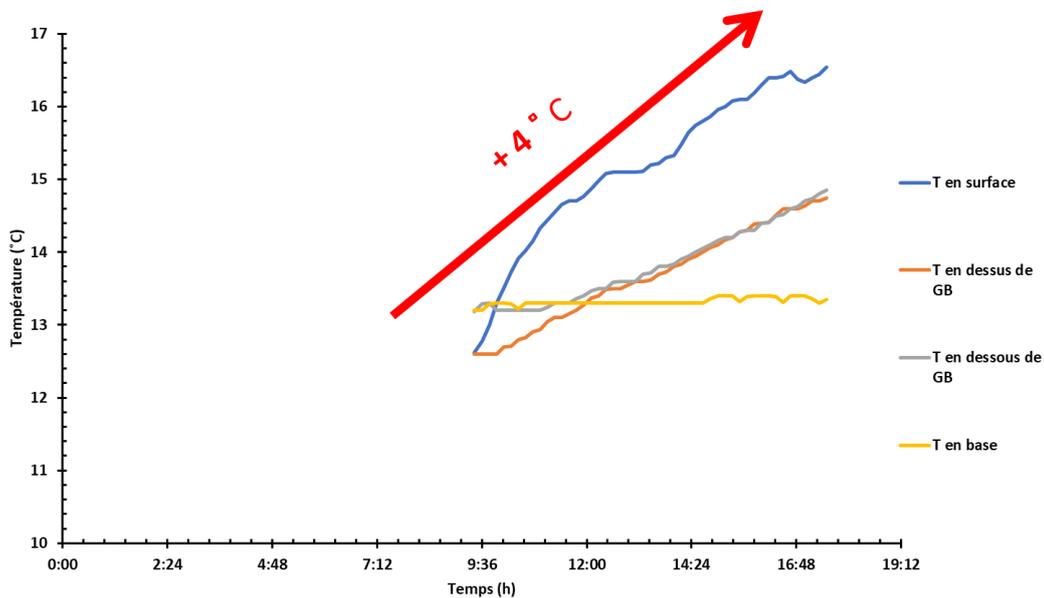


Figure 144 Température durant le jour du 5 mars 2020 (Campagne B)

IV.6.3. Campagne d'essai D

IV.6.3.1. Déformations de flexion mesurées au-dessous de la couche de base

L'analyse de l'ensemble des données est effectuée en traçant l'amplitude de la déformation en traction au passage d'une charge unique en fonction du nombre de cycles accumulés. La Figure 145 montre les amplitudes de déformation du CH5 à différentes températures de la

campagne expérimentale D. L'amplitude de déformation augmente régulièrement lorsque la température augmente. Toute variation, non liée à la température et aux conditions de chargement, dans la tendance des amplitudes de déformation pourrait être une indication d'un changement dans la rigidité de la structure.

Les données fournies par S1 et S4 ($x = 2 \text{ m}$, $x = 5.5 \text{ m}$; $z = 1.82 \text{ m}$) ont mis en évidence des petites valeurs. Ceci peut être expliqué par leur position : S1 dans la zone d'atterrissage des pneus et S4 dans la zone de décollage des pneus. Ces hypothèses sont observées sur la Figure 145 depuis le début de la dernière campagne jusqu'à l'application de 800 000 cycles cumulés de charges. À ce premier point d'inflexion (marqué par une flèche), l'amplitude de déformation enregistrée par S3 ($x = 4.5 \text{ m}$; $z = 1.82 \text{ m}$) a diminué jusqu'à un point inférieur à la déformation S1. Cette diminution continue indique la perte de la rigidité locale due à l'initiation d'une fissure dans cette zone. Néanmoins, les autres capteurs ont continué à fonctionner normalement, ce qui indique que le dommage n'est pas diffusé dans le matériau.

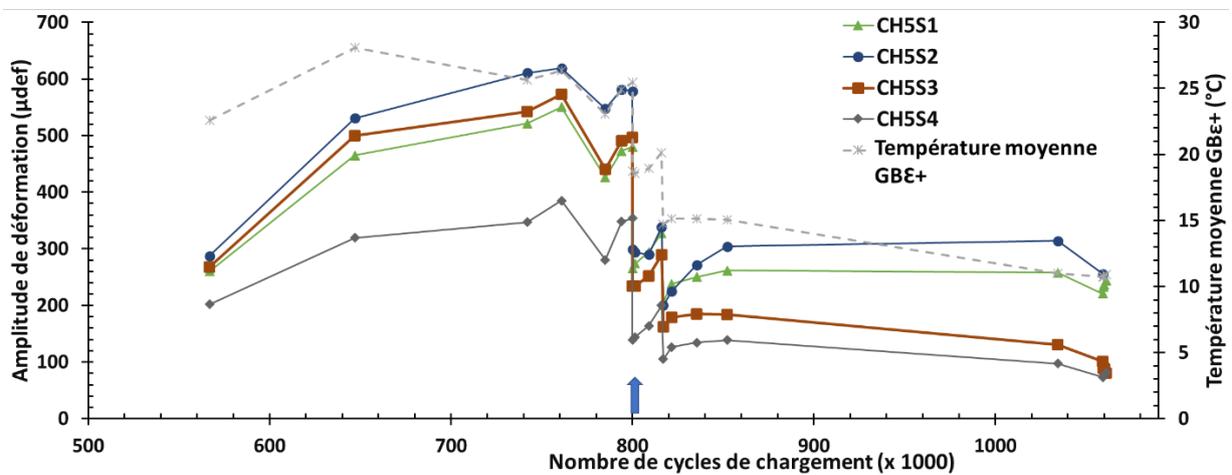


Figure 145 Amplitudes de déformations en fonction du nombre d'applications de la charge mesurées par le FBG de CH5 (Campagne D)

Par conséquent, un dommage localisé est trouvé plus près de S3 de la première ligne FBG (CH5) (voir Figure 146). A cet endroit, les déformations mesurées correspondent aux cycles de charge appliqués le matin après l'arrêt du système de chauffage pour la campagne D. Notons que la nuit précédente, la température moyenne de GBE+ a chuté de 25.5°C à 18.75°C .

Vue en plan $z = 1.82 \text{ m}$ (Surface inférieure de la couche de base)

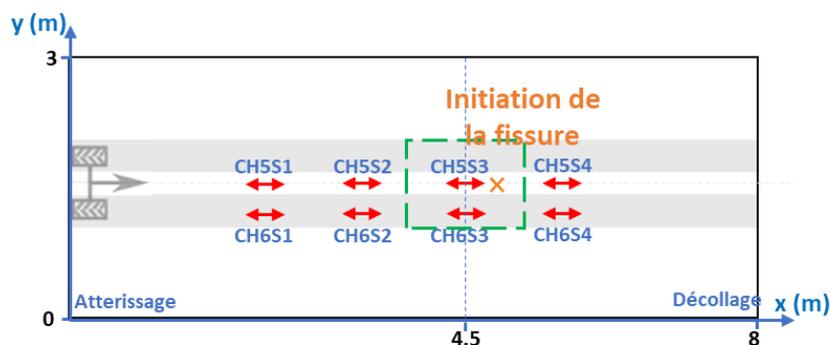


Figure 146 Vue de dessus de la couche de base avec la zone d'initiation de la fissure

En ce qui concerne la deuxième ligne de FBG (CH6), un comportement similaire est trouvé avec un point d'inflexion correspondant à 817 000 cycles cumulés de charge (voir Figure 147). Par conséquent, la fissure a mis 17 000 cycles de charge (soit dans la même journée) pour se propager de la première à la deuxième ligne. Même avec la diminution de la température, les déformations enregistrées par les capteurs S1, S2 et S4 ont légèrement augmenté après le point d'inflexion. Ceci peut être expliqué par la redistribution des charges dans la structure. En se basant sur ces résultats, une prédiction préliminaire de l'apparition d'une fissure transversale dans la base du GBE+ peut être faite.

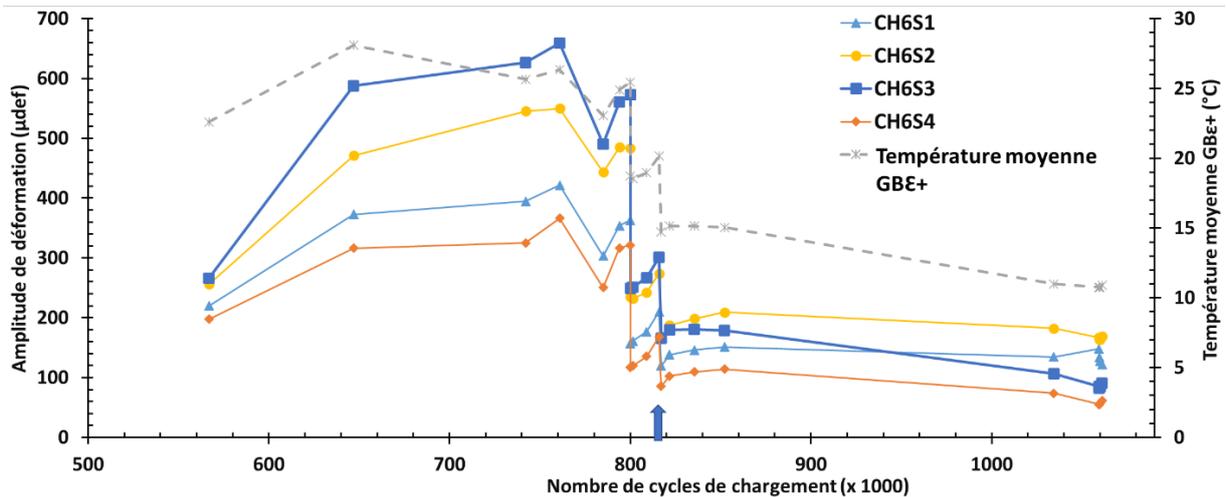


Figure 147 Amplitudes de déformations en fonction du nombre d'applications de la charge mesurées par le FBG de CH6 (Campagne D)

IV.6.3.2. Déformations mesurées au-dessus de la couche de base

Après avoir examiné les déformations sous les couches d'enrobé, une analyse est effectuée pour les déformations correspondant à la jauge de déformation longitudinale située en haut de la couche de base ($x = 4.35$ m, $z = 1.9$ m). En traçant la déformation mesurée en fonction du nombre de cycles de charge (voir Figure 148), trois phases peuvent être distinguées :

- la phase 1 représente des déformations en compression ;
- la phase 2 représente une transition des déformations en compression vers des déformations en traction ;
- la phase 3 représente des déformations en traction.

Ces résultats révèlent que la couche de base passe d'un mode de flexion à un mode de traction dans une zone proche de S3 ($x = 4.5$ m, $z = 1.82$ m).

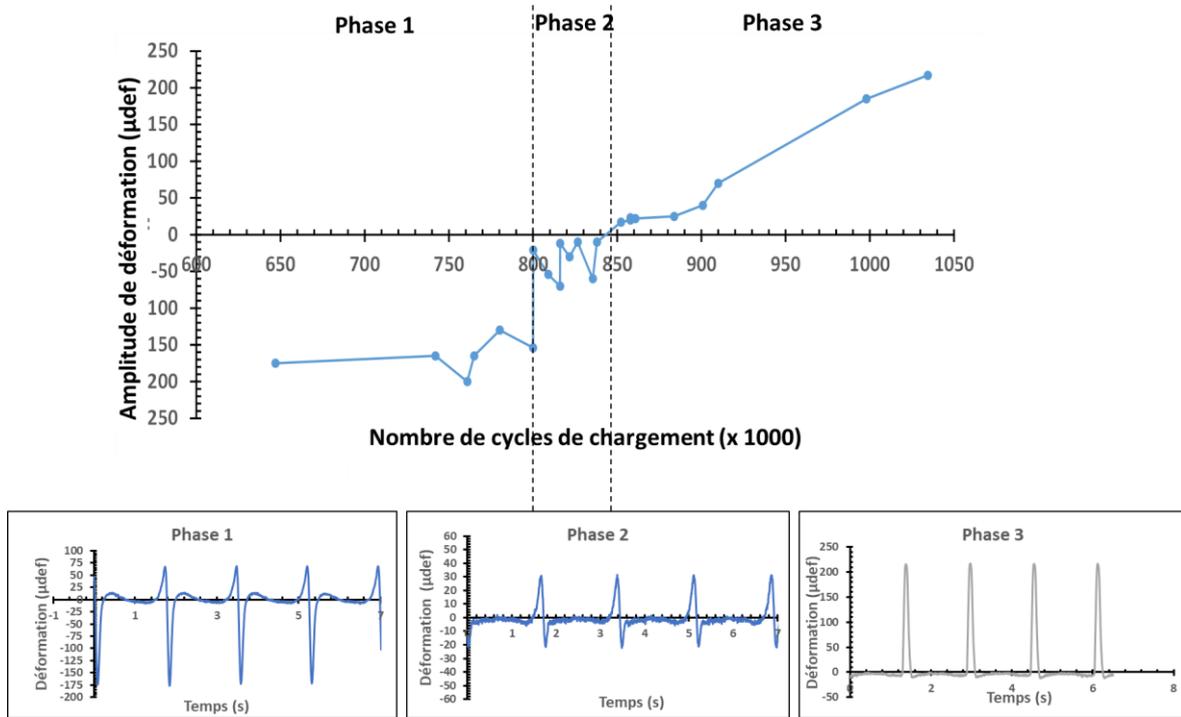


Figure 148 Amplitudes de déformations en fonction du nombre d'applications de la charge mesurées par la jauge de déformation CH4S2 (Campagne D)

Pour récapituler, après l'application de 800 000 cycles de charge, les résultats montrent une diminution de la déformation en traction S3 à la surface inférieure de la couche de base. Alors qu'à sa surface supérieure, une inversion de la déformation mesurée du mode de compression au mode de traction est obtenue (voir Figure 149). Cette analyse confirme l'initiation d'une fissure transversale au premier point et sa propagation due à l'accumulation de cycles de charge et de variations de température. La localisation de la fissure est prédite autour des deux capteurs S3 (x = 4.5 m) (représentée par un rectangle vert sur la Figure 149).

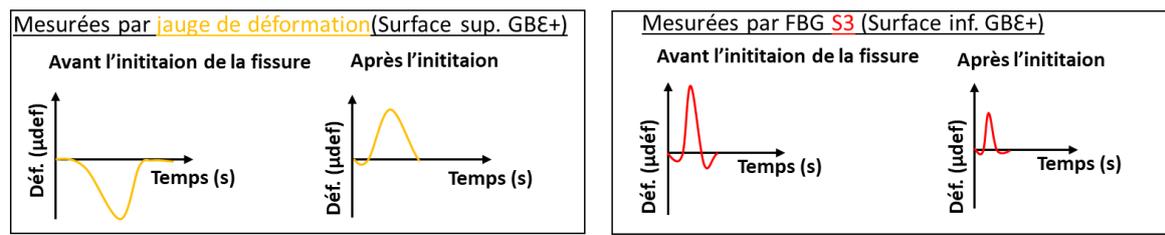
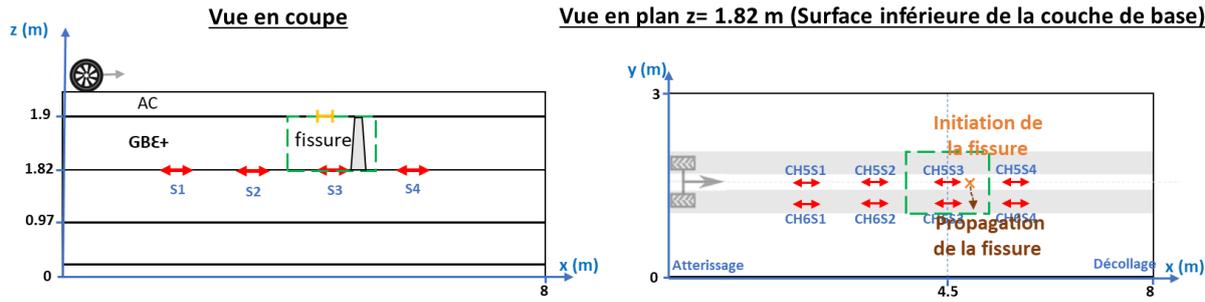


Figure 149 Aperçu de la structure fissurée (à gauche) et vue de dessus de la couche de base fissurée (à droite) avec les déformations mesurées.

IV.6.3.3. Modélisation par éléments finis

Comme mentionné précédemment, l'inspection visuelle des fissures est impossible en raison de la présence de la couche de surface qui est régulièrement modifiée. Ainsi, la détermination du positionnement de la fissure est compliquée. Afin de prédire la position exacte de la fissure, un modèle simplifié par éléments finis (MEF) est développé à l'aide du code de calcul Abaqus. Cette simulation consiste à étudier l'influence de la position de la fissure sur la déformation générée au-dessus et au-dessous de la couche de base. Les conditions expérimentales sont simulées aussi proche que possible de manière à représenter les conditions réelles de la structure de la chaussée, de la charge et des propriétés des matériaux.

Des modèles bidimensionnels sont préparés pour simuler la réponse de la chaussée à un seul passage des pneus jumelés MLS10 pour une chaussée non fissurée et les autres pour une chaussée fissurée. Cette dernière est modélisée en créant une fissure à différents niveaux dans la couche de base pour chaque modèle. La structure est modélisée en 2D comme une superposition des couches d'enrobé et de stabilisation d'une longueur totale de 8 m et d'une épaisseur de 2 m (voir Figure 150). Cette taille est choisie pour représenter la fosse expérimentale.

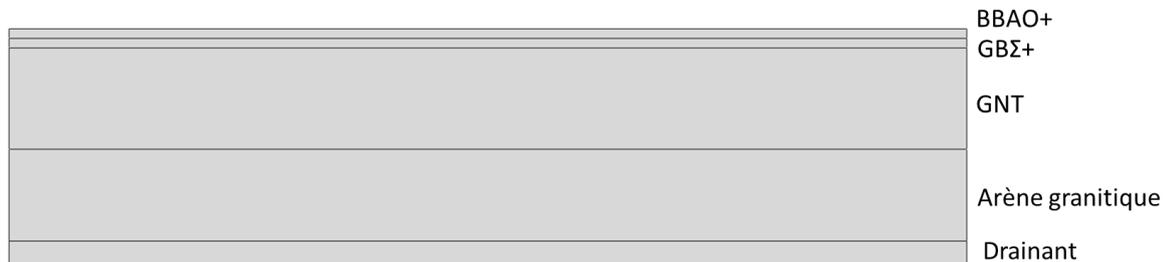


Figure 150 Vue de la modélisation de la structure non fissurée

Les propriétés mécaniques de chaque couche sont intégrées dans le modèle. En ce qui concerne les matériaux bitumineux, des propriétés élastiques linéaires dépendant de la température sont spécifiées. Les couches de matériaux granulaires sont modélisées par un comportement linéaire élastique. Les propriétés mécaniques des couches d'enrobé sont obtenues expérimentalement. Des spécimens trapézoïdaux sont préparés après carottage de la zone non sollicitée de la section d'essai. Un essai de flexion à deux points est effectué pour obtenir le module de rigidité complexe à une température de 15°C et à une fréquence de 10 Hz. Pour les couches non bitumineuses, les paramètres des matériaux sont calculés par analyse inverse à partir des mesures FWD sur la surface de la chaussée et des essais de charge sur plaque pendant la construction de la chaussée. Les propriétés mécaniques des différentes couches sont présentées dans le Tableau 39. On suppose une adhésion totale entre toutes les couches.

Couche	Module élastique (MPa)	Coefficient de Poisson
	(15°C, 10 Hz)	
BBAO+	9 000	0.35
GBΣ+	13 000	0.35
GNT	83	0.35

Arène granitique	16	0.35
Drainant	500	0.35

Tableau 39 Paramètres d'entrée du MEF

Le chargement est modélisé comme une pression verticale constante égale à 0.66 MPa. La charge est déplacée manuellement le long de la trajectoire d'application de la charge sur la chaussée afin d'effectuer une analyse théorique des déformations obtenues par les FBG et les jauges de déformation pendant la phase expérimentale. Cinq cas de positions de charge différentes sont simulés. La charge varie d'une application au-dessus du FBG S1 ($x = 2.5$ m) à une application au-dessus du FBG S4 ($x = 5.5$ m) en passant par les FBG S2 ($x = 3.5$ m) et S3 ($x = 4.5$ m). Le dernier cas correspond à l'application de la charge au-dessus de la jauge de contrainte ($x = 4.35$ m). Un exemple de position de la charge au-dessus du FBG S3 ($x = 4.5$ m) est illustré à la Figure 151. Le modèle de cet exemple est utilisé pour déterminer la déformation mesurée par le FBG S3. Le maillage est conçu avec un degré de raffinement plus élevé à proximité de la fissure pour les modèles avec une couche de base fissurée. Des éléments quadrilatéraux sont utilisés pour le maillage (CPS4R dans le code ABAQUS).

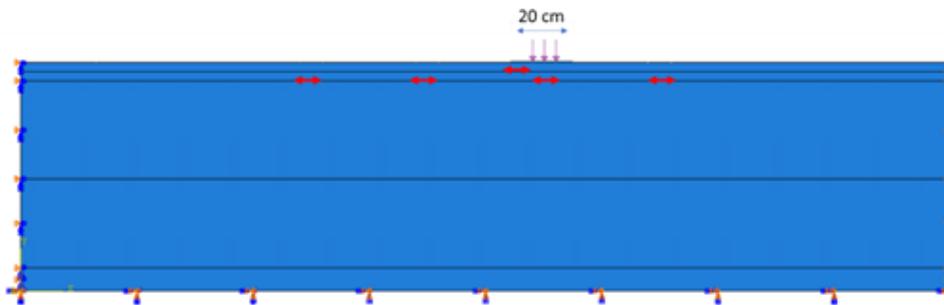


Figure 151 Conditions de chargement des roues au-dessus du FBG S3 ($x = 4.5$ m) avec les positions expérimentales des capteurs

Les déformations générées numériquement au-dessus et au-dessous de la couche de base sont mesurées pour chaque cas de chargement. Les résultats de la MEF pour les structures fissurées et non fissurées sont comparés pour évaluer l'influence d'une fissure à différentes positions dans la couche de base. Ces résultats sont ensuite comparés aux données des capteurs obtenues lors de l'essai expérimental afin de déterminer à quelle position de fissure une tendance similaire peut être observée. Un exemple d'une structure fissurée est présenté dans la Figure 152.

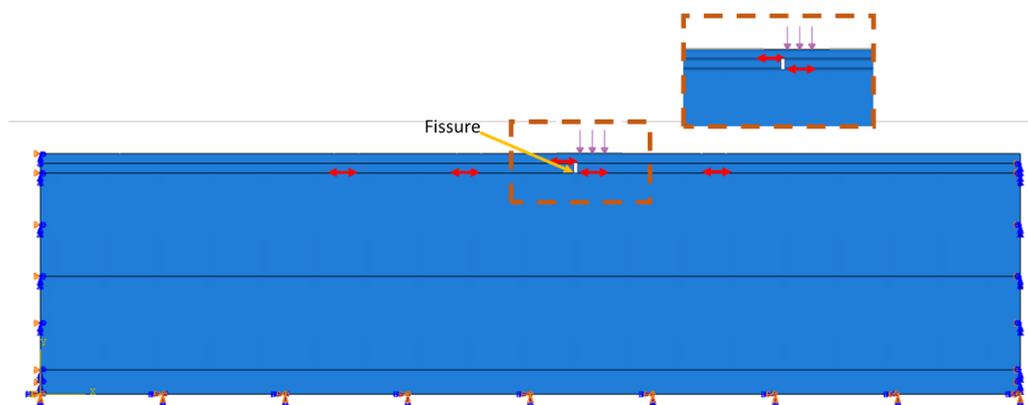


Figure 152 Modélisation d'une structure fissurée

Comme mentionné précédemment, la déformation mesurée par le FBG S3 ($x = 4.5 \text{ m}$) a diminué tandis que les déformations du FBG S2 ($x = 3.5 \text{ m}$) a augmenté après l'apparition de la fissure. En outre, la surface supérieure de la couche de base est passée d'un mode de compression à un mode de traction, comme enregistré par la jauge de déformation longitudinale. Après avoir fait varier la position de la fissure dans la MEF, on obtient un mode de déformation similaire à la réponse expérimentale de la chaussée pour une fissure située entre 5 cm et 8 cm du capteur S3. La position de la fissure est estimée dans une zone comprise entre $x = 4.42 \text{ m}$ et 4.45 m (voir Figure 153).

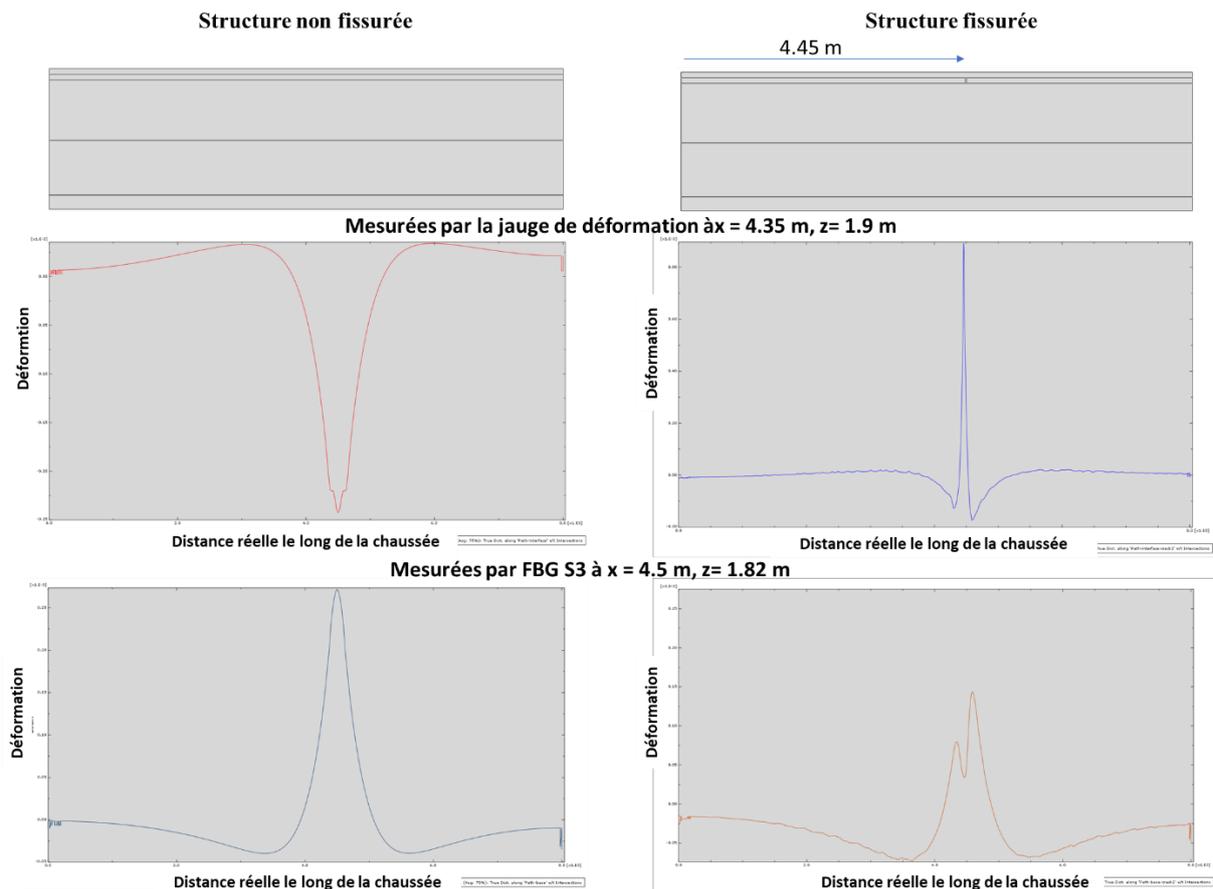


Figure 153 Déformations longitudinales obtenues à partir du modèle EF pour une structure non fissurée (à gauche) et pour une structure fissurée (à droite)

Cette simulation confirme la présence d'une fissure transversale dans la couche de base près de S3. En outre, elle permet de vérifier que la tendance observée n'est pas liée à un phénomène de décollement entre les couches de surface et base. Par conséquent, l'utilisation de la MEF permet d'identifier la position de la fissure.

IV.6.3.4. Relations entre la déformation et la température

L'expérimentation à température contrôlée et à quatre dates différentes a permis d'obtenir une large gamme de températures de chaussée. La température moyenne de la couche de base a varié de 5°C à 50°C (voir Annexe G). Cette dernière est choisie pour l'analyse de la relation déformation-température. Le rapport NCAT 2009 (Willis et al., 2009) a trouvé une fonction exponentielle qui peut décrire la relation présentée dans l'équation 46. Dans ce rapport, le cas étudié correspond à une couche de béton bitumineux avec une base granulaire. Les températures à mi-profondeur sont utilisées dans son analyse.

$$\varepsilon_t = c e^{dT} \quad \text{Équation 46}$$

Avec :

ε_t : Amplitude de la déformation en traction (μdef)

T : Température à mi-profondeur ($^{\circ}\text{C}$)

e : fonction exponentielle

c, d : coefficients de régression

Pour obtenir la relation déformation-température, le pic de déformation en traction est tracé en fonction de la température moyenne du GB ε + enregistrée avant la fissure prédite. La Figure 154 présente la relation entre la température et la déformation mesurée par la première ligne de FBG CH5 (à gauche) et la deuxième ligne de FBG CH6 (à droite). Les équations de régression sont présentées dans ce graphique. Les coefficients de détermination (R^2) sont compris entre 0.86 et 0.93.

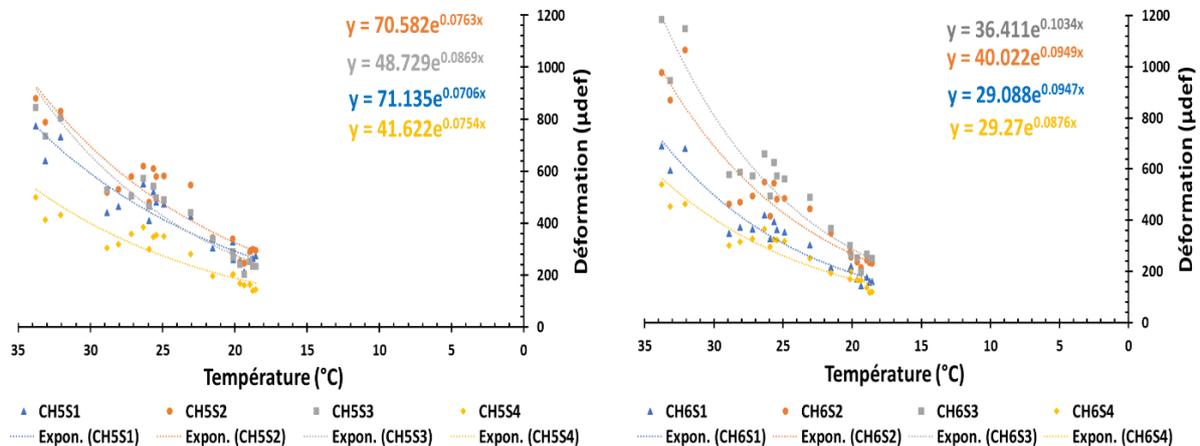


Figure 154 Amplitude de déformation longitudinale en fonction de la température moyenne du GB ε + mesurée par CH5 (à gauche) et par CH6 (à droite)

Dans notre travail de recherche, la structure étudiée est composée de deux couches d'enrobé ayant des propriétés mécaniques et thermiques différentes. De plus, un gradient de température peut être constaté au sein des couches d'enrobé, notamment lorsque des panneaux chauffants sont utilisés. Une différence allant jusqu'à 12°C entre la température de la surface de la chaussée et la température à l'interface avec la couche de base est enregistrée pendant certaines périodes de la campagne D. Ce gradient n'est pas le même pour chaque couche d'enrobé. Pour étudier l'effet des températures de la couche de surface et de la couche de base sur la déformation, l'équation 46 est modifiée en l'équation 47 pour prendre en compte les températures de ces deux couches. L'amplitude de la déformation est tracée en fonction des températures moyennes des couches de surface et de base (voir Figure 155).

$$\varepsilon_t = A e^{BT_{\text{moyenne surface}}} + C e^{DT_{\text{moyenne base}}} \quad \text{Équation 47}$$

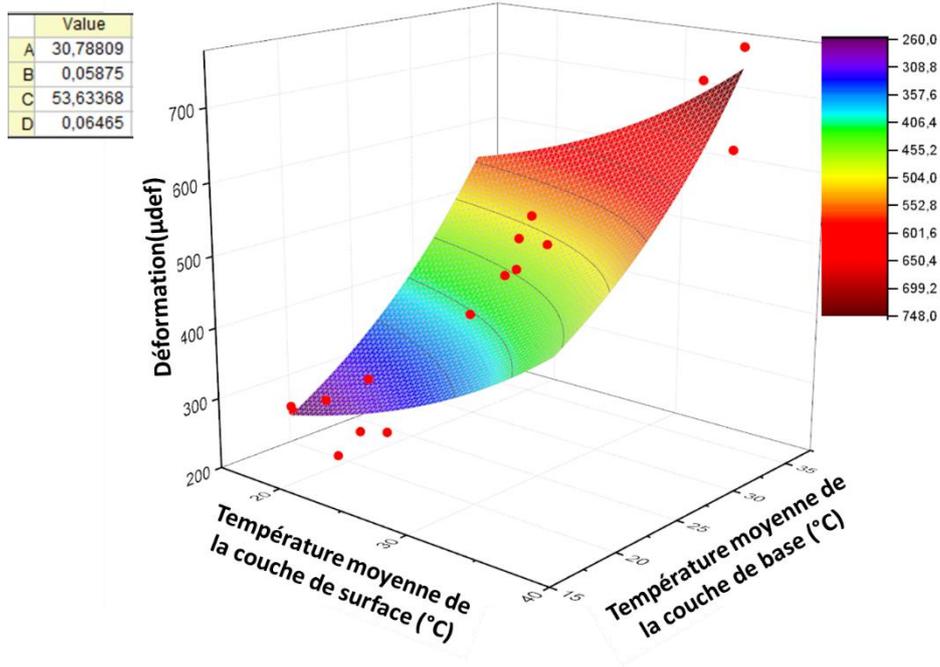


Figure 155 Un exemple d'amplitude de déformation en fonction des températures moyennes des couches de surface et de base avec les coefficients de régression

La relation empirique déformation-température correspondante peut être présentée comme suit :

$$\varepsilon_t = 30.788 e^{0.0587 T_{\text{moyenne surface}}} + 53.634 e^{0.0645 T_{\text{moyenne base}}} \quad \text{Équation 48}$$

La déformation mesurée par le FBG CH5S1 et les résultats correspondants du modèle sont tracés en fonction de la température moyenne de la chaussée dans la Figure 156 suivante. En outre, la différence entre la déformation mesurée et la déformation estimée est présentée. Cette différence varie de + ou - 10% à 12% dans cet exemple.

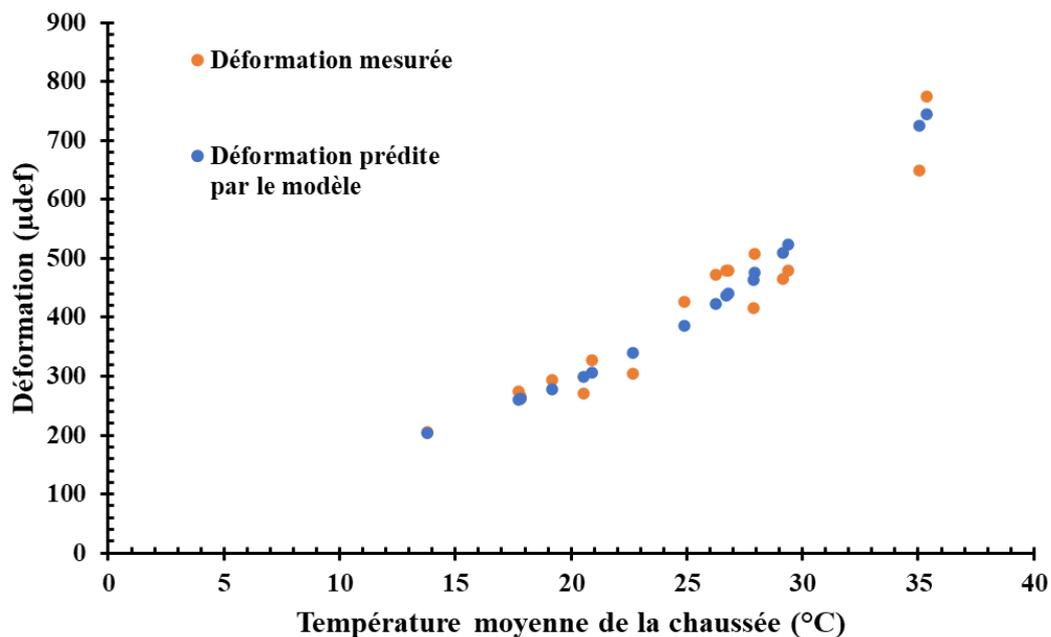


Figure 156 Déformation mesurée par le CH5S1, déformation résultante du modèle et différence entre les deux en fonction de la température moyenne de la chaussée

IV.6.3.5. Déformation normalisée en fonction de la température

Les expériences étant menées dans une large gamme de températures, il est nécessaire de normaliser la réponse de la chaussée à une température de référence. A. Vargas-Nordbeck et al., 2012 ont divisé l'équation 48 avec la température de référence (T_{ref}) par la même équation avec la température mesurée (T_{mes}). Après avoir résolu l'équation, une réponse normalisée en fonction de la température (réponse Tref) est obtenue.

$$reponse_{T_{ref}} = reponse_{T_{mes}} e^{d(T_{ref} - T_{mes})} \quad \text{Équation 49}$$

En suivant la même procédure pour l'équation 49, la déformation longitudinale normalisée est obtenue. Cette procédure de normalisation a permis une comparaison plus juste de la réponse de la chaussée testée à différentes températures. La Figure 157 illustre la déformation normalisée par rapport à la température en fonction du temps à 15°C comme température de référence. On peut observer qu'avant le 27/10/2021, les déformations présentent une faible variabilité dans le temps. Après cette date, la déformation normalisée a commencé à augmenter légèrement, ce qui pourrait indiquer l'initiation d'un dommage. Après le 10/11/2021, le FBG a présenté des résultats erratiques. Cette date correspond à l'initiation et à la propagation de la fissure transversale après 817 000 cycles de charge détectée dans les sections d'analyse précédentes.

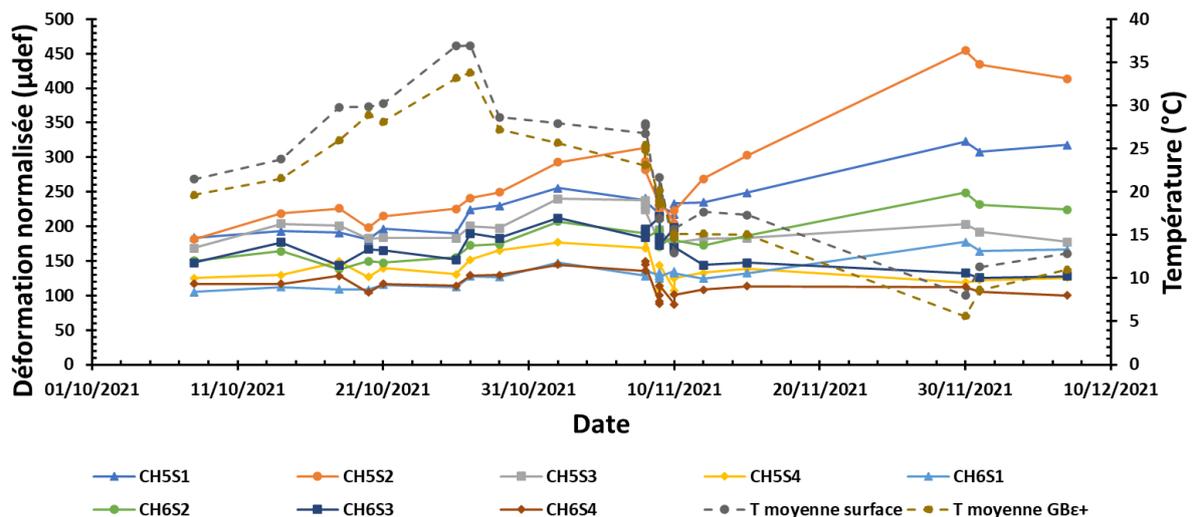


Figure 157 Déformation longitudinale normalisée à 15°C pour la campagne D

IV.6.3.6. Endommagement de la couche de base

Pour évaluer précisément la résistance à la fatigue de la couche de base, le dommage est calculé. Ce dernier est lié à la variation du module GBε+ le long de l'expérience. Pour évaluer l'effet de la variation du module de la couche de base sur sa réponse, une analyse est entreprise à l'aide du logiciel Alizé. La chaussée est modélisée par un milieu multicouche semi-infini. Le comportement du matériau est supposé être élastique linéaire. Chaque couche est caractérisée par le module d'Young E et par le coefficient de Poisson ν . Afin de comparer la déformation résultante à la déformation normalisée expérimentale à $T_{ref} = 15^\circ\text{C}$, les propriétés mécaniques des enrobés sont choisies à la même température. Le modèle numérique a permis de simuler les conditions réelles des configurations de la structure de la chaussée. Cette simulation a permis d'établir les réponses théoriques induites par la charge dans la

structure de la chaussée avec un module différent du matériau de base présenté dans la Figure 158.

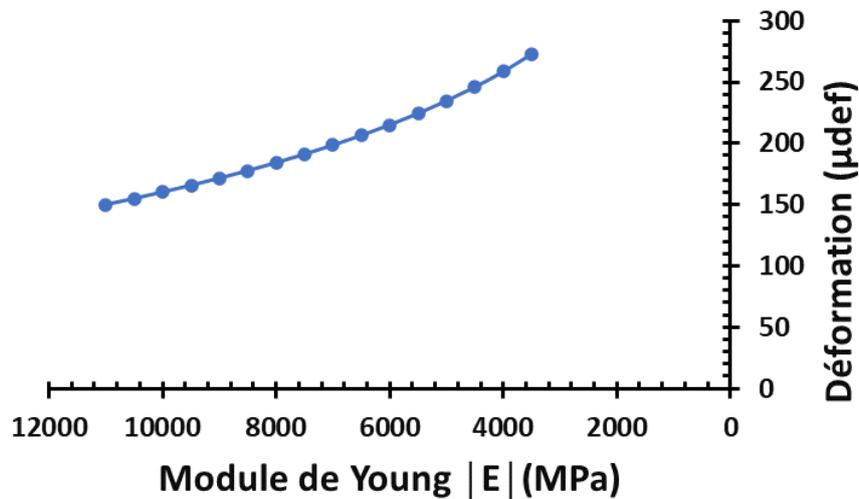


Figure 158 Déformation calculée sous la couche de base en fonction de la norme de son module de Young E

Le changement du module est associé à un dommage calculé à l'aide de l'équation suivante.

$$\text{Dommage } D (\%) = \left(\frac{E_j - E_i}{E_i} \right) \times 100 \quad \text{Équation 50}$$

Où E_i est le module d'élasticité du matériau non endommagé,

E_j est le module d'élasticité à un instant j de l'essai.

Ces réponses sont ensuite comparées aux déformations normalisées expérimentales pour prédire le dommage de la couche de base (voir Figure 159).

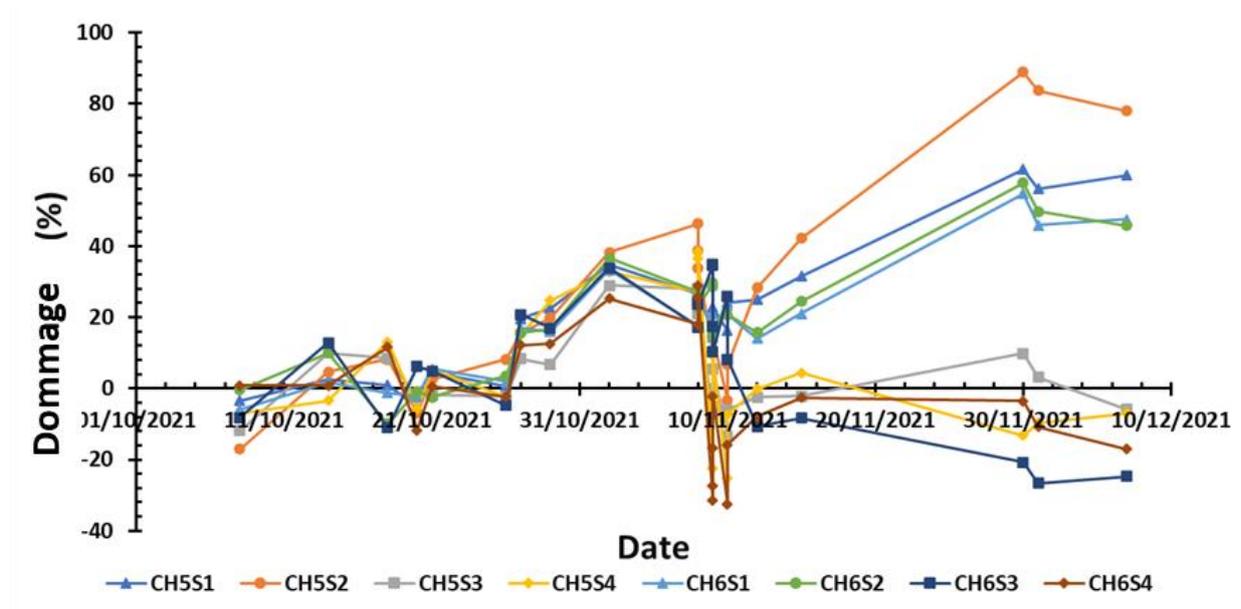


Figure 159 Dommage de la couche de base au cours du temps pour la campagne expérimentale D

Ces résultats confirment l'analyse mentionnée ci-dessus. La couche de base a commencé à être endommagée après le 27/10/2021. Ainsi, après 700 000 cycles de charge, le dommage

a augmenté de 0 % et a atteint 35 % à 45 % à 817 000 cycles de charge où le dommage a commencé à présenter des résultats erratiques indiquant un endommagement total de la couche de base. En outre, on peut remarquer qu'après ce point, les deux capteurs S1 et S2 se comportent d'une façon différente que les capteurs S3 et S4 pour les deux lignes FBG. Cette hypothèse confirme la présence d'une fissure transversale divisant la couche de base en deux sections (voir Figure 160). Ces résultats sont validés par Ziade et al., 2023.

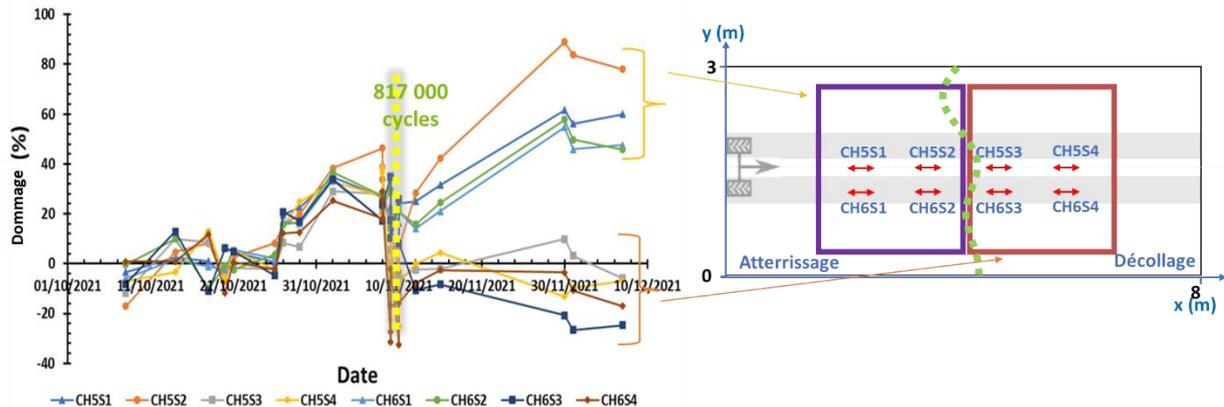


Figure 160 Dommages de la couche de base

IV.6.4. Dommages de la couche de base en se basant sur les déflexions

IV.6.4.1. Rétro calcul (ALIZE-LCPC)

La méthode consiste à exploiter le bassin caractéristique de déflexion mesuré par le déflectomètre à masse tombante (FWD) pour évaluer les modules des couches de chaussée à l'aide d'un calcul inverse qui conduit à la détermination du jeu des modules recherchés sur la base de l'optimisation de l'ajustement entre les bassins de déflexions mesurés et calculés par ALIZE-LCPC (voir Figure 161).

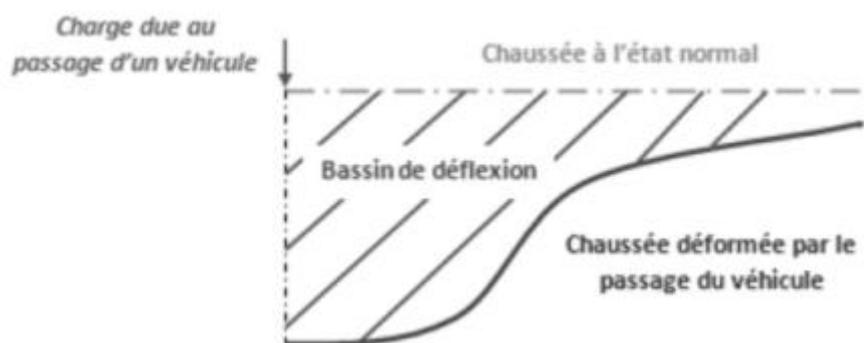


Figure 161 Bassin de déflexion

Plusieurs essais FWD sont menés à différents moments de la campagne d'essai MLS (normalement au début et à la fin de chaque campagne) pour évaluer l'évolution des déflexions. Dans ce chapitre, seules les mesures réalisées à la fin de la dernière campagne d'essais D sont utilisées afin d'obtenir les modules rétro calculés.

Les essais FWD sont réalisés à la fin de la campagne D dans des zones circulées et des zones non circulées afin d'évaluer le changement de module entre ces deux zones. Ces essais sont menés par l'application d'une charge de 60 kN sur une plaque de 150 mm de rayon. Les déflexions sont mesurées par les 9 géophones situés à des distances radiales de l'application

de la charge : 0, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 et 1800 mm. Un exemple de bassin de déflexion est représenté dans la Figure 162.

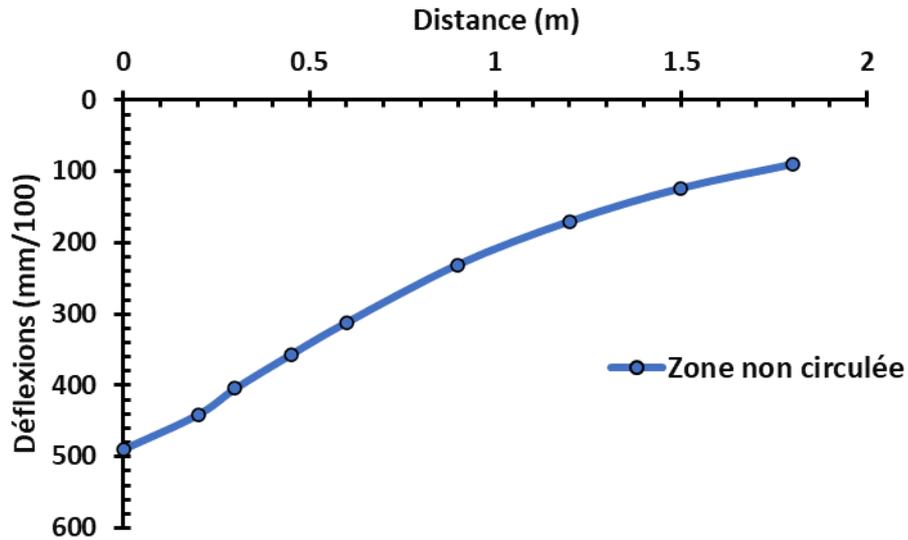


Figure 162 Bassin de déflexion mesurée dans une zone non circulée à la fin de la campagne d'essai D

Afin de réaliser le rétro calcul, la structure de chaussée est modélisée comme un demi-espace multicouche de comportement élastique. Le sol est modélisé comme une couche infinie. Au-dessus, trois couches granulaires sont représentées avec des modules élastiques et un coefficient de poisson de 0.35. Les modules élastiques des matériaux non bitumineux sont obtenus à partir des essais de charge dynamique sur plaque pendant la construction de la chaussée. Les couches bitumineuses sont considérées comme des matériaux élastiques avec un coefficient de poisson de 0.35 et un module élastique qui dépend de la température et de la fréquence de sollicitation au moment de la réalisation de l'essai FWD (11.5°C pour la couche de surface, 11°C pour la couche de base et une fréquence 1 Hz correspondant à la fréquence de sollicitation par MLS). Ces modules sont préliminaires et seront rétro calculés en fonction du bassin de déflexions. Lors du rabotage du BBAO (couche de surface de la campagne C), une couche résiduelle de 3 cm composée d'un mélange des matériaux des trois campagnes d'essai précédentes est observée. Elle est due à un mauvais rabotage des couches de surface précédentes. Cette couche est prise en considération lors de la modélisation de la chaussée (voir Figure 163).

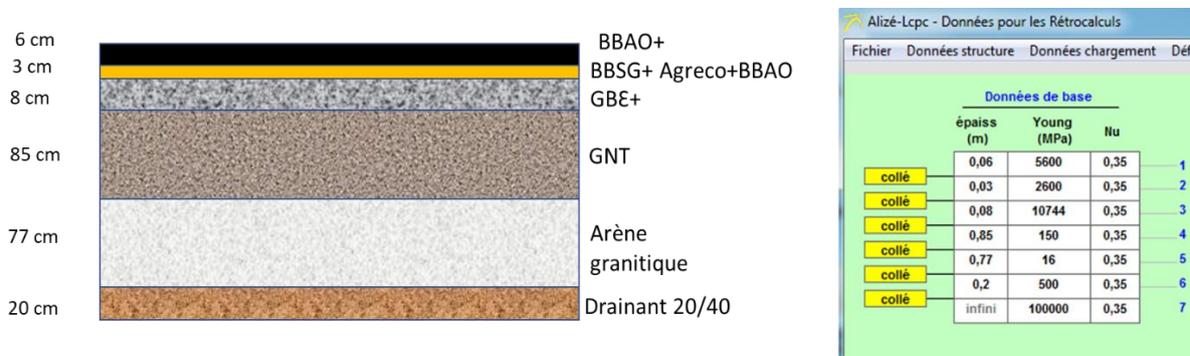


Figure 163 Modélisation de la chaussée (structure de la campagne D) dans le logiciel Alizé

Le bassin caractéristique de déflexion introduit dans ALIZE est évalué par la méthode présentée dans le guide du service technique de l'aviation civile (STAC, 2014).

IV.6.4.1.1. Module de plateforme

Le module de plateforme E_0 est calculé par l'équation de Boussinesq intégrée dans Alizé. Dans ce paragraphe, l'évolution de E_0 est présentée en se basant sur les bassins de déflexions relevés tout au long de l'essai. Dans la Figure 164, le module E_0 est obtenu à partir des 3 bassins de déflexions :

- Le 11/04/2019 : Déflexions mesurées avant la mise en place des couches bitumineuses et avant l'application de la MLS.
- Le 20/02/2020 : Déflexions mesurées à la fin de la campagne B. Elles correspondent à un matériau Agreco en couche de surface. La mesure de déflexion est réalisée en zone circulée et zone non circulée.
- Le 20/02/2021 : Déflexions mesurées à la fin de la campagne C. Elles correspondent à un matériau BBAO en couche de surface. La mesure de déflexion est réalisée en zone circulée et zone non circulée.

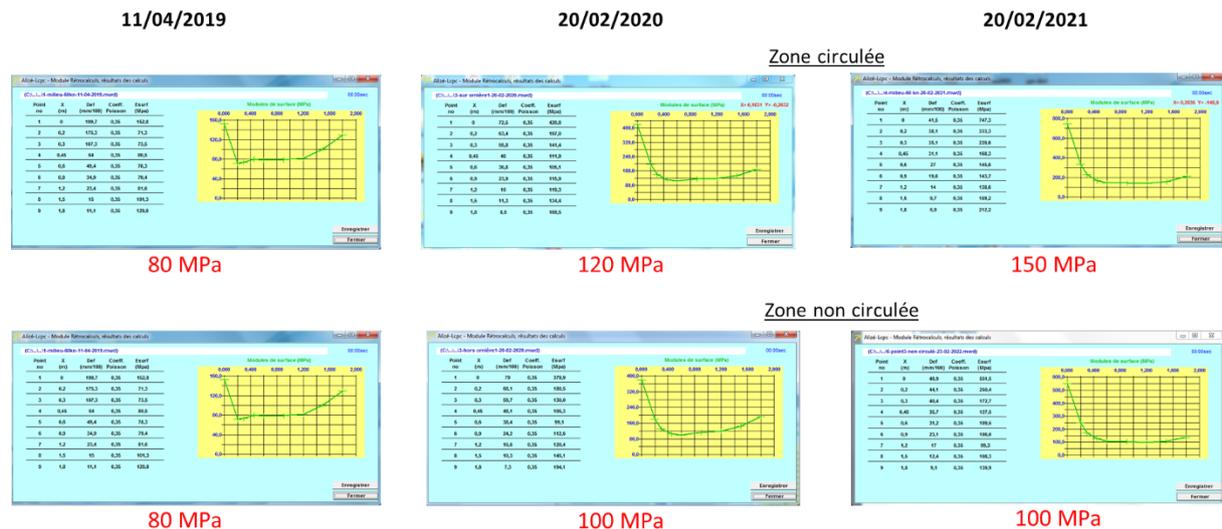


Figure 164 E_0 calculé par Alizé

Le module de la plateforme augmente de 80 MPa avant de commencer les essais à 150 MPa à la fin de la campagne C dans la zone circulée alors qu'une légère augmentation de 80 à 100 MPa est obtenue pour la zone non circulée. Cela peut être dû au tassement consécutif à l'application de la charge sur la plateforme qui est confinée dans la fosse (dont la base et les parois sont en béton). La Figure 164 est représentée d'une façon plus claire dans Annexe .

IV.6.4.1.2. Module des couches bitumineuses

Ces modules sont obtenus par rétro calcul à partir des déflexions relevées à la fin des essais (après la campagne D) dans des zones circulées et non circulées. Vu la présence d'une ornière dans les zones circulées, une couche de sable est placée dans l'ornière afin de réaliser les essais dans ces zones. Deux mesures sont faites par point dans l'ornière afin de vérifier la répétabilité des résultats. La Figure 165 représente les bassins de déflexions résultants. Les mesures dans l'ornière montrent une bonne répétabilité. Cependant le premier point de mesure est supprimé en raison de la non-conformité de ses déflexions. Cela est dû

probablement à la présence de la couche de sable utilisée afin de réaliser les essais dans l'ornière.

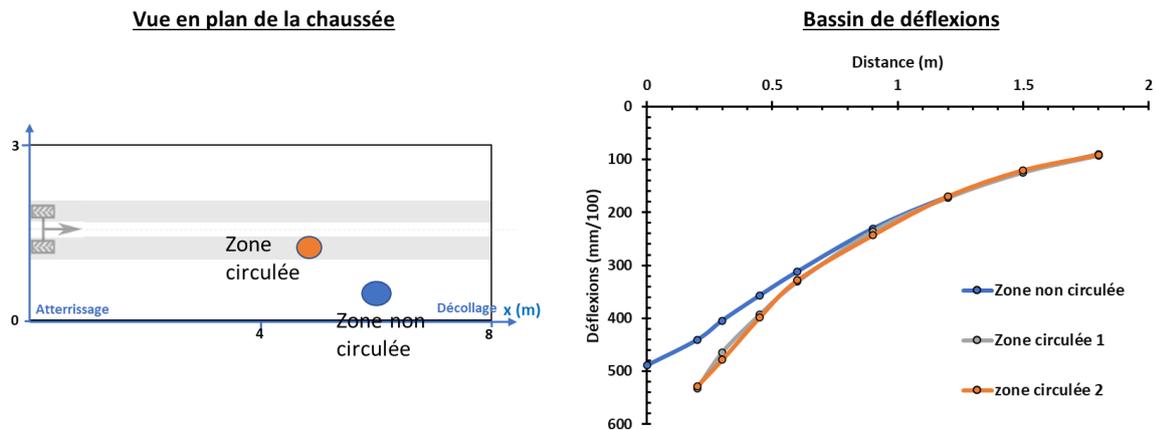


Figure 165 Bassins de déflexions

Le rétro calcul est effectué pour chaque bassin de déflexion. L'essai est réalisé à une température homogène dans la chaussée d'environ 11°C. La Figure 166 montre un exemple de rétrocalcul réalisé en utilisant le logiciel Alizé et les modules rétrocalculés des différentes couches. Cet exemple correspond à l'essai réalisé dans la zone non sollicitée à la fin de la campagne D.

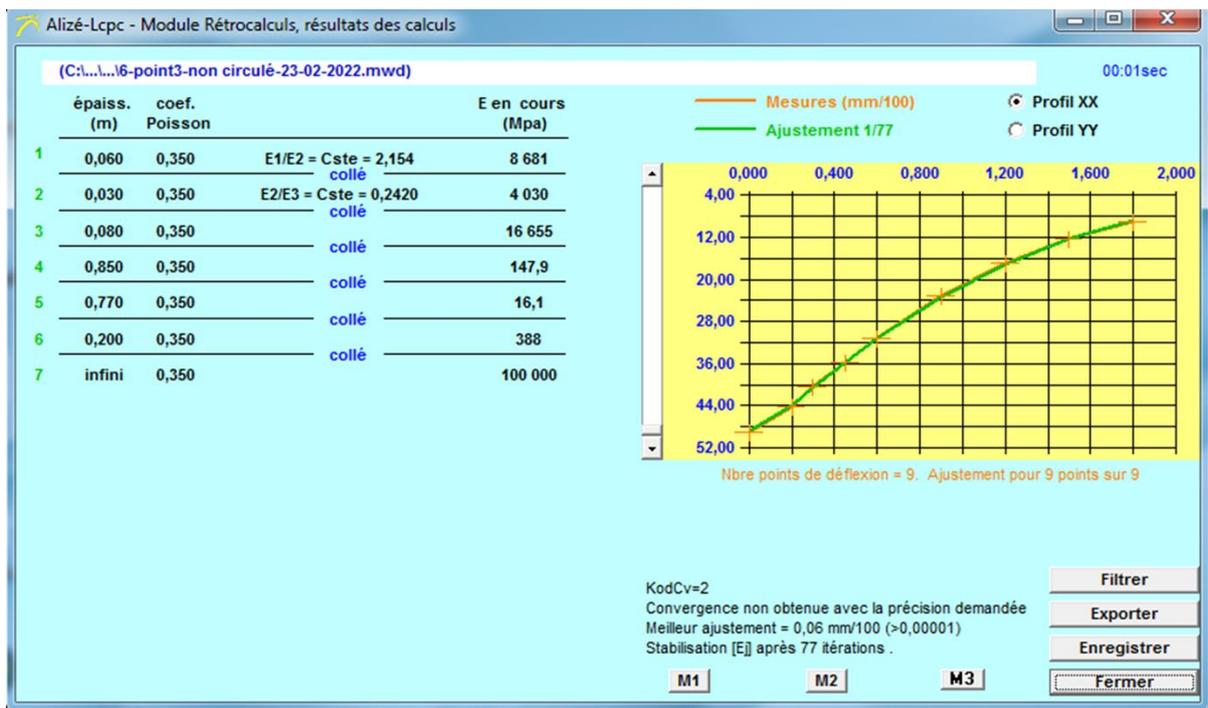


Figure 166 Exemple de rétro calcul en utilisant le logiciel Alizé

Les modules obtenus pour les différentes couches à partir des 3 bassins de déflexions sont présentés dans le Tableau 40. Ces modules correspondent à une température de 11°C (température lors de la réalisation de l'essai) et une fréquence de 34 Hz (fréquence du chargement du FWD).

	Zone non circulée	Zone circulée
--	-------------------	---------------

Couches	Module rétrocalculé (MPa)	Module rétrocalculé-point 1 (MPa)	Module rétrocalculé-point 2 (MPa)	Module rétrocalculé moyen (MPa)
BBAO+	8 681	3 452	3 733	3 592
Résiduelle	4 030	1 603	1 733	1 668
GBE+	16 655	6 623	7 161	6 892
GNT	147.9	178	161	169
Arène granitique	16.1	24	26	25
Drainant	388	766	507	636

Tableau 40 Les modules rétro calculés

En comparant les modules des couches bitumineuses entre zone circulée et non circulée, une diminution d'environ 60% est observée pour les mesures dans les zones sollicitées. D'après ce résultat, la couche de base est considérée comme endommagée vu que le matériau a perdu plus que 50% de sa rigidité initiale. Cela confirme l'analyse, basé sur les déformations mesurées par les capteurs, déjà présentée dans les paragraphes précédents.

IV.6.4.1.3. Vérification du rétrocalcul

Afin de vérifier les modules obtenus par le rétrocalcul, une comparaison est faite entre les déformations générées par une structure modélisée en appliquant ces valeurs de modules et les déformations expérimentales.

Concernant les déformations générées par la modélisation, les modules obtenus dans la zone non circulée sont utilisés. Ces modules présentent les modules des matériaux non endommagés vu qu'ils correspondent à des zones non circulées. Concernant les déformations générées expérimentalement, des mesures obtenues par les capteurs au-dessus et au-dessous de la couche de base, au début de la campagne d'essais D, sont adoptées (voir Figure 167). Ces déformations correspondent à l'application des premiers cycles sur la couche de BBAO+ (566 000 cycles cumulés sur la GBE+). Elles correspondent à des matériaux non endommagés.

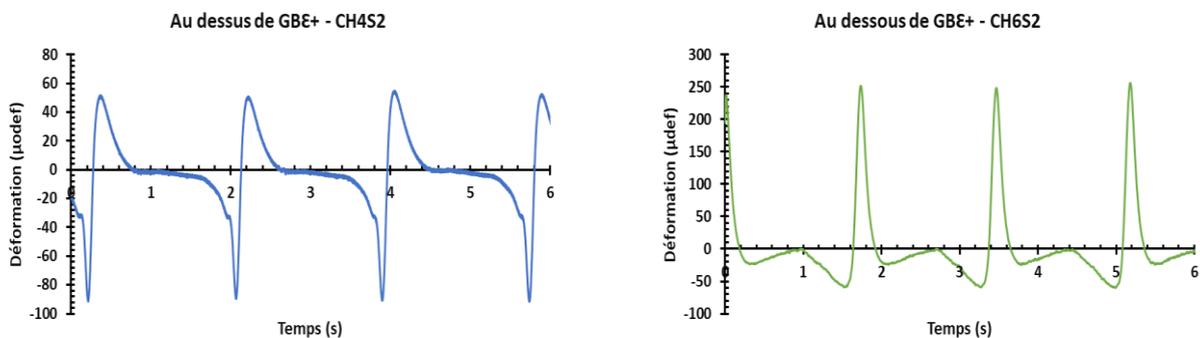


Figure 167 Déformations générées expérimentalement au début de la campagne d'essais D

Ces déformations représentent une valeur en compression de 90 μ def en dessus de la couche de base et une valeur en traction de 250 μ def en bas de la couche. Ces valeurs sont mesurées le 07/10/2021 à une température moyenne de 25°C pour la couche de surface et 23°C pour la couche de base et une fréquence de 1 Hz (fréquence de la sollicitation de la MLS).

Afin de comparer les déformations expérimentales et numériques, un ajustement est fait au module recalculé pour simuler les mêmes conditions de températures et fréquences qu'expérimentalement. Un passage d'un module recalculé, correspondant à 11°C et 34 Hz, à un module équivalent à 23°C (25°C pour les couches de surface) et 1 Hz, est fait. Ce passage se fait en utilisant le principe d'équivalence temps température et en utilisant la courbe maitresse de chaque matériau bitumineux. Puisque nous ne disposons pas des courbes maitresses de chaque matériau, les modules équivalents sont obtenus à partir de la bibliothèque des matériaux en variant la température et la fréquence. Les modules équivalents utilisés ainsi que les déformations calculées sont présentés dans la Figure 168.

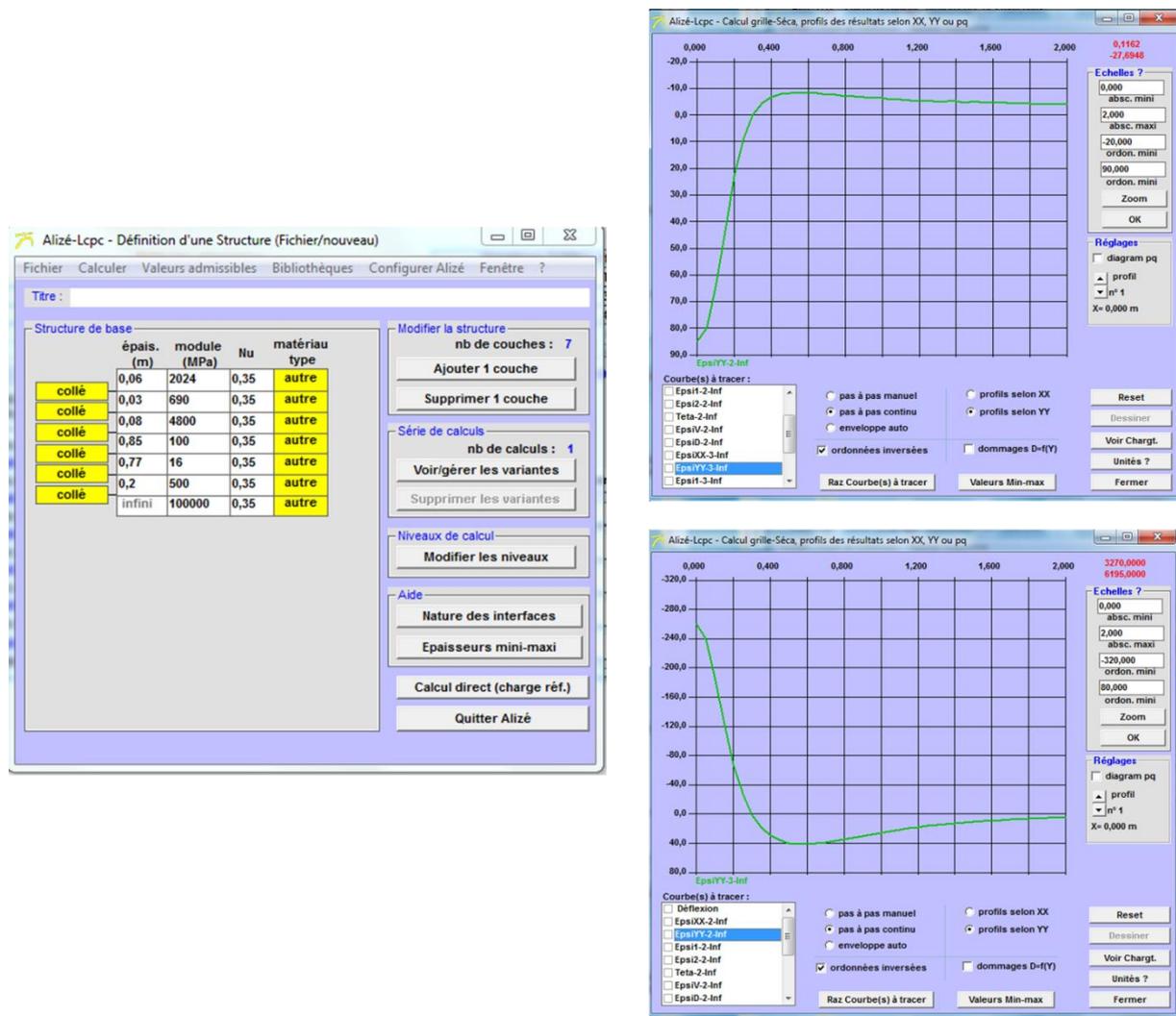


Figure 168 Les modules équivalents utilisés ainsi que les déformations calculées dans Alizé

Les déformations obtenues par Alizé correspondent à une compression d'environ 83 μ def en dessus de la couche de base et une traction de 260 μ def en bas de la couche. Ces valeurs sont très proches des valeurs expérimentales et par la suite, le rétrocalcul est vérifié.

IV.7. Essai en utilisant le simulateur de trafic FABAC

Les performances du GBE+ sont évaluées par un autre simulateur de trafic. Une section de chaussée, d'une largeur de 1.9 m et d'une longueur de 2 m est testée dans un hall avec un simulateur de trafic FABAC (Fatigue du Béton Armé Continu) de l'Université Gustave Eiffel à Nantes (voir Figure 169 (gauche)). Les dimensions de la machine sont de 10 m pour la longueur, 3 m de hauteur et 2.5 m de largeur. FABAC sollicite la chaussée sur une longueur de deux mètres.

L'essai est réalisé sans couche de surface. La structure testée est présentée dans la Figure 169 (droite). La portance est mesurée à différentes positions sur la structure au moyen d'une plaque. La valeur de portance obtenue est de 108 MPa (+/-5 MPa) au sommet de la couche de GNT.



Figure 169 Machine Fabac (gauche) et structure testée (droite)

L'essai est réalisé en deux phases. Les conditions de l'essai sont précisées dans le Tableau 41.

	Essai de fatigue	
Période	27 septembre 2021 - 18 janvier 2022	18 janvier 2022 – 1 ^{er} février 2022
Vitesse	3.5 km/h	3.5 km/h
Température de surface Min-Max	8.9°C ; 20.8°C	8.5°C ; 14.0°C
Température moyenne (milieu de la couche)	14.5°C +/- 2.7°C	11.9°C +/- 1.1°C
Chargement (jumelage standard)	65 kN	75 kN
Nombre de chargements	2.5 millions	500 000

Tableau 41 Les conditions d'essai

La réalisation de l'essai dans le hall a permis d'avoir des températures très stables. Environ 90% du chargement est appliqué sous une température entre 10 et 14°C en surface de la couche de GB.

Quatre mesures de FWD sont réalisées sur la planche à 40k, 211k, 2.46 millions et 3 millions de chargements. Un rétrocalcul basé sur le bassin de déflexions est réalisé par l'équipe de l'Université Gustave Eiffel. Ce rétrocalcul est effectué pour déterminer les modules des différentes couches et surtout l'évolution de ces modules au cours de l'essai.

Afin de simplifier les rétro-calculs, ils ont considéré qu'il n'y avait qu'une seule couche de GNT d'épaisseur 40 cm. Ils ont supposé que cette couche de GNT repose sur un sol support de 4 mètres d'épaisseur, qui repose lui-même sur un substratum rigide.

Les résultats obtenus par rétro-calculs, sur le point situé au milieu de la structure, en fixant les modules du sol et de la GNT sont présentés dans le Tableau 42.

Nombre de cycles	40 k	211 k	2.4 M	3 M
T_{mesure}	17°C	12°C	10°C	11°C
Enrobé (T_{mesure} , 30Hz)	15 731	11 810	4 748	4 399
Enrobé (15°C, 10Hz)	14 478	9 274	3 523	3 355
GNT	132	132	132	132
Sol	91	91	91	91

Tableau 42 Résultats obtenus par les rétro-calculs

Après 211 000 de cycles de chargements, le module d'enrobé diminue légèrement (14 478 à 11 810 MPa). Après 2.4 millions de chargements, le module a fortement diminué, il est d'environ 3 523 MPa, ce qui indique une très forte dégradation du matériau. Cette diminution de module au cours de l'essai, est cohérente avec les mesures à la poutre Benkelman, qui montrent une augmentation des valeurs de déflexion, ainsi qu'avec les mesures des jauges longitudinales, qui indiquent aussi une augmentation des déformations.

Après les 3 millions de chargements, des fissures très fines et assez peu visibles sont apparues sur les planches.

La durée de vie obtenue est très élevée par rapport à celle obtenue avec les essais réalisés en utilisant le MLS. Cela peut être expliqué par les variations de températures très limitées observées dans le hall d'essai avec le FABAC, qui a également un effet favorable. Cet essai est détaillé dans l'Annexe I.

IV.8. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats de campagnes expérimentales visant à évaluer la durée de vie et la résistance à la fissuration d'un matériau de couche de base contenant 40 % d'AE. Les résultats fournissent une référence pour estimer la durée de vie en fatigue d'une couche de base en utilisant l'analyse des déformations et le traitement des bassins de déflexions. Les déformations sont mesurées par des FBG et par des jauges de déformation positionnés au-

dessus et au-dessous de cette couche sous la charge du MLS10. De plus, les données de déformation servent à localiser la position des fissures dans la structure de la chaussée.

En ce qui concerne la performance en fatigue, le matériau contenant 40% d'AE a considérablement survécu dans des conditions thermiques sévères. La fissure transversale détectée est apparue après 800 000 cycles cumulés de charge en raison de la combinaison de la charge thermique et de la charge du trafic. La position exacte de la fissure est estimée à l'aide d'une modélisation simple par éléments finis. Elle est prévue dans une zone de 5 à 8 cm près du FBG S3 ($x = 4.42 \text{ m}$ à 4.45 m). D'après le calcul de l'endommagement, la couche de base a commencé à s'endommager après 700.000 cycles de charge jusqu'à l'endommagement total à 800.000 cycles. Le rétrocalcul basé sur les bassins de déflexions mesurés par le FWD montre que la GBE+ est endommagée à la fin des essais. Cependant, le rétrocalcul standard donne des indications de dommages diffus et est incapable de détecter les dommages localisés.

Le même matériau est soumis à un essai de trafic accéléré réalisé à l'Université Gustave Eiffel à Nantes en utilisant le simulateur FABAC dans un hall avec des températures presque stables. La durée de vie mesurée par cet essai est très élevée en comparant avec celle obtenue par l'essai MLS. Cette différence est certainement due aux grandes variations thermiques durant les essais MLS.

En conclusion, l'analyse des déformations peut être un outil efficace pour évaluer la présence de fissures dans la couche de base et pour prédire sa durée de vie surtout quand la fissure se trouve proche des capteurs. Ces déformations nous ont permis de voir arriver l'endommagement avant d'effectuer les mesures FWD. Cet endommagement est détecté aussi bien avec le FWD qu'avec les déformations après séparation de la température. En comparant les essais MLS et FABAC, on peut conclure que la fatigue n'est pas due juste aux trafics mais aussi à la variation de température. Cette dernière doit être prise en compte quand la durée de vie d'un matériau est étudiée. De plus, le matériau GBE+ contenant 40% d'AE a montré de bonnes performances en termes de durabilité lorsqu'il est soumis à un trafic accéléré et à des conditions de températures sévères.

Conclusion générale et perspectives

Prendre en compte les critères de développement durable s'est concrétisé dans le secteur de la construction routière par un engagement volontaire entre les différents acteurs des infrastructures routières et les représentants des institutions en France. Cet engagement regroupe des axes de progrès qui incitent à la mise en place de mesures de réduction de l'utilisation de matières premières non renouvelables et de mesures d'économie d'énergie visant à réduire l'empreinte carbone des voiries.

Pour répondre à cet engagement, des actions visant à augmenter le pourcentage de recyclage des enrobés bitumineux émergent. Cependant, l'utilisation du recyclage suscite des questions sur la qualité du mélange ainsi produit. La pérennité des infrastructures routières étant fondamentalement dépendante de ces performances, les bénéfices environnementaux de ces pratiques sont annulés par le besoin d'entretien précoce des infrastructures et le besoin de nouvelles constructions.

Dans un souci de performance et de durabilité de ces infrastructures routières, des travaux de recherche sont menés dans le cadre d'une thèse en collaboration entre le laboratoire Génie Civil Diagnostic et Durabilité GC2D de l'université de Limoges et le pôle de développement de la société de construction routière Spie batignolles malet. Cette thèse a pour objectif de comprendre l'influence de l'introduction d'AE à différentes échelles du matériau et d'évaluer l'homogénéité des mélanges bitumineux afin de garantir les performances mécaniques et la durabilité. Dans ce but, celle-ci a été orientée selon trois approches complémentaires (expérimentale échelle laboratoire, numérique et expérimentale échelle chantier) dont les conclusions sont les suivantes.

La première phase de notre travail a porté sur l'axe expérimental en laboratoire. Elle a consisté en une caractérisation du comportement mécanique des mélanges bitumineux à différentes échelles par des essais au laboratoire. Ces essais ont permis d'évaluer l'influence de l'ajout des AE. Les résultats expérimentaux ont servi aussi à alimenter les modèles numériques développés dans la deuxième phase de notre étude et à les valider.

Un matériau innovant GB ϵ +[®] fabriqué par Malet a fait l'objet de notre étude. Des essais de module en cisaillement sont appliqués sur les différentes échelles correspondantes à ce matériau. Les résultats ont été présentés sous forme des plans Cole-Cole pour les différents matériaux.

En comparant les résultats des différentes échelles (bitume, mastic et mortier), l'effet rigidifiant des particules solides est mis en évidence. En effet, plus la concentration en fines augmente, plus le comportement du bitume se rigidifie. En utilisant le DSR, on a constaté que le mortier présente une rigidité supérieure par rapport au mastic elle-même supérieure à celle du bitume sur toute l'étendue de températures. Ceci est probablement expliqué par la présence des fillers qui absorbent les huiles des liants et forment un squelette granulaire constitué de fillers, résines et asphaltènes dans le cas de mastic et en ajoutant le sable dans le cas de mortier.

En comparant les résultats des différents états de matériaux (neufs, vieux et mélanges), l'influence des AE est caractérisée. En effet, l'évolution des propriétés rhéologiques dépend de la température. Le plan Cole-Cole d'un matériau neuf est supérieur à celui d'un matériau vieux (récupéré à partir d'AE) pour la première partie du plan correspondante aux valeurs mesurées à hautes températures (et/ou basses fréquences) alors que pour la deuxième partie du plan, cette tendance change et le matériau vieux devient plus rigide que le matériau neuf à

basses températures (et/ou à hautes fréquences). Cette rigidification est due à l'agglomération des asphaltènes en clusters en raison du vieillissement.

L'influence de l'homogénéité du mélange sur la rigidité des matériaux est évaluée dans notre travail expérimental. Deux mortiers mélanges ont été fabriqués au laboratoire : le premier avec un degré d'homogénéité de 100%, fabriqué en réalisant un mélange manuel au niveau des bitumes neufs et vieux et le deuxième avec un degré inconnu d'homogénéité, fabriqué en réalisant un mélange manuel au niveau des mortiers neufs et vieux. Les deux ont été testés suivant le même protocole expérimental en utilisant le DSR. Les résultats montrent que la rigidité du premier mortier est supérieure à celle du deuxième. Par conséquent, la rigidité augmente avec l'homogénéité du mélange ou avec la remobilisation du constituant vieux dans le mélange.

Cette homogénéité est quantifiée par une prédiction en développant des modèles numériques. **La deuxième phase** de notre travail a porté sur l'axe numérique. Elle a consisté en une évaluation du comportement mécanique des mélanges bitumineux à l'échelle du mortier par des modèles d'éléments finis développés en utilisant Abaqus. Cette approche a permis d'économiser beaucoup de temps et de coûts. Les modèles peuvent être utilisés pour déterminer le module complexe de cisaillement des mélanges bitumineux, réduisant ainsi les tests de laboratoire longs et coûteux. Un autre avantage de la modélisation hétérogène est une image plus complète du comportement des matériaux, permettant une analyse plus réaliste des contraintes et des déformations dans les microstructures.

Une modélisation biphasique hétérogène a été adoptée pour simuler l'essai de module complexe de cisaillement sur des mélanges bitumineux. En ce qui concerne les résultats, cette modélisation était capable de déterminer avec précision le module complexe de cisaillement pour les mélanges bitumineux tel que le mortier. La différence entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux ne dépasse pas 10%.

Cette méthode a permis d'étudier la microstructure du matériau et d'évaluer à une échelle locale l'influence de l'application d'une charge mécanique et la distribution des déformations. En général, on a remarqué que les zones les plus endommagées dans les modèles sont situées entre les inclusions voisines. Dans ces zones, il existe des valeurs de concentration de déformation de l'ordre 4500 μdef .

En complément, des modèles triphasiques et quadriphasiques sont développés pour simuler l'essai de module sur des mélanges bitumineux dans le but de déterminer le degré d'homogénéité entre les différents constituants. Les deux approches ont abouti à des résultats proches. Par conséquent, le modèle triphasique peut être adopté sans passer par la modélisation quadriphasique afin de gagner du temps de calcul. En adoptant ces approches, le pourcentage de mélange entre les composants vieux et neuf d'un mortier mélange est prédit. Cette approche peut être optimisée en prenant en compte le coefficient de diffusion du constituant vieux dans le neuf, et en la validant expérimentalement. Cette méthode semble être un bon outil pour évaluer l'homogénéisation des constituants vieux et neufs au sein d'un matériau mélange vu qu'elle ne nécessite pas de fabriquer l'échelle finale à tester. Elle sert à économiser de ressources et elle est simple à réaliser en comparaison aux essais expérimentaux qui sont compliqués et ne sont pas encore normalisés.

Notre étude a été complétée par des essais en vraie grandeur. **La troisième phase** de notre travail a porté sur l'axe expérimental chantier. Elle a consisté en une caractérisation de la fatigue de la GB&+® en couche de base en utilisant le simulateur de trafics MLS10. Les essais

ont permis d'estimer la durée de vie du matériau. L'analyse des déformations et le traitement des bassins de déflexions ont réussi à aboutir à notre objectif. Les déformations sont mesurées par des fibres Bragg Grating (FBG) et par des jauges de déformation positionnés au-dessus et au-dessous de la couche de base sous la charge de MLS10. De plus, les données de déformation ont servi à localiser la position des fissures dans la structure de la chaussée.

La GBE+® contenant 40% d'AE a relativement survécu dans des conditions thermiques sévères. La fissure transversale détectée est apparue après 800 000 cycles cumulés de charge en raison de la combinaison de la charge thermique et de la charge du trafic. La position exacte de la fissure est estimée à l'aide d'une modélisation simple par éléments finis. D'après le calcul de l'endommagement, la couche de base a commencé à s'endommager après 700 000 cycles de charge jusqu'à l'endommagement total à 800 000 cycles. Le rétro calcul basé sur les bassins de déflexions, mesuré par le FWD, a montré que la GBE+ est endommagée à la fin des essais. Cependant, le rétro calcul standard donne des indications de dommages diffus et est incapable de détecter les dommages localisés.

Le même matériau était soumis à un essai de trafics accéléré réalisé à l'Université Gustave Eiffel à Nantes en utilisant le FABAC dans un hall avec des températures presque stables. La durée de vie mesurée par cet essai était très élevée en comparant avec celle obtenue par l'essai MLS. Cette différence est due aux grandes variations thermiques durant les essais MLS.

D'après cette partie, on a constaté que l'analyse des déformations peut être un outil efficace pour évaluer la présence de fissures dans la couche de base et pour prédire sa durée de vie surtout quand la fissure se trouve proche des capteurs. Ces déformations nous ont permis de voir arriver l'endommagement avant d'effectuer les mesures FWD. Cet endommagement est détecté aussi bien avec le FWD qu'avec les déformations après séparation de la température. En comparant les essais MLS et FABAC, on a pu conclure que la fatigue n'est pas uniquement due au trafic mais aussi à la variation de température. Cette dernière doit être prise en compte quand la durée de vie d'un matériau est étudiée. De plus, le matériau innovant GBE+® contenant 40% d'AE a montré de bonnes performances en termes de durabilité lorsqu'il est soumis à un trafic accéléré et à des conditions de températures sévères.

Au regard des résultats présentés dans ce travail de thèse, l'introduction des AE dans les mélanges bitumineux modifie leurs rigidités soit en les augmentant ou en les diminuant en fonction de la température et de la fréquence. Concernant la durabilité, le recyclage des bétons bitumineux peut être fait sans engager la durabilité mécanique des enrobés recyclés à 40% d'agrégats d'enrobé : un matériau innovant contenant 40% d'AE sans ajout des régénérants a montré une durée de vie relativement élevée d'environ 800 000 cycles quand il est soumis à des conditions de trafics et de températures sévères. La caractérisation de l'influence des AE sur les propriétés des mélanges bitumineux doit prendre en compte le degré d'homogénéité. Dans le but de garantir les performances mécaniques des enrobés recyclés, leurs degrés d'homogénéité peuvent être évalués par la méthode numérique proposée.

Dans la continuité des études, ici présentées, caractérisant les performances mécaniques des enrobés recyclés, il reste encore bien d'autres recherches et développements à mener en perspectives. Voici donc quelques suggestions :

1. Compléter la partie expérimentale en laboratoire par des essais de fatigue en torsion sur les différentes échelles afin d'étudier l'influence des AE sur la durabilité des matériaux.

2. Varier la température et la durée de malaxage des différents matériaux afin d'étudier l'influence des conditions de fabrication sur l'homogénéité du mélange et donc sur la rigidité et la résistance en fatigue.
3. Compléter la partie numérique en affectant des propriétés viscoélastiques aux différents constituants bitumineux des modèles tri et quadri phasiques.
4. Prendre en compte le coefficient de diffusion du constituant vieux dans le neuf dans les modélisations triphasiques et quadri phasiques afin de bien représenter la cinétique du mélange.
5. Valider la prédiction numérique du degré d'homogénéité de mélange en utilisant un essai de détermination de ce pourcentage parmi les essais cités dans la Partie I.
6. Compléter la partie expérimentale en chantier en découpant une plaque d'enrobé à partir du revêtement d'enrobé dans la fosse de pleine profondeur autour de la zone de dommages localisés. Cela facilitera les inspections visuelles de la plaque testée et l'identification des différentes étapes décrites dans la dernière partie de notre étude.
7. Effectuer des essais de modules sur des éprouvettes prélevées de la planche expérimentale dans les zones sollicitées et non sollicitées afin de vérifier l'endommagement.
8. Développer un modèle MEF 3D plus précis, en termes de charge mobile, de vitesse de chargement, de température et de distribution de la pression de contact des pneus afin de simuler la fatigue sur la planche expérimentale.

Références bibliographiques

Rubrique 1

Abaqus 6.13, (2013). "Abaqus theory guide," Abaqus 6.13 Doc.

Abaqus 6.11, (2011). Dassault Syst. Simulia Corp Provid. RI, USA.

Adhikari, S., & You, Z. (2008). 3D microstructural models for asphalt mixtures using X-ray computed tomography images. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1(3), 94. [http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V1N3\(3\).pdf](http://www.ijprt.org.tw/mailweb/files/sample/V1N3(3).pdf)

Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordbeck, A., Leiva-Villacorta, F., & Loría-Salazar, L. G. (Eds.). (2016). *The roles of accelerated pavement testing in pavement sustainability: engineering, environment, and economics*. Springer <https://books.google.fr/books?id=j18WDQAAQBAJ&lpg=PR5&ots=jyUCRm2O1F&lr&hl=fr&pg=PR5#v=onepage&q&f=false>

Alberola, N. D., & Mele, P. (1997). Interface and mechanical coupling effects in model particulate composites. *Polymer Engineering & Science*, 37(10), 1712–1721. <https://doi.org/10.1002/pen.11819>

Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement—a literature review. *FHWA-ICT-07-001*. <http://hdl.handle.net/2142/46007>

Al-Qadi, I. L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S. H., Pine, W. J., & Trepanier, J. (2012). Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures. <http://hdl.handle.net/2142/45810>

Ambassa, Z., Allou, F., Petit, C., Eko, R. (2012). Analyse de la sensibilité du modèle de fatigue multilinéaire pour la prédiction de la durée de vie des chaussées bitumineuses sous chargement multi-essieux. In XXX^e Rencontres AUGC-IBPSA. (Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012), 10 p. <https://docplayer.fr/12479024-Universite-de-limoges-boulevard-jacques-derche-19300-egletons-france.html>

Anderson, D. A., Christensen, D. W., & Bahia, H. (1991). Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 60, 437–532.

Arraigada, M., Pugliessi, A., Partl, M. N., & Martinez, F. (2014). Effect of full-size and down-scaled accelerated traffic loading on pavement behavior. *Materials and structures*, 47(8), 1409–1424. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0319-2>

Arraigada, M., Perrotta, F., Raab, C., Tebaldi, G., & Partl, M. N. (2016). Use of APT for validating the efficiency of reinforcement grids in asphalt pavements. In *The roles of accelerated pavement testing in pavement sustainability* (pp. 509–521). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42797-3_33

Arraigada, M., Piemontese, F., Hugener, M., & Partl, M. N. (2018). Field validation of high content recycled asphalt concrete mixtures with accelerated pavement testing (pp. 1–7). *Presented at the ISAP conference 2018. International Society for Asphalt Pavement (ISAP)*. <https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa%3A17318>

Artières, O., Bacchi, M., Bianchini, P., Horny, P., Dortland, G., (2012). Strain Measurement in Pavements with a Fibre Optics Sensor Enabled Geotextile, in: Scarpas, A., Kringos, N., Al-

Qadi, I., A., L. (Eds.), *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 201–210. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_20

Barco Carrión, A. J. D., Lo Presti, D., & Airey, G. D. (2015). Binder design of high RAP content hot and warm asphalt mixture wearing courses. *Road materials and pavement design*, 460-474. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2015.1029707>

Beghin, A. (2003). Etude de la rupture des bitumes à basse température : influences des facteurs de composition et de la rhéologie des liants. Thèse : Université Paris VI.

Benaboud, S., Takarli, M., Pouteau, B., Allou, F., Dubois, F., Hornych, P., & Nguyen, M. L. (2021). Fatigue damage monitoring and analysis of aged asphalt concrete using acoustic emission technique. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S592-S603. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1912813>

Benaboud, S. (2022). Evaluation du vieillissement et de l'endommagement des matériaux bitumineux par modélisation hétérogène et mesures acoustiques (Doctoral dissertation, Université de Limoges).

Berraha, Y., Perraton, D., Doré, G., Vaillancourt, M., & Bilodeau, J. P. (2020). Laboratory investigation of cracked asphalt pavement structure using accelerated loading system. In *Accelerated Pavement Testing to Transport Infrastructure Innovation* (pp. 51-60). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_6

Blanc, J., Hornych, P., Sotoodeh-Nia, Z., Williams, C., Porot, L., Pouget, S., ... & Chailleux, E. (2019). Full-scale validation of bio-recycled asphalt mixtures for road pavements. *Journal of cleaner production*, 227, 1068-1078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.273>

Bodin, D., Terrier, J. P., Perroteau, C., Hornych, P., & Marsac, P. (2010). Effect of temperature on fatigue performances of asphalt mixes. In *11th International conference on asphalt pavements* (Vol. 1). https://www.researchgate.net/publication/262297819_Effect_of_temperature_on_fatigue_performances_of_asphalt_mixes

Bressi, S., Pittet, M., Dumont, A. G., & Partl, M. N. (2016). A framework for characterizing RAP clustering in asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 106, 564-574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.132>

Budiansky, B. (1965). On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13(4), 223–227. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(65\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(65)90011-6)

Buttlar, W. G., & Roque, R. (1996). Evaluation of empirical and theoretical models to determine asphalt mixture stiffnesses at low temperatures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 65, 99–141.

Buttlar, W. G., Bouzkurt, D., Al-khateeb, G., & Waldhoff, A. S. (1999). Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1681(1), 157–169. <https://doi.org/10.3141/1681-19>

Burmister, D. M. (1963). *Layered System Design as Applied to Concrete Pavements*.

Cdsimpson site, (2015). "Delaunay Triangulation." <https://www.cdsimpson.net/2015/02/delaunay-triangulation.html>.

Chabot, A., Chupin, O., Deloffre, L., & Duhamel, D. (2010). Viscoroute 2.0 A: Tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 11(2), 227-250. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274>

Chailleux, E. (2013). Note d'utilisation de l'application logicielle visco-analyse.

Chen, J. S., & Peng, C. H. (1998). Analyses of tensile failure properties of asphalt-mineral filler mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(4), 256–262. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:4\(256\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:4(256))

Chen, M., Javilla, B., Hong, W., Pan, C., Riara, M., Mo, L., & Guo, M. (2019). Rheological and interaction analysis of asphalt binder, mastic and mortar. *Materials*, 12(1), 128. <https://doi.org/10.3390/ma12010128>

Chen, A., Airey, G. D., Thom, N., Li, Y., & Wan, L. (2022). Simulation of micro-crack initiation and propagation under repeated load in asphalt concrete using zero-thickness cohesive elements. *Construction and Building Materials*, 342, 127934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127934>

Christensen, R. M., & Lo, K. H. (1979). Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 27(4), 315–330. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(79\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(79)90032-2)

Christensen, R. M., & Lo, K. H. (1986). Erratum. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 34(6), 639. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(86\)90037-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(86)90037-2)

Christensen, D. W., & Anderson, D. A. (1992). Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies*, 61, 67–116.

Colwill, D. (2001). "Recyclage des chaussées souples existantes." AIPCR, (08.07.B - 2001), p.40.

Copeland, A. (2011). Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (No. FHWA-HRT-11-021). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40918>

Claudy, P. et al. (1991) Characterization of paving asphalts by differential scanning calorimetry, *Fuel Science and Technology International*, 9(1), pp.71-92. Doi: 10.1080/08843759108942254

Cussler, E. L. (1997). *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems*. Cambridge University Press. DOI:10.1017/CBO9780511805134

DAPT Webinar (2022). Resource Responsible Use of High RAP (up to 50%) Asphalt Mixtures. U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Dai, Q. (2011). Two-and three-dimensional micromechanical viscoelastic finite element modeling of stone-based materials with X-ray computed tomography images. *Construction and building materials*, 25(2), 1102-1114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.066>

Delaporte, B., Di Benedetto, H., Chaverot, P., & Gauthier, G. (2007). Linear viscoelastic properties of bituminous materials: from binders to mastics (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 76.

Delaporte, B. (2007). Etude de la rhéologie des mastics bitumineux à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement annulaire [Doctoral dissertation]. [https://www.theses.fr/fr/?q = Etude + de + la + rh%C3%A9ologie + des + mastics + bitumeux + %C3%A0 + l%27aide + d%27un + rh%C3%A9om%C3%A8tre + %C3%A0 + cisaillement + annulaire](https://www.theses.fr/fr/?q=Etude+de+la+rh%C3%A9ologie+des+mastics+bitumeux+%C3%A0+l%27aide+d%27un+rh%C3%A9om%C3%A8tre+%C3%A0+cisaillement+annulaire)

Delorme, J. L., De La Roche, C., & Wendling, L. (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. <https://www.academia.edu/download/56216959/ManuelLPC.pdf>

Di Benedetto, H., Partl, M. N., Francken, L., & De La Roche Saint André, C. (2001). Stiffness testing for bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 34(2), 66-70

Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C., & Delaporte, B. (2004). Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 5(Special Issue), 163–202. <https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689992>

Di Benedetto, H., & Corté, J. (2005). Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermo-mécaniques des mélanges bitumineux, vol. 2, Edit. Hermès Lavoisier, Paris, França.

Di Benedetto, H., Sauzéat, C., & Sohm, J. (2009). Stiffness of bituminous mixtures using ultrasonic wave propagation. *Road Materials and Pavement Design*, 10(4), 789-814. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690227>

Dony, A., Pouget, S., Nicolai, A., Faucon-Dumont, S., Poirier, J.E., Sauzéat, C., Decamps, J.A, Baudoin, S. (2019). Multi recyclage des enrobés : Application à la méthode de formulation des enrobés. *Revue RGRA N°968*. <https://www.editions-rgra.com/revue/968/recherche-et-innovation/multirecyclage-des-enrobes>

Dupont, J. (2002). Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton (Doctoral dissertation, Ecole des Ponts ParisTech).

El Mansouri, S. (2016). Mise au point du rhéomètre à cisaillement annulaire pour l'étude de rhéologie d'un mastic bitumineux avec verre incorporé (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure). <http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1634/>

El Sawda, C., Fakhari-Tehrani, F., Absi, J., Allou, F., & Petit, C. (2019). Multiscale heterogeneous numerical simulation of asphalt mixture. *Material Design & Processing Communications*, 1(3), e42. <https://doi.org/10.1002/mdp2.42>

El Sawda, C. (2022). Modélisation Hétérogène de la fatigue des bétons bitumineux (Doctoral dissertation, Université de Limoges).

Eurobitume. <https://www.eurobitume.eu/fr/bitume/production/melange/>

Faure M. (1998). Cours de route, Tome 2.Ed. ENTPE ALEAS,255p.

Fadil, H., Jelagin, D., & Partl, M. N. (2021). Predicting the master curves of bituminous mastics with micromechanical modelling. *Road Materials and Pavement Design*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2011383>

Fakhari Tehrani, F., Absi, J., Allou, F., & Petit, C. (2013). Heterogeneous numerical modeling of asphalt concrete through use of a biphasic approach: Porous matrix/inclusions. *Computational Materials Science*, 69, 186–196. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.11.041>

Fakhari-tehrani, F. (2013). Modélisation numérique hétérogène des composites bitumineux: évaluation des caractéristiques mécaniques par une approche multi-échelle (Doctoral dissertation, Université de Limoges).

Fakhari Tehrani, F., Absi, J., Allou, F., & Petit, C. (2016). Micromechanical modelling of bituminous materials' complex modulus at different length scales. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8), 685-696. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199879>

FHWA-HRT-11-021. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of The Practice.

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11021/002.cfm#:~:text=Less%20than%20half%20of%20State,and%20surface%20layers%20of%20pavements.>

Forton, A., Mangiafico, S., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., & Marc, P. (2021). Behaviour of binder blends: experimental results and modelling from LVE properties of pure binder, RAP binder and rejuvenator. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S197-S213. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1905699>

Gaspar, M. S., Vasconcelos, K. L., Lopes, M. M., & Bernucci, L. L. (2020). Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. *Transportes*, 28(2), 87-99. DOI:10.14295/transportes.v28i2.2133

Goodrich, J. L. (1988). Asphalt and polymer modified asphalt properties related to the performance of asphalt concrete mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 57, 116–175.

Hammoum, F., Chailleux, E., Nguyen, H. N., Ehlacher, A., Piau, J. M., & Bodin, D. (2009). Experimental and numerical analysis of crack initiation and growth in thin film of bitumen. *Road materials and pavement design*, 10(1), 39-61. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690181>

Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., & Shrestha, R. (2009). Laboratory evaluation of mixes containing recycled asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 495-517. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690211>

Hajikarimi, P., Fakhari Tehrani, F., Moghadas Nejad, F., Absi, J., Rahi, M., Khodaii, A., & Petit, C. (2019). Mechanical behavior of polymer-modified bituminous mastics. I: Experimental approach. *Journal of materials in civil engineering*, 31(1), 04018337. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002548

Homsy, F., Bodin, D., Chabot, A., & Hornych, P. (2017, August). Effect of temperature on asphalt pavement strain responses: APT data and thermo-viscoelastic pavement modelling. In *AAPA International Flexible Pavements Conference, 17th, 2017, Melbourne, Victoria, Australia*.

https://www.researchgate.net/publication/320280583_Effect_of_temperature_on_asphalt_pavement_strain_responses_APT_data_and_thermoviscoelastic_pavement_modelling

Huet, C. (1963). Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés [Study of the viscoelastic behavior of bituminous mixes by method of impedance]. Faculte des Sciences de Paris, Paris (in French).

IDRRIM (2021). Recyclage des agrégats d'enrobés dans les mélanges bitumineux à chaud - État de l'art et recommandations - Juillet 2021. Bron : Cerema, 2021. Collection: Références. ISBN: 978-2-37180-528-6

- Johnson, C., & Bahia, H. U. (2010). Evaluation of an accelerated procedure for fatigue characterization of asphalt binders. Submitted for publication in *Road Materials and Pavement Design*. https://uwmarc.wisc.edu/files/linearamplitudesweep/RMPD10_LAS_CMJ_HB-100321.pdf
- Karlsson, R., & Isacsson, U. (2002). Bitumen rejuvenator diffusion as influenced by ageing. *Road Materials and Pavement Design*, 3(2), 167-182. <https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689920>
- Karlsson, R., & Isacsson, U. (2006). Material-related aspects of asphalt recycling—state-of-the-art. *Journal of materials in civil Engineering*, 18(1), 81-92. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:1\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81))
- Kavussi, A., & Hicks, R. G. (1997). Properties of bituminous mixtures containing different fillers. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 66, 153–186. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1171-6>
- Kennedy, T. W., Tam, W. O., & Solaimanian, M. (1998). Optimizing use of reclaimed asphalt pavement with the Superpave system. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 67. <http://worldcat.org/issn/02702932>
- Kerner, E. H. (1956). The elastic and thermo-elastic properties of composite media. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 69(8), 808–813. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/69/8/305>
- Koti, J. (2022). Valorisation des coques de noix de palmiste dans la construction des routes à faible trafic (Doctoral dissertation, Limoges).
- Ktari, R. (2016). Mécanismes et modélisations de dégradation et décollement des interfaces de couches de chaussées. Génie civil. Université de Limoges, 2016. Français. NNT: 2016LIMO0090. tel-01417551. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01417551>
- Ktari, R., Saint-Laurent, D., Hornych, P., Hammoum, F., Marsac, P. (2020) Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. *International Journal of Pavement Engineering, Taylor & Francis (Routledge)* 27 p. DOI: 10.1080/10298436.2020.1806276
- Kowalski, K. J., McDaniel, R. S., & Olek, J. (2016). Reclaimed asphalt pavement limits to meet surface frictional requirements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015069. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001323
- Lahjiri, F. (2020). Etude de l'impact physico-chimique des liants dits "régénérants" sur la constructibilité (performance et durabilité) des enrobés recyclés (Doctoral dissertation, Université Montpellier). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03370124>
- Lamontagne, J., Dumas, P., Mouillet, V., & Kister, J. (2001). Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens. *Fuel*, 80(4), 483-488. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00121-6)
- Lamothe, S. (2014). Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques (Doctoral dissertation, École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE]). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01498929/>
- Laveissiere, D. (2002). Modélisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routières par endommagement et macro-fissuration—de l'expérimentation à l'outil de

dimensionnement pour l'estimation de la durée de vie (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Faculté des sciences-Université de LIMOGES).

LCPC (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide Technique, LCPC-SETRA.

LCPC (1998). Méthode d'essai n°52. Catalogue des dégradations de surface des chaussées. https://www.ifsttar.fr/fileadmin/user_upload/editions/lcpc/MethodeDEssai/MethodeDEssai-LCPC-ME52.pdf

Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and interface science*, 145(1-2), 42-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>

Liao, M. C., Airey, G., & Chen, J. S. (2013). Mechanical Properties of Filler-Asphalt Mastics. *International Journal of Pavement Research & Technology*, 6(5). DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(5).576

Little, D. N., & Petersen, J. C. (2005). Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and chemical interactions revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 207–218. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(207))

Liu, P., Lu, G., Yang, X., Jin, C., Leischner, S., & Oeser, M. (2021). Influence of different fillers on mechanical properties of porous asphalt mixtures using microstructural finite-element analysis. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(2), 04021004. <https://orcid.org/0000-0001-5983-7305>

McDaniel, R. S., & Anderson, R. M. (2001). Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual. National Research Council (US). Transportation Research Board. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/15417>

Mangiafico, S., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Olard, F., Pouget, S., & Planque, L. (2013). Influence of reclaimed asphalt pavement content on complex modulus of asphalt binder blends and corresponding mixes: experimental results and modelling. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup1), 132-148. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774751>

Mangiafico, S. (2014). Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. (Doctoral dissertation, ENTPE, Lyon).

Mangiafico, S., Sauzéat, C., & Di Benedetto, H. (2019). Comparison of different blending combinations of virgin and RAP-extracted binder: Rheological simulations and statistical analysis. *Construction and Building Materials*, 197, 454-463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.217>

Mannan, U. A., Islam, M. R., & Tarefder, R. A. (2015). Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies. *International Journal of Fatigue*, 78, 72-80. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.04.004

Manyo, E. Y. Modélisation avancée du contact pneu-chaussée pour l'étude des dégradations des chaussées en surface. Génie civil. Université de Limoges, 2019. Français. NNT: 2019LIMO0034. tel-02297090. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02297090>

- McDaniel, R. S., & Anderson, R. M. (2001). Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual. National Research Council (US). Transportation Research Board. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/15417>
- Meyer, M., Flood, M., Keller, J., Lennon, J., McVoy, G., Dorney, C., Leonard, K., Hyman, R., Smith, J., National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, (2014). *Strategic Issues Facing Transportation, Volume 2: Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report*. Transportation Research Board, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/22473>
- Micaelo, R., Guerra, A., Quaresma, L., & Cidade, M. T. (2017). Study of the effect of filler on the fatigue behaviour of bitumen-filler mastics under DSR testing. *Construction and Building Materials*, 155, 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.066>
- Mogawer, W., Austerman, A., Mohammad, L., & Kutay, M. E. (2013). Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(sup2), 129-147. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.812846>
- Moon, K. H., Falchetto, A. C., Wang, D., Riccardi, C., & Wistuba, M. P. (2017). Mechanical performance of asphalt mortar containing hydrated lime and EAFSS at low and high temperatures. *Materials*, 10(7), 743. <https://doi.org/10.3390/ma10070743>
- Mouillet, V., Lamontagne, J., Durrieu, F., Planche, J. P., & Lapalu, L. (2008). Infrared microscopy investigation of oxidation and phase evolution in bitumen modified with polymers. *Fuel*, 87(7), 1270-1280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.029>
- Mukhopadhyay, A. K., Neekhra, S., & Zollinger, D. G. (2004). PRELIMINARY CHARACTERIZATION OF AGGREGATE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION AND GRADATION FOR. <http://tti.tamu.edu/documents/0-1700-5.pdf>
- Navaro, J. (2011). Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques (Doctoral dissertation, Arts et Métiers-ParisTech). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00613960>
- Nicholls, J. C., Schoen, E., van Vliet, D., Mookhoek, S., Meinen, N., Visscher, J. D., ... & Schulze, C. (2019). Development of a Ravelling Test for Asphalt. In *Bituminous Mixtures and Pavements VII* (pp. 144-152). CRC Press. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02875468v2>
- Nguyen, V. H. (2009). Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures (Doctoral dissertation, University of Nottingham). http://eprints.nottingham.ac.uk/10863/1/PhD_thesis_-_Viet_Hung_Nguyen.pdf
- Olard, F. (2003). Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé (Doctoral dissertation, INSA de Lyon). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006050/>
- Olard, F., & Di Benedetto, H. (2003). General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviours of bituminous binders and mixes. *Road materials and pavement design*, 4(2), 185-224. <https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946>
- Olard, F., DI BENEDETTO, H., & ECKMANN, B. (2004). Rhéologie des bitumes : Prédiction des résultats des tests de fluage BBR à partir des résultats de module complexe. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, (252-253).

Otto, F., Liu, P., Zhang, Z., Wang, D., & Oeser, M. (2018). Influence of temperature on the cracking behavior of asphalt base courses with structural weaknesses. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 7(3), 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.04.002>

Oubahdou, Y., Reynaud, P., Petit, C., Millien, A., Dopeux, J., Metrope, M., Picoux, B., Gerbaud, C., & Tautou, R. (2020). Full Scale Testing with the Mobile Load Simulator: Advanced Measurements Related to Pavement Behavior and Surface Layer Damage (p. 467-475). https://doi.org/10.1007/978-3-030-55236-7_48

Oubahdou, Y. (2022). Etude expérimentale et rationnelle de la dégradation des couches de surface (Doctoral dissertation, Université de Limoges).

Ozer, H., Al-Qadi, I.L., Singhvi, P., Bausano, J., Carvalho, R., Li, X., Gibson, N. (2018). Prediction of pavement fatigue cracking at an accelerated testing section using asphalt mixture performance tests. *International Journal of Pavement Engineering* 19, 264–278. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1347435>

Partl, M. N., Bahia, H. U., Canestrari, F., De la Roche, C., Di Benedetto, H., Piber, H., & Sybilski, D. (Eds.). (2012). Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: state-of-the-art report of the RILEM technical committee 206-ATB (Vol. 9). Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-94-007-5104-0.

Partl, M. N., Raab, C., & Arragada, M. (2015). Innovative asphalt research using accelerated pavement testing. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(3), 1. DOI: 10.6119/JMST-014-0326-1 <https://jmsst.ntou.edu.tw/journal/vol23/iss3/1>

Ragni, D., Takarli, M., Petit, C., Graziani, A., & Canestrari, F. (2019). Use of acoustic techniques to analyse interlayer shear torque fatigue test in asphalt mixtures. *International Journal of Fatigue*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105356>

Read, J., & Whiteoak, D. (2003). The shell bitumen handbook. Thomas Telford. [https://books.google.com.lb/books?id=bA1tlkRjL8kC&lpg=PA1&ots=peScMpBYYT&dq=Read%2C%20J.%2C%20%26%20Whiteoak%2C%20D.%20\(2003\).%20The%20Shell%20bitumen%20handbook%20\(5th%20ed.\).%20London%3A%20Thomas%20Telford%20for%20Shell%20Bitumen&lr&hl=fr&pg=PA173#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.lb/books?id=bA1tlkRjL8kC&lpg=PA1&ots=peScMpBYYT&dq=Read%2C%20J.%2C%20%26%20Whiteoak%2C%20D.%20(2003).%20The%20Shell%20bitumen%20handbook%20(5th%20ed.).%20London%3A%20Thomas%20Telford%20for%20Shell%20Bitumen&lr&hl=fr&pg=PA173#v=onepage&q&f=false)

RGRA (2013). Ifsttar : les 35 ans du manège de fatigue français. N°914-915. <https://www.editions-rgra.com/revue/914-915>

Roberts, F. L., P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Lee, and T. W. Kennedy. (1996). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2 nd Edition, Napa Education Foundation, Lanham, MD, 1996.

Russo, F., Veropalumbo, R., Pontoni, L., Oreto, C., Biancardo, S. A., Viscione, N., ...& Race, M. (2022). Sustainable asphalt mastics made up recycling waste as filler. *Journal of Environmental Management*, 301, 113826. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113826>

Serfass, J. (2008). C5620-Recyclage en centrale des matériaux de chaussée. Techniques de l'Ingénieur. p.13. <https://doi.org/10.51257/a-v1-c5620>

Shashidhar, N., & Shenoy, A. (1999). Comments on the paper titled – understanding asphalt mastic behavior through micromechanics by Buttlar, W. G., Bozkurt, D., Al-Khateeb, G. G., Waldhoff, A. S. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1681(1), 166–168. <https://doi.org/10.3141/1681-22>

- Shashidhar, N., & Shenoy, A. (2002). On using micromechanical models to describe dynamic mechanical behavior of asphalt mastics. *Mechanics of Materials*, 34(10), 657–669. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(02\)00166-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00166-7)
- Silva, H. M., Oliveira, J. R., & Jesus, C. M. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013>
- Silverstein, X. (1998). *Spectrométrie de composés organiques*. De Boeck Université, p.502.
- Soenen, H., & Teugels, W. (1999). Rheological investigation on binder-filler interactions. Eurobitume Workshop 99 –Performance Related Properties for Bituminous Binders, Paper No. 102.
- Somé, C., Barthélémy, J. F., Mouillet, V., & Hammoum, F. (2020, December). Effect of ageing kinetics on the rheological properties of bituminous binders and mixes: Experimental study and multi-scale modeling. In *RILEM International Symposium on Bituminous Materials* (pp. 575-583). Springer, Cham. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03164988>
- Sow, L. (2018). *Approche couplée expérimentation-modélisation multi-échelle pour la détermination du comportement mécanique des graves routières traitées aux liants: Application à la valorisation des Mâchefers d'Incinération de Déchêts Non Dangereux* (Doctoral dissertation, INSA de Rennes; Université Cheikh Anta Diop (Dakar)). (NNT : 2018ISAR0001). (tel-01797954)
- Speight, J. G. (2016). *Asphalt materials science and technology* (pp. 437-474). Butterworth-Heinemann is. <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.267>
- Tarsi, G., Tataranni, P., Sangiorgi, C. (2020). The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. *Materials* (Basel). 2020 Sep 12;13(18):4052. doi: 10.3390/ma13184052. PMID: 32932617; PMCID: PMC7560297.
- Theocaris, P. S. (1987). *The mesophase concept in composites*. Springer-Verlag.
- Traxler, R. N. (1936). The Physical Chemistry of Asphaltic Bitumen. *Chemical reviews*, 19(2), 119-143. <https://doi.org/10.1021/cr60063a002>
- Tyrion, F. C. (2000). Asphalt oxidation, Asphaltenes and Asphalts, *Development in Petroleum Science*, 40B.
- Underwood, B. S. (2016). A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue. *International Journal of Fatigue*, 82, 387-401. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.08.020>
- USIRF Route de France (2013). *Le bitume : histoire d'un matériau routier*. Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française.
- Vargas-Nordbeck, A., & Timm, D. H. (2012). Structural evaluation and short-term performance of sustainable pavement sections at the NCAT pavement test track. *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing*, 187. <http://dx.doi.org/10.1201/b13000-27>
- Vassaux, S. (2017). *Mouillabilité et miscibilité des bitumes : application au recyclage* (Doctoral dissertation, Université Montpellier). (NNT : 2017MONT008). (tel-01834590v2)

Veropalumbo, R., Russo, F., Viscione, N., Biancardo, S. A., & Oreto, C. (2021). Investigating the rheological properties of hot bituminous mastics made up using plastic waste materials as filler. *Construction and Building Materials*, 270, 121394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121394>

Wang, H., Huang, Z., Li, L., You, Z., & Chen, Y. (2014). Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-Ray CT microstructure images. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(1), 55–61. [https://doi.org/10.1016/S2095-7564\(15\)30089-1](https://doi.org/10.1016/S2095-7564(15)30089-1)

Wen, H., & Zhang, K. (2016). Investigation of blending mechanisms for reclaimed asphalt pavement binder and virgin binder in laboratory-produced reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record*, 2575(1), 187-195. DOI: 10.3141/2575-20

Woldekidan, M. (2011). Response modelling of bitumen, bituminous mastic and mortar [Doctoral dissertation]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:e3f99110-41fe-423d-97e3-eb35ea95b271/datastream/OBJ/download>

Willis, R., Timm, D., West, R., Powell, B., Robbins, M., Taylor, A., ... & Bianchini, A. (2009). Phase III NCAT test track findings. *NCAT report*, 09-08. <https://gop.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep09-08.pdf>

Xinjun, L., Marasteanu, M., Williams, R., et Clyne, T. (2008). "Effect of RAP (Proportion and Type) and Binder Grade on the Properties of Asphalt Mixtures." 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 92-97. <https://doi.org/10.3141/2051-11>

Xu, J., Hao, P., Zhang, D., & Yuan, G. (2018). Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency based on micro-mechanical properties of layered asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 163, 390-401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.030>

Xu, Y., Chou, Z., Li, Y., Ji, J., & Xu, S. F. (2019). Effect of blending degree between virgin and aged binder on pavement performance of recycled asphalt mixture with high RAP content. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5741642>

Zhang, Y., & Leng, Z. (2017). Quantification of bituminous mortar ageing and its application in ravelling evaluation of porous asphalt wearing courses. *Materials & Design*, 119, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.052>

Ziade, E., Fakhari Tehrani, F., Beghin, A., Petit, C., Absi, J., Millien, A., & Reynaud, P. (2021). Experimental and numerical investigation on the rheological behaviour of bituminous composites via DSR testing. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S328-S344. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1912812>

Ziade, E., Petit, C., Millien, A., Beghin, A., Absi, J., Fakhari Tehrani, F., & Reynaud, P. (2023). Full-scale life cycle assessment of asphalt concrete base course containing RAP under different temperature conditions. *Road Materials and Pavement Design*. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2198024>

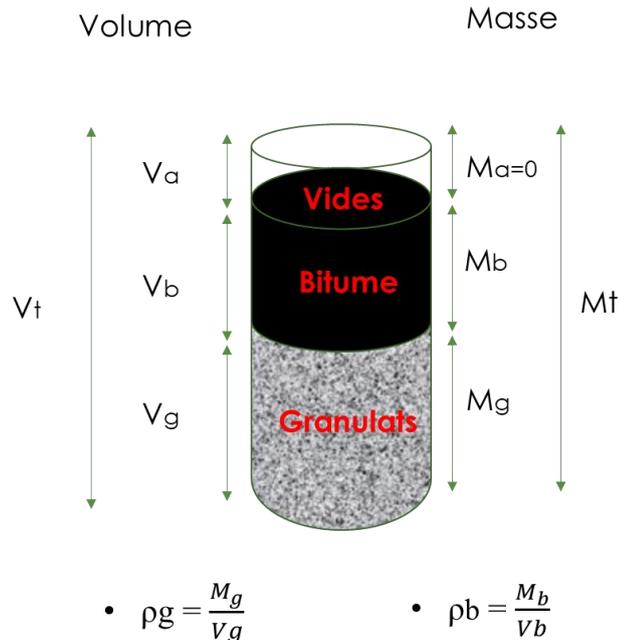
Partie V. Annexes

V.1. Annexe A

Calcul du pourcentage volumétrique

Dans le cas des mélanges bitumineux, il est important de calculer avec précision la concentration volumique compte tenu de la quantité de inclusions introduites dans le mélange. Pour ce faire :

- Les conventions :



Un exemple de calcul du pourcentage volumétrique des inclusions dans le mastic mélange de l'enrobé GB \mathcal{E} + est présenté.

- Teneur en liant : $TL_{ext.} = \frac{M_b}{M_g} = 5\% \Rightarrow M_b = 0.05 M_g$
- $M_g + M_b = 1 \text{ unité} \Rightarrow M_g + 0.05M_g = 1 \Rightarrow M_g = \frac{1}{1.05} = 0.95$
- $M_b = 1 - 0.95 = 0.05$

Donc masse granulats = 0.95 et masse bitume = 0.05

- $d_g = 2.7$ et $d_b = 1.03$ (D'après la fiche technique de la GB \mathcal{E} +))
- $\frac{M_g}{V_g} = 2.7 \Rightarrow V_g = 0.35$
- $\frac{M_b}{V_b} = 1.03 \Rightarrow V_b = 0.05$

Donc volume granulats = 0.35 et volume bitume = 0.05

- Compacité = 96% (D'après la fiche technique de la GB \mathcal{E} +))
- $C_p = 0.96 \Rightarrow V_v = 0.02$

Donc volume vides = 0.02

- % volumique granulats = $\frac{V_g}{V_t} = 84.89$
- % volumique bitume = $\frac{V_b}{V_t} = 11.11$
- % volumique vides = $\frac{V_v}{V_t} = 4$

Pour le mastic mélange, les inclusions sont les fillers de diamètre $d < 0.063$ mm et la matrice est le bitume.

- % massique fillers = 7% (D'après la courbe granulométrie de la GB&+)
- % volumique des fillers = %massique fillers x %volumique granulats = 5.94%

Le mastic ne contient pas toute la quantité de bitume qui existe dans l'enrobé. Pour déterminer la teneur en liant dans cette échelle, la surface spécifique est calculée.

- Teneur en liant : $TL_{ext.} = \alpha K \sqrt[5]{\Sigma}$
- α : coefficient qui dépend des granulats = 2.65/MVRE
- k : coefficient de richesse
- Σ : surface spécifique des granulats (m^2/kg) : $100\Sigma = 0.25 G + 2.35 S + 12 s + 150f$
 G: %massique ($d \geq 6.3$ mm)
 S: % massique ($d 0.25/6.3$ mm)
 s: %massique ($d 0.063/0.25$ mm)
 f: %massique ($d < 0.063$ mm)
- La surface spécifique des fillers $100\Sigma = 150f$
- $\frac{TL_{mastic}}{TL_{enrobé}} = 97.07\%$ donc le mastic contient 97.07% de la quantité totale du bitume dans l'enrobé.
- % volumique bitume (mastic) = % volumique bitume (enrobé) x 97.07% = 10.75%
- % volumique total mastic = % volumique granulats + % volumique bitume = 16.7%
- % volumique des fillers dans le mastic = $\frac{\% \text{ volumique fillers}}{\% \text{ volumique total mastic}} = 35.59\%$
- % volumique du bitume dans le mastic = $\frac{\% \text{ volumique bitume}}{\% \text{ volumique total mastic}} = 64.41\%$

Donc le taux volumique d'inclusions dans le mastic mélange est de 35.59%.

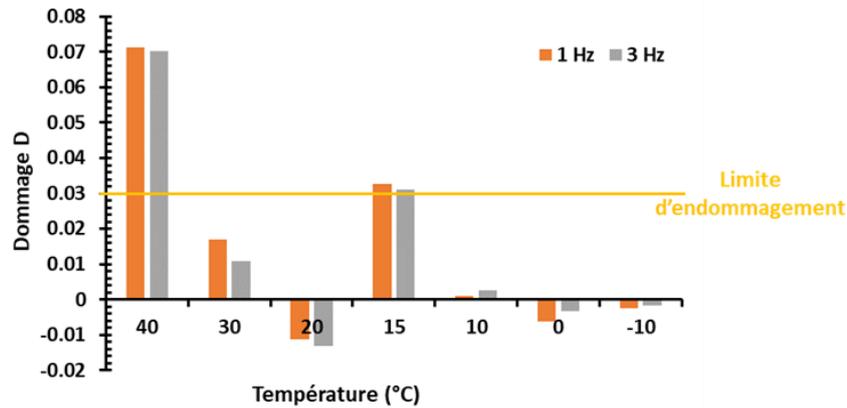
V.2. Annexe B

L'endommagement de l'éprouvette lors de l'essai de module

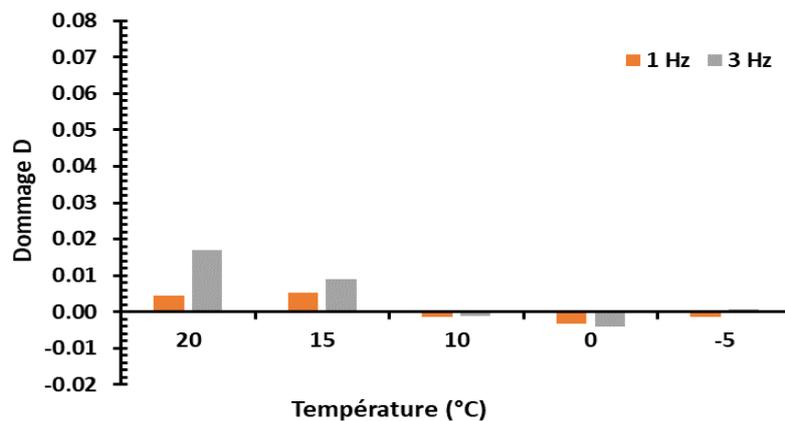
Le dommage apparent correspond à la différence de rigidité avant et après l'essai. Cette différence ne doit pas dépasser 3 %.

❖ Essais de module DSR :

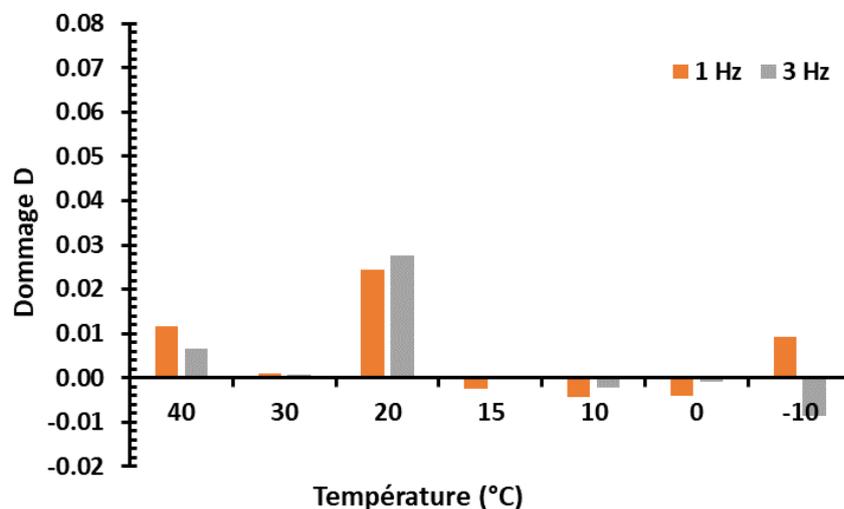
- Bitume neuf



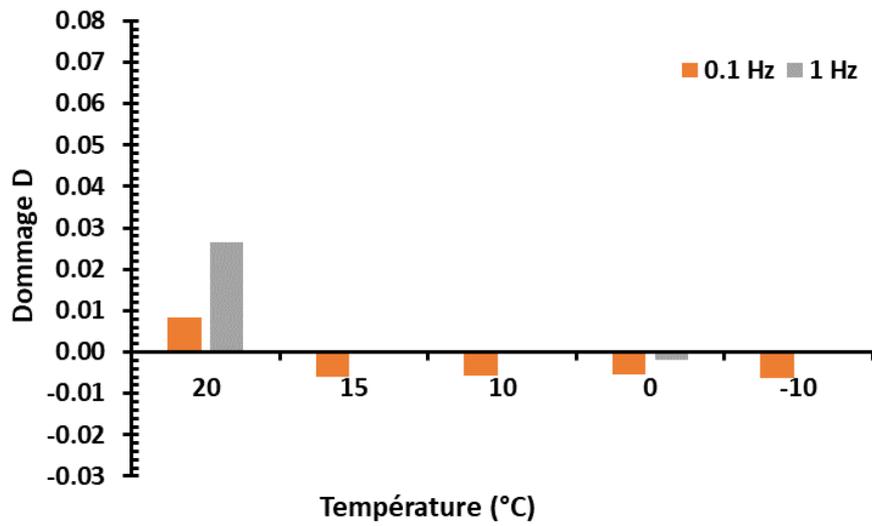
- Bitume vieux



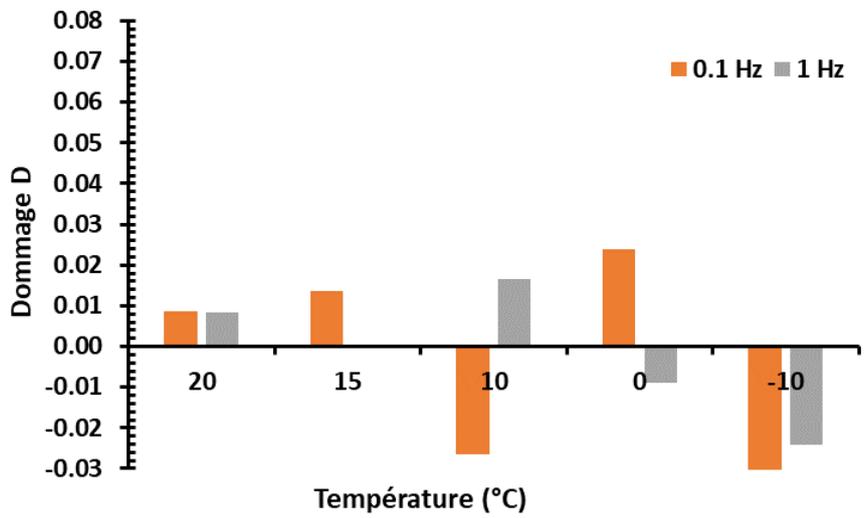
- Bitume mélange



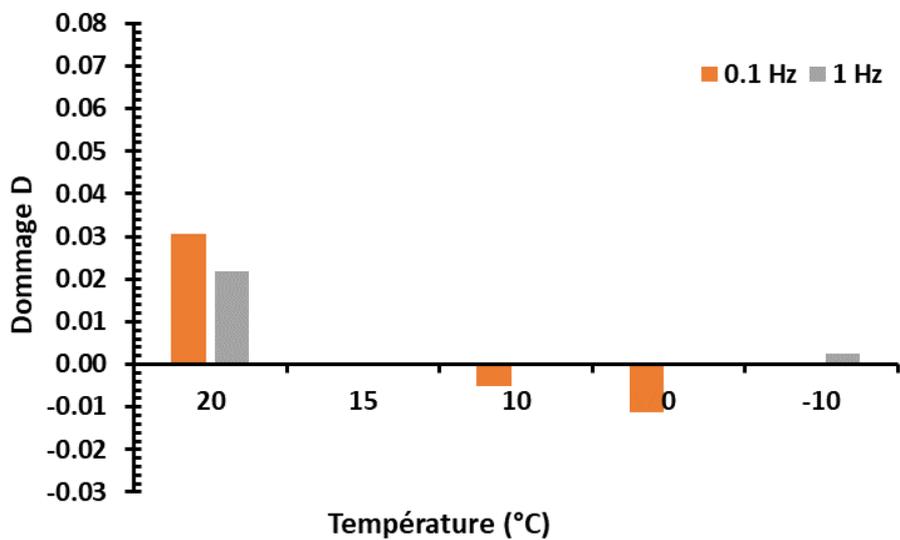
- Mastic neuf



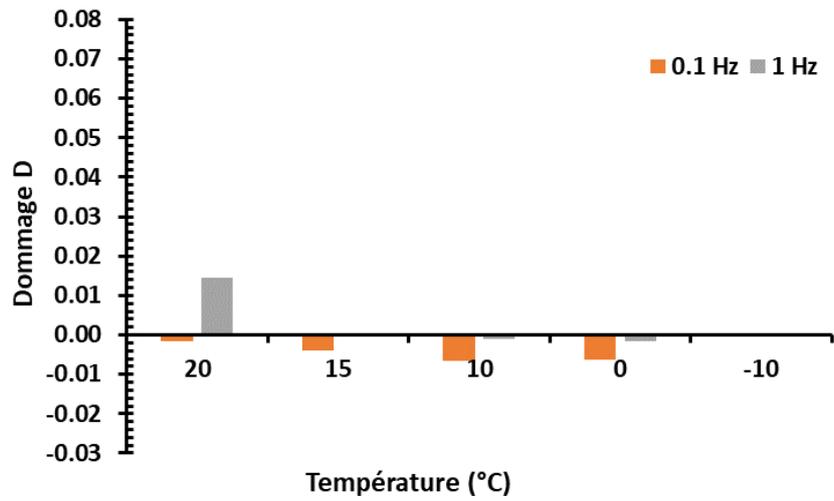
- Mastic vieux



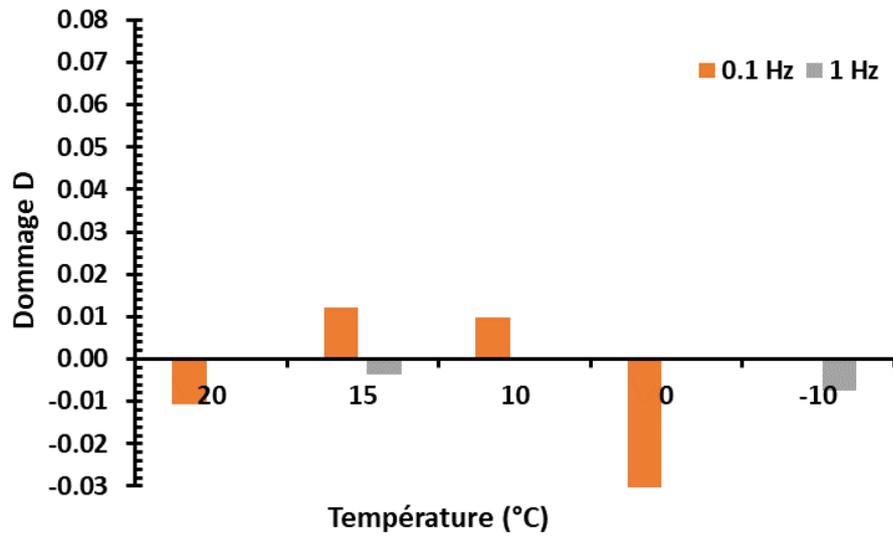
- Mastic mélange



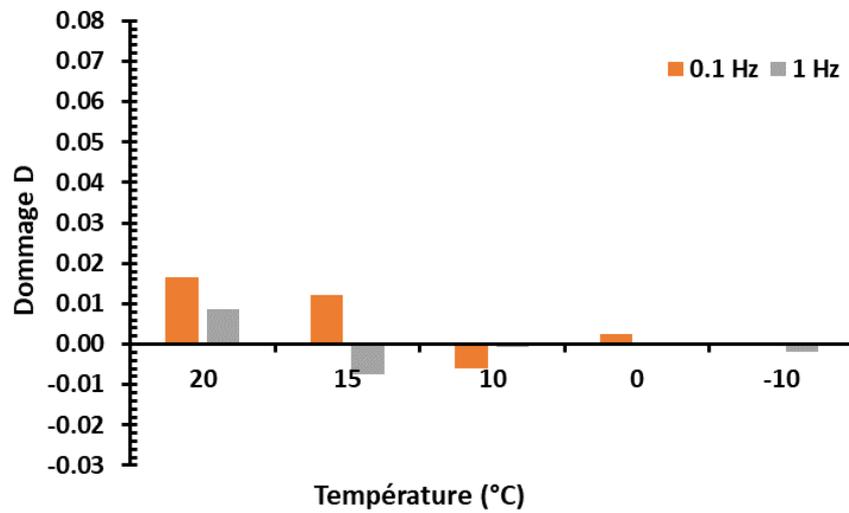
- Mortier neuf



- Mortier vieux



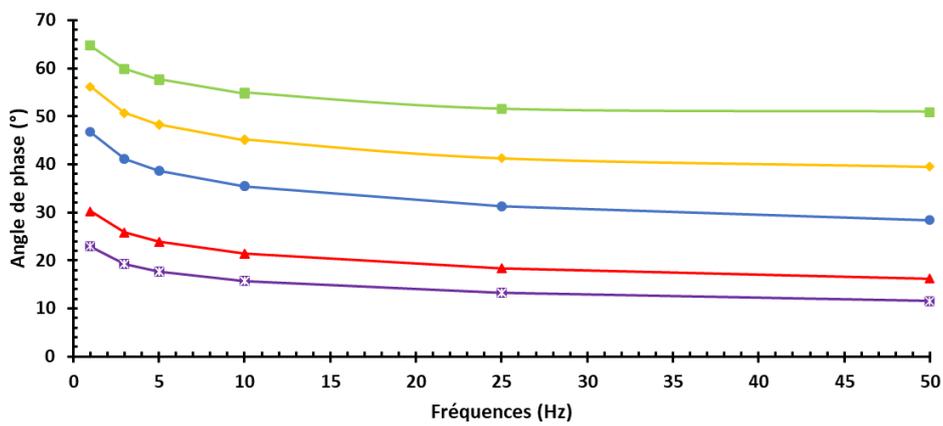
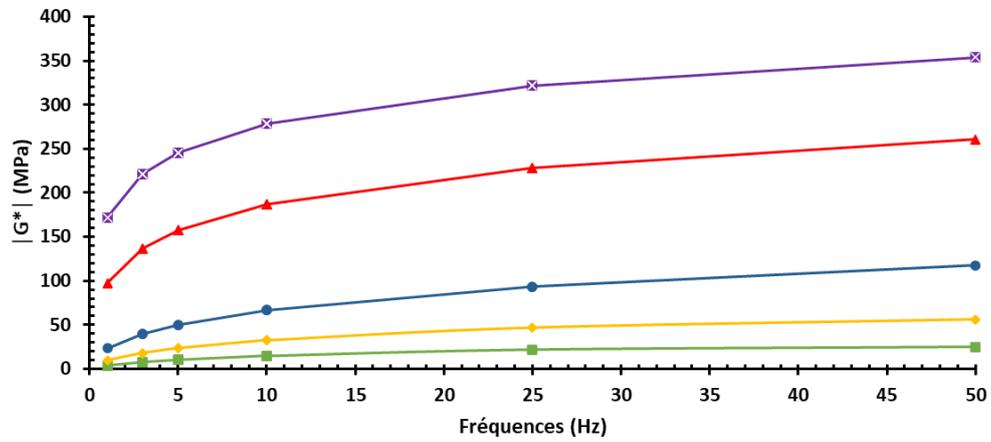
- Mortier mélange (100% homogène)



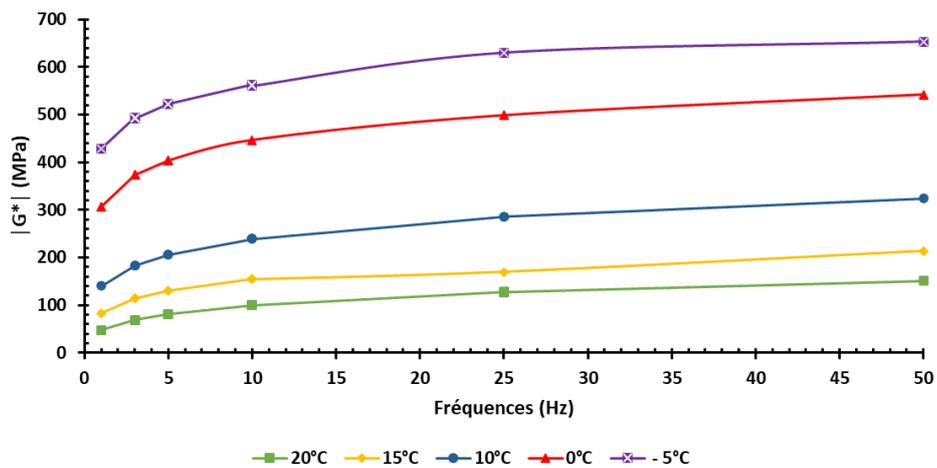
V.3. Annexe C

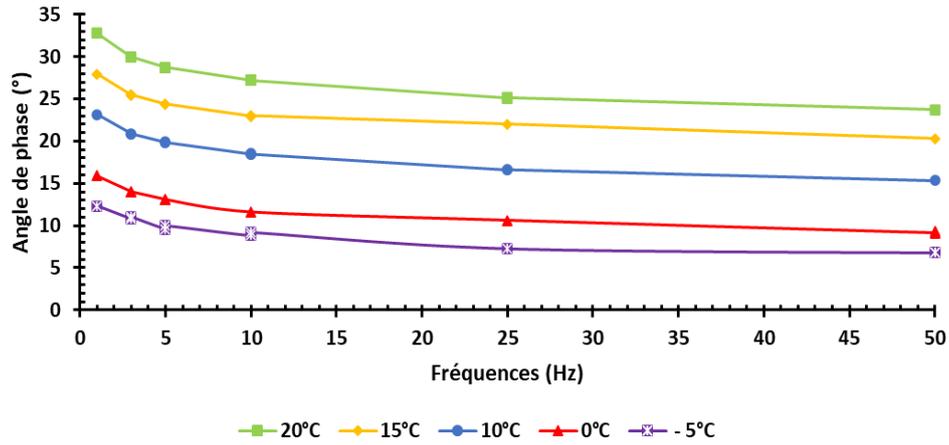
Les isothermes des matériaux testés. Ces isothermes correspondent au module complexe de cisaillement et à l'angle de phase.

- Bitume neuf

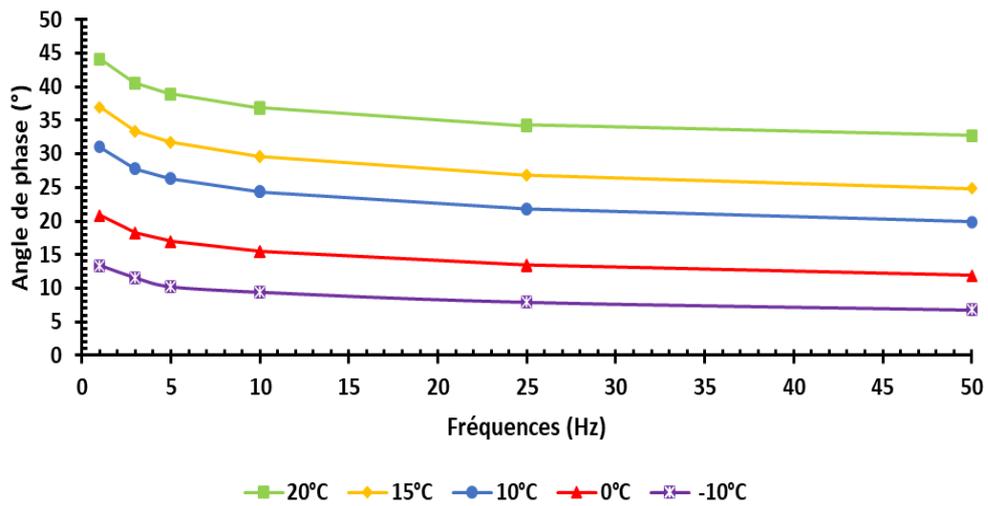
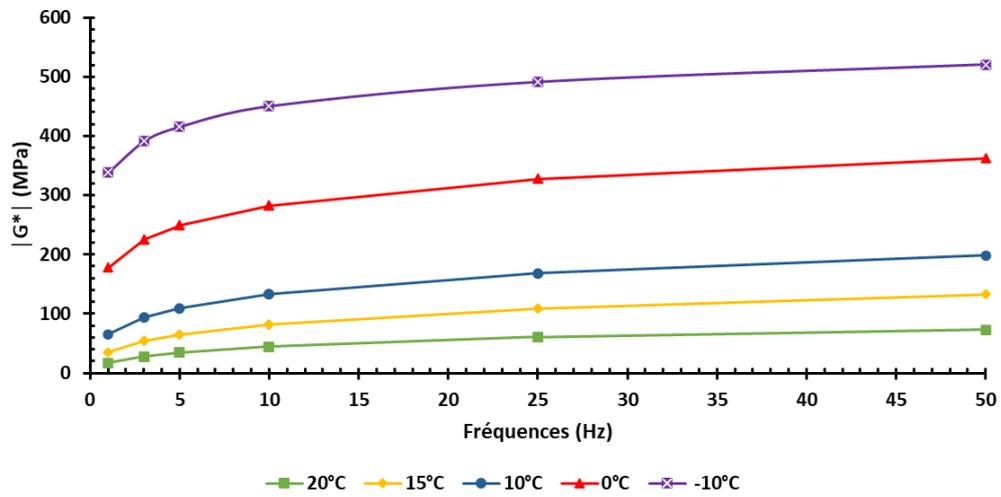


- Bitume vieux

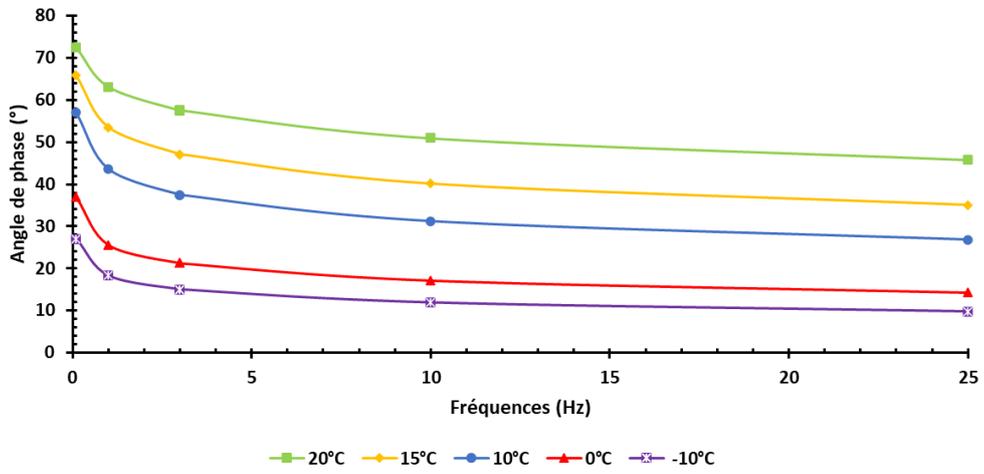
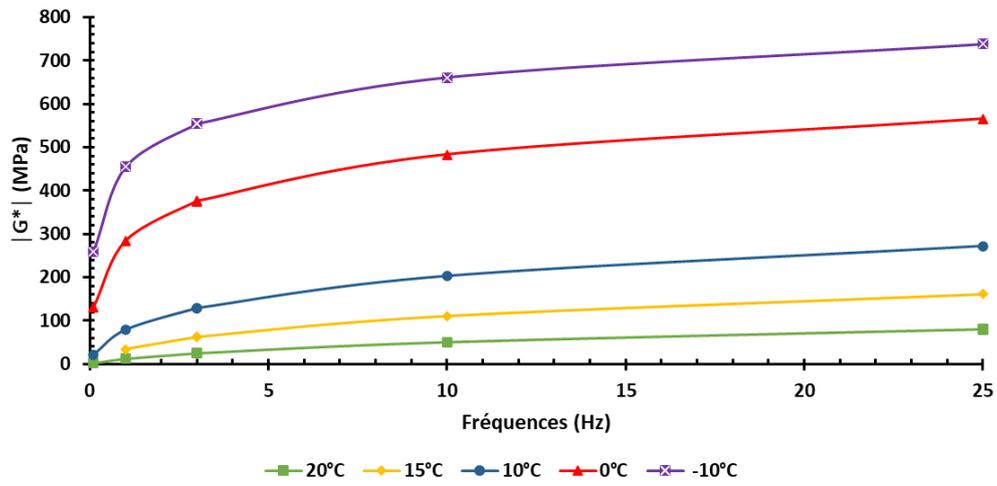




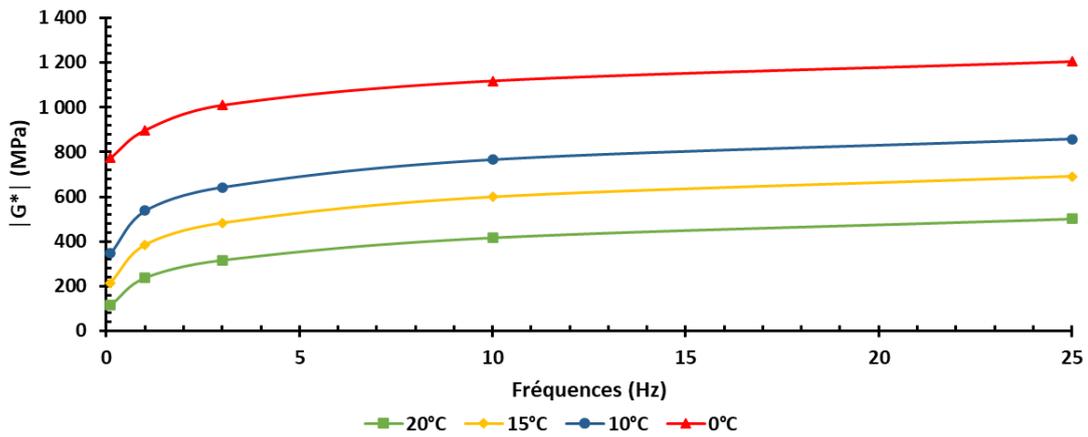
• Bitume mélange

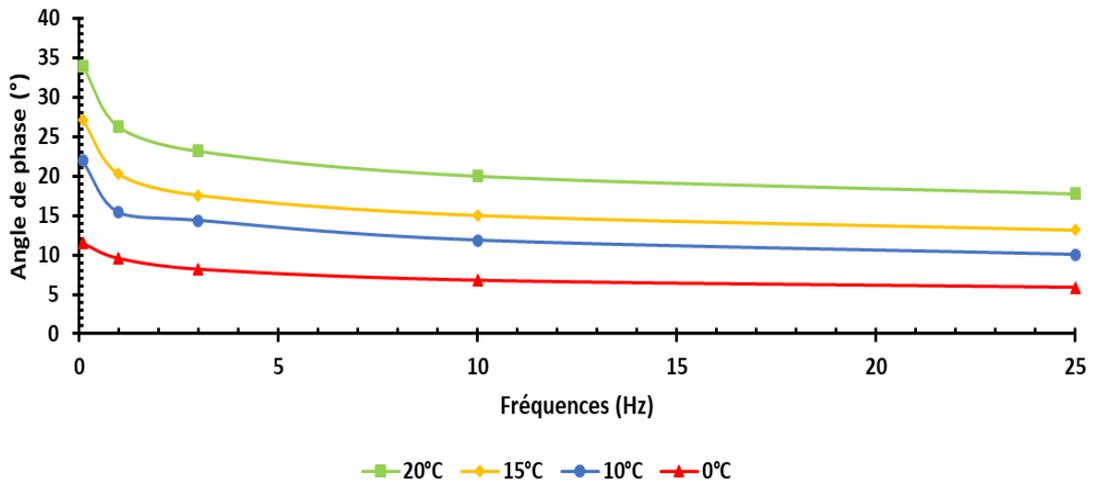


- Mastic neuf

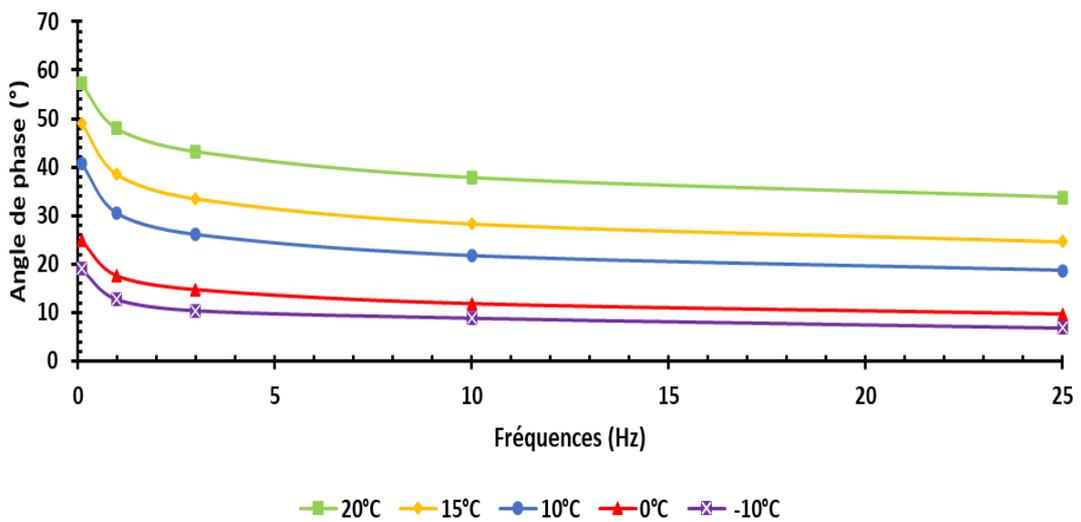
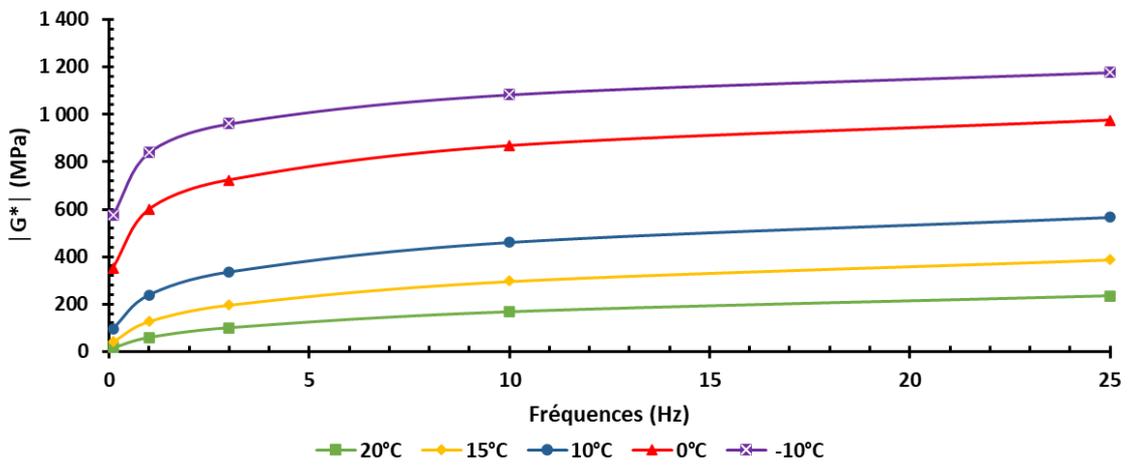


- Mastic vieux

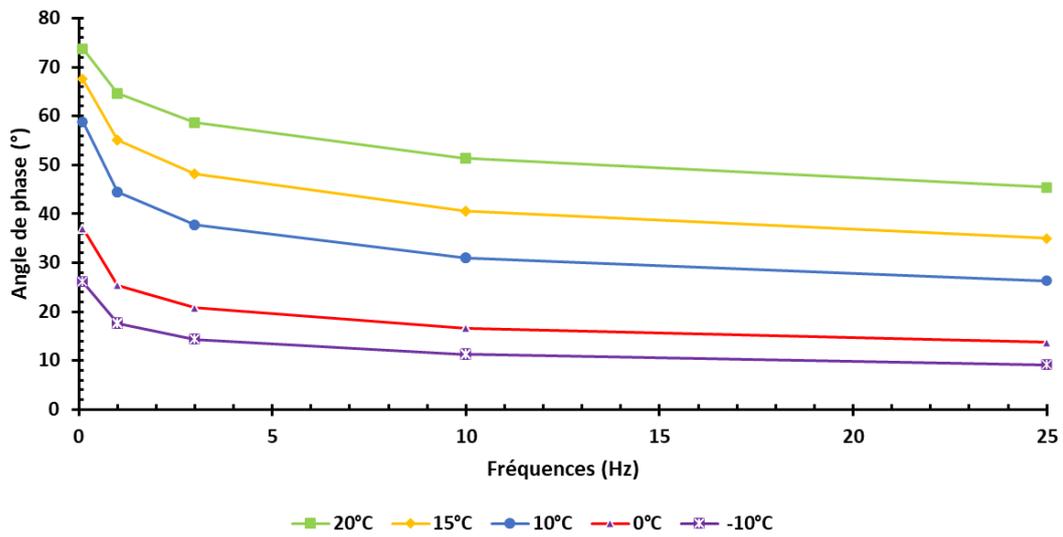
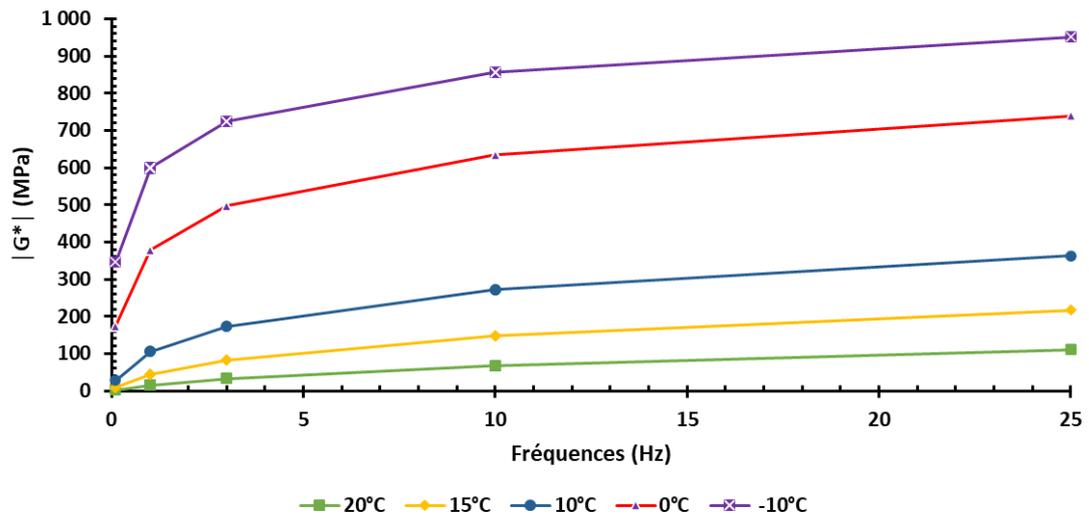




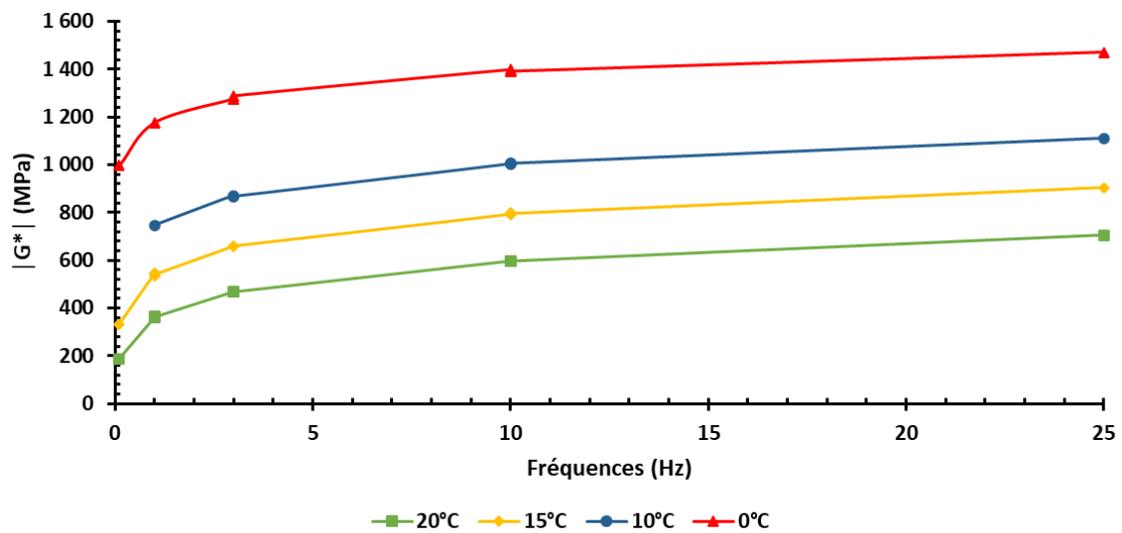
- Mastic mélange

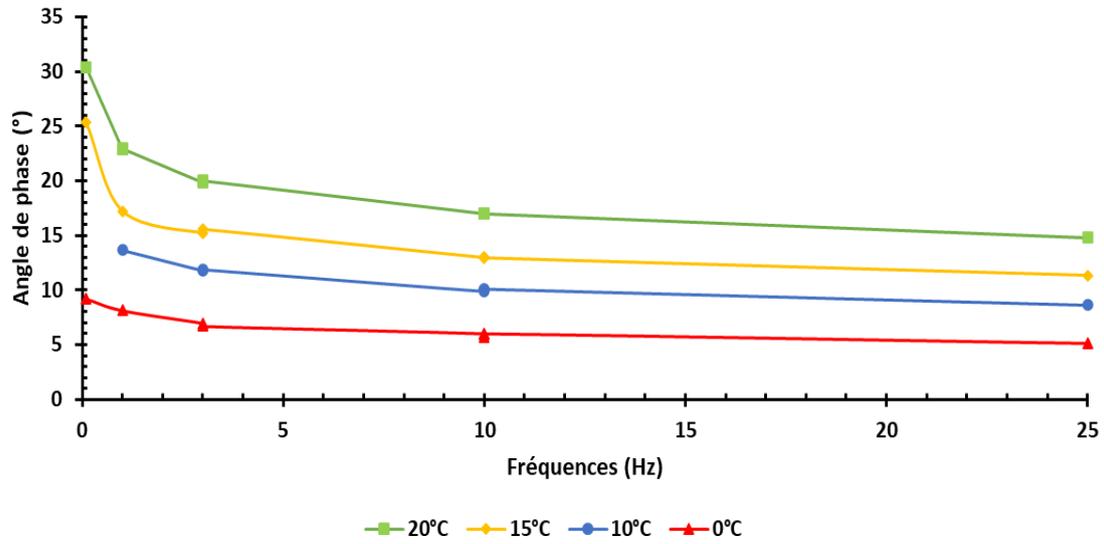


- Mortier neuf

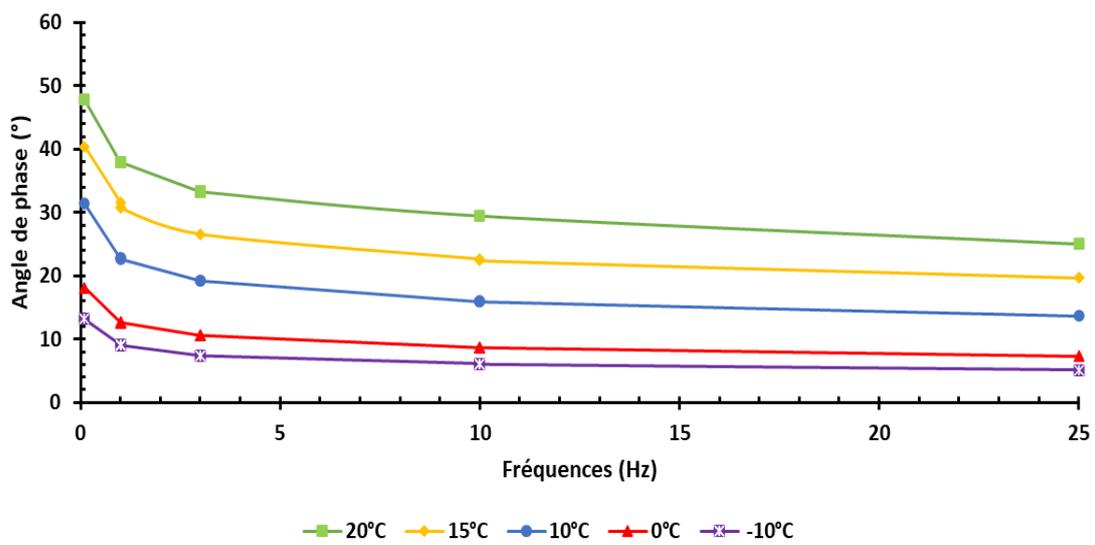
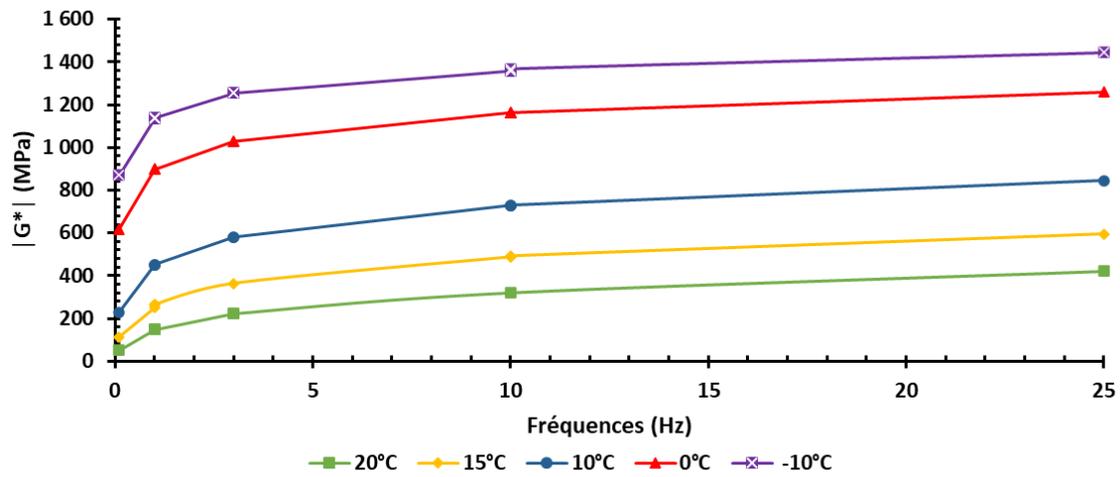


- Mortier vieux

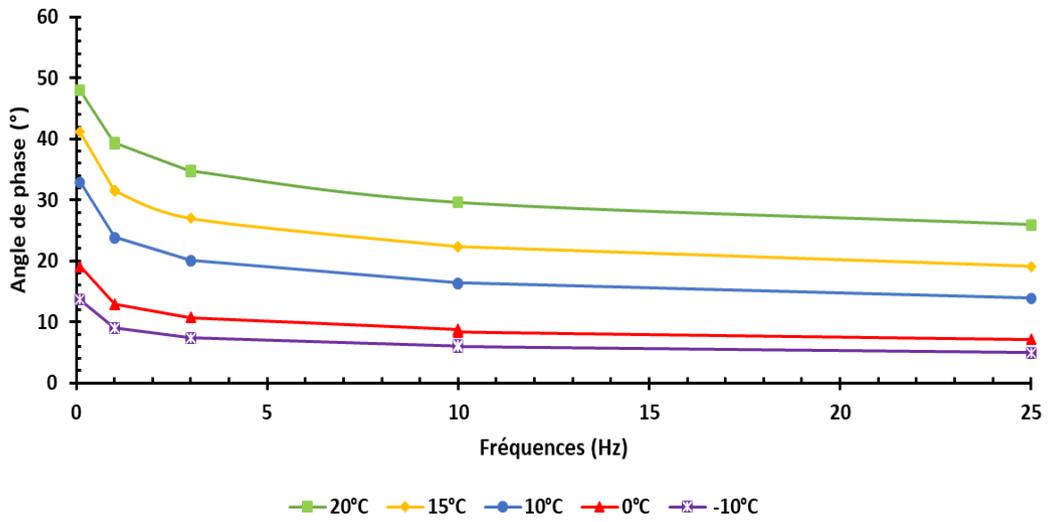
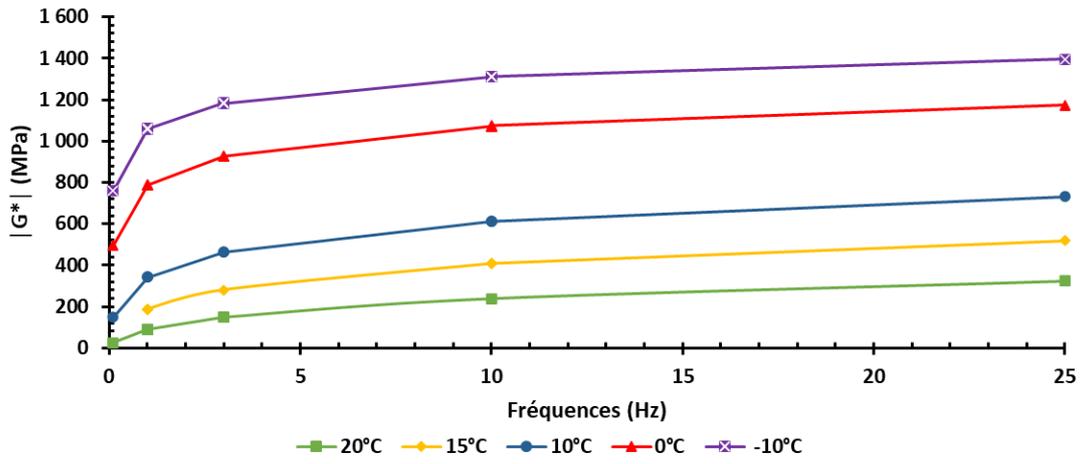




- Mortier mélange (100% homogène)



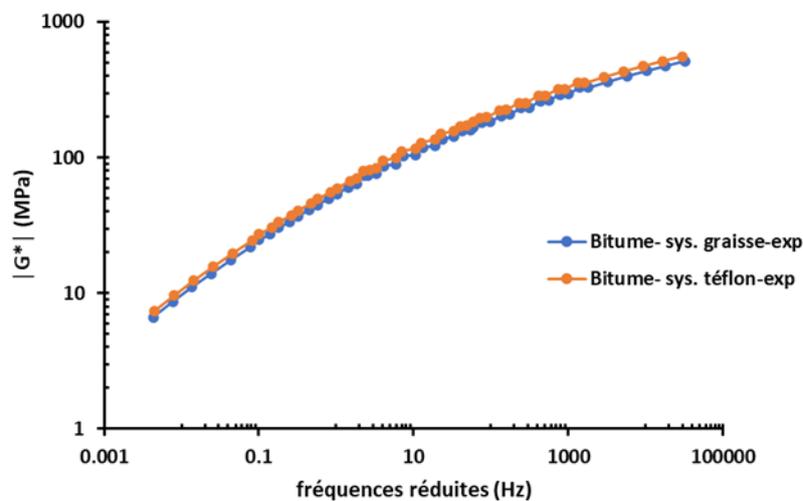
- Mortier mélange (% inconnu d'homogénéité)



V.4. Annexe D

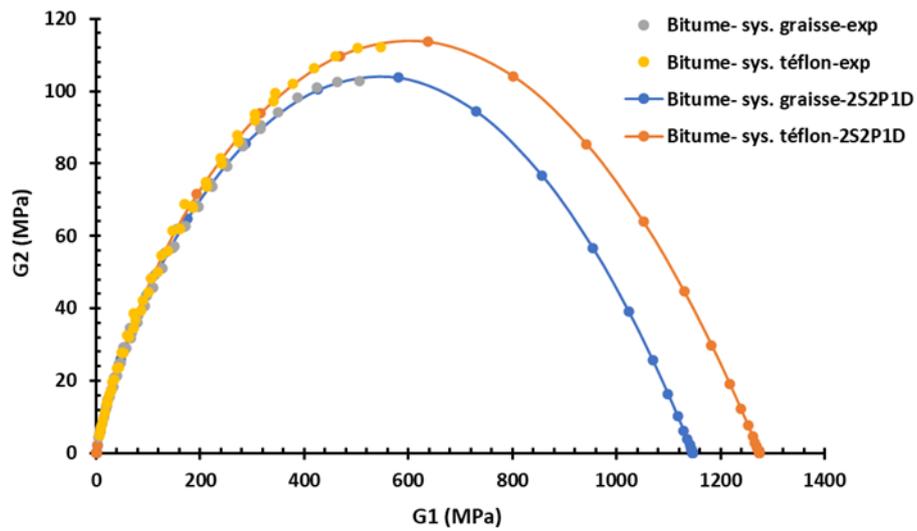
Choix du système d'extraction de bitume des agrégats d'enrobé

Avant de commencer les extractions des matériaux à tester pour ce projet, une vérification est faite concernant les systèmes d'extraction. Un enrobé fabriqué d'un bitume 35/50 est vieilli au laboratoire en utilisant la procédure de vieillissement RILEM (Partl et al., 2012), ensuite, deux extractions de bitume vieux de cet enrobé sont effectuées en utilisant deux systèmes d'extraction différents : un comprenant une vanne en verre et une jointure graissée au niveau du ballon récupérant le bitume et un autre système comprenant une vanne en téflon et un joint fin et jetable en téflon, afin de choisir le meilleur système qui influe peu sur le comportement du bitume extrait. Les modules du bitume récupéré par le système en téflon sont plus élevés que celui extrait par le système avec la vanne en verre et le joint avec de la graisse.



Courbes maitresses de la norme du module complexe du bitume extrait par deux systèmes d'extractions différents

Cependant, cette différence n'est pas très visible avec les représentations des courbes maitresses vu l'échelle logarithmique utilisée. Pour mieux voir l'écart entre le comportement des deux bitumes, leurs plans Cole-Cole expérimentaux et modélisés sont illustrés dans la Figure ci-dessous. On peut observer que le plan Cole-Cole du bitume extrait avec le système en téflon est supérieur de celui extrait avec le système graissé. Un écart de 12% est calculé au niveau du point G_{∞} . Cette différence peut être due à la pollution du bitume par la graisse en utilisant le système graissé ce qui donne des basses valeurs de modules. En plus, une vérification par spectroscopie IRTF doit être faite afin de déterminer la teneur en tétrachloroéthylène résiduel dans les deux bitumes. Dans ce projet, cette teneur n'a pas été vérifiée.

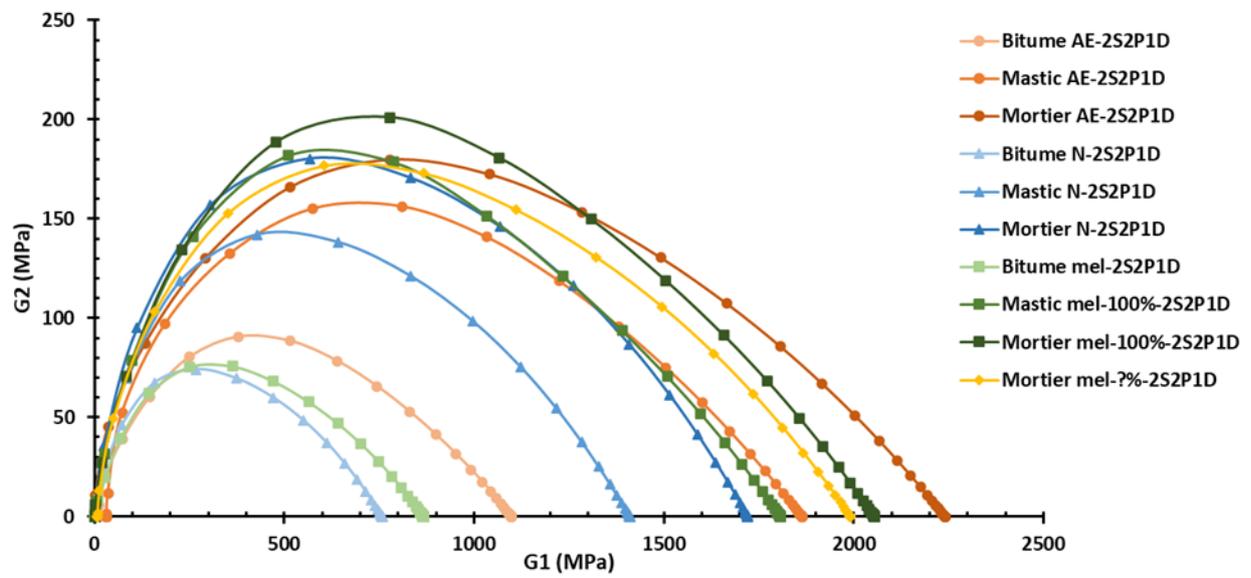


Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés du bitume extrait par deux systèmes d'extractions différents

Pour la suite des essais, le système d'extraction en téflon est adopté pour récupérer le bitume vieux des AE.

V.5. Annexe E

Récapitulatif des plans Cole-Cole obtenus pour les échelles bitume, mastic et mortier testées.



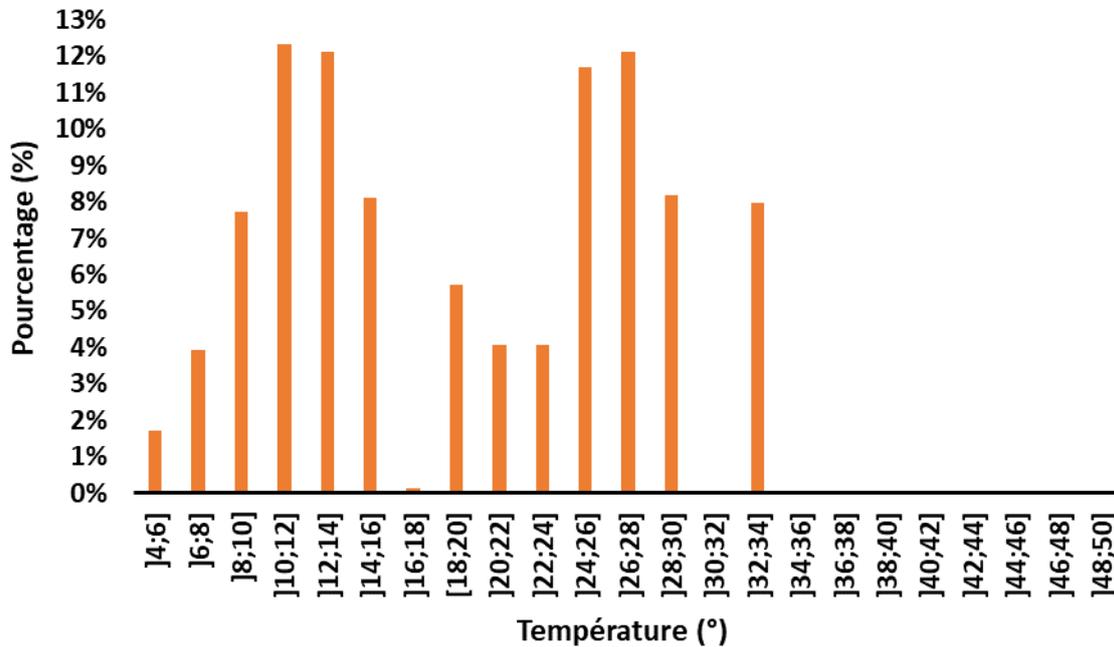
V.6. Annexe F

Les caractéristiques physiques des éprouvettes de GBÉ+ testé en utilisant la presse MTS.

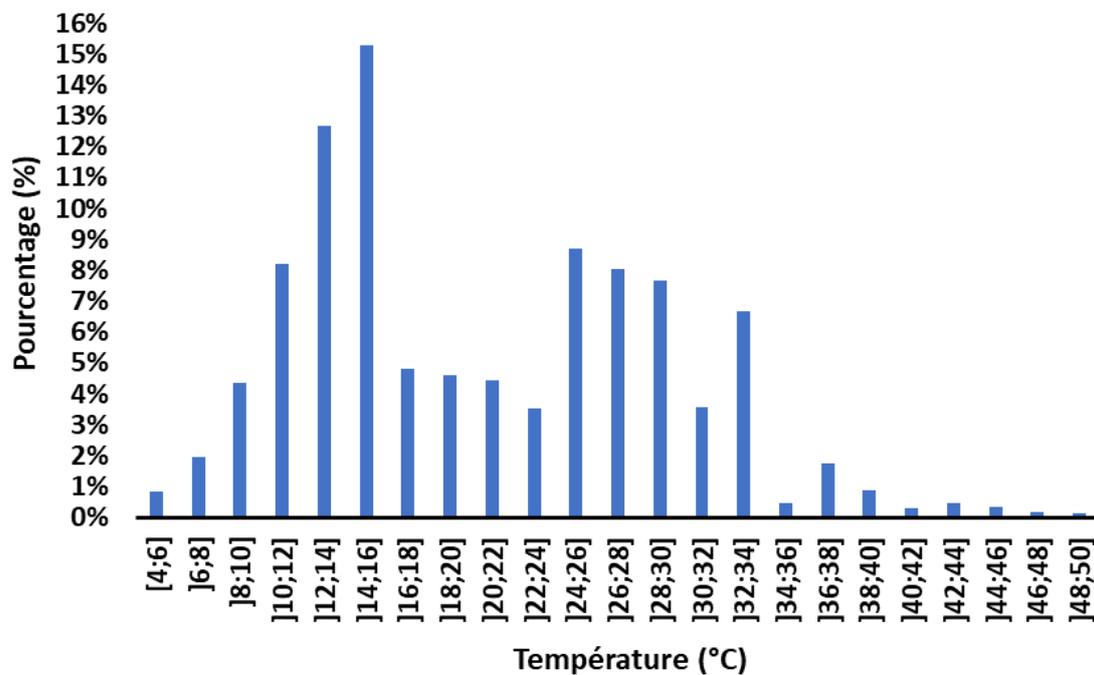
Carotte	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	Volume (mm³)	Compacité (%)	% vides
	H moyenne	D moyenne				
A1	76.96	99.32	1366.67	596211.22	91.95	8.05
A3	76.14	99.38	1350.25	590511.71	91.72	8.28
A4	73.40	99.39	1291.39	569374.54	90.98	9.02
A5	60.67	99.37	1082.32	470477.29	92.28	7.72
B3	80.84	99.35	1422.38	626688.79	91.04	8.96
B4	85.02	99.09	1511.57	655581.68	92.49	7.51
B5	80.08	99.06	1421.48	617115.92	92.40	7.60

V.7. Annexe G

La distribution de la température moyenne de la GBÉ+ (en pourcentage) pendant les phases de chargement de la campagne expérimentale D.



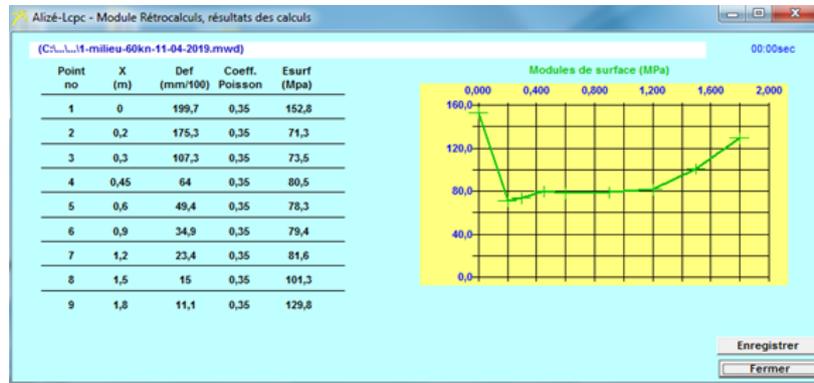
La distribution de la température moyenne de la GBÉ+ (en pourcentage) pendant les phases de chargement de l'essai MLS.



V.8. Annexe H

Module de plateforme

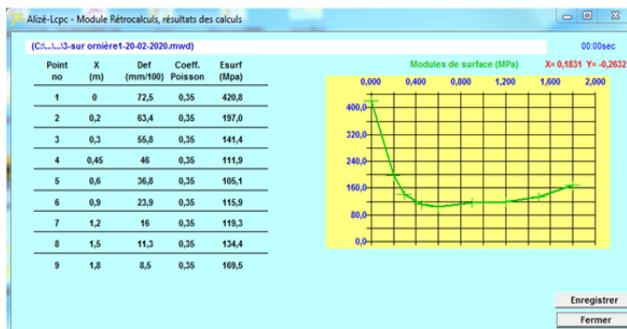
- 11/04/2019



$E_0 = 80 \text{ MPa}$

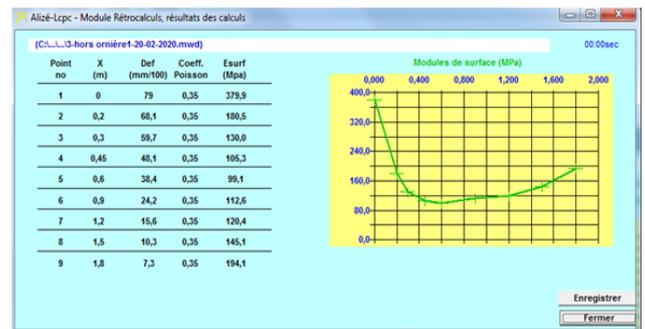
- 20/02/2020

Zone circulée



$E_0 = 120 \text{ MPa}$

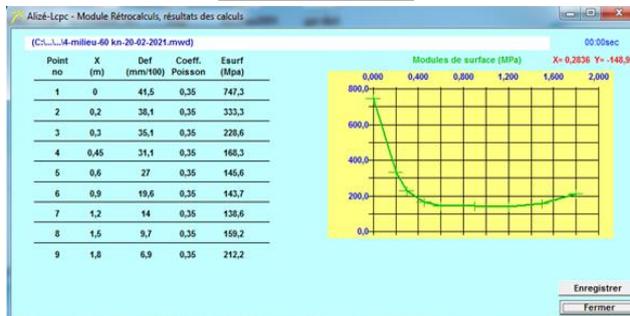
Zone non circulée



$E_0 = 100 \text{ MPa}$

- 20/02/2021

Zone circulée



$E_0 = 150 \text{ MPa}$

Zone non circulée



$E_0 = 100 \text{ MPa}$

V.9. Annexe I

Campagne d'essai en utilisant le simulateur de trafic FABAC à Nantes dans le cadre d'une collaboration entre l'entreprise Malet et l'Université Gustave Eiffel.

A. Contexte et objectifs de l'étude

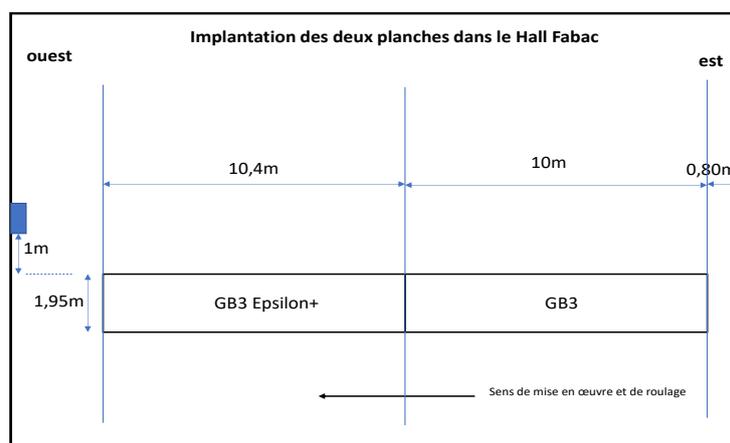
L'objectif de cette étude était de comparer les performances de la GB Epsilon+ avec celles d'une grave bitume de type 3, prise comme référence, et testée dans les mêmes conditions. Pour cela, 2 sections de chaussée, d'une largeur de 1.9 mètres et d'une longueur de 2 mètres, avec la même structure, ont été testées avec les deux machines Fabac dans le hall d'essai de l'Université Gustave Eiffel à Nantes

B. Les planches expérimentales

Les structures de chaussée ont été initialement dimensionnées avec la méthode de dimensionnement française pour supporter un nombre de chargements acceptable dans les conditions de validation par les machines Fabac, soit maximum 1 million de cycles. Les caractéristiques mécaniques déterminées avec une étude de formulation en laboratoire pour la GB Epsilon+, et en utilisant les valeurs minimales fixées par les normes (NF EN 13108-1) pour la GB3 ont été utilisées.

	GB3	GB Epsilon+
Module complexe à 15°C et 10Hz	9 000 MPa	14 346 MPa
Épaisseur	9 cm	
ε Alize	280.3 μdef	213.6 μdef
Fatigue, ε_6	90 μdef	127.5 μdef
Durée de vie théorique (r=50%)	25 366	318 194

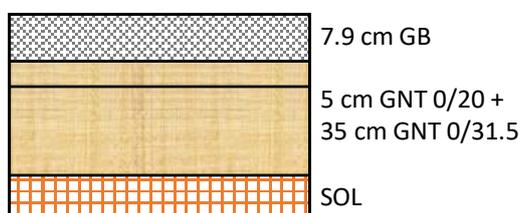
Les deux planches ont été construites à l'intérieur du hall d'essai Fabac. Ceci a permis d'obtenir des conditions optimales lors de la mise en œuvre et de limiter les fluctuations de température pendant la durée de l'essai.



Selon la structure, la couche d'enrobé est constituée de :

- 7.9 cm d'enrobé GB Epsilon+
- 7.9 cm de GB3, considérée comme structure de référence

Chaque structure était constituée d'une couche de GNT 0/31.5 de 35 cm d'épaisseur et d'une couche en GNT 0/20 de 5 cm d'épaisseur. La portance a été mesurée à différentes positions sur chaque structure au moyen d'une dynaplaque. Les valeurs de portance obtenues étaient de 104 MPa (+/-6 MPa) pour la GB3 et de 108 MPa (+/-5 MPa) pour la GB Epsilon+ au sommet de la couche de GNT. Les portances mesurées au sommet des deux planches sont donc quasiment identiques et très homogènes.



C. Déroulement de l'essai

L'essai a été réalisé en deux phases :

- La première phase a été réalisée entre le 27 septembre 2021 et le 18 janvier 2022, pour évaluer la résistance à la fatigue des structures, sous des charges de 65 kN. Après l'application de 2.5 millions de chargements à 65 kN, aucune détérioration de surface n'était visible sur les sections.
- Il a donc été décidé de prolonger l'essai et d'appliquer 500 000 chargements supplémentaires, avec des charges plus importantes (75 kN), équivalents à environ 1 million de chargements à 65 kN.

Les conditions de l'essai sont précisées dans le tableau suivant.

Lors de l'essai de fatigue, la température de surface a varié entre 8.5°C et 20.8°C. La température moyenne était de 14.0°C (+/-2.7°C), et la température moyenne au milieu de la couche était de 14.2°C (+/-2.7°C). Ces températures relativement faibles sont adéquates pour la réalisation d'un essai de fatigue.

	Essai de fatigue	
Période	27 septembre 2021 - 18 janvier 2022	18 janvier 2022 – 1 ^{er} février 2022
Vitesse	3.5 km/h	3.5 km/h
Balayage transversal	0 cm	0 cm
Température de surface Min-Max	8.9°C ; 20.8°C	8.5°C ; 14.0°C
Température moyenne (milieu de la couche)	14.5°C +/- 2.7°C	11.9°C +/- 1.1°C
Chargement (jumelage standard)	65 kN	75 kN
Nombre de chargements	2.5 millions	500 000

L'essai a été réalisé dans le hall d'essai. Les deux planches expérimentales étaient donc protégées de la pluie ainsi que des infiltrations d'eau.

Des mesures des températures ont été réalisées en continu tout au long de l'essai. Quatre capteurs de température ont été installés en surface, au milieu de la couche (4.5 cm de profondeur), à la base de la couche d'enrobé (9 cm de profondeur) et dans la GNT (à 30 cm de profondeur).

Le hall d'essai a permis d'obtenir des températures très stables.

La température de surface a varié entre 8.9°C et 20.8°C durant la première phase et entre 8.5°C et 14.0°C durant la deuxième phase.

La température moyenne, au milieu des couches d'enrobé, était de 14.5°C (+/- 2.7°C) durant la première phase et 11.9°C (+/-1.1°C) pour la deuxième phase.

D. Les machines FABAC

Les machines FABAC (Fatigue du Béton Armé Continu) ont initialement servi à tester le comportement à la fatigue des chaussées en béton armé continu. Elles sont maintenant utilisées pour simuler le trafic poids lourd sur tous types de structures de chaussée. Les machines sont au nombre de deux et sont situées sur une plate-forme dédiée, sur le site de l'Université Gustave Eiffel à Bouguenais (44). Les machines sont présentées dans la figure suivante.



Une machine FABAC est constituée de quatre trains de roulement entraînés par un ensemble chaîne-barbotin-moteur électrique. Les roues peuvent être des roues simples ou des jumelages qui roulent sur la chaussée sur une longueur de deux mètres, elles remontent ensuite dans la partie supérieure de la cage. La charge est appliquée à la chaussée par réaction avec le bâti mobile. Les dimensions de la machine sont de 10 m pour la longueur, 3 m de hauteur et 2,5 m de largeur. Le poids de la machine est de 18 tonnes, la puissance installée est de 20 KW. La vitesse de chargement peut varier entre 0,5 et 5 km/h.

La distance entre les axes des deux jumelages consécutifs est de 2,20 m.

E. Le programme des mesures

Au cours de l'essai, les sections ont fait l'objet d'un suivi plus complet, comprenant :

- Des relevés des mesures des jauges de déformation, placées à la base des couches bitumineuses, réalisés tous les 20 000 cycles.

- Des mesures de température, à la base, au milieu et à la surface de la couche d'enrobé, réalisées en continu, toutes les 10 minutes.
- Des mesures des profils transversaux au début de l'essai, puis à 40k, 100k, 200k, 500k, 840k, 900k, 1 075k, 1 330k, 1 700k, 2 000k, 2 566k et enfin 3 000k cycles
- Des mesures de déflexion à la poutre Benkelman (1 mesure par section) : au début de l'essai, puis à 40k, 100k, 200k, 500k, 840k, 1 075k, 1 300k, 1 700k, 2 000k, 2 462k, 2 492k et enfin 3 000k cycles
- Des mesures de bassins de déflexion au FWD (Falling Weight Deflectometer) : à 40k, 211k, 2 462k et enfin 3 000k cycles
- Des inspections visuelles pour l'évaluation de la fissuration : avant le début de l'essai, puis tous les 100 000 cycles.

Le tableau suivant présente les différents essais qui ont été réalisés lors de l'expérimentation ainsi que leurs fréquences.

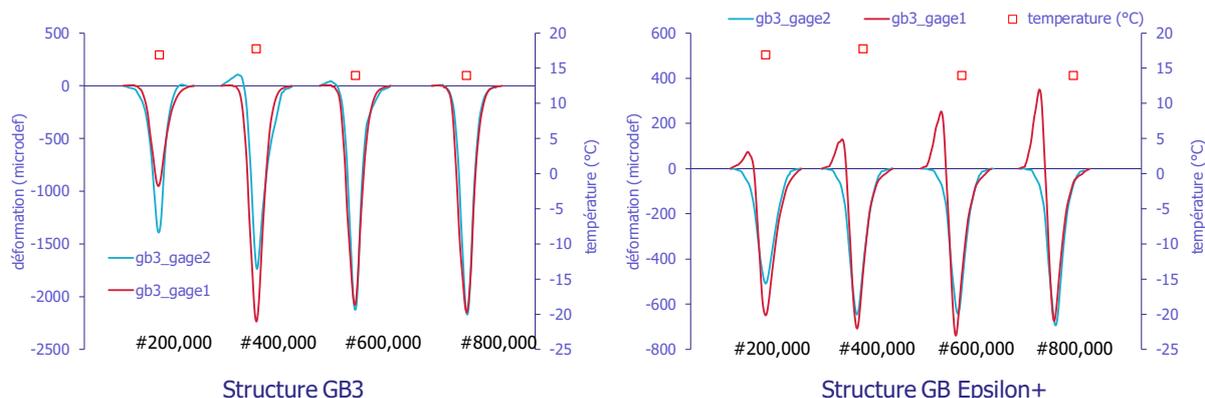
	0	40 000	100 000	200 000	500 000	840 000	900 000	1 075 000	1 300 000	1 330 000	1 700 000	2 000 000	2 462 000	2 492 000	2 566 000	3 000 000
Mesures de T°	Continu															
Mesures des capteurs	Tous les 20 000 cycles jusqu'à rupture															
Benkelman	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x		x
relèves visuels	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3 Profils transversaux	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
FWD		x		x									x			

F. Mesures des jauges de déformations

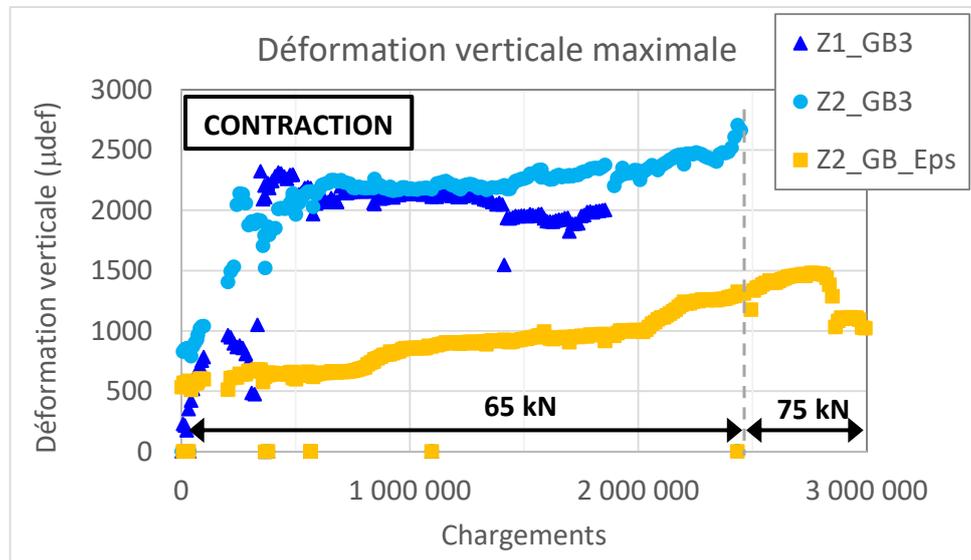
Les deux jauges longitudinales installées à la base de la couche de GB Epsilon+ ont été endommagées durant la construction, suite au très fort compactage. Seules les deux jauges verticales fonctionnent.

Pour les signaux de déformations verticales dans la structure en GB Epsilon+, les valeurs initiales sont d'environ 500 µdef et augmentent jusqu'à environ 800 µdef à 800k chargements.

La figure suivante présente le détail des signaux des déformations verticales mesurées dans les deux structures. Les déformations verticales mesurées dans la structure en GB3 sont bien plus importantes que celles mesurées dans la structure en GB Epsilon+.



La figure suivante présente l'évolution des déformations maximales en contraction pour les deux structures. Les déformations verticales dans la structure en GB Epsilon+ augmentent continuellement durant tout l'essai jusqu'à environ 1500 μdef . Dans la structure en GB3, les déformations verticales augmentent très fortement jusqu'à 500k chargements, puis elles semblent se stabiliser. Elles augmentent à nouveau à partir de 2 millions de chargements.



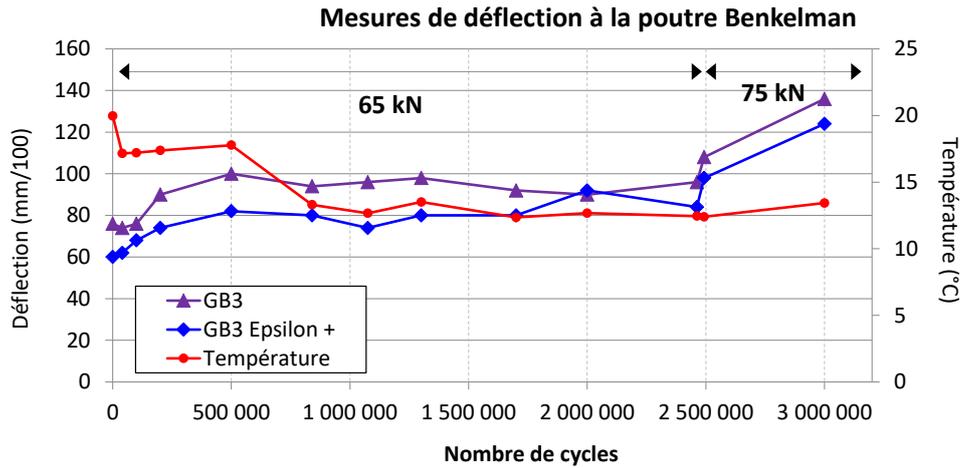
G. Mesures de déflexion réalisées avec la poutre Benkelman

Les déflexions ont également été mesurées avec une poutre Benkelman. La déflexion est mesurée sous un des jumelages d'une machine Fabac (demi-essieu à roues jumelées chargé à 65 kN) circulant à une vitesse d'environ 1 km/h. Il est ainsi possible de mesurer une valeur de déflexion maximale par point de mesure pour chaque structure.

Des mesures à la poutre Benkelman ont été réalisées périodiquement tout au long de l'essai. Les résultats des différentes mesures montrent une différence de déflexion de l'ordre de 20mm/100 entre les deux planches jusqu'au passage de 6.5 tonnes à 7.5 tonnes.

Les mesures initiales (respectivement de 76 mm/100 et 60 mm/100 pour la GB3 et GB Epsilon+) augmentent jusqu'à 500 000 cycles, puis restent stables jusqu'à 2 496 000 cycles (avant le passage de 65 à 75 kN). A partir de ce changement les déflexions augmentent très rapidement pour atteindre en fin d'essai respectivement 136mm/100 pour la GB3 et 126mm/100 pour la GB Epsilon+.

Durant tout l'essai, les déflexions sont toujours légèrement plus importantes sur la planche en GB3 que sur la planche en GB Epsilon+ mais le comportement des deux structures est identique.



H. Relevés visuels

Des Photographies ont été réalisées tout au long de l'essai. L'apparition des fissures a été très difficile à observer.

En effet, les dégradations ont été très peu visibles avant le passage de la charge à 7,5 tonnes. A partir de ce moment nous avons pu observer une rapide détérioration des planches. La Figure a montre la planche en GB3 à la fin de l'essai et la Figure b montre la planche en GB Epsilon+. Les dégradations sont très importantes sur la planche en GB3 (la planche circulée, de longueur 2 mètres, est entièrement fissurée) et de moindre importance sur la planche de GB Epsilon+ (une zone de longueur 50 cm est fissurée).

a)



b)



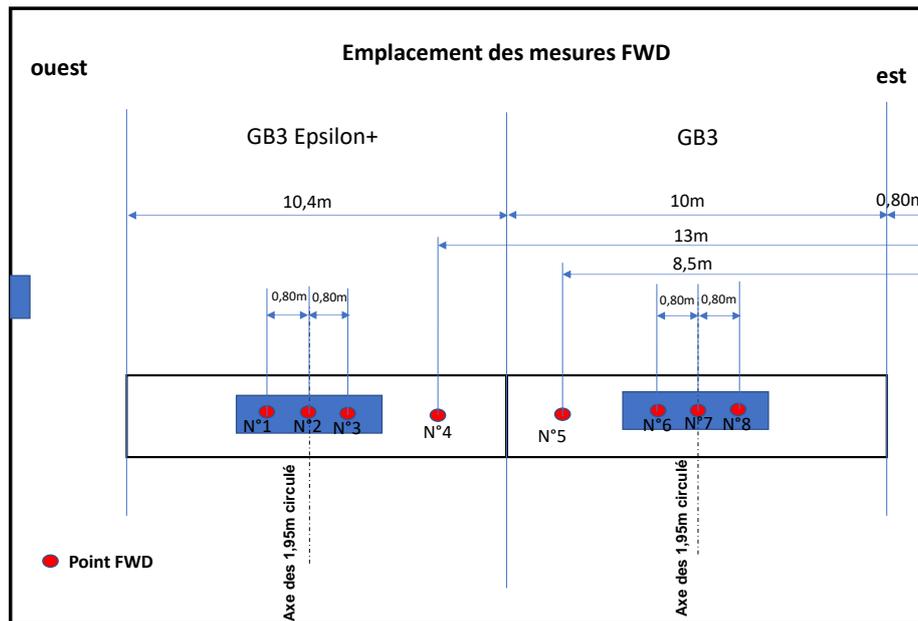
I. Mesures de déflexion réalisées avec le FWD

Les mesures ont été réalisées avec le FWD du laboratoire de Saint Briec.

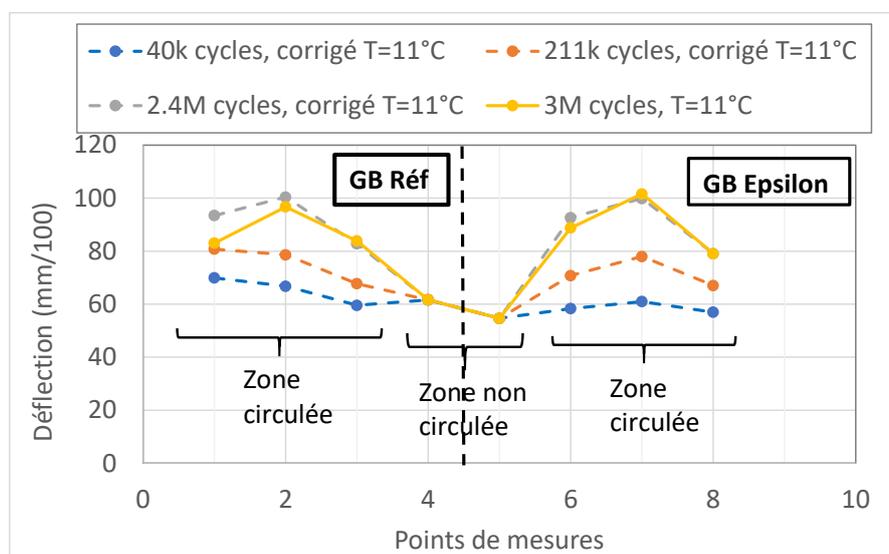
Il est intervenu à quatre reprises :

- à 40 000 chargements (le 4 octobre 2011, à 13h05)
- à 211 000 chargements (le 10 novembre 2021, à 14h14)
- à 2.462 millions de chargements (le 21 janvier 2022, à 12h18)
- à 3 millions de chargements (le 9 mars 2022, à 13h00)

Il y a eu 4 points de mesures par planche, trois dans la zone de roulage et un en dehors (voir figure suivante).



La figure suivante présente la déflexion mesurée avec le géophone G1 du FWD (le plus proche de la charge), en fonction de la position du point de mesures sur la piste, et corrigées à la température de 11°C, en utilisant les mesures sur la zone non circulée.



Sur cette figure, on observe qu'entre 40k et 211k cycles, la déflexion augmente sur les trois points de mesures de chaque zone circulée. Entre 211k cycles et 2.4 millions de chargements, la déflexion augmente aussi très fortement. Dans les deux cas, cette augmentation peut correspondre à une diminution de module d'une ou plusieurs couches de la structure, ce qui montre un endommagement d'une ou plusieurs couches de la structure.

Entre 2.4 et 3 millions, les déflexions sont quasiment équivalentes pour tous les points, sauf pour le point 1 où la déflexion diminue. Il est peut-être possible que la mesure FWD n'a pas été réalisée exactement à la même position que le point de mesure initial.

J. Evolution des modules des couches : réalisation de rétro-calculs avec les mesures FWD sur les deux sections testées

Les bassins de déflexions mesurés avec le FWD durant tout l'essai ont été utilisé afin de faire des rétro-calculs pour déterminer les modules des différentes couches et surtout l'évolution de ces modules au cours de l'essai.

Les épaisseurs des couches d'enrobés ont été définies à partir des mesures de nivellement réalisées durant la construction.

Afin de simplifier les rétro-calculs, nous avons considéré qu'il n'y avait qu'une seule couche de GNT d'épaisseur 40 cm. Nous avons supposé que cette couche de GNT repose sur un sol support de 4 mètres d'épaisseur, qui repose lui-même sur un substratum rigide.

Les modules des couches d'enrobés obtenus avec les rétro-calculs correspondent à la fréquence de 30 Hz et à la température de mesure. Ils ont ensuite été corrigés à la température de 15°C et à la fréquence de 10 Hz afin d'être comparés aux valeurs de module mesurées en laboratoire et aux valeurs des modules qui évoluent durant tout l'essai. En complément, on a également converti les résultats de calcul (modules et déformations), à une fréquence de 0.5 Hz, qui correspond à la vitesse de chargement de la machine FABAC, afin de pouvoir comparer les déformations mesurées et calculées.

On a fait l'hypothèse que les module du sol et de la GNT ne varient pas durant l'essai. Ils sont déterminés avec le rétro-calcul à 40k cycles, puis fixés à ces valeurs. Les rétro-calculs sont ensuite uniquement faits pour la couche d'enrobé. Les rétro-calculs sont ensuite uniquement faits pour la couche d'enrobé » semble être le plus réaliste et le plus cohérent avec les mesures des jauges.

	GB3 de référence (point 2)				GB Epsilon+ (point 7)			
	40k	211k	2.4 M	3 M	40k	211k	2.4 M	3 M
	17°C	12°C	10°C	11°C	17°C	12°C	10°C	11°C
Enrobé (T_{mesure} , 30Hz)	14 207	12 582	4 604	5 592	15 731	11810	4 748	4 399
Enrobé (15°C, 10Hz)	12 985	9 812	3 393	4 236	14 478	9 274	3 523	3 355

GNT	136	136	136	136	132	132	132	132
Sol	86	86	86	86	91	91	91	91

Les modules du sol et de la GNT sont semblables pour les deux structures (ce qui est cohérent avec la très bonne homogénéité des mesures dynaplaque). Les modules (15°C, 10Hz) initiaux des enrobés sont assez proches des mesures laboratoire (13 000 MPa pour la GB3 [14 400 MPa en laboratoire] et 15 700 MPa pour la GB Epsilon+ [14 500 MPa en laboratoire]).

Après 211k chargements, les modules des enrobés diminuent légèrement (12 600 MPa pour la GB3 et 11 800 pour la GB Epsilon+). Après 2.4 millions de chargements, les modules ont fortement diminué, ils sont d'environ 5 000 MPa pour les deux structures, ce qui indique une très forte dégradation des deux matériaux.

Cette diminution de module au cours de l'essai, pour les deux structures, est cohérente avec les mesures à la poutre Benkelman, qui montrent une augmentation des valeurs de déflexion, ainsi qu'avec les mesures des jauges longitudinales, qui indiquent aussi une augmentation des déformations (même si ces mesures n'ont pas fonctionné jusqu'à la fin de l'essai).

Par contre, les observations visuelles ne montrent que des fissures très fines, qui semblent indiquer un matériau peu dégradé.

Finalement, on peut aussi noter que l'évolution des modules est similaire pour les 2 structures, ce qui est assez logique, puisque les performances mécaniques des deux GB (modules initiaux et valeurs de ϵ_6 des formules chantier) sont très proches.

Résumé

Dans le contexte de l'économie circulaire, l'utilisation des enrobés recyclés dans la construction routière est devenue une nécessité forte. L'incorporation d'Agrégats d'Enrobés (AE) dans les enrobés a pris un nouvel essor par les directives de ces dernières années jusqu'au pacte d'engagement des acteurs des infrastructures de mobilité, signé en janvier 2021. Ainsi, l'objectif de la thèse est de comprendre l'influence des AE sur la durabilité des chaussées. L'originalité repose sur l'étude de la remobilisation du liant vieilli et l'homogénéité du mélange avec le liant neuf par des études numériques et expérimentales laboratoire/chantier. Considérant que ce mélange entre vieux et neuf se fait plutôt à l'échelle du mortier ou du mastic intergranulaire, une approche multi-échelle a été adoptée. Des essais en laboratoire ont été menés sur ces différentes échelles (bitume, mastic, mortier et enrobé) pour des matériaux neufs, vieux et leurs mélanges pour déterminer leurs performances mécaniques. Numériquement, un modèle hétérogène quadriphasique a été développé en se basant sur la méthode des éléments finis et sur un logiciel de générations de géométries écrit dans notre laboratoire. En comparant le module issu de modèle numérique au module de mortier mélange testé au labo, le degré d'homogénéité du mélange expérimental a été prédit. Les modèles triphasiques et quadriphasiques ont réussi à prédire le pourcentage d'homogénéité d'un mortier. Cette étude a été complétée par des essais en vraie grandeur. Une couche d'assise en GB ϵ +, matériau performant contenant 40% d'AE, a été mise en place dans une fosse expérimentale. Cette couche a été sollicitée par le Mobile Load Simulator MLS10 qui sert à simuler un trafic accéléré sur une structure de chaussée. Cette dernière a été instrumentée par des capteurs dans l'objectif de suivre sa réponse et donc évaluer sa durée de vie à l'échelle réelle. Le calcul de dommage et les mesures FWD ont montré que ce matériau a relativement survécu dans des conditions de trafic et de température sévères.

Abstract

In the context of the circular economy, the use of recycled asphalt in road construction has become a strong necessity. The incorporation of reclaimed asphalt pavement (RAP) in asphalt mixes has been given a new boost by the directives of the last years until the pact of commitment of the mobility infrastructure actors, signed in January 2021. Thus, the objective of the thesis is to understand the influence of RAP material on the durability of pavements. The originality lies in the investigation of the remobilization of the aged binder and the homogeneity of the mixture with the fresh binder by numerical and experimental laboratory/site studies. Considering that this mixing between aged and fresh binders is done at the mortar or intergranular mastic scale, a multi-scale approach was used. Laboratory tests are carried out on these different scales (bitumen, mastic, mortar and asphalt) for fresh and aged materials and their mixtures to determine their mechanical performances. In the numerical field, a quadri-phase heterogeneous model is developed based on the finite element method and geometry generation software developed in our laboratory. By comparing the modulus of the digital mix with the modulus of a mix mortar tested in the laboratory, the mix experimental degree of blending DOB was predicted. Both tri-phase and quadri-phase models have successfully predicted the DOB of a mortar. This study is completed by full-scale tests. A base course made of an HMA material called GB ϵ +, a high-performance material containing 40% RAP, is placed in an experimental pit in our laboratory. This layer is loaded by the Mobile Load Simulator MLS10 which is used to simulate accelerated traffic on a pavement structure. The latter is instrumented with sensors in order to monitor its response and thus to evaluate its life span on a real scale. Damage calculation and FWD measurements showed that this material survived relatively well under severe traffic and temperature conditions.