

Table des matières

Résumé	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xviii
Remerciements	xxi
Chapitre 1 Introduction et problématique.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique	1
1.2 Objectifs de la recherche.....	3
1.3 Organisation du document	4
1.4 Terminologie et convention de signes	5
Chapitre 2 Revue de littérature	7
2.1 Méthodes de conception	7
2.1.1 Méthodes mécanistes-empiriques de conception	7
2.1.2 Méthode française de dimensionnement	8
2.1.3 Méthode de dimensionnement nord-américaine	9
2.1.4 Synthèse	10
2.2 Généralité sur les chaussées souples.....	11
2.2.1 Éléments constitutifs de la chaussée	11
2.2.2 Effet d'une charge sur la chaussée	11
2.2.3 Synthèse	13
2.3 Comportement en petites déformations des enrobés bitumineux	13
2.3.1 Généralité	13
2.3.2 Le module complexe	14
2.3.3 Modélisation du comportement des enrobés bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire	20
2.3.4 Le coefficient de Poisson	26
2.3.5 Synthèse	27
2.4 Comportement à long terme des structures de chaussées	27
2.4.1 Fissuration des enrobés bitumineux	29
2.4.2 Orniérage des chaussées.....	43
2.5 Essais caractérisant la réponse mécanique et à long terme de la structure de chaussée	46
2.5.1 Essais de laboratoire.....	47
2.5.2 Essais en vraie grandeur.....	49
2.5.3 Synthèse	53
2.6 Caractéristiques des charges	53
2.6.1 Configurations des différents types d'essieux.....	54
2.6.2 Configurations des pneus	56
2.6.3 Interaction entre le pneu et la chaussée	63
2.6.4 Synthèse	68

2.7	Outils de calcul et de modélisation de chaussées.....	69
2.7.1	Outils de calcul.....	69
2.7.2	Le logiciel ViscoRoute® 2.0	69
2.7.3	Validation du logiciel	71
2.7.4	Synthèse	72
2.8	Instrumentation des chaussées	73
2.8.1	Problématique liée à l'instrumentation des chaussées.....	73
2.8.2	Capteurs de déformations à la base des couches bitumineuses	76
2.8.3	Instrumentation des couches bitumineuses proche de la surface	88
2.8.4	Synthèse	89
2.9	Interfaces entre les couches de la chaussée.....	90
2.9.1	La couche d'accrochage	90
2.9.2	Effet des conditions d'interface.....	91
2.9.3	Analyse des déformations au niveau des interfaces	93
2.9.4	Synthèse	93
2.10	Conclusion	94
Chapitre 3 Essais en vraie grandeur : démarche expérimentale, procédure, modélisation et mesures à la base du revêtement.....		96
3.1	Présentation et objectifs	96
3.2	Campagnes de mesures.....	97
3.2.1	Campagne n° 1 : développement et validation des protocoles expérimentaux.....	98
3.2.2	Campagne n° 2 : caractérisation de la réponse mécanique des structures sous charges multiessieux	109
3.2.3	Campagne n° 3 : étude paramétrique et développement des modélisations	114
3.3	Modélisation viscoélastique sous le logiciel ViscoRoute© 2.0	131
3.3.1	Paramètres de charge.....	131
3.3.2	Propriétés des matériaux	135
3.4	Déformations longitudinales et transversales à la base des couches bitumineuses	137
3.4.1	Signaux caractéristiques	137
3.4.2	Effet de la position des pneus.....	145
3.4.3	Développement d'un outil de traitement de données	148
3.4.4	Effet des paramètres de charge sur la mesure des amplitudes maximales de déformation	151
3.5	Conclusion	161
Chapitre 4 Instrumentation des structures de chaussée.....		163
4.1	Présentation et objectifs	163
4.2	Instrumentation des matériaux non liés	164
4.2.1	Capteurs de déformations pour les sols et matériaux granulaires	164
4.2.2	Capteurs de température.....	165
4.3	Instrumentation des enrobés bitumineux	165
4.3.1	Capteurs résistifs	165
4.3.2	Capteurs à fibre optique	168
4.3.3	Instrumentation d'une carotte d'enrobé bitumineux	172
4.3.4	Instrumentation d'une plaque de déformation multiniveau.....	179
4.4	Validation des capteurs de déformation.....	185
4.4.1	Analyse de la répétabilité de la mesure des jauges à fibre optique.	187
4.4.2	Analyse de la dispersion des jauges des plaques instrumentées.....	192
4.4.3	Analyse comparative entre les différents types de capteurs	199
4.4.4	Discussion	205

4.5	Conclusion	212
Chapitre 5 Analyse des déformations à faible profondeur sous la surface		214
5.1	Présentation et objectifs	214
5.2	Analyse des déformations longitudinales à faible profondeur (10 à 20 mm sous la surface)	215
5.2.1	Signaux caractéristiques et bassins des déformations pour un essieu simple.....	215
5.2.2	Effet des paramètres de charge sur les déformations longitudinales.....	217
5.2.3	Signaux caractéristiques pour un essieu tridem.....	222
5.2.4	Synthèse et enseignements	227
5.3	Analyse des déformations transversales à faible profondeur (10 à 20 mm sous la surface)	229
5.3.1	Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu simple	229
5.3.2	Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu tridem	236
5.3.3	Effet des paramètres de charge sur les déformations transversales.....	243
5.3.4	Synthèse et enseignements	249
5.4	Analyse des déformations verticales à faible profondeur (20 à 30 mm sous la surface)	251
5.4.1	Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu simple	251
5.4.2	Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu tridem	259
5.4.3	Effet des paramètres de charge sur les amplitudes maximales.....	264
5.4.4	Synthèse et enseignements	269
5.5	Analyse du cisaillement et de la contrainte de cisaillement à faible profondeur (20 mm sous la surface).....	271
5.5.1	Distribution du cisaillement sous la charge.....	271
5.5.2	Effet des paramètres de charge et des conditions environnementales.....	272
5.5.3	Synthèse	275
5.6	Conclusion	275
Chapitre 6 Modélisation, analyse et effet de la viscoélasticité de l'interface		278
6.1	Présentation et objectifs	278
6.2	Modélisation de l'interface entre deux couches bitumineuses.....	279
6.2.1	Interface collée et interface viscoélastique.....	279
6.2.2	Paramètres de modélisation de l'interface viscoélastique	280
6.2.3	Analyse qualitative du comportement d'une interface viscoélastique	281
6.3	Analyse des déformations de part et d'autre de l'interface.....	285
6.3.1	Analyse des déformations transversales.....	285
6.3.2	Analyse des déformations longitudinales.....	290
6.3.3	Effet des paramètres de charge sur les déformations	292
6.3.4	Synthèse et enseignements	297
6.4	Effet de la viscoélasticité de l'interface sur la distribution des contraintes et des déformations	298
6.4.1	Distribution des contraintes dans la structure en fonction de la température et des conditions d'interface.....	298
6.4.2	Distribution des déformations en fonction des conditions d'interface	307
6.4.3	Synthèse et enseignements	312
6.5	Détermination de l'épaisseur de modélisation de la couche d'interface.....	312
6.6	Conclusion	317
Chapitre 7 Mise en application du modèle de comportement viscoélastique de l'interface et discussion		319
7.1	Présentation et objectifs	319

7.2	Mise en application du modèle de comportement viscoélastique de l'interface.....	320
7.2.1	Présentation des cas simulés	320
7.2.2	Analyse des déformations à la base des couches bitumineuses.....	322
7.2.3	Approche énergétique	328
7.2.4	Analyse du chemin des contraintes au passage d'un essieu tridem.....	332
7.2.5	Synthèse et enseignements	335
7.3	Discussion.....	336
7.3.1	Principales avancées dans le domaine.....	337
7.3.2	Applicabilité.....	341
7.3.3	Critique objective et limite des travaux.....	344
7.3.4	Recherches futures	347
Chapitre 8 Conclusion		349
Bibliographie		352
Annexe 1	Matrice expérimentale des campagnes de mesures.....	363
Annexe 2	Résultats de caractérisation des matériaux de chaussées des structures du manège de fatigue de l'IFSTTAR	370
Annexe 3	Localisation des points de mesures sous le pneu.....	376
Annexe 4	Température dans les structures de chaussées des sections A et B.....	378
Annexe 5	Protocole d'installation des carottes instrumentées	389
Annexe 6	Résultats : Bassin des déformations.....	395
Annexe 7	Étude paramétrique de l'épaisseur de modélisation de la couche d'interface.	469

Liste des figures

Figure 2.1 :	Principe de fonctionnement des méthodes mécanistes-empiriques.....	8
Figure 2.2 :	Sollicitation d'une structure de chaussée souple au passage d'une charge	12
Figure 2.3 :	Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé Doucet et Auger (2010)	14
Figure 2.4 :	Courbes isothermes et isochrones du module dynamique pour le BBSG 0/10 utilisé lors de la campagne expérimentale.....	17
Figure 2.5 :	Représentation du module complexe dans le plan de Cole et Cole et dans l'espace de Black pour le BBSG 0/10 utilisé lors de la campagne expérimentale	18
Figure 2.6 :	Courbe maîtresse de module dynamique pour l'enrobé BBSG 0/10, à la température de référence de 15 °C	19
Figure 2.7 :	Modélisation du module complexe obtenu expérimentalement avec le modèle de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D pour l'enrobé BBSG 0/10	25
Figure 2.8 :	Isotherme du coefficient de Poisson en fonction de la fréquence de mesure (traduit de Di Benedetto et coll., 2008)	27
Figure 2.9 :	Courbe de fatigue (ou courbe de Wöhler) obtenue pour l'enrobé BBSG 0/10 utilisé lors des campagnes expérimentales	29
Figure 2.10 :	Les trois phases d'un essai de fatigue sur une éprouvette d'enrobé bitumineux (Perraton et coll., 2003).....	30
Figure 2.11 :	Investissement financier et contribution scientifique (adapté et traduit de Hugo et coll. (1991))	47
Figure 2.12 :	Équipement de l'Université Laval : (a) simulateur de véhicules lourds, (b) fosse de laboratoire.....	50
Figure 2.13 :	Manège de fatigue de l'IFSTTAR : (a) vue d'ensemble, (b) module essieu simple, (c) module essieu tandem et (d) module essieu tridem.....	51
Figure 2.14 :	Distribution de la pression de contact d'un pneu 11R22.5 pour une pression de gonflage de (a) 690 kPa et (b) 345 kPa	64
Figure 2.15 :	Distribution des contraintes verticales, latérales et longitudinales au contact pneu-chaussée d'un pneu 11R22.5 (De Beer et coll., 2002)	65
Figure 2.16 :	Effet du contact 3D sur les déformations et le cisaillement proche de la surface pour un pneu jumelé (Wang, H., 2011).....	67
Figure 2.17 :	Analyse comparative des capteurs du projet COST 347 suivant le critère : (a) maximum des déformations, (b) ratio des déformations entre 5 °C et 15 °C et (c) ratio des déformations entre 30 °C et 15 °C (Chenevière et coll., 2005).....	87
Figure 2.18 :	Distribution de la contrainte longitudinale (σ_{xx}) et de la déformation longitudinale (ε_{xx}) suivant la profondeur en considérant l'interface entre la couche 2 et 3 comme étant collée ou glissante (Chupin et coll., 2010).....	92

Figure 3.1 :	Structure de chaussée au site expérimental routier de l'Université Laval (SERUL).....	100
Figure 3.2 :	Instrumentation des sections 1 et 2 au SERUL	101
Figure 3.3 :	Instrumentation de la section 3 au SERUL	102
Figure 3.4 :	Véhicules d'essais de la campagne n° 1 : (a) Autobus chargé du RTC de type Nova LFS, (b) Camion équipé d'une remorque chargé de billes de bois.....	103
Figure 3.5 :	Bassin des déformations sur la section 1 : (a) position des pneus, (b) déformation longitudinale à $Z = 20$ mm, (c) déformation longitudinale à $Z = 95$ mm, (d) déformation transversale à $Z = 20$ mm, (e) déformation transversale à $Z = 95$ mm.....	108
Figure 3.6 :	Instrumentation des sections 1 et 2 avec la plaque multiniveau.....	110
Figure 3.7 :	Arrêts sur image du pneu passant sur le repère visuel.....	111
Figure 3.8 :	Camion avec remorque tridem chargée avec des blocs de béton	111
Figure 3.9 :	Tridem équipé de (a) pneus jumelés 11R22.5 et (b) de pneus à bande large 455/55R22.5	112
Figure 3.10 :	Structure de chaussée de sections A et B au manège de fatigue de l'IFSTTAR.....	116
Figure 3.11 :	Profil des couches d'enrobé bitumineux et de la fondation granulaire pour les sections A et B (manège de fatigue de l'IFSTTAR)	117
Figure 3.12 :	Schéma d'implantation des capteurs pour la section A au manège de fatigue de l'IFSTTAR	118
Figure 3.13 :	Instrumentation du manège de fatigue de l'IFSTTAR– Section A.....	120
Figure 3.14 :	Schéma d'implantation des capteurs pour la section B au manège de fatigue de l'IFSTTAR	121
Figure 3.15 :	Instrumentation du manège de fatigue de l'IFSTTAR – Section B	122
Figure 3.16 :	Modules du manège de fatigue équipés avec (a) un pneu jumelé 12.00R20 et (b) un pneu à bande large 455/55R22.5	124
Figure 3.17 :	Coordonnées des points de mesure sous les pneus.....	125
Figure 3.18 :	Contrôle et ajustement (a) de la charge appliquée et (b) de la pression de gonflage des pneus	128
Figure 3.19 :	Ratios des déformations critiques déterminés pour les quatre sections (adaptée de Grellet et coll., 2013).....	129
Figure 3.20 :	Empreintes des pneus effectuées avec le papier film <i>Fujifilm Prescale</i> pour (a) Michelin XZY-2 12.00R20 et (b) Michelin Xone XTE 455/55R22.5.....	133
Figure 3.21 :	Modélisation sous ViscoRoute© 2.0 des pneus jumelés : (a) Michelin XZY-2 12.00R20, (b) Michelin XTE 11R22.5 et du pneu à bande large : (c) Michelin Xone XTE 455/55R22.5.....	134
Figure 3.22 :	Représentation dans le plan de Cole et Cole et dans l'espace de Black du module complexe des cinq mélanges bitumineux des sections du SERUL et du manège de fatigue de l'IFSTTAR.....	136

Figure 3.23 :	Déformations longitudinale et transversale imposées à la base des couches d'enrobés bitumineux dans le domaine temporel et spatial.....	138
Figure 3.24 :	Points caractéristiques des signaux longitudinaux et transversaux pour le cas d'un essieu simple et d'un essieu tridem.....	141
Figure 3.25 :	Les méthodes de mesures du signal appliquées à un essieu simple et un essieu tridem : la méthode des pics, des demi-pics et du dernier pic.....	143
Figure 3.26 :	Construction d'un bassin de déformation : acquisition simultanée des déformations par huit capteurs situés à la base des couches bitumineuses	145
Figure 3.27 :	Construction d'un bassin de déformation : ajouts successifs des données acquises des déformations situées à la base des couches bitumineuses.....	146
Figure 3.28 :	Évolution de la contraction à l'extension au niveau d'une arête du pneu pour les déformations mesurées à la base du revêtement bitumineux	147
Figure 3.29 :	Évolution de l'extension à la contraction au niveau de l'espacement interjumelage pour les déformations mesurées à la base du revêtement bitumineux.....	148
Figure 3.30 :	Écran d'accueil de l'outil de traitement des données développé dans le cadre du projet	149
Figure 3.31 :	Module d'extraction des extremums de l'outil de traitement des données développé dans le cadre du projet	150
Figure 3.32 :	Module pour le tracé du bassin de déformation de l'outil de traitement des données développé dans le cadre du projet	151
Figure 3.33 :	Effet de la pression de gonflage sur les déformations transversales engendrées à la base du revêtement pour (a) la section 1 et (b) la section 2 au SERUL	152
Figure 3.34 :	Effet de la charge sur les déformations longitudinales et transversales pour des températures (a) autour de 20 °C et (b) > à 28 °C aux sections A et B (IFSTTAR).....	155
Figure 3.35 :	Effet des conditions expérimentales sur les ratios des déformations mesurées et modélisées à la base du revêtement pour les sections A et B (IFSTTAR).....	158
Figure 3.36 :	Effet de la vitesse sur les déformations longitudinales et transversales et sur le ratio des déformations mesurées et modélisées à la base du revêtement bitumineux pour les sections A et B (IFSTTAR) sous une charge de 5 t à 21 °C... 160	
Figure 4.1 :	Capteur de déformation pour les sols et les matériaux granulaires : (a) vue d'ensemble et (b) capteur installé au sommet de la fondation	165
Figure 4.2 :	Capteurs de déformation résistifs : (a) capteur plexiglas®, (b) capteur aluminium et (c) capteur TML	166
Figure 4.3 :	Capteur aluminium avant son conditionnement : (a) vue de dessus et (b) vue de profil.....	167
Figure 4.4 :	Mise en place des capteurs résistifs : (a) positionnement, (b) protection et recouvrement et (c) passage du finisseur	168
Figure 4.5 :	Principe de fonctionnement des capteurs à fibre optique	169
Figure 4.6 :	Conditionneur de signal : (a) modèle PicoSens, (b) modèle RadSens	172

Figure 4.7 :	Schéma d'une carotte instrumentée de capteurs à fibre optique suivant deux directions et à deux niveaux (traduit de Grellet et coll., 2012a).....	174
Figure 4.8 :	Instrumentation d'une carotte d'enrobé bitumineux : (a) usinage, (b) installation des capteurs à fibre optique intégrés dans la rondelle polymère et (c) instrumentation complétée à deux niveaux et suivant deux directions	175
Figure 4.9 :	Représentation schématique du bâti de calibration des carottes instrumentées (traduit de Grellet et coll., 2012a)	176
Figure 4.10 :	Courbe de calibration d'une rondelle polymère seule et d'une carotte d'enrobé bitumineux instrumentée d'une rondelle polymère.....	177
Figure 4.11 :	Étape d'installation d'une carotte instrumentée : (a) mise en place dans le trou de carottage puis (b) collage à l'aide de colle époxy (épaisseur de colle de 1 mm) ...	178
Figure 4.12 :	Extraction de l'instrumentation : (a) carottage, (b) carotte extraite contenant le capteur et (c) vérification du collage autour de la carotte initiale	179
Figure 4.13 :	Plaque de déformation multiniveau : (a) représentation schématique des plaques des sections 1, 2 et B, (b) photographie de la plaque de la section 2	180
Figure 4.14 :	Plaques de déformation multiniveaux installées sur la section A : (a) représentation schématique, (b) photographie des deux plaques.....	181
Figure 4.15 :	Mise en place d'une plaque de déformation multiniveau : (a) mise en place dans la couche bitumineuse, (b) position finale avant collage (vue de dessus).....	183
Figure 4.16 :	Extraction des plaques de déformation : (a) découpe d'un bloc contenant les plaques (section B), (b) extraction (section A), (c) interface des couches (section A).....	185
Figure 4.17 :	Analyse de la répétabilité des mesures effectuées en $Z = 125$ mm avec la plaque multiniveau (capteurs TB) et la carotte (capteurs LBC et TBC) en fonction de la position sous la charge pour le cas expérimental n° 11 sur la section A	187
Figure 4.18 :	Écart-type et COV des mesures effectuées en $Z = 125$ mm avec la plaque multiniveau (capteurs TB) et la carotte (capteur TBC) en fonction de la position sous la charge pour les cas expérimentaux n° 11 et 13 sur la section A.....	189
Figure 4.19 :	Écart-type moyen des mesures effectuées en $Z = 125$ mm pour la section A et en $Z = 65$ mm pour la section B avec les capteurs à fibre optique.....	190
Figure 4.20 :	COV moyen des mesures effectuées en $Z = 125$ mm pour la section A et en $Z = 65$ mm pour la section B avec les capteurs à fibre optique	191
Figure 4.21 :	Analyse de dispersion des mesures effectuées en $Z = 125$ mm avec la plaque multiniveau (capteurs TB) en fonction de la position sous la charge pour le cas expérimental n° 11 sur la section A.....	193
Figure 4.22 :	Somme des résidus des mesures au bas du revêtement pour les jauges des plaques de déformation multiniveaux pour les quatre sections	195
Figure 4.23 :	Paramètre χ^2 des mesures au bas du revêtement pour les jauges des plaques de déformation multiniveaux pour les quatre sections.....	197
Figure 4.24 :	Évolution du paramètre χ^2 des jauges transversales au bas des plaques de déformation multiniveaux en fonction de leur durée de vie pour les sections A et B	198

Figure 4.25 :	Analyse comparative entre les mesures en $Z = 125$ mm des différents types de capteurs et les modélisations pour le cas expérimental n° 21 de la section A.....	200
Figure 4.26 :	Paramètre χ^2 pour les capteurs résistifs et à fibre optique situés à la base du revêtement bitumineux de la section A	202
Figure 4.27 :	Paramètre χ^2 pour les capteurs résistifs et à fibre optique situés à la base du revêtement bitumineux de la section B	204
Figure 4.28 :	Rotation des capteurs autour des trois axes par rapport à leur position théorique ..	207
Figure 4.29 :	Effet de l'orientation du capteur sur les déformations longitudinales.....	208
Figure 4.30 :	Effet de l'orientation du capteur sur les déformations transversales.....	209
Figure 4.31 :	Effet des angles β et α sur l'amplitude maximale des déformations	209
Figure 4.32 :	Photographie de la couche de GB	211
Figure 4.33 :	Effet l'épaisseur des couches et de la profondeur de mesure sur l'amplitude maximale des déformations.....	211
Figure 5.1 :	Déformations longitudinales mesurées et modélisées en $Z = 10$ mm au passage d'un essieu simple (pneu à bande large, 4 t, 43 km/h, 24 °C) pour la section B : (a) signaux en position $Y = -105$ mm sous le pneu et (b) bassin des déformations	216
Figure 5.2 :	Effet de la charge et de la température (section A, $Z = 15$ mm) sur (a) l'amplitude de contraction et (b) l'extension maximale	218
Figure 5.3 :	Effet de la charge et de la température (section B, $Z = 10$ mm) sur (a) l'amplitude de contraction et (b) l'extension maximale	219
Figure 5.4 :	Effet de la vitesse sur l'amplitude de contraction et l'extension maximale (section A, $Z = 15$ mm)	221
Figure 5.5 :	Effet de la vitesse sur l'amplitude de contraction et l'extension maximale (section B, $Z = 10$ mm)	222
Figure 5.6 :	Déformations longitudinales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 1 (cas n° 1-119) : (a) espacement interjumelage et (b) sous les pneus	223
Figure 5.7 :	Contraintes calculées en $Z = 20$ mm au passage de l'essieu tridem équipé de pneus jumelés pour les sections 1 et 2 (coordonnée $Y = 170$ mm sous le pneu)	225
Figure 5.8 :	Déformations longitudinales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 2 (cas n° 201): (a) espacement interjumelage et (b) sous les pneus	226
Figure 5.9 :	Déformations transversales mesurées et modélisées en $Z = 15$ mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5 t, 43 km/h, 18 °C) pour la section A : (a)-(b) extérieur à la charge, (c)-(e) sous la charge	230
Figure 5.10 :	Déformations transversales mesurées et modélisées à 10 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 23,5 °C) pour la section B : (a) extérieur à la charge, (b) bord de la charge.....	232
Figure 5.11 :	Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 15 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 19 °C (cas n° 21 et 22) et de 34,5 °C (cas n° 23 et 24)	233

Figure 5.12 :	Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 10 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5 t, 43 km/h) pour la section B à une température de 22 °C (cas n° 61 et 62) et de 30,5 °C (cas n° 65 et 66)	235
Figure 5.13 :	Déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 1 (cas n° 101)	237
Figure 5.14 :	Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 1 et pour trois pressions de gonflage (830 kPa, 690 kPa et 550 kPa)	239
Figure 5.15 :	Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 2 et pour deux pressions de gonflage (690 kPa et 550 kPa).....	241
Figure 5.16 :	Déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 2 (cas n° 201)	242
Figure 5.17 :	Effet de la charge et de la température (section A, Z = 15 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus	244
Figure 5.18 :	Effet de la charge et de la température (section B, Z = 15 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus	245
Figure 5.19 :	Effet de la vitesse sur la contraction des déformations transversales (sections A et B, Z = 15 mm)	247
Figure 5.20 :	Effet de la pression de gonflage sur l'extension au bord des pneus et la contraction sous la charge de la déformation transversale en Z = 20 mm (sections 1 et 2)	248
Figure 5.21 :	Déformations verticales mesurées et modélisées en Z = 20 mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 20 °C) pour la section A : (a)-(b) extérieur à la charge, (c)-(d) sous la charge	252
Figure 5.22 :	Déformations verticales mesurées et modélisées en Z = 20 mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 32,8 °C) pour la section A : (a) bord de la charge, (b)-(c) sous la charge.....	254
Figure 5.23 :	Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 19 °C (cas n° 21 et 22) et de 34,5 °C (cas n° 23 et 24)	255
Figure 5.24 :	Effet de la température et du coefficient de Poisson sur les déformations verticales (section A).....	257
Figure 5.25 :	Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (4 t, 43 km/h) pour la section B à une température de 22,5 °C (cas n° 51 et 52) et de 28,0 °C (cas n° 55 et 56)	258
Figure 5.26 :	Déformations verticales mesurées et modélisées à 30 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus à bande large pour la section 2 (cas n° 201) : (a) extérieur à la charge, (b) sous la charge et (c) bord de la charge	260
Figure 5.27 :	Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 30 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 1 et pour trois pressions de gonflage (830 kPa, 690 kPa et 550 kPa)	262

Figure 5.28 :	Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 30 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 2 et pour deux pressions de gonflage (690 kPa et 550 kPa).....	263
Figure 5.29 :	Effet de la charge et de la température (section A, Z = 20 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus	266
Figure 5.30 :	Effet de la charge et de la température (section B, Z = 20 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus	267
Figure 5.31 :	Effet de la vitesse sur la contraction et l'extension des déformations verticales (section A, Z = 20 mm).....	268
Figure 5.32 :	Effet de la pression de gonflage sur la contraction sous la charge et l'extension au bord des pneus de la déformation verticale (sections 1 et 2).....	269
Figure 5.33 :	Distribution du cisaillement et de la contrainte de cisaillement en Z = 20 mm sous les deux types de pneus chargés à 5 t (section A).....	272
Figure 5.34 :	Effet de la charge et de la température en Z = 20 mm pour la section A sur : (a) la contrainte et (b) la déformation de cisaillement.....	273
Figure 5.35 :	Effet de la température sur le cisaillement et sur la contrainte de cisaillement en Z = 20 mm (section A, chargement de 5 t).....	274
Figure 6.1 :	Analyse qualitative du comportement d'une interface visqueuse	281
Figure 6.2 :	Profil de distribution des contraintes dans les couches bitumineuses pour deux positions sous la charge et sous trois conditions de température	283
Figure 6.3 :	Déformations transversales mesurées et modélisées en Z = 65 mm et en Z = 75 mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 20 °C) pour la section A: (a) sous la charge, (b) extérieur à la charge	286
Figure 6.4 :	Déformations transversales mesurées et modélisées en Z = 65 mm et en Z = 75 mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 33 °C) pour la section A: (a) sous la charge, (b) extérieur à la charge	287
Figure 6.5 :	Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 65 mm et à 75 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5,8 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 20 °C (cas n° 31) et de 32,8 °C (cas n° 33)	289
Figure 6.6 :	Déformations longitudinales mesurées et modélisées en Z = 65 mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h) pour la section A à une température de : (a) 20 °C (cas n° 31) et (b) 32,8 °C (cas n° 33).....	291
Figure 6.7 :	Bassin des déformations longitudinales mesurées et modélisées à 65 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5,8 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 20 °C (cas n° 31) et de 32,8 °C (cas n° 33)	292
Figure 6.8 :	Effet des paramètres de charge sur les déformations transversales en Z = 65 mm et Z = 75 mm à des températures (a) autour de 20 °C et (b) élevées (> 28 °C)	293
Figure 6.9 :	Effet des paramètres de charge sur les déformations longitudinales en Z = 65 mm à des températures (a) autour de 20 °C et (b) élevées (> 28 °C)	294
Figure 6.10 :	Effet de la vitesse sur les déformations longitudinales et transversales mesurées et modélisées à 65 mm et à 75 mm de profondeur au passage d'un essieu simple chargé à 5 t pour la section A et à une température de 22,5 °C.....	296

Figure 6.11 :	Profil de distribution des contraintes sous un pneu jumelé (cas n° 31 et 33) et sous un pneu à bande large (cas n° 32 et 34) chargés à 5,8 t et circulant à 43 km/h en fonction des conditions d'interface entre les couches bitumineuses de la section A.....	299
Figure 6.12 :	Évolution des contraintes en fonction de la température et des conditions d'interface sous un essieu simple (pneu jumelé ou pneu à bande large, 5,8 t, 43 km/h) pour la section A.....	300
Figure 6.13 :	Évaluation de l'écart d'amplitude des contraintes engendré par la viscoélasticité de l'interface en fonction de la température et du type de pneu (section A, 5,8 t et 43 km/h)	301
Figure 6.14 :	Évolution des contraintes de part et d'autre de l'interface en fonction de la température dans le cas de l'interface viscoélastique.....	303
Figure 6.15 :	Évolution de la contrainte à 5 mm de profondeur en fonction de la température et des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu à bande large, 5,8 t, 43 km/h) pour la section A.....	304
Figure 6.16 :	Exemple des cycles de température et du gradient thermique associé à deux profondeurs (30 mm et 90 mm) dans les couches bitumineuses de la section A	305
Figure 6.17 :	Effet d'un gradient thermique sur la distribution des contraintes dans les couches bitumineuses de la section A pour le pneu à bande large (5,8 t, 43 km/h) dans le cas d'une interface viscoélastique	306
Figure 6.18 :	Distribution des déformations longitudinales et transversales au bas de la couche de base de la section A ($Z = 125$ mm) en fonction des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)	308
Figure 6.19 :	Distribution des déformations longitudinales et transversales à faible profondeur dans la couche de surface de la section A ($Z = 15$ mm) en fonction des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)	310
Figure 6.20 :	Distribution des déformations verticales à faible profondeur dans la couche de surface de la section A ($Z = 20$ mm) en fonction des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)	311
Figure 6.21 :	Influence de l'épaisseur de la couche d'interface sur les bassins des déformations longitudinales, transversales et verticales dans les couches bitumineuses de la section A pour un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)	314
Figure 6.22 :	Écart moyen entre les modélisations et les mesures expérimentales de la section A en fonction des critères d'évaluation suivant : type de pneu, température, intensité de la charge, déformations mesurées, profondeur de la mesure	316
Figure 7.1 :	Déformations longitudinales et transversales à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm, $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 255$ mm) au passage d'un essieu tridem (pneu à bande large, 5 t, 43 km/h) pour deux températures : (a) 20 °C et (b) 30 °C	323
Figure 7.2 :	Amplitude maximale des déformations longitudinales et transversales calculées à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) et déformation relative associée en fonction de la température	326

Figure 7.3 :	Déformations longitudinales et transversales relatives calculées à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) avec et sans gradient thermique dans les couches bitumineuses en fonction de la température.....	327
Figure 7.4 :	Amplitude maximale des contraintes longitudinales et transversales à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) en fonction de la température et des conditions d'interface.....	329
Figure 7.5 :	Courbes de charge et de décharge à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) pour deux températures (20 °C et 30 °C) dans la direction longitudinale et transversale	330
Figure 7.6 :	Densité d'énergie dissipée à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) en fonction de la température pour deux vitesses de la charge (43 km/h et 90 km/h)	331
Figure 7.7 :	Chemin des contraintes (représentation de Drucker-Prager) à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) pour trois températures (10 °C, 25 °C et 30 °C).....	334
Figure 7.8 :	Effet des propriétés thermoviscoélastiques de l'interface sur les déformations et les contraintes longitudinales et transversales calculées à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm)	343

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe	16
Tableau 2.2 : Éléments rhéologiques de base.....	21
Tableau 2.3 : Représentation et module complexe des modèles de Maxwell, Maxwell généralisé, de Kelvin-Voigt et Kelvin-Voigt généralisé	22
Tableau 2.4 : Représentation des modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D.....	23
Tableau 2.5 : Paramètres des modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D pour l'enrobé BBSG 0/10	25
Tableau 2.6 : Classification des capteurs de l'essai à Nardo (OCDE, 1985)	78
Tableau 2.7 : Caractéristiques des capteurs du programme COST 347 et des essais au LAVOC (Chenevière et coll., 2005, Wistuba et Perret, 2004).....	84
Tableau 3.1 : Effet de la réduction de 690 kPa à 517 kPa de la pression de gonflage sur l'amplitude des déformations pour l'autobus urbain.....	107
Tableau 3.2 : Synthèse des jauges au manège de fatigue de l'IFSTTAR - Section A	120
Tableau 3.3 : Synthèse des jauges au manège de fatigue de l'IFSTTAR - Section B.....	122
Tableau 3.4 : Cas d'étude pour la section A au manège de fatigue de l'IFSTTAR	126
Tableau 3.5 : Cas d'étude pour la section B au manège de fatigue de l'IFSTTAR	127
Tableau 3.6 : Paramètres du modèle de Huet-Sayegh des cinq mélanges bitumineux des sections du SERUL et du manège de fatigue de l'IFSTTAR.....	136
Tableau 3.7 : Effet des conditions expérimentales sur le ratio des déformations mesurées à la base du revêtement bitumineux.....	157
Tableau 3.8 : Effet des conditions expérimentales sur les ratios des déformations mesurées et modélisées à la base du revêtement pour les sections 1 et 2 au SERUL	158
Tableau 4.1 : Spécifications des jauges à fibre optique de type OSP-A (<i>Opsens</i>) pour la mesure des déformations	171
Tableau 4.2 : Dimensions des plaques et positionnement des jauges	182
Tableau 4.3 : Cas expérimentaux sélectionnés pour la validation des capteurs de la section A au manège de fatigue de l'IFSTTAR	186
Tableau 4.4 : Cas expérimentaux sélectionnés pour la validation des capteurs de la section B au manège de fatigue de l'IFSTTAR	186
Tableau 5.1 : Effet des conditions expérimentales sur les déformations longitudinales.....	228
Tableau 5.2 : Comparaison des mesures expérimentales et des modélisations.....	228
Tableau 5.3 : Effet des conditions environnementales sur le ratio des déformations	229
Tableau 5.4 : Effet des conditions expérimentales sur les déformations transversales.....	250
Tableau 5.5 : Comparaison des mesures expérimentales et des modélisations.....	250

Tableau 5.6 : Effet des conditions environnementales sur les ratios de déformation	250
Tableau 5.7 : Effet des conditions expérimentales sur les déformations verticales	270
Tableau 5.8 : Comparaison des mesures expérimentales et des modélisations.....	270
Tableau 5.9 : Effet des conditions environnementales sur les ratios de déformation	271
Tableau 6.1 : Paramètres du modèle de Huet de la couche d'accrochage.....	280

À mes parents

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche Guy Doré, professeur au département de génie civil, de m'avoir guidé, encouragé et surtout pour m'avoir fait confiance tout au long de ce projet. Je tiens également à remercier toute l'équipe qui travaille à ses côtés et qui m'a accompagné. Merci, Chantal Lemieux, Jean-Pascal Bilodeau, Christian Juneau et Sylvain Auger, pour votre soutien, vos aides techniques et scientifiques. C'est tout simplement très agréable et enrichissant de travailler avec vous.

Je remercie également les partenaires et collaborateurs de la Chaire de recherche industrielle CRSNG sur l'interaction charges lourdes/climat/chaussées qui ont participé au suivi et à l'avancement de mon projet. François Beauchamp, Charles Leduc, Steve Mercier, vos connaissances et votre savoir-faire ont été très précieux pour la réussite technique du projet.

Au cours de ce projet, j'ai eu la chance de collaborer avec l'IFSTTAR et plus particulièrement avec l'équipe du manège de fatigue. J'ai énormément appris à vos côtés. Jean-Pierre Kerzreho, Stéphane Trichet, Thierry Gouy, Gilles Coirier, votre accueil a été des plus chaleureux et c'était un vrai plaisir d'étudier et d'apprendre à vos côtés. Merci, Jean-Michel Piau, Pierre Hornych, Armelle Chabot et Olivier Chupin, de m'avoir guidé dans ce projet. Vos connaissances m'ont permis de toujours avancer dans la bonne direction.

Parmi tous les étudiants que j'ai eu le plaisir de côtoyer à l'université, j'aimerais remercier dans un premier temps Romain Marcel, Paul de Barbeyrac et Thomas Gaulliard pour leur aide direct sur le projet lors des campagnes expérimentales et surtout pour l'analyse de toutes ces données. Un grand merci à Christina, Catherine, Joanie, Pauline, Florence, Caroline, Jonas, J-P, Mamadou, Alejandro, Alban, Nicolas, Thomas, Simon et Cédric avec qui j'ai partagé de si bons moments.

La réussite d'un tel projet repose également sur ces rencontres qui avec le temps deviennent de sincères amitiés et une nouvelle famille. Merci à mes colocs, Pierre, Stéphane et Nano pour toutes ces aventures vécues dans l'appartement et à travers le Québec. Mes remerciements

s'adressent également à Jojo et à sa famille pour leur bonne humeur, leur bienveillance et leur générosité. Pour ces multiples week-ends, soirées et précieux moments passés avec vous, je vous dis un grand merci, Antoine, Laeti, Roro, Joanie, Maxime, Rahmie, Vero, Guigui, Caro, Sophie, Loriane, Mumu, Guillaume et Élodie. Merci Alice pour ton appui et tes encouragements pendant ces longues semaines d'écriture.

Je tiens finalement à remercier avec beaucoup d'affection ma famille et notamment ma sœur jumelle Marie-Pierre, mon frère Aurélien et bien sûr mes parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu tout au long de ce projet et de mes années au Québec.

Chapitre 1

Introduction et problématique

1.1 Mise en contexte et problématique

Les routes ont un rôle majeur dans le développement économique et social d'une région, autant au niveau local qu'au niveau national. Elles subissent l'agression de plusieurs agents qui l'endommagent progressivement. Ces détériorations sont causées par trois types de sollicitation : mécanique, climatique et chimique. Les divers processus de dégradations affectant les routes sont le résultat de la combinaison de ces sollicitations. Elles se doivent cependant de posséder une bonne résistance en fatigue et de conserver une capacité structurale et fonctionnelle suffisante pour assurer un déplacement sécuritaire et confortable pour les usagers. La conception des chaussées ne repose dorénavant plus sur des règles simples d'expérience, mais sur des modèles mécanistiques-empiriques complexes. Mis ensemble, ces modèles offrent des outils performants de dimensionnement et d'analyse des structures existantes et ainsi, permettent une meilleure gestion du réseau routier.

Une gestion performante du réseau routier passe par une bonne connaissance du trafic l'utilisant. Ce trafic est en constante augmentation et les charges associées sont très diversifiées, tant sur le plan de leur mode d'application (type de camion) que sur leur intensité (chargement réglementé). De nouveaux équipements sont proposés par l'industrie du transport visant à améliorer le rendement économique et écologique de celle-ci. Au Québec, par exemple, l'utilisation des pneus à bande large en remplacement des pneus jumelés traditionnels, apparaît comme l'une des solutions envisagées par cette industrie en raison de leur grande efficacité sur la route. En France, depuis le 1er janvier 2013, le tonnage du poids total des véhicules de transports routiers de marchandises de plus de 4 essieux est passé de 40 000 kg à 44 000 kg (soit une augmentation de 10 %). Ces changements ne sont cependant pas sans conséquence sur les infrastructures et il apparaît nécessaire de posséder ou de développer des outils pouvant les évaluer.

Les méthodes de dimensionnement sont un des outils permettant d'optimiser les structures des chaussées pour des objectifs de conception définis. Les charges et les conditions climatiques sont des intrants à ces méthodes puisqu'ils ont un impact direct sur les déformations et les contraintes s'exerçant dans les différentes couches de la structure. La quantification des dommages engendrés par les charges lourdes est effectuée à partir de la connaissance des déformations et des contraintes se distribuant dans la structure de chaussée lors du passage d'un type de charge. L'acquisition de ces données est possible à partir d'outil de calcul ou bien à partir de mesures expérimentales. Ces deux techniques sont complémentaires. L'utilisation de ces techniques permet d'identifier les sollicitations critiques imposées à la chaussée et cela pour chaque mode de rupture de la structure. En ce qui concerne les chaussées souples, les charges lourdes sont principalement responsables de quatre modes de rupture. Le premier mode de rupture est l'apparition d'ornièrè structurale issue de la déformation permanente des matériaux non liés. Ce mode de rupture est quantifiable à partir de la mesure de la déformation verticale appliquée sur les matériaux. La pose de capteur de déformation ainsi que de cellule de charge dans les couches de ces matériaux permet la mesure expérimentale de ces sollicitations. Le second mode de rupture des enrobés bitumineux est la fissuration par fatigue. Le passage d'une charge lourde impose une traction au bas du revêtement bitumineux qui se traduit par une extension du matériau. La répétition de ces déformations endommage le matériau jusqu'à amorcer une fissure. Sous l'effet des charges, la taille de la fissure augmente et se propage sur toute l'épaisseur de la couche jusqu'à apparaitre en surface de la structure. La mise en place de jauges d'extensométrie permet la mesure des déformations au bas des couches. L'expérience montre cependant une difficulté à obtenir une mesure fiable et fidèle de la déformation à ce niveau dans la structure. Le troisième et le quatrième mode de rupture sont l'apparition d'ornièrè de fluage et la fissuration s'amorçant en surface des couches bitumineuses. Ces deux modes de rupture sont regroupés, car ils sont tous les deux engendrés par les sollicitations s'exerçant dans les premiers centimètres du revêtement bitumineux. L'association des contraintes de cisaillement et de traction ainsi que les déformations en cisaillement et en extension peuvent générer un fluage des matériaux et l'apparition de fissures. Sous l'effet des charges, ces fissures vont se propager vers le bas des couches. La propagation peut s'arrêter à une profondeur donnée ou être complète et atteindre le bas du revêtement. Plusieurs outils de calcul permettent d'analyser la

répartition des sollicitations dans les hauts des couches bitumineuses et ainsi d'identifier précisément les phénomènes responsables de ces deux modes de rupture. L'instrumentation du haut des couches bitumineuses est très différente de celle à la base des couches, car les capteurs doivent résister à des sollicitations thermiques et mécaniques importantes. Très peu de capteurs ont pour le moment prouvé leur efficacité et leur viabilité. Une mesure expérimentale de la déformation serait cependant nécessaire afin de valider les outils de calculs ainsi que les hypothèses de modélisations actuellement utilisées. En associant les déformations mesurées expérimentalement à celles obtenues par des calculs théoriques, il sera possible d'évaluer le comportement général de la structure et ainsi de proposer de meilleurs outils de dimensionnement et d'évaluation de la performance des couches bitumineuses.

Avec l'intégration en métrologie de technologie, telle que la fibre optique, il est maintenant possible de concevoir de nouveaux types de capteurs. Étant donné que les enrobés bitumineux sont des matériaux viscoélastiques, leur réponse mécanique dépend à la fois des paramètres de charge tels que la vitesse et des conditions de température. La conception des capteurs doit donc être pensée afin que la lecture des mesures soit fidèle au comportement du matériau, pour une gamme étendue de températures et de fréquences de sollicitation. L'intégration des capteurs dans les couches bitumineuses doit également être pensée afin qu'ils ne modifient pas localement le comportement de la couche.

1.2 Objectifs de la recherche

L'objectif de cette étude est de caractériser les déformations à plusieurs niveaux dans la structure de chaussée dans le but d'identifier les modes de sollicitations, les conditions de charges et les conditions environnementales susceptibles d'endommager les couches bitumineuses. Pour ce faire, les principaux sous-objectifs de l'étude sont les suivants :

- Développer et optimiser les techniques d'instrumentation des chaussées bitumineuses afin de caractériser les déformations à plusieurs niveaux dans les couches bitumineuses ;
- Valider les capteurs de déformation à l'aide des techniques de mesure actuelle et des outils de modélisation adaptés aux enrobés bitumineux ;

- Caractériser les déformations s'exerçant à trois niveaux dans les couches bitumineuses, c'est-à-dire à la base et au sommet de celles-ci et également de part et d'autre de l'interface entre ces couches ;
- Caractériser les déformations pour plusieurs conditions de charges, soit la pression de gonflage, la vitesse, l'intensité du chargement et le type pneu ;
- Analyser l'effet du pneu à bande large comparativement aux pneus jumelés sur la distribution des déformations dans la structure de chaussée ;
- Analyser le comportement d'une interface entre deux couches bitumineuses afin de quantifier l'influence de sa viscoélasticité sur la distribution des contraintes et des déformations dans le revêtement ;
- Proposer une nouvelle approche de modélisation basée sur les mesures expérimentales et la mettre en application afin d'identifier spécifiquement les phénomènes mis en jeu dans l'endommagement des chaussées.

1.3 Organisation du document

La thèse se structure en quatre principales parties. Premièrement, le chapitre 2 présente les méthodes de conception de chaussée et détaille plus particulièrement l'instrumentation des chaussées et l'effet des paramètres de charges sur le dimensionnement des chaussées. La présentation du comportement en petites déformations des enrobés bitumineux et du comportement à long terme des structures de chaussées permet de décrire les outils de modélisation et les outils expérimentaux actuellement utilisés afin de caractériser l'endommagement des chaussées. Une partie importante de ce chapitre est dédiée aux problématiques liées à la mesure expérimentale des déformations et en particulier sur la nécessité d'instrumenter le haut des structures bitumineuses ainsi que l'interface entre les couches. La seconde partie du document est constituée des chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 présente la démarche expérimentale, les procédures d'analyse ainsi que les résultats préliminaires des premières campagnes de mesures. Le chapitre 4 détaille les deux types d'instrumentation à fibre optique utilisés au cours du projet ainsi que les signaux obtenus à la base des couches bitumineuses. Ce chapitre comprend les étapes de validation des capteurs, les méthodes d'analyse des signaux et l'étude comparative effectuée avec l'instrumentation usuellement utilisée dans les chaussées. La troisième partie du document est constituée des

chapitres 5 et 6. Le chapitre 5 présente les déformations longitudinales, transversales et verticales s'exerçant dans le haut des couches bitumineuses. L'effet des paramètres de charges, de la structure de chaussée et de la température sur la distribution des déformations y est détaillé. Le chapitre 6 détaille les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface entre deux couches bitumineuses. Pour ces deux chapitres, les mesures expérimentales sont comparées aux résultats obtenus avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Cette étude montre que l'approche traditionnelle de modélisation ne permet pas d'expliquer l'ensemble des mesures expérimentales relevées au niveau de l'interface et à faible profondeur sous la surface. Le chapitre 6 propose donc une modélisation dans laquelle les paramètres viscoélastiques de l'interface y sont intégrés. Finalement, plusieurs applications du modèle de comportement sont proposées dans le chapitre 7 afin d'apporter des éléments de réponse sur les phénomènes d'endommagement observés dans les structures de chaussées. Ce chapitre comprend également une discussion sur les points importants du projet, en particulier sur la modélisation proposée et sur l'analyse des données expérimentales.

Ce travail a été effectué en collaboration avec l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) et plus spécifiquement avec le département matériaux et structures du site de Nantes (France). Les méthodes de dimensionnement et d'analyse des chaussées souples peuvent différer entre la France et le Québec. Les normes ainsi que les critères de conception sont donc présentés pour chacune des deux méthodes. Les approches considérées sont précisées dans le document.

1.4 Terminologie et convention de signes

Dans l'ensemble du document, plusieurs termes techniques associés au domaine routier sont utilisés. Les termes les plus fréquents ainsi que les conventions de signes associées sont ici définis pour l'ensemble du travail.

- Définition :

Une traction/compression est une force appliquée sur la surface d'un élément visant à engendrer un allongement/raccourcissement de celui-ci dans la direction de la force. Une extension/contraction est une variation relative de longueur d'un élément entraînant un allongement/raccourcissement de celui-ci lorsqu'il est soumis à une action extérieure.

- Convention de signes :

Par convention, une déformation/contrainte de signe positif désigne une extension/traction. Une déformation/contrainte de signe négatif désigne donc une contraction/compression.

- Terminologie associée aux contraintes et déformations :

Dans le domaine routier, les contraintes et les déformations s'exerçant dans la structure de la chaussée se définissent suivant les trois composantes principales d'un repère orthonormé (0,X,Y,Z). Suivant chaque direction les termes spécifiques sont utilisés :

- Longitudinale : direction correspondant au sens de roulement du véhicule. Cette direction est définie comme étant suivant l'axe des X.
- Transversale : direction perpendiculaire au sens de roulement du véhicule, dans le plan horizontal de roulement. Cette direction est définie comme étant suivant l'axe des Y.
- Verticale : direction perpendiculaire au plan de roulement de la charge. Cette direction est définie comme étant suivant l'axe des Z.

Chapitre 2

Revue de littérature

2.1 Méthodes de conception

2.1.1 Méthodes mécanistes-empiriques de conception

La gestion du réseau routier requiert des outils de dimensionnement et d'analyse des structures faisant intervenir toutes les sollicitations responsables de la dégradation des ouvrages routiers (Doré, 2008). Ces outils sont basés sur des modèles empiriques ou mécanistes-empiriques. La figure 2.1 présente le principe de fonctionnement d'une approche mécaniste-empirique pour la conception et le dimensionnement d'une chaussée. La méthode de dimensionnement est basée sur les trois principales étapes suivantes :

- L'étape 1 consiste à déterminer la réponse des matériaux de chaussée sous une charge modélisée. Ce calcul est possible par la mise en place de modèles et d'outils de calcul analytiques. Les conditions de charge, de terrain ainsi que les caractéristiques de l'ouvrage sont les intrants du calcul.
- L'étape 2 consiste à déterminer la durée de vie de la chaussée en associant la réponse des matériaux à des modèles de performance. Les conditions de terrain et les propriétés physiques des matériaux sont utilisées pour sélectionner et calibrer ces modèles de performance.
- L'étape 3 consiste à s'assurer que la durée de vie obtenue vérifie les critères de performance imposés. À cette étape, le concepteur a la possibilité d'optimiser le dimensionnement par itération, voire à modifier ces choix de conception, afin de vérifier l'ensemble des conditions imposées par le projet.

Dans cette étude, les travaux s'orientent principalement vers la détermination de la réponse des matériaux et en particulier des déformations dans le revêtement. L'ensemble des modèles et des outils de calcul, ainsi que leurs intrants, sont donc détaillés au cours des prochaines

sections de ce chapitre. Pour chacun, l'impact sur la réponse des matériaux et la durée de vie de la structure y sont détaillés.

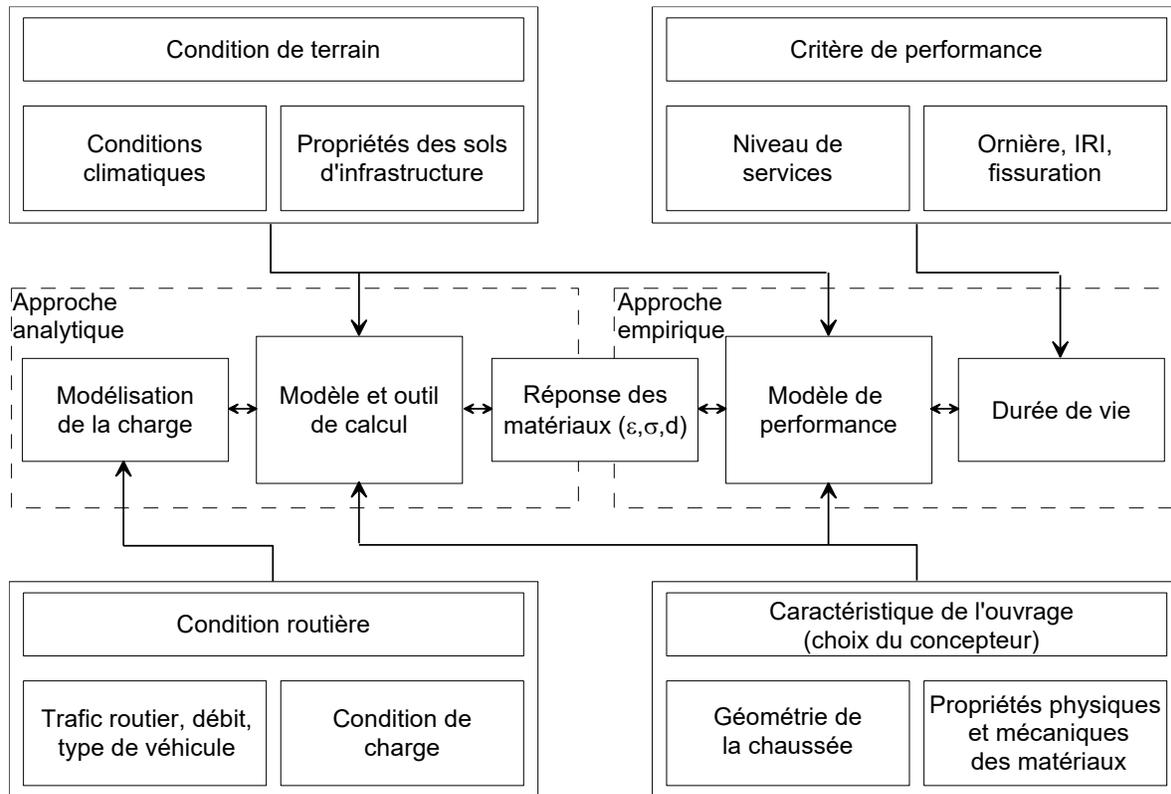


Figure 2.1 : Principe de fonctionnement des méthodes mécanistes-empiriques

2.1.2 Méthode française de dimensionnement

La méthode française de dimensionnement relève d'une démarche combinant les apports de la mécanique rationnelle et des éléments expérimentaux (SETRA-LCPC, 1994). Dans un premier temps, un modèle de la structure de chaussée est défini afin de calculer les sollicitations engendrées par la charge standard correspondant à l'essieu légal. L'essieu de référence est un essieu simple à roues jumelées chargé à 130 kN, soit 65 kN par demi-essieu. Les résultats d'essais de laboratoire sur l'endommagement en fatigue des matériaux de chaussée sont exploités pour évaluer la résistance en fatigue de la structure en considérant l'hypothèse de l'additivité des dommages de Miner (Miner, 1945). Des coefficients de calage sont par la suite ajoutés aux lois d'endommagement pour tenir compte des observations du comportement réel des chaussées. Ces observations permettent également de valider l'endommagement par déformations permanentes au niveau du sol support et au niveau des

couches granulaires. À partir de l'ensemble de ces données, une démarche de calcul probabiliste est adoptée. Les structures de chaussées ne sont pas dimensionnées pour répondre à une durée de vie imposée, mais elles sont évaluées sur leur évolution, dans le temps, de la probabilité cumulée de rupture. Cette démarche permet de tenir compte de la dispersion et du caractère aléatoire de plusieurs facteurs intervenant dans l'endommagement à long terme de la chaussée. La variabilité des matériaux ainsi que des conditions de mise en œuvre de la structure font partie de ces facteurs. Outre ces paramètres intrinsèques à la construction et à la réhabilitation des chaussées, l'analyse probabiliste tient compte de la variabilité des conditions environnementales et des évolutions du trafic au cours de la durée de vie de la chaussée.

2.1.3 Méthode de dimensionnement nord-américaine

Trois méthodes de dimensionnements de chaussées sont couramment utilisées en Amérique du Nord : la méthode AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), la méthode AI (Asphalt Institute) et la méthode MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide). Plusieurs administrations routières ont développé leurs propres méthodes de conception ou adapté les méthodes existantes. Dans le cadre du programme canadien SHRP (C-SHRP, 2002), un recensement des différentes méthodes de conception canadiennes montre une utilisation préférentielle de la méthode AASHTO. Cette méthode empirique est fondée sur l'essai routier de l'AASHTO effectué entre 1956 et 1960. La méthode initiale a connu de nombreuses révisions pour aboutir à la version actuellement utilisée qui a été publiée en 1993 (AASHTO, 1993). Les multiples révisions apportées à la méthode ont été effectuées afin de généraliser la procédure de conception pour différents climats, matériaux et sols existants. Le dimensionnement de la chaussée se fait à l'aide d'une équation de régression qui relie les caractéristiques structurales de la chaussée, l'évolution dans le temps du niveau de qualité des chaussées (ou indice de viabilité de la chaussée) et le nombre total admissible de passages d'ÉCAS (Équivalent de la Charge Axiale Simple). Cette méthode de conception intègre une approche probabiliste où le concepteur définit un facteur de fiabilité afin de tenir compte de l'incertitude sur la prédiction du trafic et la dispersion sur la performance des matériaux. L'ÉCAS se définit comme étant le dommage unitaire causé à la chaussée par un essieu simple, muni de pneus jumelés, chargé à 80 kN. L'agressivité de chaque véhicule, caractérisant le trafic, est alors calculée par rapport à cette charge de référence. Le ministère

des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) du Québec a mis au point un logiciel de dimensionnement des chaussées souples appelé « Chaussée[®] » qui intègre cette méthode de dimensionnement. Les modèles et les paramètres de calculs ont été adaptés et étalonnés pour tenir compte des conditions propres au Québec. Cette méthode présente plusieurs avantages. Les principaux avantages sont sa simplicité d'utilisation et son adaptabilité pour plusieurs conditions climatiques et pour différents types de matériaux et de trafics. Les limitations de cette méthode sont les conséquences de sa conception qui a été développée dans un milieu spécifique et sur une période de temps limité. Les relations empiriques mises au point doivent donc être utilisées avec précaution et peuvent amener à choisir des fiabilités plus grandes que nécessaire afin de s'assurer de la viabilité de la chaussée.

La méthode de conception MEPDG permet de palier aux inconvénients de la méthode AASHTO en intégrant des niveaux hiérarchiques de précision pour chaque intrant du modèle. Elle permet de prédire distinctement chaque phénomène d'endommagement de la chaussée. Cette méthode est très complète, mais elle est aussi complexe et nécessite une importante quantité de données parfois non disponibles. La méthode ne propose pas un calcul d'ÉCAS puisqu'elle utilise les données précises de trafic sous forme de nombre d'essieux par type et par classe de charge pour le calcul. Les paramètres de charge peuvent être modifiés pour sélectionner des types de pneus ainsi que leurs caractéristiques physiques (pression de gonflage, dimension, écartement entre les pneus). La méthode MEPDG est actuellement exploitable. Cependant, elle est en constant développement afin d'y intégrer de nouveaux résultats de recherche et de s'assurer du calage et de la validité des relations utilisées.

2.1.4 Synthèse

Initialement, la prise en compte du trafic dans les méthodes de conception se faisait en déterminant l'agressivité d'un véhicule comparativement à celui d'une charge de référence. L'évolution des outils de calcul et des modèles mathématiques d'analyse offre la possibilité d'intégrer dans les paramètres de conception des niveaux de précision plus élevés en ce qui concerne l'influence du trafic et des charges.

2.2 Généralité sur les chaussées souples

2.2.1 Éléments constitutifs de la chaussée

Une chaussée souple consiste en une structure multicouche construite sur un sol d'infrastructure, dont chaque couche a un rôle bien spécifique. Au sommet de la structure, le revêtement en enrobé bitumineux ou en béton de ciment, a pour rôle structural de distribuer la charge et d'assurer l'étanchéité de la chaussée. Son rôle fonctionnel est de garantir un confort au roulement et une bonne adhérence. En dessous du revêtement se situent la couche de fondation en gravier naturel ou concassé et une couche de sous-fondation en sable et gravier. Ces deux couches ont pour rôle de distribuer la charge pour protéger l'infrastructure et assurer un bon drainage dans la structure. Elles permettent aussi une bonne surface de travail pour la mise en place du revêtement et assurent une protection supplémentaire contre le gel (Doré, 2008).

2.2.2 Effet d'une charge sur la chaussée

Une structure routière est soumise à deux principales sollicitations qui sont les contraintes imposées par les variations de température et celles imposées par les charges roulantes. Dans cette étude, les travaux s'orientent sur l'effet de la charge sur le comportement mécanique de la structure. Selon Di Benedetto et Corté (2005), chaque couche de chaussée subit des déformations et des flexions sous l'effet du trafic. L'ordre de grandeur des cycles de chargement et des déformations restant de l'ordre de 10^{-4} m/m, le calcul des contraintes et des déformations s'effectue en considérant un système multicouche élastique linéaire isotrope. Cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée, en particulier en ce qui concerne les couches d'enrobé bitumineux. Ces couches sont constituées d'un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume. Le bitume a un comportement viscoélastique. Ses propriétés mécaniques dépendent de la vitesse de chargement et de la température. Sous les sollicitations répétées des charges, des phénomènes irréversibles et non linéaires apparaissent dans le matériau.

Sous l'effet d'une charge roulante, la contrainte se distribue dans la structure multicouche et engendre une déformation suivant les trois directions principales comme cela est illustré à la figure 2.2. La connaissance du module d'Young et du coefficient de Poisson de chaque couche permet la caractérisation de ces déformations. Dans la direction transversale, le bas de la

couche 1 est en extension directement sous la charge et en compression de part et d'autre de la charge. Dans la direction longitudinale, la déformation varie avec le passage de la charge. À l'avant et à l'arrière du pneu, la charge impose une contraction du matériau alors que directement sous le pneu, elle engendre une extension. Il y a donc une succession de contraction-extension-contraction en un point donné à la base de la couche au passage de la charge. L'extension à la base de la couche est générée par une contrainte en traction imposée par la charge. La répétition de cette extension engendre l'apparition de microfissures qui en s'accumulant entraînent une fissuration par fatigue du matériau. Dans la direction verticale, la charge impose une compression ce qui génère une contraction au sommet des couches. Dans les matériaux granulaires et les couches bitumineuses, ces compressions répétées engendrent une déformation permanente et cela se répercute en surface de la chaussée par l'apparition d'ornières. La qualité de roulement et la sécurité des usagers sont affectées par ces phénomènes.

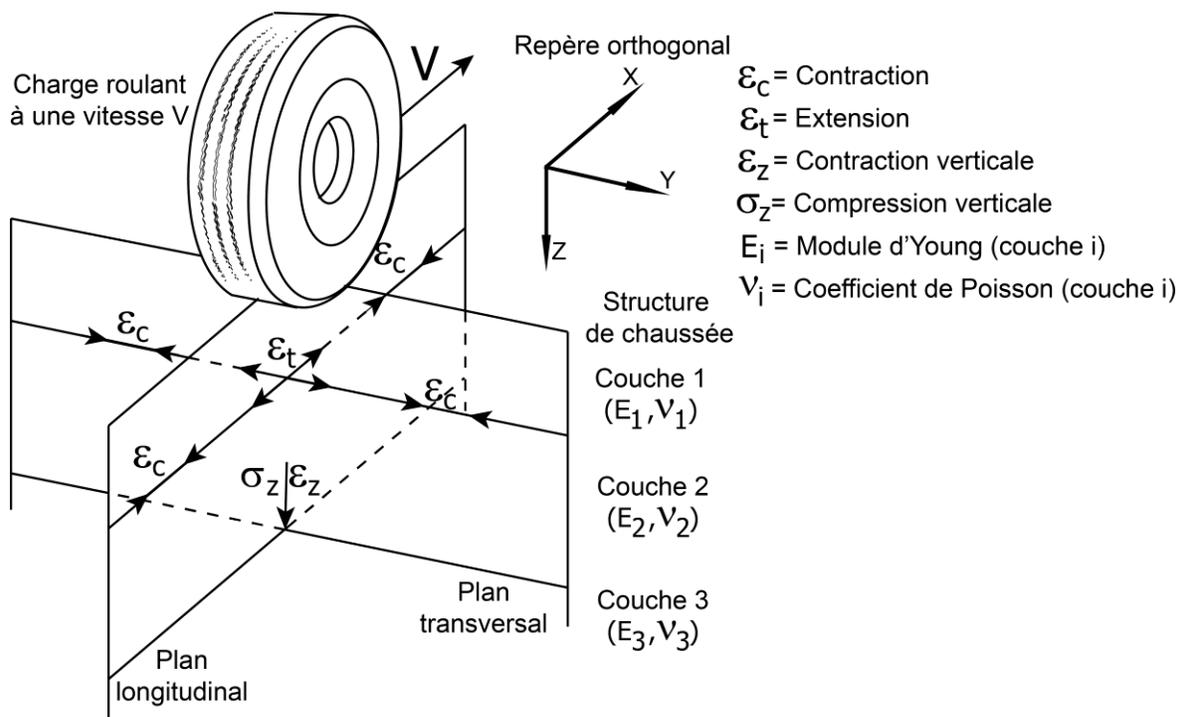


Figure 2.2 : Sollicitation d'une structure de chaussée souple au passage d'une charge

2.2.3 Synthèse

Les différentes couches de la chaussée distribuent les contraintes générées par le passage de la charge et subissent des déformations réversibles et irréversibles. Les caractéristiques de la charge influencent la réponse instantanée de la structure ainsi que son comportement à long terme.

2.3 Comportement en petites déformations des enrobés bitumineux

2.3.1 Généralité

Selon Di Benedetto et Corté (2005), une couche d'enrobé bitumineux dans une structure de chaussée est considérée comme un milieu continu, isotrope, thermosusceptible et avec une viscosité élastique linéaire. Ces hypothèses sont utilisées à des fins de calculs pour le dimensionnement routier. L'enrobé est un matériau composite (granulat, liant bitume). Il possède à l'échelle microscopique un caractère hétérogène. À l'échelle macroscopique, les couches de chaussée sont considérées comme étant des milieux continus et homogènes. Concernant l'hypothèse d'isotropie, la mise en place du matériau par compactage impose un gradient de densité dans le sens de l'épaisseur de la couche et une orientation privilégiée des granulats peut apparaître. À des fins de simplification, l'ensemble des couches est cependant supposé isotrope dans les calculs de dimensionnement structural. L'enrobé possède un comportement dit viscoélastique : sa réponse mécanique est fortement dépendante de la fréquence de sollicitation et de la température du matériau. Lorsqu'il est soumis à un chargement très rapide, son comportement est très proche de l'élasticité alors que lorsque la charge est très lente, son comportement est à prédominance visqueuse. Dans le domaine routier, la caractéristique des charges imposées par le trafic se situe entre ces deux conditions extrêmes. La linéarité du comportement des matériaux dépend du niveau de déformation imposé. Dans le domaine linéaire viscoélastique, la relation qui relie les déformations aux contraintes est influencée uniquement par la température et la fréquence de chargement et non par l'amplitude des contraintes ou des déformations. Sayegh (1966) a mis en évidence des effets de non-linéarité dès lors qu'une déformation de $20 \cdot 10^{-6}$ m/m était imposée à l'échantillon. Plusieurs essais de laboratoire effectués par Airey et coll. (2004) situent la limite

de linéarité des mélanges bitumineux à $100 \cdot 10^{-6}$ m/m. Les déformations inférieures à cette limite se situent dans le domaine dit « des petites déformations ». Les essais de laboratoire qui décrivent le comportement viscoélastique des matériaux sont effectués dans ce domaine de déformations.

2.3.2 Le module complexe

2.3.2.1 Définition

Selon Doucet et Auger (2010), le module complexe (noté E^*) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous chargement cyclique. La figure 2.3 présente un cycle de sollicitation en traction-compression alternée effectué sur une éprouvette d'enrobé bitumineux. Compte tenu du caractère viscoélastique du matériau, la réponse en déformation d'un enrobé bitumineux sous une contrainte sinusoïdale (équation 2-1) est une sinusoïde (équation 2-2) qui présente un retard de phase (équation 2-3). L'angle de déphasage caractérise le comportement visqueux du matériau. Il est donc nul pour un matériau purement élastique et vaut 90° pour un matériau purement visqueux.

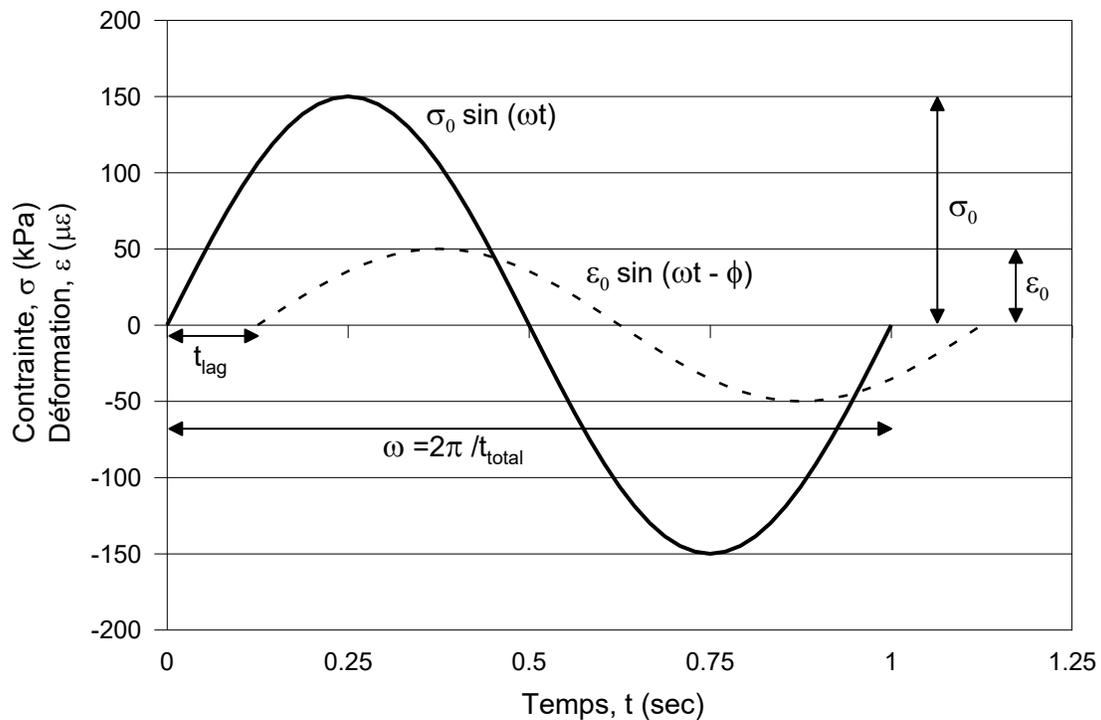


Figure 2.3 : Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé Doucet et Auger (2010)

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad \text{Équation 2-1}$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \Phi) \quad \text{Équation 2-2}$$

$$\Phi = \omega t_{lag} \quad \text{Équation 2-3}$$

Où : t = temps de chargement (en s),
 ω = période (en rad/s)
 $= 2 \cdot \pi \cdot f$ avec f la fréquence de sollicitation (en Hz),
 Φ = angle de phase (en rad),
 t_{lag} = temps de déphasage entre $\sigma(t)$ et $\varepsilon(t)$ (en s).

Le module complexe est défini comme le rapport entre l'amplitude complexe de la contrainte et l'amplitude complexe de la déformation, tel que présenté à l'équation 2-4. La norme du module complexe $|E^*|$, nommé module dynamique en Amérique du Nord et module de rigidité en Europe, est le rapport entre la contrainte maximale et la déformation maximale. Le module complexe comme tout nombre complexe se décompose en une partie réelle (notée E_1) et une partie imaginaire (notée E_2). Sous sa forme vectorielle, il est composé d'un module ($|E^*|$) et d'un argument (Φ), tel que présenté à l'équation 2-4.

$$E^*(t) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \Phi)}} = |E^*| e^{i\Phi} \quad \text{Équation 2-4}$$

Où : $|E^*|$ = module dynamique ou module de rigidité (en MPa)
 i = unité imaginaire ($i^2 = -1$)

2.3.2.2 Méthodes d'essais

Au cours d'essais de laboratoire, une éprouvette d'enrobé bitumineux est soumise à des chargements répétés sous des conditions croisées de températures et fréquences de sollicitation. Les déformations sont maintenues dans le domaine linéaire. Les amplitudes de la contrainte et de la déformation sont mesurées simultanément ainsi que leur déphasage. À partir de ces données, il est possible de caractériser l'ensemble du comportement viscoélastique linéaire du matériau. Plusieurs méthodes d'essais normalisées de détermination du module sont proposées par l'AASHTO, l'American Society for Testing and Materials (ASTM), le Comité européen de normalisation (CEN) ainsi que par le MTMDET. Le tableau 2.1 fait un bilan des essais recommandés ainsi que des paramètres techniques préconisés.

Les essais de module dynamique sont principalement des essais de traction-compression directe, de compression directe ou de flexion deux points. La norme européenne NF EN 12697-26 (2012) présente également des essais de flexion trois et quatre points sur éprouvettes prismatiques ainsi que des essais de traction indirecte et de traction directe. Ces essais sont cependant moins couramment utilisés. Pour l'ensemble des essais de laboratoire, l'amplitude de chargement doit être telle qu'aucun dommage ne puisse en résulter pendant le temps nécessaire au relevé des mesures. Il est donc préconisé de maintenir des déformations inférieures à 50.10^{-6} m/m pour s'assurer d'être dans le domaine linéaire tout en évitant tout endommagement en fatigue. Une attention particulière doit être portée pour les températures extrêmes, c'est-à-dire supérieures à 30 °C et inférieures à 0 °C. L'ensemble des méthodes d'essais préconise d'évaluer le module complexe pour une gamme donnée de températures et de fréquences afin d'obtenir l'ensemble du comportement viscoélastique du matériau.

Tableau 2.1 : Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe

Norme	Méthode d'essais	Forme de l'échantillon	Fréquence d'essais (en Hz)	Température d'essais (en °C)
AASHTO TP 62-07	Compression directe	Cylindrique	0,1, 0,5, 1, 5, 10, 25	-10°, 4,4°, 21,1°, 37,8°, 54,4°
ASTM D 3497-79	Compression directe	Cylindrique	5, 25, 40	1°, 4°, 16°
EN 12697-26	Flexion en deux points	Trapézoïdale ou prismatique	3 fréquences espacées également sur une échelle log entre 0,1 et 50	4 températures espacées de 10 °C entre -30° et 40°
EN 12697-26	Traction-compression directe	Cylindrique	6 fréquences entre 0,1 et 50 (usuellement 0,1, 0,3, 1, 3, 10 et 20)	4 températures entre -30° et 40° (usuellement 10°, 20°, 30° et 40°)
LC 26-700	Traction-compression directe	Cylindrique	0,1, 0,3, 1, 3, 10	-20°, -10°, 0°, 10°, 20°, 30°, 40°

2.3.2.3 Présentation des résultats de module complexe

Les résultats expérimentaux des paramètres du module complexe sont généralement illustrés suivant quatre représentations :

- Les courbes isothermes et les courbes isochrones : ces courbes sont obtenues en traçant la norme du module complexe en fonction de la fréquence pour chaque température

d'essais (courbe isotherme), ou en fonction de la température pour chaque fréquence d'essais (courbe isochrone). Ces courbes permettent une lecture directe du module pour un calcul de dimensionnement pour une fréquence et une température donnée. Un exemple de ces courbes est illustré à la figure 2.4 pour le béton bitumineux semi-grenu (BBSG) 0/10 utilisé lors de la campagne expérimentale.

- Représentation dans le plan de Cole et Cole et dans l'espace de Black : dans le plan de Cole et Cole, la partie réelle E_1 est portée en abscisse et la partie imaginaire E_2 en ordonnée. Cette représentation est illustrée à la figure 2.5. Dans l'espace de Black, la norme du module dynamique est représentée en abscisse sur une échelle logarithmique et l'angle de phase est en ordonnée (figure 2.5). Les enrobés présentent un comportement thermorhéologique simple lorsque les points représentatifs s'ajustent sous la forme d'une courbe unique dans le plan de Cole et Cole et dans l'espace de Black (Huet, 1963) et dans ce cas, le principe d'équivalence temps-température est applicable.

Les données de module complexe illustrées à la figure 2.4 ainsi qu'à la figure 2.5 ont été obtenues en suivant les recommandations de la norme NF EN 12697-26 (2012) pour les essais de flexion en deux points sur éprouvettes trapézoïdales.

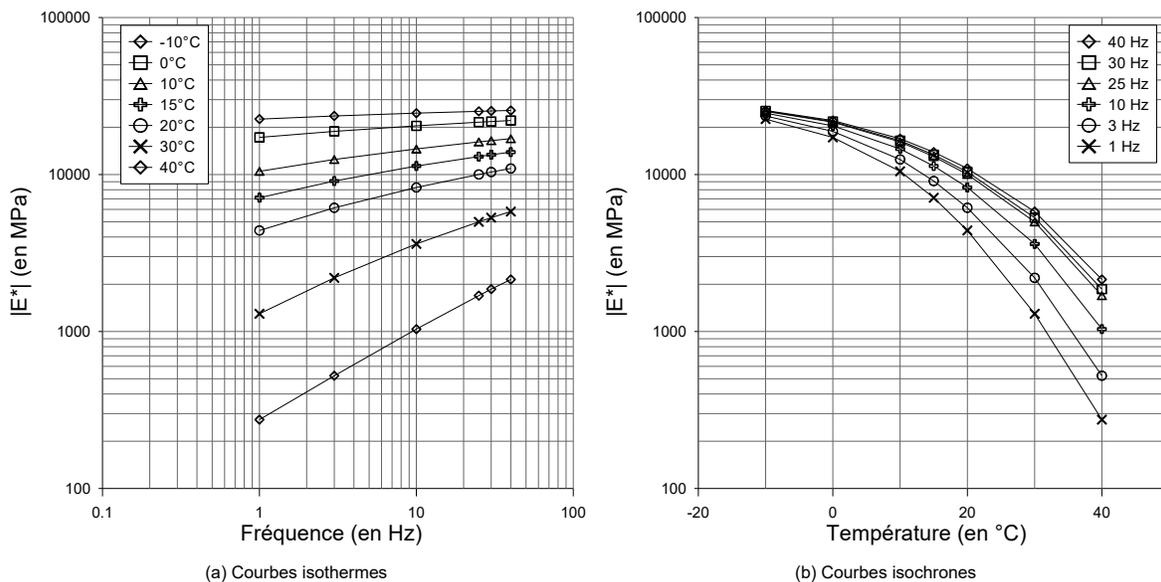


Figure 2.4 : Courbes isothermes et isochrones du module dynamique pour le BBSG 0/10 utilisé lors de la campagne expérimentale

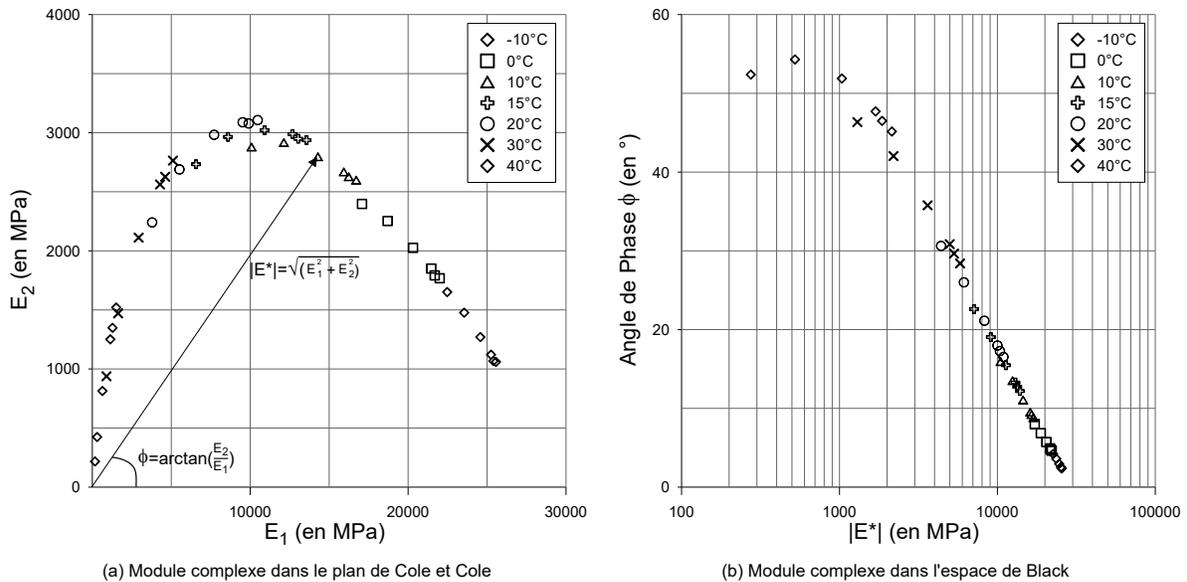


Figure 2.5 : Représentation du module complexe dans le plan de Cole et Cole et dans l'espace de Black pour le BBSG 0/10 utilisé lors de la campagne expérimentale

2.3.2.4 Principe d'équivalence temps-température et courbe maîtresse

Le principe d'équivalence temps-température, aussi appelé le principe d'équivalence fréquence-température, s'applique lorsque l'ensemble des résultats expérimentaux de module complexe présente une courbe unique dans le plan de Cole et Cole et l'espace de Black. Ce principe stipule qu'une même valeur de module dynamique peut être obtenue avec différents couples (fréquence ou pulsation ω , température). Comme présenté à l'équation 2-5, il existe une pulsation ω_2 de sollicitation sous laquelle un module complexe évalué à la température T_2 est équivalent aux résultats de module évalué à la pulsation ω_1 et à la température T_1 .

$$E^*(\omega_1, T_1) = E^*(\omega_2, T_2) \text{ avec } \omega_1 \cdot f(T_1) = \omega_2 \cdot f(T_2) \quad \text{Équation 2-5}$$

En utilisant cette propriété d'équivalence, il est possible de construire une courbe unique de module dynamique, pour une température de référence (T_R) choisie arbitrairement, à partir des courbes isothermes. Cette courbe est appelée courbe maîtresse de l'enrobé à la température T_R . Graphiquement, cette courbe est obtenue par translation de chaque isotherme, parallèlement à l'axe des fréquences, jusqu'à superposition des points de même ordonnée. L'isotherme de la température de référence reste fixe et sert de repère à la translation. Pour chaque isotherme, un facteur de translation (a_T) est déterminé. Chaque point des isothermes

vérifie l'équation 2-6. Le coefficient de translation pour la température de référence est donc égal à 1. La fréquence ainsi déterminée est appelée fréquence équivalente (ou fréquence réduite) pour la température de référence. Un exemple de courbe maîtresse de module dynamique, du BBSG 0/10, est présenté à la figure 2.6.

$$E^*(\omega_1, T_1) = E^*(\omega \cdot a_T, T_R) \text{ avec } a_T = f(T)/f(T_R) \text{ et } a_{T_R} = 1 \quad \text{Équation 2-6}$$

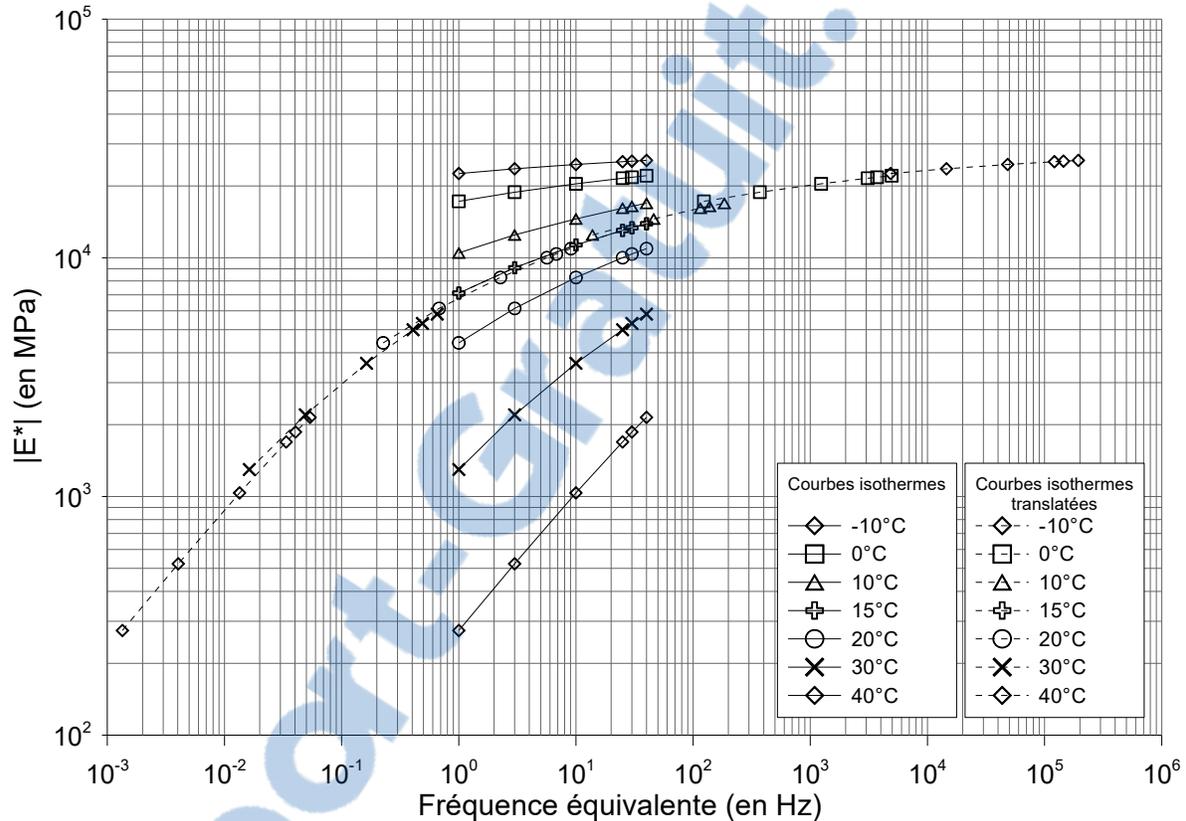


Figure 2.6 : Courbe maîtresse de module dynamique pour l'enrobé BBSG 0/10, à la température de référence de 15 °C

Pour chaque enrobé bitumineux, il est possible de tracer une courbe maîtresse à la fois pour le module dynamique et pour l'angle de phase. Ces courbes permettent d'obtenir des valeurs de module pour des fréquences inaccessibles par l'expérimentation. Williams et coll. (1955) proposent une formule analytique liant les facteurs de translation et les températures. Cette formule dite WLF (William, Landel et Ferry) est présentée à l'équation 2-7. Pour chaque température, le facteur de translation peut aussi être déterminé en utilisant une formule de type Arrhénius (équation 2-8).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1 \cdot (T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \quad \text{Équation 2-7}$$

Où : C_1 et C_2 = constantes fonction du matériau

T = température

T_R = température de référence

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad \text{Équation 2-8}$$

Où : δH = énergie apparente d'activation caractérisant le matériau

R = constante des gaz parfaits (=8.314 J.mol⁻¹.K⁻¹)

T = température exprimée en Kelvin

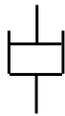
T_R = température de référence exprimée en Kelvin

2.3.3 Modélisation du comportement des enrobés bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire

2.3.3.1 Généralité

Le comportement mécanique d'un matériau peut être décrit par des modèles rhéologiques simples (Carter, 2002). Plusieurs éléments sont utilisés pour élaborer différents modèles de comportement des matériaux. Le tableau 2.2 présente trois éléments rhéologiques de base utilisés pour modéliser le comportement d'un enrobé bitumineux. Le ressort caractérisé par sa rigidité modélise le comportement élastique linéaire. L'amortisseur linéaire et l'amortisseur parabolique modélisent le comportement visqueux du matériau. Les modélisations des enrobés bitumineux et des bitumes sont basées sur un assemblage de ces éléments. Ces assemblages peuvent être une mise en série de plusieurs éléments ou une mise en parallèle, ou encore une combinaison des deux. Lors d'un assemblage en parallèle, les éléments sont associés rigidement par leurs extrémités. La contrainte totale est alors la somme des contraintes élémentaires de chaque élément et les déformations sont égales pour chacune des branches. Dans un assemblage en série, la déformation totale est la somme des déformations de chaque élément et les contraintes se conservent dans l'assemblage.

Tableau 2.2 : Éléments rhéologiques de base

Élément rhéologique	Ressort	Amortisseur linéaire	Amortisseur parabolique
Comportement	Élasticité linéaire	Viscosité linéaire	Viscosité non linéaire
Symbole			 ou 

2.3.3.2 Modèles de Maxwell et de Kelvin-Voigt

Le modèle de Maxwell est construit par un assemblage en série d'un élément ressort et d'un amortisseur linéaire. Il représente le liquide viscoélastique le plus simple. Le modèle de Kelvin-Voigt représente le solide viscoélastique le plus simple. Il se compose d'un ressort et d'un amortisseur linéaire mis en parallèle. La représentation de ces deux modèles, leurs équations de comportement ainsi que leurs modules complexes sont donnés au tableau 2.3. Ces deux modèles ne permettent pas de décrire correctement le comportement complexe des matériaux bitumineux (Commission européenne, 1999). Ils servent cependant à constituer des éléments de base pour des modèles plus complexes.

Le modèle de Maxwell généralisé est un modèle constitué d'un nombre fini (noté n) d'éléments de Maxwell mis en parallèle. Le tout est ensuite associé à un ressort et un amortisseur en parallèle. Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé se compose de l'association en série d'éléments de Kelvin-Voigt associé, là aussi en série, à un ressort et un amortisseur linéaire. Ces deux modèles permettent de décrire tous les types de comportements viscoélastiques linéaires lorsque le nombre d'éléments n tend vers l'infini. Selon Di Benedetto et Corté (2005), ces deux modèles peuvent donc modéliser le comportement d'un enrobé bitumineux tant qu'un nombre suffisant d'éléments est utilisé.

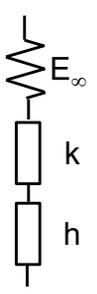
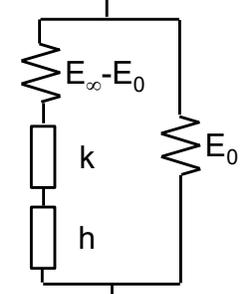
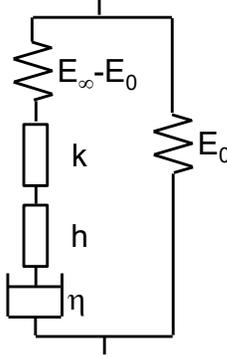
Tableau 2.3 : Représentation et module complexe des modèles de Maxwell, Maxwell généralisé, de Kelvin-Voigt et Kelvin-Voigt généralisé

Modèle	Maxwell	Kelvin-Voigt
Représentation		
Équation de comportement	$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right]$	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right]$
Module complexe	$E^*(\omega) = \frac{E\omega^2\eta^2 + iE^2\omega\eta}{E^2 + \omega^2\eta^2}$	$E^*(\omega) = E + i\omega\eta$
Modèle généralisé		
Module complexe	$E^*(\omega) = E_0 + i\omega\eta_\infty + \sum_{j=1}^n \frac{E_j\omega^2\eta_j^2 + iE_j^2\omega\eta_j}{E_j^2 + \omega^2\eta_j^2}$	$E^*(\omega) = \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{E_j + i\omega\eta_j} + \frac{1}{E_\infty} + \frac{1}{i\omega\eta_0} \right)^{-1}$
Variable	E _j : Rigidité du ressort n°j	η _j = Viscosité de l'amortisseur n°j

2.3.3.3 Modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D

Le modèle de Huet (1963) est un modèle constitué de trois éléments en série (tableau 2.4). Le premier élément est un ressort de raideur E_∞ . Ce ressort modélise la réponse instantanée du modèle, c'est-à-dire quand les fréquences de sollicitation sont élevées et pour des températures très basses. Les deux autres éléments sont des amortisseurs, non linéaires, à loi de fluage parabolique de paramètre k et h . Pour les bitumes et les enrobés, ces deux paramètres vérifient la relation suivante : $0 < k < h < 1$. Les enrobés bitumineux possèdent un module statique pour les basses fréquences et pour de hautes températures. Cette propriété n'étant pas prise en compte dans ce modèle, il n'est pas possible de correctement calculer les paramètres du modèle de Huet avec les données expérimentales pour cette plage d'utilisation.

Tableau 2.4 : Représentation des modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D

Modèle	Huet	Huet-Sayegh	2S2P1D
Représentation			
Variable	η : Viscosité de l'amortisseur E_0, E_∞ : Rigidité des éléments ressorts k, h : Paramètre des éléments paraboliques		

Le modèle de Huet a été adapté par Sayegh (1965) avec l'ajout d'un ressort en parallèle de très faible rigidité par rapport au ressort E_∞ . Ce modèle dit de Huet-Sayegh est représenté au tableau 2.4. Le module complexe associé à cette représentation est donné à l'équation 2-9.

$$E^*(\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta \cdot (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad \text{Équation 2-9}$$

Où : ω = période (en rad/s)

τ = temps de relaxation qui est fonction de la température (en s)

h et k = paramètres des éléments paraboliques vérifiant $0 < k < h < 1$

δ = constante positive sans dimension

E_∞ = module élastique instantané ou module vitreux (en MPa)

E_0 = module élastique statique (en MPa)

À partir de ce modèle, la détermination de l'évolution du module complexe avec la température se fait en déterminant la loi de variation du paramètre τ avec la température. Ce paramètre traduit l'équivalence temps-température et est issu de l'équation d'Arrhénius proposé par Huet. Ce temps caractéristique est donc calculé en fonction de la température comme présenté à l'équation 2-10.

$$\tau(\theta) = \exp(A_0 + A_1 \cdot \theta + A_2 \cdot \theta^2) \quad \text{Équation 2-10}$$

Où : θ = température (en °C)

A_0, A_1 et A_2 = coefficients de régression intrinsèques au matériau étudié

Dans la méthode d'essai LC 26-700 (Québec, 2007), le MTMDET préconise une expression du paramètre τ ajusté pour une température de référence (T_R) selon le principe d'équivalence temps-température comme indiqué à l'équation 2-11. Le paramètre de translation est une relation quadratique du différentiel entre la température et la température de référence. Cette relation est présentée à l'équation 2-12

$$\tau = a_T \cdot \tau_0 \leftrightarrow \log(\tau) = \log(\tau_0) + \log(a_T) \quad \text{Équation 2-11}$$

$$\log(a_T) = a_1 \cdot (T - T_R) + a_2 \cdot (T - T_R)^2 \quad \text{Équation 2-12}$$

Où : T = température (en °C),

T_R = température de référence (=10 °C),

τ_0, a_1 et a_2 = coefficients de régression intrinsèques au matériau étudié.

Le modèle de Huet-Sayegh permet de représenter correctement le comportement des enrobés bitumineux sur toute la gamme de fréquences. Les valeurs des coefficients de régression varient en fonction de la formulation des matériaux et du type de bitume utilisé.

Olard (2003) a repris le modèle de Huet-Sayegh en y ajoutant un amortisseur linéaire en série avec les deux amortisseurs paraboliques et le ressort. Ce modèle, dit 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot), est représenté au tableau 2.4. Le modèle 2S2P1D présente un très bon calage aux faibles fréquences et aux hautes températures à la fois pour les bitumes et les enrobés bitumineux. Il est préféré au modèle de Huet-Sayegh pour la modélisation du comportement des bitumes. Le modèle de Huet-Sayegh est retenu pour les enrobés bitumineux compte tenu des bonnes corrélations obtenues avec un minimum de paramètres.

2.3.3.4 Application des modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D

Les paramètres des trois modèles présentés au tableau 2.4 peuvent être déterminés à l'aide du logiciel Viscoanalyse (Chailleux et coll., 2006). Cet outil de calcul permet de visualiser les

mesures expérimentales de module complexe, d'analyser les courbes isothermes et isochrones, de construire les courbes maîtresses pour une température imposée et de déterminer les paramètres des modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D. Ce logiciel peut être utilisé à la fois pour des enrobés et des liants bitumineux. Le tableau 2.5 présente les paramètres obtenus pour les modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D de l'enrobé BBSG 0/10 utilisé lors de ce projet. Le paramètre β qui est présenté dans le tableau est directement lié à la viscosité newtonienne (paramètre η) du modèle 2S2P1D.

Tableau 2.5 : Paramètres des modèles de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D pour l'enrobé BBSG 0/10

Modèle	Paramètre								
Huet	δ	k	h	E_∞	a_0	a_1	a_2		
	2,3411	0,2144	0,6416	28 838	3,7767	-0,3837	$1,629 \cdot 10^{-3}$		
Huet-Sayegh	δ	k	h	E_∞	a_0	a_1	a_2	E_0	
	2,4809	0,2193	0,6622	28 743	3,9078	-0,3837	$1,629 \cdot 10^{-3}$	23,30	
2S2P1D	δ	k	h	E_∞	a_0	a_1	a_2	E_0	β
	1,90314	0,19725	0,5544	29 208	3,2878	-0,3837	$1,629 \cdot 10^{-3}$	70,15	31,06

La figure 2.7 présente une comparaison entre ces trois modèles et les données de laboratoire obtenues pour l'enrobé BBSG 0/10. Les valeurs du module sont présentées dans le plan de Cole et Cole et de Black.

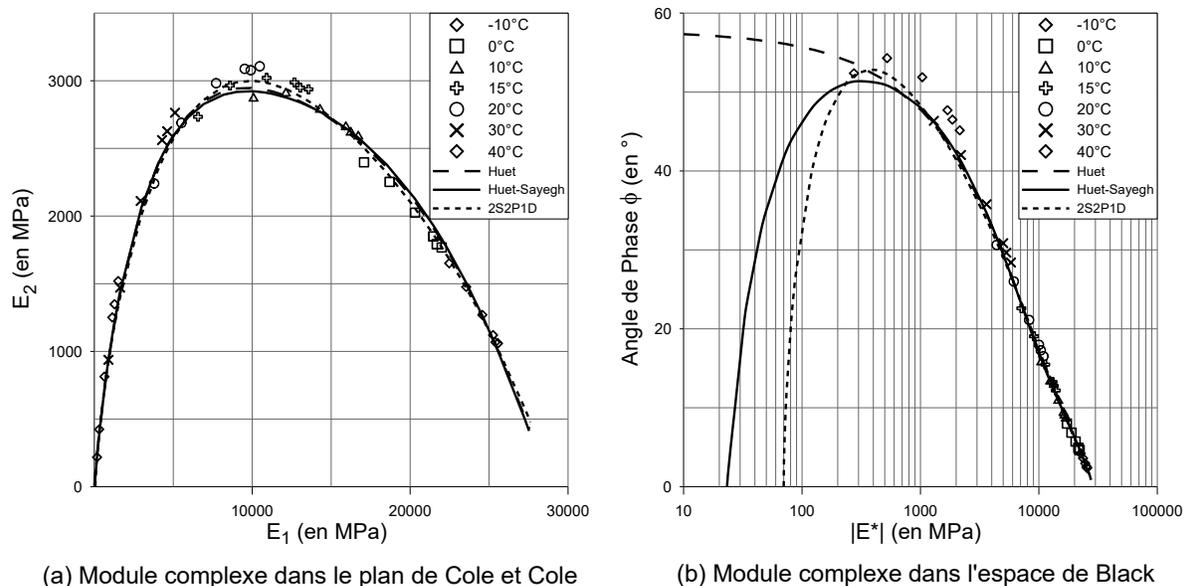


Figure 2.7 : Modélisation du module complexe obtenu expérimentalement avec le modèle de Huet, Huet-Sayegh et 2S2P1D pour l'enrobé BBSG 0/10

Pour les hautes températures et les basses fréquences, l'angle de phase diminue étant donné que les enrobés possèdent un module statique. Comme illustré sur la figure 2.7, le calage pour cette plage d'utilisation est meilleur avec le modèle de Huet-Sayegh et 2S2P1D. Dans le plan de Cole et Cole, les trois modèles présentent des corrélations très bonnes avec les données expérimentales. À des fins de modélisations, ces trois modèles peuvent être utilisés. Le choix du modèle s'effectue en fonction de la plage de fréquences et de températures sous laquelle le matériau sera étudié et en fonction du type de matériau.

2.3.4 Le coefficient de Poisson

D'un point de vue théorique, selon Tschoegl et coll. (2002), le coefficient de Poisson des matériaux viscoélastiques dépend de la température et de la fréquence de sollicitation. Des mesures directes de ν sur éprouvettes cylindriques, sollicitées en traction-compression sinusoïdale, tendent à montrer que sa partie imaginaire est très petite (Charif, 1991). Les travaux de Di Benedetto et coll. (2007) effectués sur un mélange bitumineux précisent que, contrairement aux hypothèses couramment considérées, le coefficient de Poisson n'est ni une constante ni un nombre réel. La figure 2.8 présente un exemple de mesures du coefficient de Poisson effectuées sur un enrobé bitumineux pour 6 températures, sous 6 fréquences de sollicitations. Les résultats montrent que la norme $|\nu^*|$ varie entre 0,25 pour les hautes fréquences ou les basses températures et 0,5 pour les basses fréquences ou les hautes températures. Le coefficient de Poisson diminue lorsque la température diminue ou lorsque la fréquence augmente. Au cours de cette étude, l'angle de phase du coefficient de Poisson a montré un faible retard compris entre 1° et 6° .

Chailleux et coll. (2011) proposent un modèle pour le coefficient de Poisson complexe en fonction du module complexe E^* et des extensions élastiques à l'infini de E^* et de ν^* . Ce modèle est présenté à l'équation 2-13. Cette formule rend compte à la fois de la variabilité de ν par rapport à la fréquence et à la température à travers les variations de E^* .

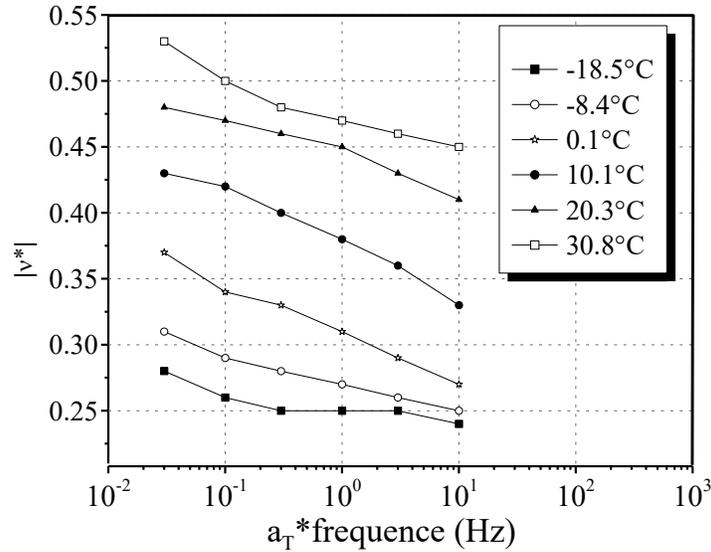


Figure 2.8 : Isotherme du coefficient de Poisson en fonction de la fréquence de mesure (traduit de Di Benedetto et coll., 2008)

$$|\nu^*| = \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \nu_\infty\right) \cdot \frac{E^*}{E_\infty} \quad \text{Équation 2-13}$$

Où : ν_∞ = extension à l'infini du coefficient de poisson $\nu^*(\omega \rightarrow \infty)$

E_∞ = module élastique instantané $E^*(\omega \rightarrow \infty)$ (en MPa)

E^* = module dynamique (en MPa)

2.3.5 Synthèse

Lorsqu'il est soumis à une contrainte, l'enrobé bitumineux a une réponse en déformation qui est fonction de l'amplitude, de la fréquence de la sollicitation ainsi que de la température ambiante. Ce comportement viscoélastique linéaire est modélisable par l'association d'éléments rhéologiques simples. La détermination des paramètres de chaque élément permet une très bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et les courbes théoriques du module dynamique de l'enrobé bitumineux.

2.4 Comportement à long terme des structures de chaussées

Au passage du trafic lourd, la chaussée est soumise à des sollicitations de courtes durées qui sont répétées en réponse aux passages successifs des essieux des véhicules. En fonction du nombre de répétitions de charge et de l'amplitude des sollicitations, de la fissuration et de

l'orniérage peuvent apparaître dans la structure de chaussée. Deux types de fissuration, caractérisés par leur mécanisme d'initiation et de propagation, peuvent être définis. Le premier type de fissuration est engendré par la flexion des couches bitumineuses, imposée lors de chaque passage des charges. Comme illustré à la figure 2.2, cette flexion impose une contrainte en traction et par conséquent une déformation en extension à la base du revêtement. En réponse à la répétition des sollicitations, des microfissures apparaissent et peuvent à long terme aboutir à l'amorce d'une fissure. La succession des charges a pour effet de la propager vers le haut, jusqu'à ce qu'elle atteigne la surface de la chaussée. Cette fissuration est appelée « fissuration de fatigue » ou « fissuration par le bas ». Le second type de fissuration s'amorce dans les premiers centimètres sous la surface de la chaussée et se propage vers la base du revêtement. Ces fissurations sont appelées : « fissuration par le haut » ou « top-down cracking (TDC) ». Les mécanismes à l'origine de ces fissurations sont détaillés par la suite.

Outre la fissuration, les passages successifs des charges peuvent entraîner une déformation permanente du profil transversal de la chaussée. Ce phénomène, appelé orniérage des chaussées, se divise en deux catégories. Dans un premier temps, les déplacements de la surface peuvent provenir du tassement des couches structurales non liées (matériau granulaire) et du sol d'infrastructure. La répétition des contraintes verticales appliquées au sommet de ces couches engendre des déformations permanentes au matériau ce qui forme des ornières dites structurales (ou ornières à grands rayons). La deuxième catégorie d'ornière est issue de l'accumulation des déformations permanentes dans les couches bitumineuses. Sous l'effet des charges lourdes, principalement lorsque le trafic est lent et canalisé et que les températures extérieures sont élevées, l'enrobé bitumineux est amené à fluer. Le fluage des couches de surfaces engendre des ornières à petits rayons, de la largeur des bandes de roulement, qui s'accompagnent d'une formation de bourrelets latéraux. La chaussée est aussi soumise à d'autres dégradations causées principalement par le climat (fissuration thermique, soulèvement au gel), par une mauvaise mise en œuvre (fissuration, nid de poule) ou aussi par une mauvaise formulation des enrobés (ressuage, désenrobage). Ces dernières ne sont pas détaillées par la suite puisqu'elles ne sont pas les conséquences directes des charges du trafic.

2.4.1 Fissuration des enrobés bitumineux

2.4.1.1 Fissuration par fatigue des couches bitumineuses

Des essais de laboratoire permettent d'étudier le comportement en fatigue des couches bitumineuses et consistent à soumettre une éprouvette à des sollicitations répétées et à relever le nombre de cycles nécessaire pour entraîner sa rupture. Ce nombre de cycles est appelé la durée de vie du matériau (noté N) et est associé à une amplitude de déformation (notée ϵ). Les essais sont répétés pour plusieurs niveaux de sollicitations afin de tracer la courbe de fatigue du matériau aussi appelée la courbe de Wöhler. Cette courbe est obtenue en effectuant une régression linéaire dans le domaine logarithmique de l'ensemble des couples (ϵ, N) testés. La figure 2.9 présente un exemple de courbe de fatigue pour le BBSG 0/10 utilisé lors des campagnes expérimentales du projet. Les mesures ont été effectuées suivant la norme NF EN 12697-24 (2012). Trois amplitudes sont testées ($110 \mu\epsilon$, $120 \mu\epsilon$ et $140 \mu\epsilon$) sur quatre éprouvettes dans chaque cas. Plus l'amplitude des déformations est élevée, plus le nombre de cycles nécessaire pour atteindre la rupture est petit, d'où une pente négative. L'interpolation des points expérimentaux permet d'obtenir la courbe de Wöhler dont la forme est détaillée à l'équation 2-14.

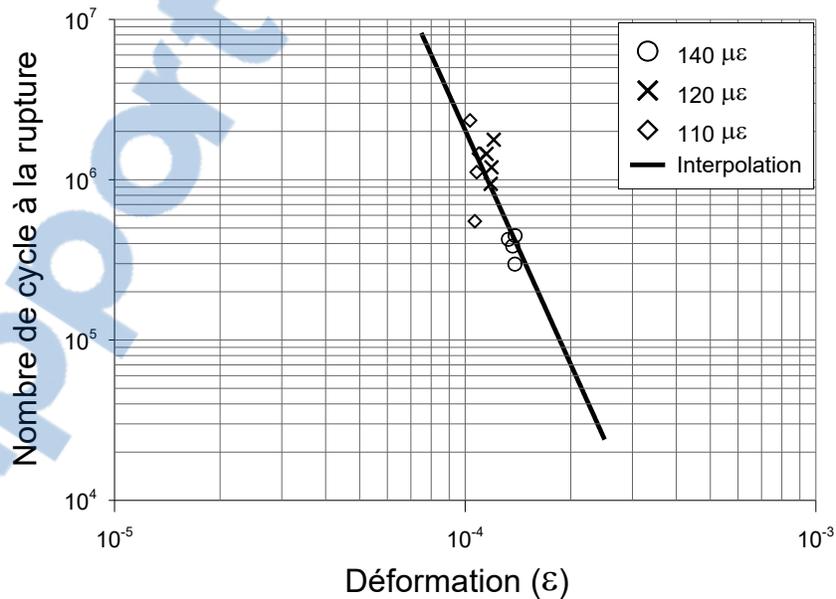


Figure 2.9 : Courbe de fatigue (ou courbe de Wöhler) obtenue pour l'enrobé BBSG 0/10 utilisé lors des campagnes expérimentales

$$\text{Log}(N) = b.\text{log}(\varepsilon) + a \quad \text{Équation 2-14}$$

Où : N = nombre de cycles à la rupture,

ε = amplitude la déformation appliquée pour les essais à une température donnée et une fréquence donnée,

a, b = constantes fonction du type de matériau.

Les deux constantes (notées a et b) sont fonction des propriétés du matériau et des conditions d'essais (température, fréquence de sollicitation, type de sollicitation et forme du signal). Lorsqu'elle est soumise à une sollicitation répétée imposée sous la forme d'une contrainte (force) ou d'une déformation (déplacement), l'éprouvette d'enrobé bitumineux suit trois phases distinctes jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. Ces phases sont identifiables en mesurant pour chaque chargement l'évolution de la norme du module complexe. Un exemple de l'évolution type du module complexe au cours d'un essai est présenté à la figure 2.10.

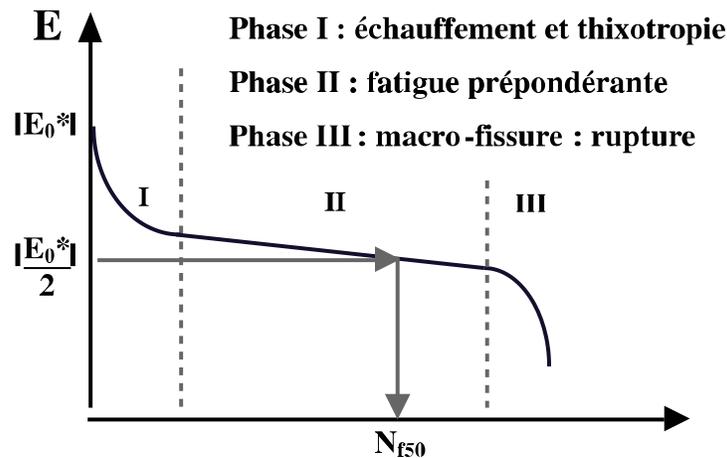


Figure 2.10 : Les trois phases d'un essai de fatigue sur une éprouvette d'enrobé bitumineux (Perraton et coll., 2003)

La phase I, dite phase d'adaptation, se traduit par une chute très rapide de la norme du module. Cette baisse est principalement associée à un phénomène d'échauffement soit une dissipation d'énergie de nature visqueuse et de thixotropie (Di Benedetto et coll., 2011). La phase II, dite phase de fatigue, se caractérise par une décroissance lente et continue du module. Au cours de cette phase, la fatigue est le phénomène prépondérant. Au cours de cette phase, des microfissures se développent de façon homogène dans l'ensemble du volume de l'éprouvette. La phase III dite la phase de rupture se caractérise par une chute très brutale du module. Au

cours de cette phase, les contraintes se concentrent sur les zones endommagées du matériau. L'accumulation des microfissures entraîne l'apparition d'une macro-fissure qui mène à la rupture complète de l'éprouvette.

La résistance en fatigue des enrobés peut être définie par d'autres critères comme la rupture physique de l'éprouvette, la diminution partielle de la norme du module, le critère de la courbe de Weibull, ou encore une approche énergétique. Ces critères sont synthétisés et comparés à la référence Baaj (2002). La résistance en fatigue se définit également comme le nombre de sollicitations nécessaire pour réduire de 50 % le module initial de l'éprouvette. Sur la figure 2.10, celui-ci correspond à la valeur notée N_{F50} , et se situe dans la phase II de la courbe de fatigue. Ce critère est le plus couramment utilisé. Les essais de laboratoire peuvent être complétés en flexion (essais flexion 2 points, 3 points et 4 points), mais aussi en cisaillement, en traction-compression ou encore en traction indirecte. La norme NF EN 12697-24 (2012) préconise un essai de flexion deux points sur éprouvette trapézoïdale, encastree au niveau de la grande base et sollicitée en tête de l'échantillon. La forme trapézoïdale permet une sollicitation loin des points d'encastrement et des points d'application de la force. La sollicitation est généralement effectuée à déplacement imposé avec une force variable au cours de l'essai afin de compenser la perte de module. À l'inverse, il est possible aussi de réaliser des essais contrôlés en force dont le paramètre variable est le déplacement de l'éprouvette.

Les essais de laboratoire sont effectués pour une fréquence et une température fixe. Les enrobés bitumineux étant des matériaux thermosusceptibles, les résultats d'essais dépendent des conditions imposées pendant les mesures. La courbe de Wöhler qui permet de suivre l'évolution de la durée de vie en fatigue du matériau est déterminée en laboratoire pour une condition imposée de température, de fréquence et pour un signal de sollicitation simplifiée. Suivre l'évolution des dommages en laboratoire nécessite une simplification des modes de sollicitation par rapport à ceux que le matériau subit lors de conditions réelles. Les essais de laboratoire ne tiennent par exemple pas compte du temps de repos entre les charges, de la fréquence de sollicitation imposée par des configurations d'essieux variables ni même de la variabilité des matériaux en place et des sols supports. Afin de prendre en compte ces simplifications et de transposer ces essais au dimensionnement des chaussées, des coefficients de calage et de pondération sont introduits dans les modèles de fatigue obtenus en laboratoire.

Les lois de fatigue ou encore modèle de performance ainsi modifiées sont appelées des fonctions de transfert, dont l'équation 2-15, proposée par Perraton et coll. (2011), présente une formulation générale.

$$N_{f,\theta_i} = a_1 \cdot \beta_{a_1} \cdot (\varepsilon_t)^{-a_2 \cdot \beta_{a_2}} \cdot |E_{\theta_i}^*|^{-a_3 \cdot \beta_{a_3}} \left| E_{\theta_{ref}}^* \right|^{-a_4} \quad \text{Équation 2-15}$$

Où : N_{f,θ_i} = durée de vie en fatigue à la température considérée (θ_i),
 θ_{ref} = température de référence,
 $|E_{\theta}^*|$ = norme du module complexe à la température (θ),
 a_i = coefficient de la droite de Wöhler obtenu par essais de laboratoire,
 β_{a_i} = coefficients de calage associé au coefficient a_i ,
 ε_t = déformation en extension.

La méthode française de dimensionnement repose sur la détermination en laboratoire de la valeur ε_6 correspondante à l'amplitude de sollicitation associée à une durée de vie de 1 million de chargements sous une fréquence de 25 Hz et une température de 10 °C. Ces valeurs sont ensuite ajustées en fonction du comportement observé pour des chaussées de même type, en fonction de facteurs de dispersion sur l'épaisseur de la structure et de résultats de fatigue (coefficient de risque ou de fiabilité) et enfin en fonction de la portance de la plateforme support (SETRA-LCPC, 1994). La méthode de conception nord-américaine utilise principalement les fonctions de transfert de la méthode MEPDG obtenues à partir des équations initialement proposées par l'Asphalt Institute et Shell Oil. La loi de fatigue proposée par Shell Oil (Bonnaure et coll., 1980) est détaillée à l'équation 2-16 et celle de l'Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1982 et Hudson et coll., 1968) est présentée à l'équation 2-17.

$$N_f = A_f \cdot F'' \cdot K_{1\alpha} \cdot (\varepsilon_t)^{-5} (E)^{-1,4} \quad \text{Équation 2-16}$$

Où : N_f = durée de vie en fatigue du modèle Shell Oil,
 ε_t = déformation en extension,
 E = norme du module complexe,
 A_f = facteur d'ajustement des données de laboratoire (par défaut =1.0),
 F'' = fonction de l'épaisseur (h_{ac}) et du module (E) de l'enrobé bitumineux,
 $F'' = 1 + (13909 \cdot E^{-0,4} - 1) / (1 + \exp(1,354 \cdot h_{ac} - 5,408))$
 $K_{1\alpha}$ = fonction de l'indice de pénétration (PI) et de la teneur volumétrique effective en bitume de l'enrobé bitumineux (V_b),
 $K_{1\alpha} = (0,0252 \cdot PI - 0,00126 \cdot PI \cdot V_b + 0,00673 \cdot V_b - 0,0167)^5$

La loi de fatigue de Shell Oil permet d'intégrer l'effet des propriétés mécaniques du bitume et de la composition de l'enrobé bitumineux sur la durée de vie en fatigue du matériau. Les propriétés mécaniques de l'enrobé interviennent à la fois dans les valeurs du module, mais aussi à travers la fonction notée $K_{1\alpha}$. L'équation 2-16, présente une forme généralisée pouvant s'appliquer à l'ensemble des structures d'un réseau routier puisqu'elle tient compte de l'épaisseur du revêtement bitumineux grâce à la fonction F'' . Cette fonction de pondération fait intervenir le module de l'enrobé bitumineux ainsi que son épaisseur.

$$N_f = 0,00432 \cdot 10^M \cdot (\varepsilon_t)^{-3,291} (E)^{-0,854} \quad \text{Équation 2-17}$$

Où : N_f = durée de vie en fatigue du modèle Asphalt Institute (modèle MS-1),
 ε_t = déformation en extension,
 E = norme du module complexe,
 M = fonction de la teneur en vide (V_a) exprimée en % et de la teneur en bitume (V_b) exprimée en % de l'enrobé bitumineux,
 $M = 4,84 \cdot (V_b / (V_a + V_b) - 0,69)$.

La loi de fatigue de l'Asphalt Institute intègre elle aussi une fonction M qui modifie la durée de vie en fonction de la teneur en bitume et en vide de l'enrobé bitumineux. Cette variable est donc dépendante de la formulation de l'enrobé. L'utilisation d'un bitume modifié (bitume polymère) ne peut cependant pas être directement intégrée puisque le type de bitume ne fait pas partie des paramètres d'entrée. Cette variable ne sera qu'indirectement intégrée par les valeurs de module complexe obtenues. À partir de ces lois de fatigue, chaque gestionnaire et concepteur routier peut imposer localement un paramètre de calage à l'équation afin de l'adapter aux conditions climatiques locales, aux conditions de charge et aux types de matériau utilisés. La méthode de conception MEPDG recommande des valeurs de calage afin de minimiser les erreurs relevées entre les prévisions et les suivis de performance actuellement effectués sur le réseau. Dans une optique de calibration nationale pour l'ensemble des États-Unis, la formule de l'Asphalt Institute a été modifiée afin d'intégrer des coefficients de calage nationaux. La fonction de transfert correspondante est présentée à l'équation 2-18. Les étapes de détermination des coefficients de calage pour la méthode MEPDG sont détaillées à la référence NCHRP (2004). Il en ressort que β_{f2} et β_{f3} sont des constantes valant

respectivement 1,2 et 1,5. Le coefficient β_{f1} est une fonction de l'épaisseur de la couche de revêtement bitumineux. La fonction de transfert finale est présentée à l'équation 2-19.

$$N_f = 0,00432 \cdot 10^M \cdot \beta_{f1} \cdot (\varepsilon_t)^{-3,291 \cdot \beta_{f2}} (E)^{-0,854 \cdot \beta_{f3}} \quad \text{Équation 2-18}$$

Où : N_f =durée de vie en fatigue,
 ε_t = déformation en extension,
 E = norme du module complexe,
 $\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ = coefficients de calage de la fonction de transfert,
 M =fonction de la teneur en vide (V_a) exprimée en % et de la teneur en bitume (V_b) exprimée en % de l'enrobé bitumineux,
 $M = 4,84 \cdot (V_b / (V_a + V_b) - 0,69)$.

$$N_f = 0,00432 \cdot 10^M \cdot \beta'_{f1} \cdot (\varepsilon_t)^{-3,9492} (E)^{-1,281} \quad \text{Équation 2-19}$$

Où : N_f =durée de vie en fatigue,
 ε_t = déformation en extension,
 E = norme du module complexe,
 $\beta'_{f1} = \beta'_{f1} \cdot k'_1$ et k'_1 est fonction de l'épaisseur de la couche bitumineuse (h_{ac}),
 $k'_1 = 1 / (0,000398 + (0,003602 / (1 + \exp(11,02 - 3,49 \cdot h_{ac}))))$,
 β'_{f1} = Coefficient de calage (valeur numérique)
 M = fonction de la teneur en vide (V_a) exprimée en % et de la teneur en bitume (V_b) exprimée en % de l'enrobé bitumineux,
 $M = 4,84 \cdot (V_b / (V_a + V_b) - 0,69)$.

La détermination des lois de fatigue en laboratoire utilise un signal sinusoïdal dont l'amplitude correspond à la déformation en extension rencontrée à la base du revêtement. Plusieurs auteurs ont étudié l'effet du signal de chargement sur l'endommagement en fatigue des matériaux à l'aide d'essais de laboratoire (Bodin et coll., 2009 ; Breysse et coll., 2003 ; Chatti, Karim et El Mohtar, 2004 ; Himeno et Kogo, 2008 ; Salama et Chatti, 2010). Ces travaux ont été principalement effectués pour quantifier l'impact des charges multiessieux sur l'endommagement des chaussées. Plusieurs paramètres tels que la fréquence du signal, sa forme (sinusoïdale, double pic, triangulaire), son nombre de pics et le temps de repos entre chaque cycle peuvent réduire ou multiplier la durée de vie de l'éprouvette d'un facteur 3. Augmenter les temps de repos entre les cycles de chargement permet à l'enrobé bitumineux de s'autoréparer par cicatrisation des fissures. Himeno et Kogo (2008) ont noté une

augmentation de 50 % à 150 % de la durée de vie lorsqu'une période de repos, respectivement de 1 seconde et de 10 secondes, était introduite à un cycle de chargement sinusoïdal de fréquence 5 Hz et d'amplitude de 400 $\mu\epsilon$. Au cours de ces mêmes essais, les durées de vie en fatigue des éprouvettes sous chargement triangulaire étaient 60 % plus élevées que celles sous un chargement sinusoïdal de même amplitude et de même fréquence. Ces différences s'expliquent principalement par la vitesse à laquelle la déformation est appliquée, mais aussi à l'aire sous le signal. Homsî (2011), propose un plan d'expérience afin d'identifier les paramètres indépendants caractérisant un signal de chargement réel. À partir de seize paramètres initialement identifiés, basés sur la forme du signal, son intensité et sa durée, quatre sont apparus indépendants. Ces quatre paramètres sont : le niveau de déformation (ϵ), le nombre de pics (N_p), l'aire sous le signal de chargement divisée par le niveau de déformation et par la durée du signal de chargement (\hat{A}_n) et finalement la durée du signal de chargement divisée par le nombre de pics (\bar{D}). Homsî (2011) propose un modèle de fatigue multilinéaire à partir de ces quatre paramètres et une variante au modèle en y ajoutant un nouveau paramètre (W_d = l'énergie dissipée sur la moitié d'un signal de chargement). Le modèle initial est détaillé à l'équation 2-20 et la variante à l'équation 2-21.

$$\log(N_f) = a. \log(\epsilon) + b. \log(N_p) + c. \hat{A}_n + d. \bar{D} + e \quad \text{Équation 2-20}$$

$$\log(N_f) = a. \log(W_d) + b. \log(N_p) + c. \hat{A}_n + d. \bar{D} + e \quad \text{Équation 2-21}$$

Où : N_f = durée de vie en fatigue,

N_p = nombre de pics,

\hat{A}_n = aire sous le signal de chargement divisée par le niveau de déformation et par la durée du signal de chargement,

\bar{D} = durée du signal de chargement divisée par le nombre de pics,

W_d = énergie dissipée sur la moitié d'un signal de chargement,

a, b, c, d et e = coefficients des modèles de fatigues obtenus en laboratoire.

L'approche énergétique, comme ici l'usage de l'énergie dissipée, fait partie des méthodes dites continues d'analyse du signal. Plusieurs auteurs ont analysé les différentes énergies mises en jeu au cours des essais de laboratoire afin de caractériser l'endommagement par fatigue des chaussées flexibles (Ghuzlan et Carpenter, 2000, Salama et Chatti, 2010, Shen et Carpenter, 2007, Van Dijk et Visser, 1977). L'évaluation énergétique est basée sur les

propriétés viscoélastiques des matériaux bitumineux. Lorsqu'il est soumis à une force, la déformation de l'enrobé bitumineux augmente au cours du temps. Lorsque le chargement n'est plus appliqué, la déformation diminue et tend vers une valeur nulle. Une déformation résiduelle persiste cependant. Le tracé de la contrainte en fonction de la déformation présente donc une boucle d'hystérésis. L'aire de cette boucle représente l'énergie dissipée au cours d'un cycle de chargement. L'équation 2-22 permet de calculer la valeur de cette énergie pour un matériau linéaire viscoélastique soumis à un chargement cyclique sinusoïdal. Les recherches sur l'énergie dissipée à chaque cycle ont montré que la fatigue des matériaux était directement liée à ce paramètre. Ghuzlan et Carpenter (2000) ont défini le ratio de l'énergie dissipée (équation 2-23) et montré que ce paramètre représente le pourcentage de l'énergie dissipée dont la variation est l'endommagement du matériau.

$$W_i = \pi \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sin(\varphi_i) \quad \text{Équation 2-22}$$

$$\text{DER} = (W_{i+1} - W_i) / W_i \quad \text{Équation 2-23}$$

Où : W_i = énergie dissipée au cycle de chargement n° i,
 σ_i = contrainte au cycle de chargement n° i,
 ε_i = déformation au cycle de chargement n° i,
 φ_i = angle de phase au cycle de chargement n° i,
 DER = ratio de l'énergie dissipée.

Le principal avantage du calcul énergétique est d'exploiter l'ensemble du signal de déformation et de tenir compte à la fois de la variation de la contrainte et de la déformation dans le temps. L'accessibilité à ces mesures est directe par la lecture des capteurs sur les éprouvettes et les machines de laboratoire. Ceci n'est cependant pas le cas lorsque les mesures sont prises in situ au passage des charges lourdes. Le calcul nécessite une mesure simultanée de la contrainte et de la déformation. Les mesures se doivent aussi d'être correctement calibrées et de présenter une bonne précision afin de ne pas engendrer d'erreurs dans le calcul énergétique. L'évaluation des dommages par une approche énergétique possède comme avantage de pouvoir s'appliquer à la fois à la fissuration s'amorçant à la base du revêtement et à celle s'initiant proche de la surface.

2.4.1.2 La fissuration s'amorçant dans le haut de la couche bitumineuse

Dès la fin des années 1990, plusieurs observations effectuées sur des chaussées épaisses ont mis en évidence un type de fissuration dont l'origine se localisait proche de la surface et qui se propageait vers le bas. Cette propagation pouvant s'arrêter à une profondeur donnée dans la couche de revêtement ou bien se poursuivre à travers l'ensemble de la structure bitumineuse. Ces observations ont été relevées à la fois en Europe, en Amérique, en Afrique et en Asie (Roque et coll., 2010). Ce mécanisme de rupture ne peut pas s'expliquer en considérant l'approche classique associée au calcul de la fatigue en bas de la couche. En effet, l'approche classique considérant une charge circulaire uniforme dont les pressions de contact sont verticales à la surface donne un maximum de déformation à la base des couches bitumineuses. Les déformations horizontales calculées dans les premiers centimètres de la structure sont inférieures à celles en bas de couche. Les amplitudes des contraintes et des déformations calculées proche de la surface sont alors trop faibles pour engendrer un endommagement susceptible de créer une fissure du matériau. Afin d'expliquer ce phénomène, plusieurs recherches se sont orientées à expliquer, dans un premier temps, l'initiation des fissures puis dans un second temps, leur mode de propagation. Pour ces deux étapes de la fissuration, les recherches se sont orientées à reconsidérer l'ensemble des hypothèses posées au cours de l'approche traditionnelle et vérifier leur applicabilité pour l'analyse des phénomènes de surface. Les différents outils de recherche à disposition ainsi que les mécanismes responsables de la fissuration et les facteurs contribuant ou limitant ce type de fissuration sont ici présentés.

- Les outils de recherche :

Les outils d'analyse de la fissuration des chaussées sont les suivants : (a) l'observation et la prise de mesure in situ afin d'identifier les facteurs susceptibles d'entraîner la dégradation de la structure, (b) l'analyse théorique des phénomènes par l'utilisation d'outils de calculs afin d'obtenir et de définir des critères pouvant expliquer la rupture des matériaux, (c) les essais de laboratoire permettant de définir les paramètres physiques et les lois de comportement des différents matériaux et aussi de valider les critères développés et finalement (d) les mesures in situ afin de calibrer et/ou de valider les modèles développés.

Les observations et les prises de mesure in situ ont été particulièrement utilisées à l'origine pour l'identification des causes et des facteurs aggravant le phénomène. Les observations ont permis de localiser les zones affectées par la fissuration ainsi que le type de fissure (taille, orientation, profondeur) et leur vitesse d'évolution. Les bases de données des chaussées affectées par ce type de fissuration ont permis de concentrer les recherches sur l'effet des caractéristiques de la structure (épaisseur, type de bitume, âge de la chaussée, méthode de construction), de son environnement (climat, température du revêtement), et des types de charges rencontrées (caractéristique des pneus et des camions).

L'analyse théorique de la fissuration s'amorçant proche de la surface vise à quantifier la distribution des contraintes (contrainte de traction et contrainte de cisaillement) et des déformations dans les premiers centimètres dans la structure. L'approche par éléments finis a été la plus exploitée pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'analyse par éléments finis permet une fine discrétisation tridimensionnelle de la structure sous le pneu et ainsi l'identification des zones critiques dans la couche bitumineuse. Cette approche permet de plus d'intégrer les lois de comportement et les lois d'endommagement des matériaux et de modéliser l'initiation et la propagation de la fissuration. En fonction de la complexité des modèles et des temps de calcul associés, il est ainsi possible d'opérer un grand nombre d'analyses paramétriques sur les différentes propriétés des matériaux. L'effet des conditions extérieures ainsi que l'effet des charges s'intègrent au modèle en paramétrant les conditions initiales et les conditions limites des modèles. Alors que cette approche vise à analyser les phénomènes à l'échelle de la structure de chaussée, Wang, L. et coll. (2003) ont étudié le phénomène à l'échelle de la microstructure du matériau. Pour cela, l'analyse considère chaque granulat comme un élément ayant des propriétés physiques et morphologiques qui lui sont propres. La cohésion entre ces éléments est assurée par le liant bitumineux ayant lui aussi des propriétés physiques définies. Afin de mesurer la distribution des contraintes et des forces sous différentes sollicitations, une analyse micromécanique et des calculs par éléments discrets ont été effectuées à l'échelle du matériau. Ces analyses théoriques ont été complétées par une série d'essais en laboratoire visant à utiliser l'imagerie sur des coupes d'échantillons d'enrobé bitumineux endommagés. L'analyse par imagerie permet d'identifier les zones fissurées ou celles présentant des déformations permanentes. Elle vise à effectuer plusieurs coupes sur un même échantillon afin de mesurer le déplacement (translation et rotation) des particules et ainsi calculer les

déformations permanentes associées. Bien que l'étude portait initialement sur l'analyse de l'orniérage, les conclusions ont été exploitées pour apporter des éléments de réponse concernant la fissuration s'amorçant dans le haut des couches.

Les essais de laboratoire permettent de déterminer les cinq propriétés physiques suivantes : les lois de fluage et le module complexe pour une plage étendue de températures, la résistance à la traction, la ténacité (coefficient d'intensité de contrainte critique) et la résistance à la fatigue. Ces paramètres mécaniques ainsi que les lois de comportement sont obtenus par des essais normalisés et sont par la suite intégrés aux outils de calcul afin de prédire l'apparition et la propagation de la fissuration.

Les mesures in situ sont principalement utilisées pour valider ou calibrer les modèles définis précédemment. Ces mesures se divisent en deux catégories. La première catégorie correspond à la prise de mesure des déformations et des contraintes s'exerçant au contact entre le pneu et la chaussée. Les principales conclusions de ces études sont détaillées à la section 2.6.3. Ces données sont utilisées dans les outils de calcul comme étant les conditions aux limites imposées à la surface de la structure. L'effet du type de pneu ainsi que ses caractéristiques physiques et mécaniques influence la distribution de la charge au niveau de l'interface entre le pneu et la chaussée. La seconde catégorie correspond à la mesure directe des déformations ou des contraintes par l'implantation de capteurs dans les premiers centimètres sous la surface. Les études portant sur ces mesures expérimentales restent encore limitées en raison de la difficulté à obtenir une lecture précise et fiable de la mesure à un tel niveau dans la structure. Cette problématique et l'état des connaissances sur l'instrumentation des chaussées sont présentés à la section 2.8.

- Les mécanismes responsables de la fissuration :

Le risque de fissuration s'amorçant dans le haut de la structure est influencé par plusieurs facteurs et surtout par leur association (Myers et coll., 1998, Holewinski et coll., 2003 et Collop et Roque, 2004 tiré de Wistuba et coll., 2006). En fonction des mécanismes responsables de leur initiation, la fissure peut être orientée transversalement ou longitudinalement à l'axe de la chaussée. Des fissures de surface ont été observées à la fois à l'extérieur et sous les sentiers de roues. Les origines de ces fissures sont les suivantes :

- Myers et coll. (1998) ont conclu que les contraintes de traction s'exerçant sous les nervures du pneu associées aux contraintes de cisaillement des pneus radiaux sont responsables de la fissuration de surface. Cette étude montre que l'épaisseur de la structure n'a que peu d'impact sur l'amplitude des contraintes de traction générées en surface.
- À l'échelle de la microstructure, Wang, L. et coll. (2003) ont montré que l'agencement du squelette granulaire de l'enrobé bitumineux ainsi que la résistance du bitume sont deux facteurs ayant une influence sur la résistance à la fissuration. Les analyses effectuées dans cette étude montrent que la fissuration ne s'amorce pas en surface, mais à une faible distance sous la surface (de l'ordre du centimètre) et qu'elle est fonction de la configuration des particules ainsi que de la distribution en vides dans le matériau.
- Les contraintes imposées par le passage des charges peuvent excéder localement la résistance en traction du matériau et créer des microfissures. Au travers des modèles par éléments finis, les contraintes verticales et tangentielles générées au contact entre le pneu et la surface ont été intégrées au calcul (Wang, H. et Al-Qadi, 2010). Cette approche tridimensionnelle montre que le potentiel de rupture est fonction de l'association de la contrainte en traction et de la contrainte de cisaillement. La fissuration ne se développe pas nécessairement là où la contrainte en traction est la plus élevée. Dans le cas des chaussées épaisses, les modèles suggèrent que la déformation en cisaillement au niveau des arêtes des pneus est plus importante que l'extension à la base du revêtement. Wang, H. et Al-Qadi (2009) ont utilisé la contrainte octaédrique ainsi que l'énergie de distorsion afin de tenir compte de l'ensemble de la sollicitation qui s'exerce sous le pneu. Cette approche confirme que l'apparition de la fissuration se situerait dans les premiers centimètres sous le pneu et non directement en surface.
- Les changements brutaux de gradients de température en surface de la couche bitumineuse entraînent des retraits thermiques qui peuvent être responsables de fissures transversales. Cet effet est d'autant plus néfaste lorsque les températures sont basses puisque le potentiel de réparation ainsi que la viscosité du matériau sont faibles dans cette plage de températures. En fonction de la géométrie de la structure, les contraintes longitudinales engendrées par le changement de température peuvent être

très élevées. En les associant aux contraintes imposées par la charge, elles peuvent provoquer une rupture de l'enrobé à l'extérieur des sentiers de roues. En fonction des conditions climatiques, ce type de fissures est localisé entre 400 mm et 900 mm à l'extérieur de l'axe de la roue.

- En réponse à plusieurs observations in situ, Svasdisant et coll. (2002) ont conclu que la fissuration par le haut serait engendrée par les contraintes en traction imposées par la charge. Ce phénomène est accentué par la température, mais aussi par l'âge du bitume (son oxydation) et par plusieurs facteurs associés à la construction des structures (ségrégation des matériaux et endommagement associé au compactage). Le vieillissement du bitume réduisant la résistance à la fissuration du matériau, les charges sont plus susceptibles d'entraîner une rupture en surface de l'enrobé. Les travaux effectués dans le cadre du projet NCHRP 1-42 (Roque et coll., 2010) présentent une synthèse de l'ensemble des phénomènes contribuant à la fissuration par le haut. Les problèmes associés au mélange bitumineux comme une mauvaise granulométrie, une dureté trop élevée aux basses températures, une faible résistance à l'eau, une faible résistance à la rupture y sont détaillés. Ces travaux étudient également l'effet d'une mauvaise compaction de la ségrégation ainsi que des problèmes environnementaux comme l'ensoleillement, la contrainte thermique ou le vieillissement du matériau.

- La viscosité des matériaux bitumineux :

Tamagny et coll. (2004) ont effectué plusieurs séries de calculs à l'aide du module de calcul CVCR (Chaussée Viscoélastique sous Charge Roulante) du logiciel CESAR-LCPC au sein duquel ils ont intégré les paramètres viscoélastiques des couches bitumineuses. Le logiciel permet de simuler le passage d'une charge roulante et d'extraire l'ensemble des contraintes et des déformations au cours du temps. L'étude compare les calculs de la contrainte longitudinale dans le cas d'une couche bitumineuse élastique et d'une couche viscoélastique. Dans le premier cas, la contrainte reste négative (compression) contrairement au second cas où celle-ci devient positive (traction) après le passage de la charge. En conclusion de l'étude, les auteurs précisent que l'amplitude de la contrainte après le passage de la charge et située à 1,65 cm de profondeur est responsable de la fissuration par le haut. Il est donc ici recommandé de considérer le caractère viscoélastique des matériaux afin d'expliquer le phénomène.

Afin d'étudier les différents mécanismes mis en jeu proche de la surface et d'identifier les zones critiques où la fissuration s'amorcerait, plusieurs études (Baek et coll., 2012 ; Kim et coll., 2008) ont été menées afin d'intégrer à des calculs par éléments finis le modèle d'endommagement viscoélastique continue VECD. Cette démarche permet une modélisation des zones endommagées tout en permettant un suivi des paramètres mécaniques accompagnant l'endommagement. Le modèle VECD est construit suivant trois principes. Le premier principe repose sur une modélisation viscoélastique du comportement du matériau. Le second principe repose une approche continue du dommage afin d'intégrer l'évolution des microfissurations à la résistance globale du matériau. Le dernier principe est l'intégration de l'équivalence temps-température à l'évolution du dommage afin d'évaluer l'influence conjointe du temps et de la température. La mise en place de ce modèle permet donc de tenir compte du caractère viscoélastique des matériaux et intègre également la notion de temps et de non-homogénéité des matériaux. Ce programme permet l'intégration des lois de vieillissement, des paramètres d'auto régénération des enrobés et des modèles de performances en ce qui concerne l'apparition et la propagation des fissures. L'utilisateur peut compléter l'étude en imposant des contraintes tridimensionnelles au niveau de l'interface entre le matériau et le pneu. Ce programme est donc très complet, mais requiert un nombre d'intrants importants ainsi qu'une bonne connaissance des logiciels de modélisation.

2.4.1.3 Synthèse

L'analyse de la fissuration par fatigue des matériaux nécessite une bonne caractérisation de l'ensemble du signal de déformation se développant à la base du revêtement et cela pour chaque condition de charge. L'ensemble des lois d'endommagement recommande une calibration des modèles afin d'associer les propriétés des matériaux, les conditions environnementales et les paramètres de charges et cela pour chaque type de structure de chaussée. La caractérisation de la fissuration par le haut se divise en deux catégories. La première vise à identifier les mécanismes responsables de la fissuration et la seconde vise à déterminer les facteurs contribuant et favorisant la fissuration. Les caractéristiques de charge, les propriétés des matériaux, les conditions environnementales ainsi que la structure de la chaussée et ses techniques de construction sont tous des facteurs à prendre en compte afin d'identifier les mécanismes responsables de la fissuration. Dans le cadre du projet, l'analyse

des phénomènes de surface est limitée à étudier : (a) l'impact de la viscoélasticité des matériaux ; (b) l'effet des charges ; (c) l'effet de la structure de chaussée. Pour l'ensemble de ces études, les facteurs gouvernant la fissuration sont quantifiés à l'aide de plusieurs modélisations préalablement déterminées pour le projet.

2.4.2 Orniérage des chaussées

Au passage répété des charges lourdes, des ornières se développent en surface de la structure de chaussée. Elles se classent en trois catégories : les ornières structurales, les ornières de fluage et les ornières d'usure. L'orniérage total de la structure est la somme de ces trois types d'ornières.

2.4.2.1 Ornière structurale

Lorsque les matériaux granulaires et les sols sont soumis à des contraintes externes, ils ont un comportement élastoplastique. L'application d'une charge sur ces matériaux génère une déformation totale qui se divise en deux composantes : la déformation réversible (réponse élastique) et la déformation permanente (déformation plastique). L'orniérage structural apparaît en surface de la structure de chaussée lorsque la déformation permanente s'accumule au niveau des matériaux granulaires et des sols. Ce type d'ornière est aussi appelé ornière à grand rayon. Les facteurs influençant la déformation permanente d'un matériau granulaire sont les suivants (Poupart, 2013) : la rotation des contraintes au passage de la charge, le niveau de contraintes appliqué ainsi que l'historique des contraintes, les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux granulaires telles que la masse volumique sèche, la granulométrie, la morphologie et la texture des particules granulaires et enfin les conditions environnementales et la teneur en eau. La durée de vie d'une chaussée en orniérage est directement liée à la déformation verticale appliquée au sommet de la couche du matériau considéré. Les différentes lois d'endommagement liées à la déformation permanente se présentent sous la forme donnée à l'équation 2-24.

Plusieurs modèles existent comme celui de l'Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1982), le modèle du logiciel de dimensionnement MnPave (Minnesota Department of Transportation, 2012) ou encore le modèle de Roadent (Timm et coll., 1999). Pour chacun de ces modèles, le nombre d'applications de charge admissible avant la rupture est associé à une profondeur

d'ornièrre maximale. Cette valeur est souvent prise égale à 12,7 mm.

$$N_R = C_R * K_{R1} \cdot \varepsilon_V^{K_{R2}} \quad \text{Équation 2-24}$$

Où : N_R = nombre de cycles de chargement appliqués jusqu'à la rupture par déformation permanente,
 ε_V = déformation verticale au sommet du sol considéré,
 K_{R1} et K_{R2} = paramètres de conception fonction des propriétés du matériau,
 C_R = facteur de correction ou de calibration du modèle

2.4.2.2 Ornière de fluage

Les ornières par fluage s'observent principalement sur des voies où le trafic est lent et canalisé comme des voies urbaines d'autobus ou sur des zones à fortes charges comme des secteurs portuaires ou industriels. Leurs apparitions sont associées aux températures élevées pouvant être mesurées au cours des mois estivaux. Les profondeurs d'ornières associées au fluage sont particulièrement surveillées, car elles réduisent considérablement le confort au roulement ainsi que la sécurité des usagers de la route (risque d'aquaplanage, perte de contrôle du véhicule). Les ornières de fluage, aussi appelées ornière de faible rayon, sont présentes au niveau des sentiers de roues et sont engendrées par l'accumulation de déformations permanentes dans les premiers centimètres du revêtement. Les ornières de fluage se caractérisent principalement par une dépression au niveau des sentiers de roues accompagnée de l'apparition de bourrelets latéraux de part et d'autre de cette dépression. D'un point de vue du matériau, les facteurs influençant la formation des ornières dans les couches bitumineuses sont les suivants (Sohm, 2011) : la composition minérale des matériaux (granulométrie et squelette granulaire, fraction de sable, portion fine, forme et texture des granulats), les propriétés du liant bitumineux (nature du liant et teneur en liant), et la compacité du mélange. La température est un facteur déterminant dans l'apparition des ornières de fluage. Lorsque les températures augmentent, le liant bitumineux perd de sa rigidité. La rigidité de mélange ainsi que sa cohésion diminuent, entraînant une augmentation de sa susceptibilité aux déformations permanentes. Enfin, le dernier paramètre responsable du fluage des matériaux est le trafic des charges lourdes. Le fluage est fonction de la vitesse de la charge, de l'intensité des charges transportées, et aussi des fréquences de sollicitations.

Les modèles de prédictions de l'orniérage sont basés sur des lois d'accumulation du dommage au passage des charges. Plusieurs lois de prédiction de l'orniérage permettent de déterminer le nombre de passages admissible avant d'atteindre la profondeur d'ornière critique. La méthode de conception MEPDG de l'AASHTO 2002 (ARA, 2004) suggère la fonction de transfert détaillée à l'équation 2-25. La déformation permanente est donc directement liée à la température et à la déformation verticale appliquée par le passage de la charge.

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = -3,74938 + 0,4262 \cdot \log(N_r) + 2,02755 \cdot \log(T) \quad \text{Équation 2-25}$$

Où : N_R = nombre de répétitions correspond à une déformation de ε_p ,
 ε_p = critère d'accumulation des déformations permanentes,
 ε_r = déformation réversible,
 T = température du revêtement.

L'approche analytique proposée par Deacon et coll. (2002) suggère de considérer à la fois la contrainte de cisaillement, et la déformation en cisaillement. La relation proposée est présentée à l'équation 2-26. La contrainte de cisaillement ainsi que la déformation en cisaillement étant fonction de la charge et de la température, la détermination de l'orniérage final est effectuée par calcul itératif pour chaque chargement. La détermination de la déformation permanente de cisaillement est donc basée sur une loi de cumul des dommages. La profondeur d'ornière est déterminée à l'aide d'un paramètre la reliant à la déformation permanente en cisaillement.

$$\gamma^i = a \exp(b \cdot \tau) \cdot \gamma^e \cdot n^c \quad \text{Équation 2-26}$$

Où : γ^i = déformation permanente de cisaillement à 50 mm de profondeur,
 τ = contrainte de cisaillement déterminée à 50 mm par des calculs numériques,
 γ^e = déformation élastique de cisaillement,
 n = nombre de répétitions de chargement,
 a, b, c = coefficients de régression du modèle en fonction des matériaux.

2.4.2.3 Synthèse

Les charges lourdes sont directement responsables de l'orniérage structural et du fluage des matériaux bitumineux. Lorsque les conditions environnementales et les paramètres de charge sont amenés à changer en surface, la distribution des contraintes dans la structure est

également amenée à changer. Afin de déterminer l'effet des différents types de charges sur l'orniérage des chaussées, il est nécessaire de mesurer ou de calculer la contraction et le cisaillement qui s'exercent dans les premiers centimètres de la couche bitumineuse.

2.5 Essais caractérisant la réponse mécanique et à long terme de la structure de chaussée

La réponse mécanique instantanée et la réponse à long terme des structures de chaussée peuvent être déterminées à l'aide de plusieurs méthodes d'analyses. Ces méthodes sont classées en cinq principales catégories en fonction des bénéfices qu'elles apportent par rapport à leur coût d'exploitation (Hugo et coll., 1991). Ces catégories sont présentées à la figure 2.11. Tout d'abord, les modélisations par ordinateur sont de faibles coûts, mais leurs contributions scientifiques sont fonction du jugement de l'ingénieur. Les coûts et la contribution scientifique des essais de laboratoire ainsi que des essais routiers en vraie grandeur sont jugés de coûts moyens et nécessitent aussi une interprétation des résultats en fonction des conditions d'essais. La généralisation des résultats qui en découle nécessite souvent l'appui de simulations numériques ou bien de calibration à l'aide d'essais à long terme. Les suivis de performance à long terme sont les mesures ayant le plus grand bénéfice expérimental, mais les coûts associés sont importants car ils nécessitent une longue période de mesures. Ces mesures servent néanmoins de base à la vérification de modèles et de lois de comportement développés à l'aide d'essais de courte durée et de simulations numériques. Entre les deux se situent les essais de chargements accélérés. Ces mesures nécessitent des coûts plus faibles que le suivi de performances à long terme, mais apportent des contributions significatives et permettent d'évaluer l'influence spécifique de certains paramètres de conception. Ces mesures simulent la durée de vie de la chaussée en très peu de temps. Une interprétation est ensuite requise afin de généraliser les résultats. Au cours de ce projet, des essais sont effectués à la fois sur des sites expérimentaux et avec un simulateur de chargement accéléré afin d'obtenir la réponse instantanée de la chaussée pour plusieurs conditions environnementales et pour plusieurs paramètres de charges. Cette démarche permet d'assurer un bon contrôle de l'effet des paramètres environnementaux sur les résultats. En parallèle, plusieurs essais de laboratoire viennent compléter la démarche expérimentale afin d'identifier les paramètres et les lois de comportements pour les modélisations du projet.

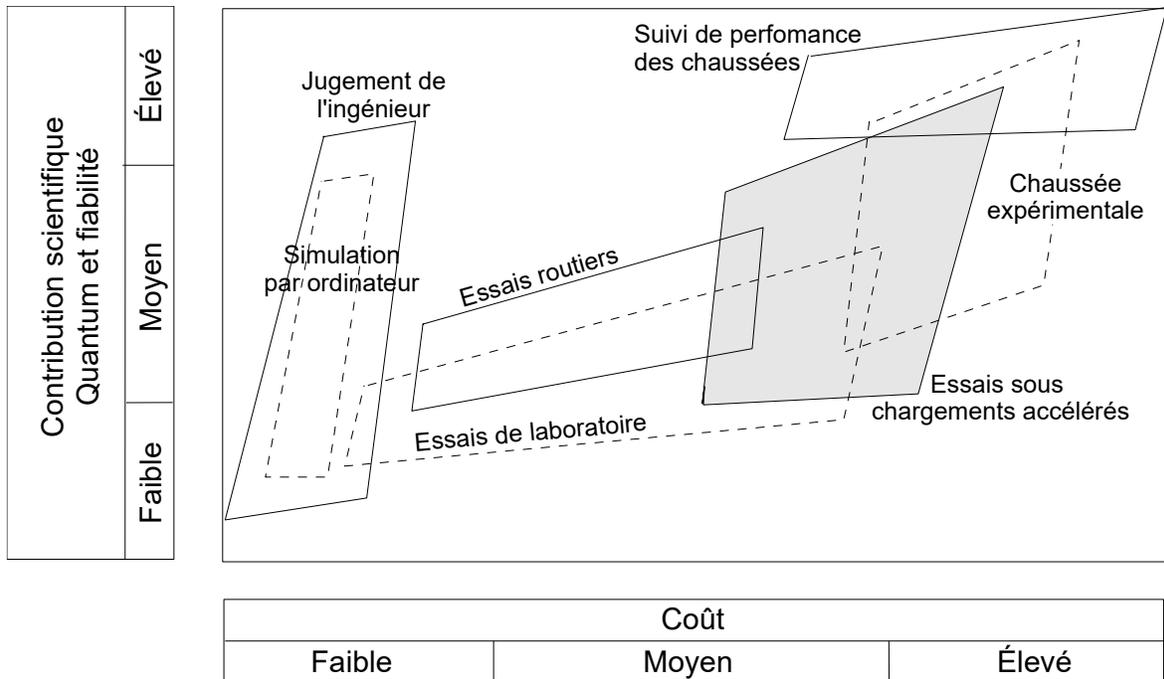


Figure 2.11 : Investissement financier et contribution scientifique (adapté et traduit de Hugo et coll. (1991))

2.5.1 Essais de laboratoire

2.5.1.1 Étude des sols et des matériaux granulaires

L'essai en cellule triaxiale, à chargements répétés par une presse est l'un des essais les plus utilisés pour caractériser la déformation permanente dans les sols. Il permet d'évaluer rapidement l'influence des propriétés physiques et mécaniques des matériaux sur leur résistance face aux déformations permanentes. La réponse élastique des sols et des matériaux granulaires peut être caractérisée à travers la détermination du module réversible (noté M_R). Le module réversible est défini comme étant le produit entre la contrainte déviatorique appliquée et l'inverse de la déformation réversible. Les contraintes appliquées sur le matériau, la masse volumique, la granulométrie, la teneur en fine, la teneur en eau, le type de granulat ainsi que la forme des particules sont des paramètres qui influencent la valeur de ce module (Bilodeau, 2009). Il est l'un des paramètres d'entrée pour le calcul de la distribution des contraintes et des déformations dans une structure de chaussée. Plusieurs essais de laboratoire permettent d'obtenir cette valeur afin de l'intégrer aux outils de calcul. Le premier type d'essais correspond à des mesures effectuées en cellule triaxiale qui visent à faire varier les contraintes appliquées sur le matériau. Uzan (1985) suggère de caractériser le module

réversible des matériaux en fonction de la contrainte totale et de la contrainte octaédrique suivant la relation définie par l'équation 2-27 :

$$M_R = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad \text{Équation 2-27}$$

Où : M_R = module réversible (MPa),
 k_1, k_2, k_3 = constantes caractéristiques du matériau,
 p_a = pression atmosphérique (=101,325 kPa),
 θ = contrainte totale (kPa),
 τ_{oct} = contrainte de cisaillement octaédrique (kPa).

Le module réversible est directement lié aux caractéristiques des matériaux, mais aussi aux contraintes qu'ils subissent. Le module réversible n'est donc pas homogène au sein d'une structure de chaussée. Ce paramètre varie en fonction de la charge appliquée en surface et de la profondeur dans la structure. La détermination du module réversible par essais triaxiaux nécessite un nombre important de mesures et peut s'avérer dispendieuse en temps et en argent. Rahim et George (2005) proposent un modèle permettant d'estimer le module réversible des sols grossiers à partir de plusieurs caractéristiques physiques des sols telles que la masse volumique sèche, la teneur en eau, le pourcentage de particules fines et le coefficient d'uniformité. Ces données souvent accessibles par des essais simples de laboratoire permettent d'obtenir une bonne estimation du module réversible du matériau.

2.5.1.2 Étude des enrobés bitumineux

Les essais de laboratoire utilisés pour caractériser la réponse mécanique et la réponse à long terme des enrobés bitumineux se divisent en trois groupes. Le premier groupe d'essais vise à caractériser le comportement rhéologique des enrobés bitumineux à l'aide d'essais de fluage, de relaxation ou encore d'essais de module complexe comme détaillés à la section 2.3.2. Le second groupe d'essais vise à caractériser le comportement en fatigue et en orniéage des matériaux bitumineux. Ces essais consistent à simuler le comportement mécanique d'une chaussée en imposant des sollicitations répétées à une éprouvette afin de définir sa résistance à la fatigue comme détaillée à la section 2.4.1 ou sa résistance à l'orniéage. Finalement, le dernier type d'essais de laboratoire est plus particulièrement associé à la fissuration des matériaux bitumineux puisqu'ils visent à quantifier les paramètres de propagation de la

fissure. Ces essais visent à amorcer mécaniquement une fissure avant les essais et à analyser sa propagation sous une sollicitation définie. La combinaison de ces essais permet donc d'obtenir une modélisation du comportement de la couche bitumineuse pour l'ensemble de sa durée de vie utile, c'est-à-dire de sa mise en place jusqu'à sa rupture par fissuration ou parorniéage.

2.5.2 Essais en vraie grandeur

2.5.2.1 Essais sous simulateurs routiers

Les simulateurs routiers et les simulateurs de chargement accéléré sont de deux types : les simulateurs linéaires et les simulateurs circulaires. Concernant les simulateurs « linéaires », l'appareillage est placé sur un système de glissières ou de rails, permettant à la charge d'accélérer, de maintenir sa vitesse et finalement de freiner sur une courte distance. En fonction de la taille des simulateurs, ces derniers peuvent être équipés de plusieurs types de charges et de plusieurs types d'essieux. Les chargements appliqués ainsi que les vitesses et les caractéristiques de charge sont parfaitement maîtrisés et la répétabilité de la machine est très bonne. Plusieurs simulateurs linéaires sont mobiles et peuvent solliciter une structure de chaussée du réseau routier ou bien une zone d'essai sur un site expérimental. En fonction de la taille de l'infrastructure, les simulateurs peuvent reproduire des charges variant d'un essieu simple jusqu'au train d'atterrissage d'un avion (cas du NAPTF-National Airport Pavement Test Facility- opéré par le FAA-Federal Aviation Administration- proche d'Atlantic City aux États-Unis). Hugo et Epps-Martin (2004) détaillent une liste des simulateurs routiers actuellement en service. À cette liste s'ajoute le simulateur routier de l'Université Laval ainsi que la fosse de laboratoire (Chaire i3C, 2015) tel que présenté à la figure 2.12. Un système de contrôle de la température peut s'ajouter au simulateur afin de contrôler la température ambiante et celle de la chaussée. Il est possible de geler et de dégeler la structure pour étudier l'influence du gel sur la réponse mécanique de la structure. À l'image du simulateur routier de l'université Laval, plusieurs simulateurs peuvent aussi être placés dans une enceinte fermée où les conditions climatiques sont contrôlées. Les simulateurs routiers permettent de tester à la fois l'effet du climat, de la charge, et des paramètres de la structure. Les chaussées testées sont construites dans une fosse de laboratoire afin de s'assurer de maîtriser les paramètres de chaque couche de la structure (figure 2.12). Ces fosses offrent une installation facile de

l'instrumentation à la construction, et la possibilité de contrôler le niveau de la nappe phréatique au cours d'un essai.

Les simulateurs linéaires ont pour avantages de reproduire exactement les sollicitations engendrées par le passage d'une charge. La vitesse de la charge et sa fréquence de passage sont les principaux inconvénients de ces outils. Les simulateurs linéaires sont souvent limités par leur dimension, à des vitesses de charge inférieure à 50 km/h. Ils fonctionnent en mode unidirectionnel ou bidirectionnel. Dans le mode bidirectionnel, la charge sollicite la chaussée à la fois lors de son déplacement aller et son déplacement retour. Pour le mode unidirectionnel, le simulateur doit soulever la charge pour éviter d'appliquer des contraintes à la chaussée au cours du déplacement retour. Le simulateur routier de l'Université permet d'effectuer 20 000 chargements par jour en mode bidirectionnel et moitié moins en mode unidirectionnel. Dans le cas d'essais en vraie grandeur nécessitant des vitesses de chargement plus rapides ainsi qu'un plus grand nombre de sollicitations journalières, les simulateurs de type circulaire sont préconisés. L'envergure de ces simulateurs peut varier de 10 m à 50 m.



Figure 2.12 : Équipement de l'Université Laval : (a) simulateur de véhicules lourds, (b) fosse de laboratoire

Une vue d'ensemble d'un simulateur circulaire et de ces modules est présentée à la figure 2.13 (Kerzreho, 2013). Cette figure présente une vue du simulateur routier de chargement accéléré de l'IFSTTAR (Nantes, France) ainsi que des équipements pouvant être installés sur ces bras. Les simulateurs circulaires ont pour avantage d'avoir une plus grande plage de vitesses de chargement et donc un plus grand nombre de répétitions journalières. Les principaux

inconvenients sont les coûts d'exploitation ainsi que les efforts de surface tangentiels pouvant être engendrés par le mouvement circulaire de la charge.

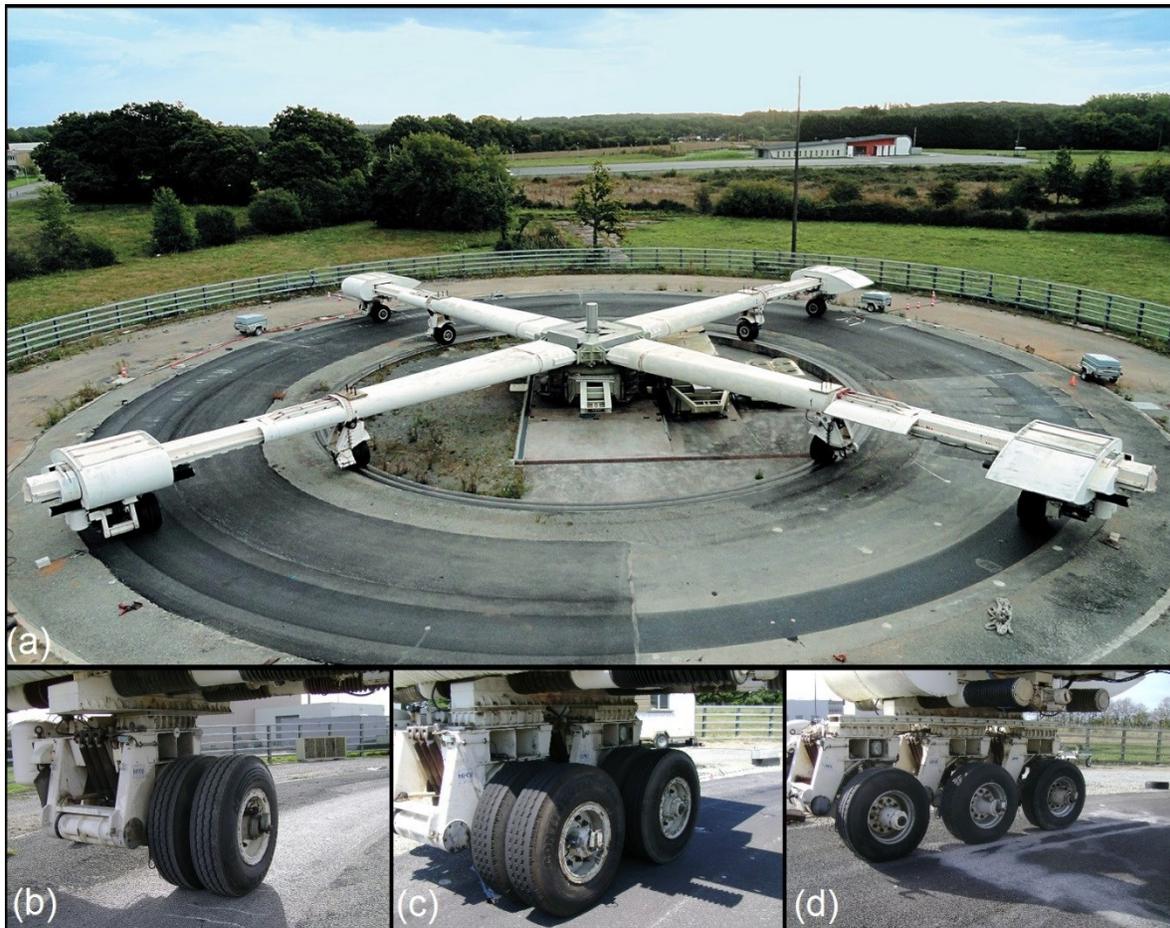


Figure 2.13 : Manège de fatigue de l'IFSTTAR : (a) vue d'ensemble, (b) module essieu simple, (c) module essieu tandem et (d) module essieu tridem

Plus spécifiquement, le manège de fatigue possède une motorisation centrale constituée d'une tourelle de 450 kN, boulonnée sur un socle en béton qui entraîne en rotation quatre bras (Autret et coll., 1988). Au bout de ces quatre bras sont fixés des modules pouvant reproduire le demi-essieu d'un camion. Les modules peuvent être équipés d'un essieu simple, d'un essieu tandem ou d'un essieu tridem. Les bras, longs de 20 m, pèsent 140 kN chacun et sont capables d'imposer cette masse sur les roues des essieux. En son milieu, chaque bras est supporté par un second appui roulant, dont le rôle est d'assurer la stabilité dynamique du bras et d'imposer le réglage grossier de la charge à appliquer sur les roues. Les suspensions pneumatiques permettent de maintenir l'extrémité des bras dans un plan parallèle à la piste et les suspensions et les amortisseurs neutralisent les oscillations potentielles des roues. Le réglage fin de la

charge est effectué au niveau des modules. Le système applique donc une charge constante indépendamment de la dégradation et du dénivelé de la chaussée. Le rayon de giration moyen des modules peut être réglé à l'arrêt entre 15,50 m et 19,50 m avec un pas de 0,5 m. Une fois en rotation, les modules oscillent autour de leur position centrale afin de recréer la distribution transversale du passage des charges sur les voies. Un bras possède au total 11 positions (cinq de part et d'autre de la position centrale) espacées de 10,5 cm. L'ensemble du manège est démontable et transportable et il peut être remonté sur une autre piste d'essai en moins d'une semaine. Cette méthode permet de construire une piste d'essais tout en maintenant les essais sur une seconde piste. De plus, la piste est libre de tout encombrement afin de faire circuler les engins de travaux lors de la construction. Les pistes d'essais sont des anneaux de 6 m de largeur et de 17,5 m de rayon moyen. La chaussée possède un dévers de 2 % incliné vers l'intérieur et sa longueur développée est de 110 m. Cette longueur permet, dans la majorité des essais, une division de la piste en quatre secteurs. Actuellement, le site du manège de fatigue possède trois anneaux dont l'un possède un cuvelage en béton permettant le contrôle du niveau de la nappe phréatique dans le sol d'infrastructure. Les bras peuvent circuler jusqu'à des vitesses de 100 km/h et sont surveillés automatiquement par plusieurs systèmes de sécurité. Cela permet un fonctionnement jour et nuit de la machine sans surveillance humaine. Les indicateurs de la machine sont regroupés dans un centre de commande. Ce dispositif est capable d'appliquer 55 000 chargements par jour.

2.5.2.2 Essais sur sites expérimentaux

Les sites expérimentaux de type circuit ou de type route sont des routes laboratoires constituées de plusieurs sections consécutives sur lesquelles sont effectuées les essais routiers. Les sites de type circuit, comme la piste d'essais du NCAT (National Center for Asphalt Technology, Alabama, United States), sont des structures exclusivement consacrées à la recherche. Les sites d'essais de type route, comme le site d'essais du SERUL (Site Expérimental Routier de l'Université Laval), sont des structures ouvertes à la circulation routière. Dans les deux cas, les paramètres mécaniques et les caractéristiques des structures de chaussées construites sur ces sites sont parfaitement connus. Les essais routiers sont basés sur la circulation répétée de charges lourdes telles que des camions ou des véhicules d'essais. Contrairement à des simulateurs routiers, les charges sont plus représentatives des

sollicitations réelles des véhicules (passage consécutif de l'ensemble des essieux des véhicules). En fonction des pistes d'essais, il est aussi possible de simuler les phases d'accélération, de freinage ou encore des zones de virages. Les sites expérimentaux permettent aussi d'évaluer l'effet du climat sur la durée de vie utile de la chaussée puisqu'ils sont soumis au cours de l'année aux différentes conditions de température, d'ensoleillement et d'humidité de leur lieu de construction.

2.5.3 Synthèse

Les essais de laboratoire et les essais en vraie grandeur sont complémentaires dans l'étude de la réponse mécanique et structurale de la chaussée. L'association de ces deux types d'essais permet de définir, de calibrer et de valider les modèles de comportement des différentes couches de la chaussée. Pour l'ensemble des mesures, il est important de s'assurer du contrôle ou de l'accessibilité aux paramètres régissant le comportement des matériaux. Les conditions climatiques, ainsi que les paramètres de charges et la caractérisation physique des matériaux sont nécessaires afin d'évaluer correctement l'impact de ces paramètres sur la réponse mécanique et la réponse à long terme de la chaussée.

2.6 Caractéristiques des charges

L'évaluation d'une charge spécifique est typiquement effectuée en déterminant l'agressivité relative de celle-ci comparativement à une charge dite de référence. Le nombre d'applications de charges admissibles, avant la rupture de la structure, pour la charge à analyser est comparé au nombre d'applications de charges admissibles pour la charge de référence. L'équation traduisant cette approche est exprimée à l'équation 2-28. Pour un critère de rupture défini (la fatigue, le fluage, l'orniérage structural ou la fissuration de surface), la durée de vie de la structure est calculée pour les deux types de charges. Le ratio de ces valeurs permet de définir le dommage relatif d'une charge par rapport à l'autre. Ce dommage relatif est également appelé le coefficient d'agressivité (ou CA).

Cette approche d'analyse utilise la loi d'additivité de Miner qui considère que le dommage entraîné par une succession de sollicitation est la somme des dommages causés par chacune d'elles. Un ratio supérieur à 1 signifie donc qu'il y a une augmentation des dommages engendrés par la configuration de charge évaluée comparativement à la charge de référence.

Dans l'analyse de l'effet des pneus larges comparativement aux pneus jumelés traditionnels, Al-Qadi et Wang (2009) ont généralisé l'approche du dommage relatif en proposant un ratio des dommages combinés (noté CDR) tenant compte des différents modes de rupture de la chaussée. Cette approche peut être appliquée pour toutes les caractéristiques de charge et s'exprime suivant l'équation 2-29.

$$DR_i = N_i(\text{charge évaluée})/N_i(\text{charge de référence}) \quad \text{Équation 2-28}$$

Où : DR = dommage relatif,
 N_i = nombre d'applications de charge pour le critère de rupture
 i = critère de rupture (fatigue, fluage, orniéage structural, fissuration de surface).

$$CDR = a_{fatigue} \times DR_{fatigue} + a_{fluage} \times DR_{fluage} + a_{ornière} \times DR_{ornière} + a_{fissuration_surface} \times DR_{fissuration_surface} \quad \text{Équation 2-29}$$

Où : CDR = ratio combiné des dommages,
 a_i = coefficient pour le critère de rupture i considéré,
 $a_i = 1/\log(N_i) / \sum_{j=1}^n 1/\log(N_j)$
 i = critère de rupture (fatigue, fluage, orniéage structural, fissuration de surface),
 n = nombre total de critères de rupture considérés.

L'analyse des différentes caractéristiques de charges requiert une approche générale et les études ne doivent pas se limiter à un seul mode de rupture.

2.6.1 Configurations des différents types d'essieux

Au Québec, les dimensions et les charges à respecter par les transporteurs routiers sont définies par le MTMDET dans le guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers (Gouvernement du Québec - Ministère des Transports du Québec, 2013). Un camion se compose traditionnellement d'un tracteur et d'une ou plusieurs unités (remorque ou semi-remorque) attachées à celui-ci. On retrouve principalement trois grands groupes d'essieux : l'essieu simple, l'essieu tandem (deux essieux) et l'essieu tridem (trois essieux). Les essieux tandem et tridem sont reliés au véhicule par un système de suspension conçu pour égaliser, à

1000 kg près, la masse pouvant être mesurée sous les roues de chaque essieu. On considère donc généralement que chaque essieu d'un groupe d'essieux transmet à la chaussée une charge identique. Les charges limites sont imposées par deux critères : le premier critère autorise une masse maximale par catégorie d'essieux et le second critère autorise une masse totale en charge. Les transporteurs doivent donc toujours respecter à la fois les masses totales, mais aussi les masses par essieux et cela tout au long de l'année. Au cours du dégel, une baisse des charges maximales transportées est imposée aux transporteurs pour limiter l'endommagement des chaussées. Afin d'évaluer l'impact des différents types d'essieux sur l'endommagement des chaussées, les méthodes de dimensionnement au Québec (ainsi qu'en France) utilisent la notion de coefficient d'agressivité aussi appelé le trafic équivalent. Cette démarche d'analyse permet de rapporter les dommages engendrés par une charge multiple à ceux d'une charge de référence. Le coefficient d'agressivité peut être obtenu par une loi de puissance comme définie à l'équation 2-30.

$$CA = (P/P_{Ref})^n \quad \text{Équation 2-30}$$

Où : CA = coefficient d'agressivité,
 P = charge du groupe d'essieux,
 P_{Ref} = charge de l'essieu de référence,
 n = coefficient de charge ou puissance.

Cette forme de relation est très utilisée afin d'obtenir une approximation de l'effet d'une charge sur l'endommagement des chaussées. Cependant, l'essieu de référence varie entre les pays. Au Québec, les charges de référence sont de 8 160 kg pour l'essieu simple à pneu jumelé, de 15 200 kg pour l'essieu tandem et de 21 800 kg pour l'essieu tridem. En France, l'essieu simple de référence est chargé à 13 000 kg. Le coefficient de charge dépend du type de structure étudiée. Une valeur de 4 est souvent considérée pour les chaussées souples. Plus la rigidité de la structure augmente, plus le coefficient est élevé (valeur de 5 pour les chaussées rigide). Pour l'ensemble des pays, il existe à la fois des charges totales admissibles en fonction du type de camions, mais aussi une charge limite par essieux.

Le nombre d'essieux (entre 2 et 8) et l'espacement entre les essieux sont deux paramètres qui ont été beaucoup analysés. Ces études ont été menées à partir de mesures expérimentales qui visaient à caractériser le signal des déformations et des contraintes associées aux différentes

charges. En complément de ces mesures, l'effet du signal sur la fatigue et l'orniérage des enrobés bitumineux a été évalué en laboratoire et par des simulations numériques (Chatti, Karim et coll., 2009 ; Hajek et Agarwal, 1989 ; Homsy, 2011 ; Salama et Chatti, 2010 ; Salama et coll., 2006). Il ressort de ces études que le temps de repos, la fréquence du signal de chargement et surtout la forme du signal de chargement influencent la durée de vie en fatigue et en orniérage de la structure. Les méthodes d'analyse du signal et leur impact sur la durée de vie des structures sont détaillés au paragraphe 3.4.1. Les conclusions de ces études préconisent une approche énergétique afin de déterminer l'endommagement relatif de chaque type d'essieu. Ces approches énergétiques tiennent compte de l'historique du signal de chargement et peuvent être associées, grâce à des essais de laboratoire, à la durée de vie de la chaussée.

L'agressivité des véhicules ne dépend pas seulement du type d'essieux, mais aussi des caractéristiques mécaniques de l'essieu. En particulier, le type de suspension utilisé par le camion influence l'agressivité totale du véhicule. La raideur des suspensions influence la réponse dynamique du véhicule et donc la distribution des pressions de contact entre le pneu et la chaussée lorsque le véhicule est en mouvement. Il est alors recommandé d'utiliser le même type de camion et les mêmes types de suspension (idéalement le même camion) lorsqu'une analyse comparative des configurations de charge est effectuée.

2.6.2 Configurations des pneus

2.6.2.1 Nomenclature des pneus

Une roue désigne l'ensemble pneu/jante. La jante est la section métallique intérieure sur laquelle repose un système multicouche de caoutchouc et d'acier (le pneu). Le pneu assure l'interface entre le véhicule et la route. Son rôle est de transmettre la charge du véhicule tout en offrant une bonne adhérence pour le roulement. Un pneu étant indissociable d'une jante, il n'est pas rare de retrouver le mot pneu pour désigner une roue. En particulier, la nomenclature d'un pneu va désigner à la fois les caractéristiques du pneu et de la jante. Cette désignation se présente sous la forme A#B avec « A » les paramètres du pneu, « # » le type de pneu et « B » les paramètres de la jante. Le symbole « # » est remplacé par la lettre R pour un pneu radial ou par « - » pour les pneus biais. La lettre « A » sera remplacée par la largeur de la section de

la roue alors que « B » correspond au diamètre nominal de la jante. À titre d'exemple, un pneu traditionnellement utilisé au niveau d'une roue jumelée au Québec s'écrit 11R22.5. Dans ce cas-là, « A » vaut 11 pouces et « B » vaut 22.5 pouces, et une roue jumelée sera composée de deux pneus 11R22.5 espacés d'une distance « d » définie par le constructeur. Une « roue jumelée » est également appelée « pneu jumelé ». Pour les pneus à bande large, la section du pneu est le paramètre important. Pour cette raison, la hauteur et la largeur apparaissent dans la désignation du pneu. Le pneu 455/55R22.5, par exemple, possède une largeur de section de 455 mm et le ratio entre la largeur et la hauteur est de 55 %, soit une hauteur de 250 mm. Ces données ne renseignent pas directement sur l'empreinte au sol puisque la largeur du pneu tient compte du bourrelet de part et d'autre du pneu et l'empreinte au sol d'un pneu dépend à la fois de la charge et de la pression de gonflage.

2.6.2.2 Analyse comparative des pneus à bande large et des pneus jumelés.

- Historique des pneus à bande large :

Depuis leur première apparition dans les années 1980, les pneus à bande large ont été beaucoup étudiés et ont connu des évolutions considérables. Les premiers modèles possédaient une largeur de 295 mm, contre 455 mm actuellement en Amérique et 495 mm en Europe (Al-Qadi et coll., 2004). Les fabricants (Michelin, Goodyear, Bridgestone), en plus de proposer des pneus plus larges, ont aussi apporté des modifications concernant la forme et la composition des pneus. De nombreuses études ont été effectuées pour comprendre et évaluer l'impact qu'aurait l'utilisation des pneus à bande large en remplacement des pneus jumelés traditionnels. Les premières générations de pneus larges (385/65R22.5 et 425/65R22.5) ont été étudiées dans les années 90 aux États-Unis (par Akram au Texas, Bonaquist en Virginie et Sebaaly en Pennsylvanie), en Finlande par Huhtala et au Royaume-Uni par Addis. L'ensemble de ces études s'accorde pour conclure que les dommages engendrés par les pneus larges étaient en tout point supérieurs aux pneus jumelés pour une même charge transportée. Dépendamment de la pression de gonflage et de la structure de chaussée, le dommage relatif s'établit entre 1,5 et 2,0 en ce qui concerne l'orniérage et entre 2,0 et 4,0 en ce qui concerne la fissuration de fatigue (Al-Qadi et coll., 2004). Les projets ne se sont cependant pas arrêtés là puisque rapidement, l'utilisation des pneus larges a présenté de nombreux avantages économiques, écologiques ainsi qu'une conduite plus sécuritaire et de meilleure qualité.

- Les avantages et les inconvénients dans l'utilisation des pneus à bande large :

Les premières générations de pneus à bande large présentaient une baisse de la résistance au roulement pouvant atteindre 25 %, ce qui se traduisait par des réductions de consommation de carburant proche de 6 % et conséquemment, une baisse de la pollution (Bauer et coll., 1996). La résistance au roulement représente près de 35 % de l'énergie consommée sur un véhicule et actuellement, avec la nouvelle génération de pneus larges, la baisse de la résistance au roulement est d'au moins 12 % (Al-Qadi et Elseifi, 2007). Cette baisse se répercute, dépendamment de la route et du positionnement des pneus, par des réductions de la consommation d'essence comprises entre 6 % et 11 %. Des pneus larges placés à la fois au niveau du tracteur et de la remorque sont plus efficaces que s'ils sont seulement installés sur la remorque. Une étude effectuée auprès de sept compagnies de transport au Canada (Genivar Consultant Group, 2005) rapporte que six d'entre elles ayant utilisé des pneus à bande large ont obtenu des baisses de consommation allant de 3,5 % à 12 %. Ces données représentent un gain monétaire significatif pour les entreprises de camionnage. D'un point de vue environnemental, cette réduction de la consommation se répercute directement sur la baisse des émissions de gaz (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone et oxyde d'azote). Ce sont des avantages écologiques auxquels vient s'ajouter celui de la réduction de caoutchouc consommée. Moins de caoutchouc étant nécessaire pour la production des pneus larges signifie que moins de matières sont à recycler une fois la durée de vie du pneu atteinte. Un gain de poids est aussi à considérer pour la société de camionnage. Un changement de pneu au niveau d'un tridem d'une remorque permet une baisse de la charge à l'essieu car un pneu large est plus léger que deux pneus en configuration jumelée. Freund et Brady (2009) ont collecté des séries de données sur les pressions de gonflage des pneus équipant les camions de plusieurs sociétés de transport. Les conclusions de ces études révèlent que l'entretien des véhicules n'est que très peu respecté. En moyenne, il est apparu que 45 % des camions possèdent des écarts de pressions de ± 5 psi (soit 35 kPa ou 0,35 bar) par rapport aux pressions recommandées. Ces écarts atteignent même ± 20 psi pour 7 % des camions échantillonnés. Ces écarts s'expliquent principalement par les difficultés rencontrées par les sociétés à assurer un entretien régulier et un contrôle de la pression dans les pneus jumelés. Le manque d'accessibilité aux valves des pneus entraîne une vérification succincte. Plus d'un quart des pneus jumelés équipant une remorque présentent une différence de pression supérieure à 5 psi

entre les deux pneus d'un pneu jumelé, entraînant du même coup une augmentation de la consommation d'essence et de l'entretien du véhicule ainsi qu'une usure prématurée des pneus. Le déséquilibre des pneus entraîne également une mauvaise répartition de la charge et une réponse non optimale de la remorque et du tracteur. Le contrôle et l'ajustement des pneus larges sont plus simples, diminuant ainsi le coût d'entretien lié à la prévention et à la réparation.

En contrepartie, les premières générations de pneus à bande large ont montré une augmentation importante des dommages engendrés dans la structure de chaussée. Ces mesures ne permettaient pas une utilisation immédiate de ces types de pneus sur le réseau routier, sans quoi les réparations et les travaux auraient été conséquents quelques années plus tard. Les critères d'évaluation de ces dommages ont évolué simultanément aux méthodes de conception des routes et aux techniques de fabrication des pneus. Vingt ans après, la nouvelle génération de pneus larges (445/50R22.5 et 455/55R22.5) ne possédant plus les mêmes caractéristiques physiques et dimensionnelles, une réévaluation du dommage relatif entre les pneus est en cours depuis plusieurs années. De nouveaux composants et procédés de fabrication permettent maintenant la confection de pneus plus larges tout en maintenant un ratio hauteur/largeur adéquat. Cette nouvelle génération de pneus larges a été évaluée par différents groupes de recherche en suivant les quatre critères de rupture suivants : la fissuration par fatigue, l'orniérage structural, l'orniérage par fluage dans les couches bitumineuses et finalement la fissuration s'amorçant en surface. Deux approches ont été considérées pour les deux premiers modes d'endommagement : une analyse empirique basée sur la pose de capteurs de déformations dans la chaussée et une analyse mécanistique basée sur l'utilisation de logiciels de calcul. Pour le fluage des couches bitumineuses, les études se sont orientées vers des essais de laboratoire et des mesures expérimentales visant à quantifier le dommage relatif de chaque type de pneu. Finalement, pour la fissuration par le haut, l'ensemble des études est basé sur une approche théorique utilisant des logiciels de calcul visant à quantifier la distribution des déformations et des contraintes dans les premiers centimètres de la couche bitumineuse. Les analyses paramétriques, effectuées dans ces études, ont mis en évidence l'influence de la pression de gonflage des pneus, de leur chargement ainsi que de l'épaisseur de revêtement.

Les principales conclusions des études effectuées sur les pneus 445/50R22.5 et 455/55R22.5 sont les suivantes :

- Priest et coll. (2005), ont instrumenté une structure de chaussée (épaisseur de revêtement de 170 mm, fondation de 150 mm et sous-fondation de 450 mm) à l'aide de capteurs de déformation et de capteurs de pression. En complément, une série de calcul effectuée à l'aide du logiciel WESLEA a permis de comparer ces mesures aux valeurs calculées. Les outils de calcul ont montré que l'utilisation des pneus larges (445/50R22.5) en remplacement des pneus jumelés (275/80R22.5) entraîne une augmentation de 50 % des déformations en bas du revêtement et une augmentation de 15 % à 20 % des contraintes au niveau de la sous-fondation et de la fondation. Expérimentalement, les mesures ne montrent pourtant aucune différence notable entre les deux configurations de pneus. Les auteurs concluent que les durées de vie en ornierage structurale et en fatigue sont égales pour les conditions d'essais évaluées. La comparaison entre les mesures théoriques et expérimentales a donc montré que le modèle surestimait significativement les déformations et les contraintes engendrées par un pneu large ou alors sous-estimait celles engendrées par un pneu jumelé. Les auteurs préconisent donc d'augmenter la taille de la matrice expérimentale et d'intégrer au modèle théorique une discrétisation plus détaillée des empreintes de pneus.
- Le centre des transports de l'Illinois (Al-Qadi et Wang, 2009, 2012 ; Wang, H. et Al-Qadi, 2011) a effectué une importante campagne de mesures expérimentale sur plusieurs structures de chaussée représentatives d'un réseau routier à l'aide du simulateur de charge linéaire ATLAS (*Accelerated Testing Loading ASsembly*). En complément, un modèle tenant compte du caractère viscoélastique des matériaux et de la tridimensionnalité de la sollicitation appliquée par la charge (détaillé à la section 2.6.3) a été mis au point sous le logiciel ABAQUS. Ce modèle par éléments finis a servi de point de comparaison pour l'ensemble des cas évalués expérimentalement. Concernant les déformations longitudinales, les mesures expérimentales indiquent que les pneus 455/55R22.5 entraînent une augmentation de l'ordre de 16 % comparativement aux pneus jumelés. Cette augmentation est comprise entre 2 % et 40 % en fonction de la structure étudiée, des charges appliquées et des pressions de gonflage. Les mesures montrent que plus les structures possèdent

une épaisseur de revêtement importante, moins l'augmentation des déformations est importante. Concernant l'orniérage structural, les simulations numériques montrent que les pneus larges entraînent une augmentation de la compression appliquée sur les sols et que le risque d'endommagement est donc augmenté pour une même charge transportée. Cette augmentation est comprise entre 3 % et 25 %. En contrepartie, les pneus à bande large diminuent la compression maximale appliquée en surface de l'enrobé bitumineux, contrainte considérée comme responsable du fluage. Cette diminution est comprise entre 5 % et 30 %. Les modélisations montrent également que le cisaillement critique dans les premiers centimètres proche de la surface diminue de 7 % à 20 % avec l'utilisation des pneus larges. Le cisaillement mesuré au bord des pneus est responsable de la fissuration s'amorçant en surface. Comme présenté, la réponse de la structure à un nouveau type de pneu dépend de ses caractéristiques et en particulier de son épaisseur de revêtement bitumineux. Sur une chaussée épaisse, les modes de rupture observés sont principalement la fissuration s'amorçant en surface et le fluage des couches bitumineuses. Pour les chaussées intermédiaires et fines, le facteur responsable de la rupture de la structure est la fissuration par fatigue initiée au bas du revêtement bitumineux. L'intégration des pneus à bande large n'a donc pas le même impact sur le réseau principal caractérisé par des structures épaisses et sur le réseau secondaire caractérisé par des structures plus fines.

- Afin de caractériser l'effet des bords des pneus sur l'endommagement s'amorçant proche de la surface, Greene et coll. (2010) ont installé une série de capteurs de déformation dans les premiers centimètres de la couche bitumineuse en surface. Les résultats expérimentaux, accompagnés d'un modèle par éléments finis, confirment que l'utilisation des pneus à bande large (455/55R22.5 et 445/50R22.5) réduit de 20 % le cisaillement et de 10 % à 20 % les déformations en extension en surface. Une augmentation de l'ordre de 10 % de la déformation verticale appliquée en surface est également relevée. Les pneus jumelés sont donc moins dommageables en ce qui concerne le fluage des matériaux bitumineux, mais plus dommageables en ce qui concerne la fissuration par le haut. Expérimentalement, les points de mesure de la déformation proche de la surface se sont limités à un positionnement situé à l'extérieur du pneu. Aucune mesure sous le pneu n'est présentée dans cette étude. Il est à noter que pour les conditions expérimentales simulées, aucune différence notable n'a été

relevée en ce qui concerne l'extension en bas de la couche de revêtement.

- La mesure de la déformation en cisaillement dans les premiers centimètres de la couche bitumineuse est expérimentalement accessible à travers l'installation d'une rosette de déformation. Cette opération a été effectuée par Xue et Weaver (2011) en installant deux capteurs dans des directions orthogonales et un troisième avec un angle de 45° par rapport aux deux premiers. Le cisaillement a été évalué à deux profondeurs dans la couche bitumineuse pour quatre types de pneus (deux pneus jumelés et deux pneus larges). L'étude propose une méthode d'analyse des mesures expérimentales relevées à faible profondeur. Ces mesures montrent l'importance d'avoir un contrôle précis sur la température du revêtement, sur la vitesse de passage de la charge, mais aussi sur la position relative de la charge par rapport aux capteurs. L'analyse du cisaillement sous le pneu a montré une influence importante de l'empreinte de pneu sur la distribution des déformations.

2.6.2.3 Synthèse

Les pneus à bande large présentent de nombreux avantages écologiques et économiques pour les transporteurs routiers et augmentent également la sécurité des transports. Le passage de deux pneus jumelés à une seule roue plus large entraîne une nouvelle distribution de la charge au sein de la structure. Les mesures expérimentales et les simulations numériques ont montré que la mise en service des nouvelles générations des pneus à bande large a pour effet d'augmenter les déformations en bas de la couche de revêtement, mais aussi les déformations verticales appliquées sur les sols. À l'inverse, les pneus larges réduisent le cisaillement ainsi que l'extension dans les premiers centimètres du revêtement bitumineux. Ces conclusions sont fonction de la charge transportée, de la structure de chaussée étudiée, mais aussi des conditions climatiques. L'endommagement des structures épaisses a principalement lieu en surface par le fluage des matériaux et la fissuration par le haut. Pour ces structures, l'utilisation des pneus larges serait bénéfique. À l'inverse pour les structures d'épaisseur intermédiaire et mince, plus fortement affectées par la fissuration par fatigue et à l'orniérage structural, les pneus à bande large diminueraient leur durée de vie. Afin de conclure sur l'effet du type de pneu, il est nécessaire de quantifier l'impact sur l'ensemble d'un réseau et pour diverses conditions de trafic.

2.6.3 Interaction entre le pneu et la chaussée

La couche supérieure d'un pneu est constituée de caoutchouc dont les propriétés mécaniques varient avec la charge appliquée ainsi qu'avec les conditions de températures et de vitesse. Le pneu est construit à partir d'une succession de couches et de structures métalliques visant à répartir la charge sur l'ensemble de l'empreinte du pneu. Les conditions d'interface et la distribution des contraintes au contact pneu-chaussée varient en fonction des pressions de gonflage, de la charge, de la vitesse du véhicule et des caractéristiques du pneu.

2.6.3.1 Forme des empreintes de pneu

Un pneu se définit par sa bande de roulement qui correspond à la surface entre les deux arêtes extérieures du pneu. Dans la bande de roulement, les rainures du pneu imposent une sculpture propre à chaque type de pneu. Ces rainures définissent les limites des nervures du pneu. La figure 2.14 montre un exemple d'empreinte de pneu où trois rainures parallèles définissent les quatre nervures du pneu. D'autres rainures moins profondes divisent les nervures du pneu en bloc.

L'approche classique utilisée pour les calculs de distribution de la contrainte dans les couches de la chaussée pose les hypothèses suivantes : l'aire de contact entre le pneu et la chaussée est de forme circulaire, la distribution des contraintes est uniforme et uniquement orientée perpendiculairement à la surface de contact (direction verticale suivant l'axe Z) et la charge est supposée statique. La pression de contact est également supposée égale à la pression de gonflage. Expliquer les phénomènes d'endommagement s'exerçant en surface des couches bitumineuses requiert de reconsidérer ces hypothèses. La répartition des contraintes appliquées au contact pneu-chaussée est influencée par : le type de pneu (large, jumelé, radial, biais), la pression dans le pneu (pression recommandée par le fabricant, un sous-gonflage, un surgonflage), la charge distribuée par le pneu, sa sculpture (nervure et rainure) et ses propriétés mécaniques (type de caoutchouc). La figure 2.14 présente la distribution des pressions de contact pour un même pneu, sous une même charge, mais pour deux pressions de gonflage différentes. La baisse de pression a imposé une augmentation de l'empreinte de pneu dans la direction longitudinale (de roulement), mais également une redistribution des pressions de contact. Lorsque le pneu est gonflé à une pression de 690 kPa, les pressions maximales se

situent au centre du pneu. Lorsque la pression de gonflage diminue, la charge se répartit à travers la structure latérale du pneu et entraîne une augmentation des pressions de contact au bord des pneus. Les hypothèses simplificatrices considérant une charge circulaire ne peuvent donc pas s'appliquer lorsque les analyses portent sur la répartition des déformations et des contraintes dans les premiers centimètres de la structure de chaussée. Afin de caractériser l'endommagement s'amorçant en surface, il est nécessaire de considérer à la fois la forme générale du pneu (forme rectangulaire), mais aussi la distribution des nervures et la répartition des contraintes au contact.

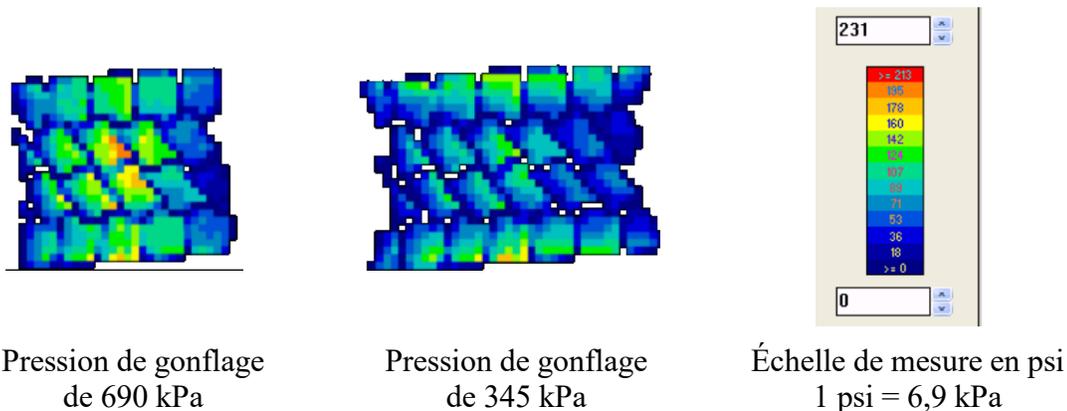


Figure 2.14 : Distribution de la pression de contact d'un pneu 11R22.5 pour une pression de gonflage de (a) 690 kPa et (b) 345 kPa

Plusieurs hypothèses simplificatrices considèrent que les pressions de contact sont uniquement orientées verticalement à la surface de contact. Les travaux effectués à l'aide du système de mesure VRSPTA (*Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array*) par De Beer et coll. (1997) ont permis d'obtenir une répartition réelle des pressions de contact des pneumatiques. Un exemple de la distribution des contraintes verticales et horizontales (latérale et longitudinale) est présenté à la figure 2.15 pour un pneu de dimension 11R22.5 (ST 234 BFGoodrich) gonflé à une pression de 420 kPa (60 psi) et de 690 kPa (100 psi).

Plus spécifiquement, lorsqu'un pneu est surchargé ou sous-gonflé, des surpressions verticales sont générées sur les bords des pneus alors qu'un surgonflage tend à répartir plus uniformément la contrainte verticale. Le maximum de contrainte est alors mesuré au centre du pneu. Les mesures montrent qu'il est possible de distinguer l'ensemble des sculptures du pneu. Concernant les efforts horizontaux, c'est-à-dire les efforts latéraux et les efforts longitudinaux, une répartition dite en « dent de scie » est observable. Les pneumatiques qui

subissent une compression verticale importante tendent à vouloir s'étendre latéralement en raison du coefficient de Poisson élevé du caoutchouc. Longitudinalement, de la traction est mesurée à l'avant du pneu ainsi que de la compression à l'arrière du pneu.

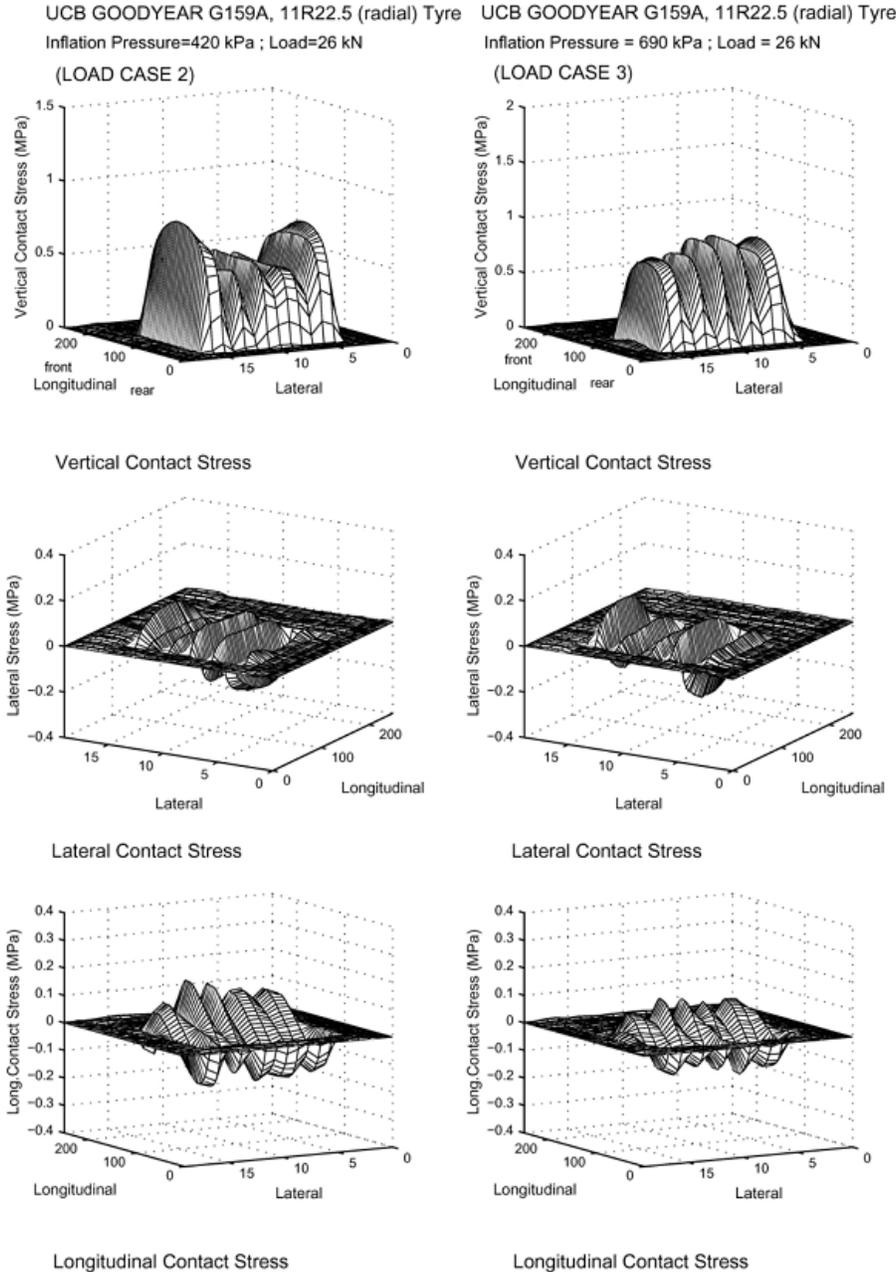


Figure 2.15 : Distribution des contraintes verticales, latérales et longitudinales au contact pneu-chaussée d'un pneu 11R22.5 (De Beer et coll., 2002)

La distribution des contraintes de contact est fonction du type de pneu, du chargement appliqué, et surtout de la pression de gonflage appliquée. L'amplitude des contraintes au

niveau des bandes de roulement du pneu dépend principalement de la charge appliquée. Des contraintes additionnelles peuvent être liées aux accélérations, aux décélérations du véhicule ou encore à la prise d'un virage. Ces effets ne sont cependant pas considérés dans le cadre du projet et la charge circule à une vitesse uniforme suivant une direction linéaire.

2.6.3.2 Effet du contact 3D entre le pneu et la chaussée

L'intégration d'une distribution tridimensionnelle entre le pneu et la chaussée modifie significativement la réponse de la structure. Luo et Prozzi (2007) ont utilisé une approche linéaire élastique afin d'étudier l'effet de cette distribution sur la déformation longitudinale et transversale en bas de couche. Cette étude paramétrique effectuée avec différents types de pneus et pour douze structures de chaussée conclut que la contrainte verticale est le facteur dominant en ce qui concerne les déformations en bas de couches. Les contraintes de contact transversales influencent l'amplitude des déformations lorsque les structures sont fines. Son influence décroît lorsque l'épaisseur de la couche bitumineuse augmente. Soon et coll. (2004) ont montré que les contraintes horizontales au contact pneu-chaussée engendrent une contrainte en traction à l'extérieur des pneus. L'amplitude de ces contraintes ainsi que leurs localisations (profondeur et distance par rapport au pneu) varient en fonction de l'épaisseur de la structure. Plusieurs relevés expérimentaux montrent une meilleure corrélation avec les durées de vie en fatigue des structures lorsqu'un contact 3D est intégré aux analyses. L'effet du contact 3D a aussi été évalué en considérant un comportement viscoélastique de l'enrobé bitumineux au passage de la charge roulante. Cette approche par éléments finis a été plus spécifiquement développée afin d'analyser l'effet des pneus larges comparativement aux pneus jumelés. Les travaux de modélisations effectués à l'Université de l'Illinois (Al-Qadi et Wang, 2009 ; Wang, H., 2011 ; Yoo, 2007) montrent que les efforts horizontaux appliqués au contact pneu-chaussée ne devraient pas être négligés puisqu'ils modifient significativement les amplitudes des déformations et des contraintes proche de la surface. Les simulations montrent que la déformation par cisaillement proche de la surface est augmentée de 4 % à 10 % lorsqu'un contact 3D est considéré comparativement à une charge uniforme. La contrainte en cisaillement, pour sa part, augmente de 15 % à 25 % en fonction de la structure de chaussée, des températures de revêtement et de la charge appliquée. L'intégration du contact 3D ne modifie pas seulement l'amplitude des mesures, mais aussi les formes générales

du signal. La figure 2.16 présente la distribution des déformations et du cisaillement, proche de la surface sous un pneu jumelé. Le centre de l'espace interjumelage, appelé centre du pneu sur la figure, est situé en 0. La distribution est présentée dans la direction transversale à la direction du pneu. La répartition pour le cas 3D est superposée à la répartition pour le cas uniforme. En ce qui concerne les déformations, lorsqu'une pression de contact est uniforme, les mesures sous le pneu sont négatives. Sous une pression de contact 3D, les déformations deviennent positives à l'exception des arêtes des pneus qui restent négatives. L'intégration du contact 3D n'a donc pas d'effet important à l'extérieur du pneu. Le maximum d'extension apparaît au niveau de l'espace entre les deux pneus du jumelage. En ce qui concerne le cisaillement, dans le cas uniforme, le maximum se situe directement au niveau des arêtes extérieures des pneus. Dans le cas 3D, la localisation du maximum se retrouve au niveau des nervures extérieures des pneus. Cette considération modifie donc la localisation des contraintes et des déformations critiques responsables de l'endommagement de surface de la structure.

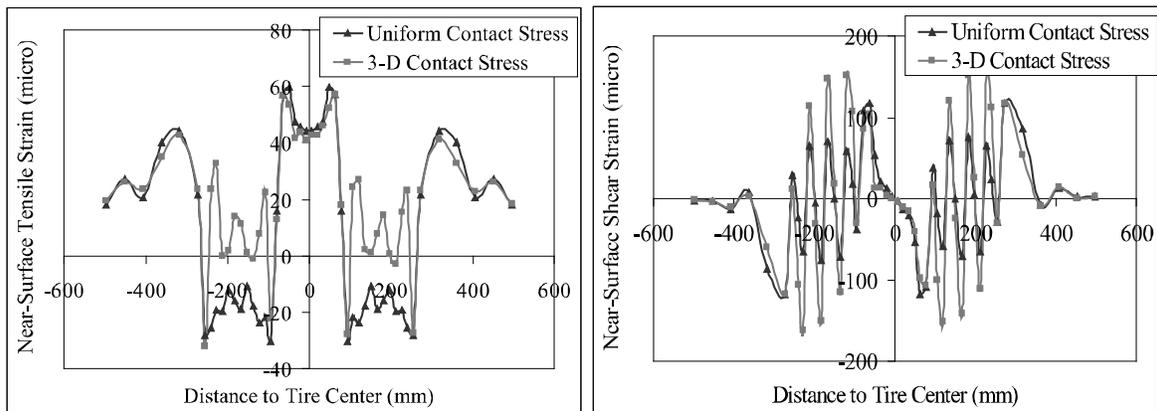


Figure 2.16 : Effet du contact 3D sur les déformations et le cisaillement proche de la surface pour un pneu jumelé (Wang, H., 2011)

À la base du revêtement, l'intégration du contact 3D n'influence que très peu la déformation longitudinale. En ce qui concerne la déformation transversale, une augmentation de l'ordre de 5 % à 20 % est relevée. En fonction du type d'essieu, plusieurs mesures expérimentales montrent que les déformations transversales peuvent être les déformations critiques responsables de la fatigue. Cette considération 3D de la charge explique en partie les écarts mesurés entre les mesures expérimentales et les calculs numériques. Au niveau des contraintes déviatoriques et de la contraction verticale appliquée sur le sol, l'intégration du modèle 3D

engendre une baisse des valeurs. Cela signifie que les modèles qui considèrent une contrainte uniforme en surface surestiment les dommages engendrés par le pneu. Cette baisse est de l'ordre de 5 % à 10 % en fonction de la charge et de la température.

2.6.3.3 Synthèse

La distribution de la charge au contact pneu-chaussée est fonction du tonnage imposé au pneu, de la pression de gonflage, des caractéristiques physiques du pneu (sa structure, ses sculptures, le type de caoutchouc, sa forme) et également des conditions d'utilisation (température, usure). Cette distribution se divise suivant trois composantes. La composante la plus importante est la contrainte verticale et elle se répartit sur l'ensemble de l'empreinte de pneu. La seconde composante, engendrée par les propriétés du caoutchouc, correspond à la contrainte transversale. Cette contrainte se répartit au niveau de chaque nervure du pneu. La troisième composante correspond à la contrainte longitudinale et son signe ainsi que son amplitude varient suivant la position sous le pneu. La prise en compte de cet effet 3D modifie l'amplitude et également la forme des signaux de déformations et les contraintes proche de la surface. En fonction des conditions environnementales et de la structure de chaussée, la modélisation du contact 3D a un impact plus ou moins significatif sur les mesures.

2.6.4 Synthèse

La réponse mécanique d'une structure de chaussée et en particulier des couches bitumineuses dépend de la charge, de l'historique de chargement et des conditions environnementales sous lesquelles elle est appliquée. Les paramètres de charge suivants influencent particulièrement la répartition des déformations dans la structure : le type d'essieu, le type de pneu, le chargement appliqué, la pression de gonflage et la vitesse du véhicule. Historiquement, l'effet du type de pneu et en particulier la comparaison entre les pneus larges et les pneus jumelés a été très étudié. Ces études sont basées sur la modélisation et la mesure des contraintes et des déformations à différents niveaux dans la structure. Dans les premiers centimètres de la couche de revêtement, les analyses portent essentiellement sur des modélisations, car l'installation de capteurs fiables et durables à cette profondeur dans les couches bitumineuses reste problématique. Les modélisations montrent pourtant que les phénomènes de surface sous le pneu sont complexes et fortement influencés par les conditions de charges.

2.7 Outils de calcul et de modélisation de chaussées

2.7.1 Outils de calcul

Les outils de calcul et de modélisation de chaussées reposent principalement sur les mêmes principes fondamentaux : effectuer un calcul d'endommagement ou de durée de vie en ayant préalablement calculé les sollicitations internes (contraintes, déformations et déplacements) en tenant compte des propriétés des matériaux, de la structure et des conditions de sollicitations externes imposées par la charge. Les logiciels diffèrent à travers la configuration des chargements, les lois de comportement des matériaux, les considérations structurales et surtout les méthodes de calculs des sollicitations. Les outils de calculs et de modélisations sont très nombreux et ils ont tous été mis au point dans l'optique de répondre à un besoin spécifique à l'analyse du comportement de la chaussée. Dans le cadre de ce travail, le choix du logiciel s'est orienté vers un outil de calcul permettant l'intégration des paramètres viscoélastiques des matériaux, de la structure de chaussée, des conditions de charges et des conditions environnementales. Parmi les logiciels disponibles, le logiciel ViscoRoute© 2.0 est retenu. Son principe de fonctionnement ainsi que sa validation sont détaillés dans cette section.

2.7.2 Le logiciel ViscoRoute© 2.0

Le logiciel ViscoRoute© 2.0 (Chabot et coll., 2010) est un outil permettant de calculer de manière semi-analytique les champs de sollicitation dans une chaussée composée de matériaux élastiques et viscoélastiques au passage d'une charge roulante. La structure de chaussée est un demi-espace multicouche constitué de couches élastiques, les sols et fondations, et de couches thermoviscoélastiques, les enrobés bitumineux. Le chargement est une charge d'intensité constante et uniformément répartie sur une surface rectangulaire ou elliptique et se déplaçant à une vitesse constante. Le logiciel intègre le modèle viscoélastique de Huet-Sayegh. Comme présenté à la section 2.3.3.3 et au tableau 2.4, ce modèle rhéologique est constitué de deux branches en parallèle. La première branche possédant un ressort ainsi que deux amortisseurs paraboliques correspond à l'élasticité instantanée et retardée. La seconde branche est seulement constituée d'un ressort et correspond au comportement statique ou à long terme de l'enrobé.

Dans le repère fixe de la structure de chaussée (x,y,z), l'équation d'équilibre de champ se définit dans chaque couche i par l'équation 2-31 (Duhamel et coll., 2003).

$$\text{Div} \left(\underline{\underline{\sigma}}_{(x,y,z,t)} \right) = \rho_i \frac{\partial^2 u(x,y,z,t)}{\partial t^2} \quad \text{Équation 2-31}$$

Où : $u(x,y,z,t)$ = vecteur de déplacement

ρ_i = masse volumique du matériau de la couche i

$\underline{\underline{\sigma}}_{(x,y,z,t)}$ = tenseur des contraintes de Cauchy

Div = opérateur Divergence (analyse vectorielle)

Les conditions aux limites appliquées à la structure de chaussée sont les suivantes :

- Pour la surface libre, $\sigma(z=0).n = p_0$ sur l'aire de la charge et $\sigma(z=0).n = 0$ ailleurs. n étant la normale extérieure.
- Aux interfaces entre les couches, un collage parfait est imposé. Pour chaque interface (à la profondeur z_i) entre la couche $n^\circ i$ et la couche $n^\circ i+1$, il y a une continuité des déplacements et des contraintes. C'est-à-dire que $u(x,y,z_i^+,t) = u(x,y,z_i^-,t)$ et $\sigma(x,y,z_i^+,t).n = \sigma(x,y,z_i^-,t).n$
- En $z = +\infty$, les contraintes et les déplacements sont nuls c'est-à-dire que $u(x,y,+\infty,t) = 0$ et $\sigma(x,y,+\infty,t) = 0$.

En transposant le problème dans le repère de la charge roulante (X,Y,Z) et non le repère fixe de la structure de chaussée (x,y,z), la résolution de l'équation n'est alors plus fonction de la variable de temps t. Ce changement est possible en considérant que la charge se déplace en régime permanent à la vitesse V. En effectuant le changement de repère : $(x,y,z) \rightarrow (X-V.t, Y, Z)$ à l'équation 2-31, l'équation d'équilibre se définit alors par l'équation 2-32.

$$\text{Div} \left(\underline{\underline{\sigma}}_{(X,Y,Z)} \right) = \rho_i V^2 \frac{\partial^2 u(X,Y,Z)}{\partial X^2} \quad \text{Équation 2-32}$$

Où : $u(X,Y,Z)$ = vecteur de déplacement

ρ_i = masse volumique du matériau de la couche i

$\underline{\underline{\sigma}}_{(X,Y,Z)}$ = tenseur des contraintes

V = La vitesse de la charge roulante

L'algorithme de résolution consiste à effectuer la résolution de l'équation dans l'espace fréquentiel de Fourier et d'y intégrer les lois de comportement de chaque couche. Les méthodes de résolution reposent sur les travaux de thèse de Nguyen (2002) et les étapes principales de calcul sont présentées par Duhamel et coll. (2005). La résolution s'effectuant dans le domaine des nombres d'onde, le retour au domaine des variables d'espace (X,Y,Z) pour les champs de déplacement et de contrainte se fait par transformée de Fourier inverse. L'intérêt de la méthode de résolution réside dans la rapidité d'obtention de la solution tout en pouvant traiter l'ensemble d'une structure multicouche suivant sa profondeur. Pour une profondeur donnée, les résultats sont calculés le long d'un maillage bidimensionnel. Le logiciel ViscoRoute se compose d'un noyau de calcul développé en langage C++ ainsi que d'une interface graphique utilisateur (GUI). La version 2.0 du logiciel permet l'intégration au noyau de calcul de cas multicharges à pression uniforme pour des surfaces ponctuelles, elliptiques et rectangulaires. Il est à noter que le noyau de calcul peut être utilisé indépendamment de l'interface graphique et peut être intégré à d'autres algorithmes de calculs. Pour une profondeur donnée, les sorties offertes par le logiciel sont les trois composantes du vecteur de déplacement, les six composantes du tenseur des déformations ou les six composantes du tenseur des contraintes.

2.7.3 Validation du logiciel

La validation des calculs viscoélastiques a été effectuée suivant plusieurs approches. La première approche a été de comparer les résultats du logiciel avec les résultats d'une solution analytique dans le cas d'un massif semi-infini (Chabot et Piau, 2001). La comparaison entre les deux cas est jugée excellente puisque les différences sont inférieures à 1 %. La seconde approche a été de comparer les résultats pour une structure multicouche modélisée avec le module CVCR du logiciel CESAR-LCPC. La comparaison entre les résultats obtenus par le calcul par éléments finis et ceux de ViscoRoute est très bonne (Duhamel et coll., 2005). Ces résultats sont valides lorsque de mêmes hypothèses de calculs sont considérées (massif semi-infini). La troisième approche a été de comparer les résultats du logiciel ViscoRoute© 2.0 avec le logiciel VEROAD (Hopman, 1996) qui est un logiciel de calculs viscoélastiques mis au point à l'Université de Technologie de Delft aux Pays-Bas. Plusieurs études ont montré

une bonne corrélation entre des mesures in situ de déformation et les calculs effectués avec le logiciel VEROAD (Nilsson et coll., 1996). L'analyse comparative entre les deux logiciels montre que les résultats très proches à l'exception des hautes températures et des basses vitesses (Chabot et coll., 2010). Du point de vue de la programmation, les deux logiciels présentent des différences. ViscoRoute© 2.0 tient compte des forces d'inertie dans son calcul et la viscoélasticité est modélisée par l'intégration du module complexe dans l'algorithme de programmation. Sous VEROAD, les matériaux bitumineux sont modélisés à partir d'un module d'élasticité isostatique K linéaire élastique et d'un module de cisaillement G linéaire viscoélastique. Les différences entre les deux logiciels sont plus marquées sur des structures fines comparativement aux chaussées épaisses. Enfin, la dernière approche de validation a été de comparer les déformations calculées à des valeurs expérimentales obtenues lors d'une campagne de mesures en manège de fatigue. Duhamel et coll. (2005) ont montré que quelques différences pouvaient être observées entre le modèle et les mesures expérimentales, en particulier pour les déformations longitudinales. Les différences s'expliquent en partie par les incertitudes de modélisation en ce qui concerne les épaisseurs et les modules des différentes couches ainsi que le comportement du sol (considéré élastique dans le logiciel). En conclusion, l'étude montre que l'accord entre la modélisation et les mesures est satisfaisant compte tenu des hypothèses de modélisation effectuées. L'un des objectifs des essais effectués en manège de fatigue était d'identifier l'effet des charges multiessieux. Les signaux de modélisation montrent que les meilleures corrélations entre les mesures expérimentales et théoriques étaient obtenues avec une prise en compte des effets viscoélastiques (Kerzreho et coll., 2012). Le logiciel ViscoRoute© 2.0 est un outil adapté pour quantifier le comportement des structures bitumineuses et caractériser les déformations et les contraintes dans la structure.

2.7.4 Synthèse

L'analyse du comportement mécanique d'une structure de chaussée nécessite la connaissance du champ des déformations, des contraintes et des déplacements en plusieurs points spécifiques des couches de chaussées. Ces données sont accessibles avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Ce logiciel permet d'intégrer la loi de comportement viscoélastique de Huet et Sayegh pour les couches bitumineuses. Il permet également d'évaluer l'effet des caractéristiques de charges (multiessieux, dimensions, poids, vitesse) ainsi que l'effet de la

température. Sa validité a été prouvée au travers des analyses comparatives avec des outils de calculs reconnus et des mesures expérimentales. Son utilisation est donc adaptée à l'analyse du comportement mécanique des chaussées.

2.8 Instrumentation des chaussées

2.8.1 Problématique liée à l'instrumentation des chaussées

Afin d'évaluer la réponse mécanique et le comportement à long terme des couches de la chaussée, il est nécessaire de quantifier les déformations, les contraintes ou les déplacements s'exerçant au passage des charges lourdes. Ces mesures sont possibles en instrumentant la structure de chaussée à des profondeurs spécifiques pendant la construction ou bien après la fin des travaux de pose de l'ensemble des couches (méthode dite « après-coup »). L'instrumentation utilisée dans les chaussées doit répondre aux objectifs suivants :

- Résister aux conditions de mise en place de l'enrobé.

Lorsque l'instrumentation des couches bitumineuses est effectuée pendant la construction, les capteurs sont placés en contact direct avec l'enrobé. Les sollicitations (vibration, efforts transversaux et verticaux) dues au compactage sont appliquées lorsque la couche bitumineuse est à des températures élevées. Le module des enrobés est alors faible et les efforts transmis aux couches granulaires et au travers les couches bitumineuses sont maximaux. Les matériaux utilisés pour les capteurs doivent donc résister à des températures supérieures à 100 °C et aux efforts de compactage. Le compactage impose de plus un déplacement des granulats. Les capteurs doivent donc posséder une protection suffisante afin de limiter les risques d'écrasement des jauges par les granulats. L'endommagement associé au compactage est plus important lorsque les couches de revêtement sont fines et lorsque les capteurs sont installés proche de la surface. Cette problématique ne s'applique pas aux capteurs installés après la construction de la chaussée.

- Garantir la position et l'orientation des capteurs dans les couches.

L'objectif des capteurs de mesure est de relever les déformations dans le sens longitudinal ou transversal au roulement à une profondeur préalablement définie. L'interprétation des mesures expérimentale nécessite de connaître la profondeur d'installation des capteurs et de s'assurer

de leur orientation par rapport au plan de mesure. Au cours des étapes de pavage et de compactage, les capteurs peuvent être amenés à se déplacer et cela peut engendrer une rotation par rapport à l'orientation initiale modifiant ainsi l'amplitude et la forme du signal. Les résultats obtenus peuvent alors sous-estimer ou surestimer la « vraie » réponse mécanique de la structure. Cette problématique est particulièrement importante lorsque les capteurs de mesure sont utilisés à des fins de validation ou de développement de modèles de comportement. Lorsque les capteurs sont installés pendant la construction de la chaussée, il n'est pas possible de garantir avec précision leur positionnement. Leur position ne peut être obtenue qu'après la fin des essais routiers en détruisant la structure de chaussée autour des capteurs et en les extrayant. Lorsque les capteurs sont installés après la construction de la structure, le positionnement des capteurs est simplifié puisque l'étape de compactage est terminée.

- Suivre le comportement des matériaux sous différentes conditions environnementales.

Les capteurs de mesure doivent pouvoir garantir une lecture fine et fiable pour une large gamme de conditions expérimentales. Afin d'évaluer l'effet des charges et des conditions climatiques, les capteurs doivent posséder une fréquence d'acquisition élevée ainsi qu'une plage de mesure adaptée aux amplitudes de la sollicitation. Les outils de modélisation posent traditionnellement comme hypothèses que les couches sont homogènes et isotropes. Cependant, l'implantation de capteurs dans la structure engendre une discontinuité locale des propriétés des matériaux. La conception des capteurs et leur mise en œuvre dans la structure doivent atténuer cet effet intrusif afin d'adéquatement suivre le comportement mécanique des matériaux. Pour cela, lorsque les capteurs sont installés à la construction, l'ancrage dans le matériau est effectué à l'aide des matériaux eux-mêmes. Par exemple, l'enrobé bitumineux vient recouvrir le capteur de déformation. L'intégration de capteur après la construction de la chaussée nécessite des forages ou des traits de scie dans les couches. Ces actions entraînent une destruction et une modification locale des propriétés du matériau (découpe et échauffement des matériaux, concentration de contraintes, apport d'eau et de particules fines associées au forage). L'emploi de colle ou d'un liant est requis pour garantir l'adhérence des capteurs. Ces liants engendrent une discontinuité dans les couches de la chaussée. Les matériaux utilisés pour fabriquer les jauges, les capteurs ainsi que les colles doivent garantir une bonne transmission des contraintes lors de la sollicitation de la structure. La conception

d'un capteur doit donc tenir compte du comportement des matériaux, mais aussi des techniques de mise en place. Il doit permettre le suivi, sous plusieurs conditions environnementales, de la réponse mécanique.

- Résister aux contraintes imposées par les charges lourdes sur l'ensemble des mesures.

En fonction de la profondeur de la chaussée, les amplitudes mesurées par les jauges varient puisque la charge se distribue au travers la structure. Proche de la surface, les déformations peuvent être très élevées (supérieure à $800 \mu\epsilon$) tandis qu'à la base du revêtement bitumineux, l'ordre de grandeur est de $100 \mu\epsilon$. Les déformations verticales dans les couches granulaires sont également très élevées en particulier proche de l'interface entre le revêtement et la fondation. Les capteurs doivent garantir une précision de mesure indépendamment des conditions climatiques, des plages de mesure et résister à un nombre important de répétitions de charge. Afin de suivre l'évolution du comportement d'une structure routière, la durée de vie des capteurs doit être supérieure à 500 000 chargements. Dans le cas où une dérive dans le temps de la mesure apparaît, il est nécessaire de prévoir une correction des données.

- Garantir une lecture fine, fiable et répétable de la mesure.

Les capteurs de mesure placés dans les sols, les matériaux granulaires et les couches de revêtement, sont situés dans un milieu hétérogène. Ces milieux sont constitués de particules de taille, de forme et de propriétés physiques variables. Les capteurs, installés en un point spécifique de la couche, calculent une moyenne du mesurande sur la zone environnante à la jauge. Dans un enrobé bitumineux, la proximité des particules grossières (granulat) ou du liant peut influencer localement la mesure. Lors de la conception, la taille des capteurs doit donc être en adéquation avec les propriétés physiques et morphologiques des constituants des couches. À titre d'exemple, dans une couche bitumineuse, un capteur de petite taille pourrait se retrouver à proximité d'un granulat et mesurer des déformations très faibles compte tenu de la rigidité élevée du granulat. À l'inverse, si le capteur se retrouve à proximité d'une zone riche en liant les déformations pourraient être très élevées compte tenu de la basse rigidité du liant. La taille des capteurs doit donc être représentative des paramètres de couche. La rigidité des matériaux constituant le capteur doit être proche de celui du matériau utilisé. Une rigidité trop grande par rapport au matériau peut entraîner une sous-estimation des déformations et également imposer une discontinuité des propriétés de la couche à proximité du capteur. Les

matériaux constitutifs des capteurs doivent être conçus pour être capables de suivre les déformations de la couche sans affecter son comportement.

Les capteurs les plus adaptés à l'instrumentation des chaussées souples se divisent en trois catégories. Les capteurs de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer aussi appelés capteur de déplacement inductif) sont utilisés dans les sols et les matériaux granulaires. Ces capteurs permettent une mesure des déplacements dans les couches de fondation et les sols. Ils peuvent être mis en place directement dans les structures de chaussée ou servir à l'instrumentation des cellules de charge lors d'essais de laboratoire sur des matériaux non liés ou liés (Bilodeau, 2009 et Doucet et Auger, 2010). La seconde catégorie de capteur est associée à la mesure de la contrainte dans les couches et comprend les capteurs de type cellule de charge. En fonction de la taille et de la mesure désirée, les cellules de charge peuvent être de type hydraulique, pneumatique ou équipées de jauges de déplacement. Le capteur convertit un changement de pression, une force ou un déplacement en contrainte. La troisième catégorie de capteur permet la mesure de la déformation dans les couches bitumineuses à l'aide de jauges résistives. Cette catégorie de capteur est plus spécifiquement détaillée dans le paragraphe suivant puisqu'elle correspond en partie à l'instrumentation utilisée dans le cadre de ce projet.

2.8.2 Capteurs de déformations à la base des couches bitumineuses

Plusieurs centres de recherche ont conçu différents modèles de capteur afin de mesurer les déformations dans les couches bitumineuses. Dès les années 1980, ces centres de recherche ont collaboré afin de comparer les techniques existantes, mais également afin d'uniformiser les techniques de mise en place et les méthodes d'analyse des mesures obtenues. Ces collaborations ont été effectuées lors des essais de Nardo en Italie (OCDE, 1985 ; Scazziga et coll., 1987) et lors d'essais au manège de fatigue de Nantes en France (OCDE, 1991). Les techniques de mesure se sont ajustées et plusieurs conceptions de capteur ont été testées au Danemark (Krarup, 1991), en Finlande (Huhtala et Pihlajamäki, 1991), aux Pays-Bas (Vogelzang et Bouman, 1991) ainsi qu'aux États-Unis d'Amérique (Sebaaly et Tabatabaee, 1991). Les conclusions d'un second programme collaboratif intitulé : COST Action 347 « Improvements in pavement Research with accelerated load testing » proposent de nouveaux outils de comparaison entre les capteurs. Les capteurs testés ainsi que les principaux résultats

de ces recherches sont détaillés dans cette section.

2.8.2.1 Essais de Nardo et essais au manège de fatigue de Nantes

En 1982, les pays membres de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economiques) ont décidé de donner suite aux travaux effectués conjointement sur « les effets des véhicules lourds de marchandises » en créant un groupe international d'experts intitulé : « concertation sur les programmes d'utilisation d'équipements lourds de recherche et d'essais en vraie grandeur » (OCDE, 1985). L'objectif était d'examiner la recherche en matière de dimensionnement, de construction et d'entretien des chaussées par l'intermédiaire d'essais accélérés de chargement. L'harmonisation des programmes de recherche ainsi que la normalisation des méthodes de mesures et de calculs entre les 25 pays membres se sont retrouvés être les principaux objectifs à réaliser. Puisqu'aucun laboratoire de recherche n'a la preuve de l'absolue validité des résultats de ses mesures, des essais communs effectués dans les mêmes conditions (charge, structure, climat) ont été effectués sur une chaussée d'essais à Nardo (Italie). Trois catégories de capteurs de déformation ayant trois conceptions distinctes ont été évaluées et sont détaillées au tableau 2.6. La classification des capteurs est effectuée en fonction du mode d'installation des jauges sur leur support. La catégorie 1 correspond au capteur en H, la catégorie 2 correspond aux capteurs où la jauge est collée sur un matériau bitumineux conçu en laboratoire et la troisième catégorie correspond aux capteurs où les jauges sont collées sur une éprouvette prélevée dans la chaussée d'essais.

La catégorie 1 se divise en trois sous-catégories. La catégorie 1.1, utilisée principalement par trois équipes lors des essais, correspond aux capteurs où la jauge de déformation est insérée, par le fournisseur du capteur, à un barreau de plastique (barre centrale du H). Ce barreau est ensuite fixé, en laboratoire, à deux barreaux d'ancrage en aluminium (barre supérieure et inférieure du H) garantissant ainsi une bonne adhérence à la couche bitumineuse une fois mis en place. Les modèles peuvent varier en fonction de la taille des fils et des ancrages. La catégorie 1.2, utilisée par deux équipes lors des essais, désigne les capteurs où la jauge de déformation est collée à une lamelle d'aluminium qui est elle-même attachée à deux barres d'ancrage en aluminium. Cette technique nécessite la mise en place en laboratoire d'une protection autour de la jauge pour éviter un écrasement par les granulats lors de la mise en place. La catégorie 1.3 est vendue sous le format proposé et ne nécessite aucune préparation

en laboratoire. Les coûts des capteurs varient en fonction de la taille du capteur et du modèle sélectionné.

Tableau 2.6 : Classification des capteurs de l'essai à Nardo (OCDE, 1985)

Catégorie	Schéma	Modèle de jauge	Longueur active du fil/ancrage	Résistance Ω	Coût (US \$)	Équipe	Montage
1.1		Kyowa KM-120-H2-11L 100-3	70 mm/104 mm	120 \pm 1 %	40	3	Fixation des barreaux d'ancrage en laboratoire
		Kyowa KM-120-H2-11L 100-3	70 mm/106 mm	120 \pm 1 %	35	5	
		Kyowa KM-120-H2-11L 100-3	70 mm/100 mm	120 \pm 1 %	75	7	
1.2		Kyowa KC-70-A1-11	67 mm/130 mm	120	35	2	Collage de la jauge sur le support et fixation des barreaux en laboratoire
		PL30 ou Kyowa KFC-30-C1-11	30 mm/100 mm	120	23	6	
1.3		HBM DA 3	88 mm/140 mm	350	180	1	
2.1		HBM LP 21 60-120	60 mm/60 mm	120	12	1	Collage sur 1/3 de la hauteur sur éprouvette Marshall
		BHL FAE 2-300-35 PL	76 mm/76 mm	350	35	8	
2.2		HBM 20/600 XA21	20 mm/20 mm	600 \pm 0,25	10	9	Collage au milieu d'une éprouvette de laboratoire
2.3		Metal Foil Gauge	13 mm/25 mm	120	15	4	Collage sur bloc de « sheet asphalt »
3.1		HBM LP 21 60-120	60 mm/60 mm	120	12	1	Collage sur éprouvette prélevée dans la chaussée
		HBM 60/600 LP 21		600 \pm 0,25	15	3	

La catégorie 2 se divise elle aussi en 3 sous-catégories. Quatre équipes de recherche ont collé les jauges de déformations directement sur des matériaux bitumineux. Ces supports ont la forme d'un cylindre de diamètre de 160 mm pour la catégorie 2.1, d'un cube de 20 mm de large pour la catégorie 2.2 et d'une fine plaque carrée pour la catégorie 2.3. Pour l'ensemble des cas, les supports bitumineux ont été préparés et compactés en laboratoire. Le coût des jauges est inférieur à la catégorie 1, mais la préparation des capteurs nécessite des travaux de laboratoire supplémentaires. La catégorie 3 comprend les capteurs cylindriques où les jauges sont installées au bas et sur le dessus d'éprouvettes préalablement prélevées sur le site d'essais. Ces capteurs sont par la suite remis en place par forage et collés à l'aide de colle époxy. Pour les essais de Nardo, les capteurs instrumentaient une structure de chaussée constituée de deux couches d'enrobé bitumineux (de 50 mm et 80 mm) surmontant une fondation granulaire de 170 mm. Les mesures ont été effectuées sous plusieurs conditions de charges, de vitesses et de températures.

Les principales conclusions et les recommandations de cette étude sont les suivantes :

- Les conditions de pose : suite à la pose du revêtement bitumineux et au compactage des couches, un taux de perte de signal ou de détérioration des capteurs est habituellement estimé à 50 %. Pour les essais Nardo, l'attention particulière apportée à la mise en place a permis un taux de succès plus important. Les pertes les plus importantes ont été notées pour les capteurs de la catégorie 1.2. Les protections entourant plusieurs capteurs n'étaient pas suffisantes. Le long de la section d'essais, la structure de chaussée a montré une forte hétérogénéité de ses propriétés physiques et mécaniques ainsi que de l'épaisseur des couches. Cela a pour effet de rendre plus complexe la comparaison entre les capteurs. Une attention particulière est préconisée lors d'essais comparatifs en ce qui concerne les conditions de pose des matériaux et des capteurs.
- Les conditions d'essais : quatre paramètres ont été identifiés comme étant des variables importantes à considérer dans l'interprétation des mesures, à savoir la température du revêtement bitumineux, la variation de l'épaisseur des couches bitumineuses, la distance des capteurs par rapport à la charge et sa profondeur par rapport à la surface. Le contrôle de la température a montré qu'un écart de température de 5 °C peut entraîner des erreurs sur la mesure de la déformation pouvant aller jusqu'à 50 %. De même, un décalage de 20 mm de la charge par rapport au capteur peut entraîner jusqu'à 30 % d'écart dans les mesures. Un contrôle précis du placement des capteurs dans la structure est très fortement recommandé pour garantir une lecture fiable de la mesure.
- Les types de capteurs : la raideur des capteurs influence la mesure de la déformation. Cet effet est particulièrement marqué avec les capteurs de la catégorie 1 puisque ceux-ci possèdent des ancrages aux extrémités. La présence des ancrages modifie localement la rigidité de l'enrobé bitumineux. Des mesures calculées avec et sans présence de capteurs montrent que leur présence entraîne des erreurs de 4 % à 8 % en fonction de la température pour les capteurs de type 1.1 et de l'ordre de 7 % à 21 % pour les capteurs de types 1.2. Les capteurs de types 1.2 présentant des rigidités supérieures de par la protection entourant les jauges, les déformations relevées sont généralement plus faibles qu'avec les autres capteurs, mais les résultats sont plus consistants. La sensibilité de ces

capteurs par rapport à la température est également moindre. En ce qui concerne les capteurs de type 2 et 3, leur principal avantage est la possibilité de les mettre en place dans la chaussée existante en s'assurant de leur positionnement tout en garantissant un taux de succès supérieur. Cependant, la présence de colle époxy influence la mesure de la déformation en augmentant localement la raideur autour du capteur. La diminution de l'épaisseur de colle est préconisée afin de limiter cette perturbation.

- L'analyse des mesures expérimentales : pour les cas spécifiques de l'étude, des calculs théoriques de la déformation ont été effectués afin de les comparer aux mesures expérimentales. Les capteurs de types 1.1, 1.2, 2.3 et 3.1 présentent les meilleures corrélations entre les mesures in situ et les calculs. L'écart-type des mesures pour les capteurs de type 1 est de l'ordre de $50 \mu\epsilon$ (pour des amplitudes de l'ordre de $250 \mu\epsilon$). En ce qui concerne les capteurs de type 2 et 3, les écarts-types sont de l'ordre de $100 \mu\epsilon$ pour les mêmes cas d'étude. Les capteurs de type 2.1 et 2.2 présentent des écarts par rapport à la moyenne de plus de 150 %. Dans leur ensemble, les capteurs de type 1.2, 1.3, 2.1 et 3.1 présentent des mesures inférieures de 30 % à 40 % par rapport à la moyenne.

Compte tenu des résultats de cette étude, des essais complémentaires ont été effectués au manège de fatigue de Nantes afin de valider les précédentes observations, de pallier aux erreurs expérimentales et réduire les imprécisions engendrées par les paramètres extérieurs. Ce programme d'étude intitulé Projet FORCE visait à poursuivre les essais croisés et collaboratifs des pays membres de l'OCDE (OCDE, 1991). Au cours de ce projet, trois structures de chaussées ont été instrumentées avec des capteurs de type 1.1 et 1.2. Les quatre bras du manège de fatigue ont été réglés pour appliquer quatre différents tonnages pour plusieurs vitesses de rotation et le tout sous plusieurs conditions de température. En complément de cette instrumentation, l'Université de Technologie de Delft a installé des capteurs de type TML (tableau 2.7). Ces capteurs sont constitués d'un tube étanche à faible module. À l'intérieur de ce tube est disposée une fine poutre sur laquelle les jauges de déformation sont collées. Ces capteurs possèdent une forte résistance à la chaleur (jusqu'à 180°C), une grande plage d'utilisation ($5000 \mu\epsilon$) et sont donc idéales pour résister aux sollicitations imposées par la mise en place de l'enrobé bitumineux et le compactage. Les

capteurs TML possèdent des ancrages de forme cylindrique et de faible diamètre contrairement aux capteurs de type 1.1 et 1.2 qui ont des ancrages rectangulaires. Enfin, le laboratoire des Routes et de la Circulation du Centre de Recherche technique de Finlande (VTT) a poursuivi ces recherches sur les capteurs de type 2.1. Ce système de mesure se compose de jauges de déformation collées à des éprouvettes de 15,24 cm (6 pouces) de diamètre effectuées en laboratoire. Ces éprouvettes cylindriques viennent par la suite s'adapter à un trou dans la chaussée avec une faible tolérance afin de limiter le volume et l'épaisseur de colle utilisée pour le scellement. Les éprouvettes se comportent comme une partie intégrante de la chaussée et leur effet de renforcement est minime puisque les matériaux utilisés sont identiques aux couches en place et l'épaisseur de colle est très faible.

Les conclusions du Projet FORCE et des travaux complémentaires des laboratoires de recherche sont les suivants :

- Les capteurs TML ont montré au cours des essais une bonne durabilité et une bonne résistance à la fatigue. Des mesures au déflectomètre à masse tombante sous différentes charges ont montré une concordance raisonnable entre les déformations mesurées et les déformations calculées et cela pour les deux structures analysées (OCDE, 1991). Ces types de capteurs sont des outils pertinents pour l'analyse du positionnement de la charge, de l'effet du type de pneu, de l'effet de la température et peuvent être utilisés pour caractériser le comportement mécanique des structures bitumineuses. Les recherches de l'Université de Technologie de Delft ont défini des procédures de mise en place et d'analyse des signaux de déformation permettant de rendre fiables les mesures effectuées à l'aide de ce type de capteur (Vogelzang et Bouman, 1991).
- Suite aux essais de Nardo, le VTT a fait des capteurs de type 2.1 leur référence pour la mesure des déformations dans les couches bitumineuses. Les travaux effectués sur ces types de capteurs ont montré leur bonne adaptabilité en particulier en ce qui concerne la profondeur de mise en place et l'orientation des mesures. Des modélisations effectuées à partir d'un modèle de Burger ont montré une bonne capacité des capteurs à évaluer le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux (Huhtala et Pihlajamäki, 1991). Les résultats montrent que ces capteurs permettent une bonne caractérisation de la forme

des signaux de déformation et cela pour une plage étendue de température et de charge. Les capteurs placés dans la direction transversale sont plus sensibles au positionnement relatif de la charge que les capteurs longitudinaux. Les études montrent également que ces types de capteurs sont adaptés pour l'évaluation de l'effet du type de pneu sur la réponse mécanique des couches bitumineuses.

- Les capteurs de types 1.1 et 1.2 mis en place par le LCPC permettent un suivi du comportement viscoélastique des matériaux et peuvent être utilisés pour analyser les effets de température et de vitesse dans les revêtements bitumineux. Les mesures montrent une dispersion importante des amplitudes relevées entre les différents capteurs pour les structures minces. Cette dispersion diminue lorsque l'épaisseur de la structure de chaussée augmente. Ces capteurs permettent un suivi du comportement à long terme de la structure puisque l'augmentation des déformations en bas de couche a pu être associée à l'état de la fissuration relevé en surface de la chaussée. Compte tenu de l'endommagement non homogène de la structure, la dispersion entre les capteurs augmente avec le nombre d'application de charge. Des pertes importantes de capteur (pas de signal ou signaux non valides) de l'ordre de 50 % à 60 % ont été notées au cours des essais.
- L'analyse comparative entre les capteurs du LCPC, du VTT et de l'Université de Technologie de Delft, montre une tendance identique concernant l'effet de l'épaisseur de la structure de chaussée et l'effet de la charge. Les mesures pour une condition de charge donnée présentent cependant une dispersion importante entre chaque type de mesure. Cette dispersion est observable autant pour les capteurs orientés longitudinalement que transversalement dans la structure.

Les capteurs de type 1.1 et 1.2 du LCPC, de type 2.1 pour le VTT ou de types TML pour l'Université Technologique de Delft permettent tous de faire le suivi du comportement des matériaux bitumineux. À l'aide de ce type de capteur, il est possible d'évaluer l'effet de l'intensité de charge, de la vitesse et de la température. Ces analyses se limitent cependant à des études comparatives entre chaque condition expérimentale. Chaque type de capteur possède des avantages et des inconvénients associés à leur conception, leur fabrication et leur

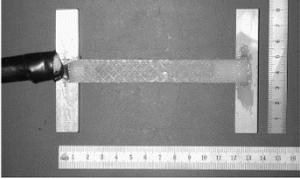
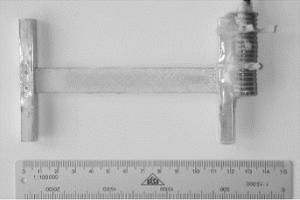
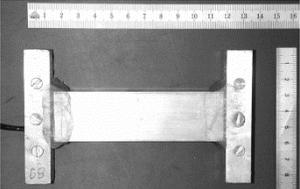
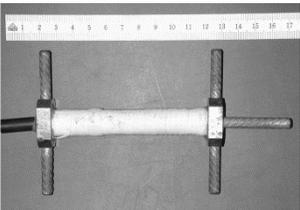
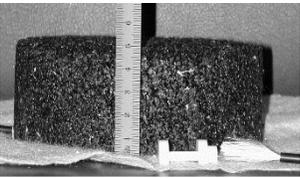
mise en place. L'utilisation d'un type de capteur peut être préférée en fonction des objectifs spécifiques des programmes expérimentaux. Les différentes campagnes d'essais visant à comparer la mesure absolue de chaque capteur n'ont pas apporté de conclusions satisfaisantes. La dispersion des valeurs entre chaque capteur d'une même conception et entre les différentes conceptions ne permettent pas de conclure sur l'absolue validité d'un type de capteur et des mesures associées.

2.8.2.2 Le programme COST 347 et les essais au laboratoire LAVOC à L'EPFL

Un des objectifs du projet COST 347 intitulé « Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing » est d'utiliser un accélérateur de chargement afin de développer et de comparer les différentes méthodes de mesure et d'analyse de la déformation dans les couches bitumineuses. Dans le cadre de ce projet, le Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a travaillé sur sept missions. Les missions 1 (Golkowski, 2003), 4, 5 (Heinrich et Janauschek, 2003) et 6 (Wistuba, 2004) visaient spécifiquement l'analyse comparative de sept types de capteurs. Ces derniers sont présentés au tableau 2.7.

Les capteurs LAVOC, ETHZ et LCPC correspondent aux types 1.1 et 1.2 précédemment testés lors des projets OCDE. Le capteur BAST est un capteur en H de type 1.1 où la barre d'époxy dans laquelle se situe la jauge, possède une largeur plus grande et une épaisseur plus fine que les autres modèles. Le capteur TU-Delft est un capteur de type TML. Le capteur CEDEX est une fine feuille dans laquelle une jauge de déformation est intégrée. Finalement, le capteur LAVAL correspond au premier modèle de capteur avec une jauge à fibre optique ayant un interféromètre de type Fabry-Pérot. La jauge est insérée à un corps polymère qui vient s'insérer dans une éprouvette cylindrique d'enrobé bitumineux.

Tableau 2.7 : Caractéristiques des capteurs du programme COST 347 et des essais au LAVOC (Chenevière et coll., 2005, Wistuba et Perret, 2004)

Code Pays	Photographie des capteurs	Type de jauges Caractéristiques	Fabriquant	Dimension (en mm)
LAVOC Lausanne Suisse		Kyowa KM-120-H2-11W1M3 Résistance : 120 Ω Module : 2 800 MPa	Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd	Barre époxy : 4,5 x 15 x 120
ETHZ Zurich Suisse		Kyowa KM-120-H2-11W1M3 Résistance : 120 Ω Module : 2 800 MPa	Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd	Barre époxy : 4,5 x 15 x 120
LCPC Nantes France		Kyowa KM-120-H2-11W1M3 Résistance : 120 Ω Module : 2 800 MPa	Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd	Barre époxy : 4,5 x 15 x 120
BAST Allemagne		HBM 1-LY11-10/350A Résistance : 175 Ω Module : 20 000 MPa	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Germany	Barre époxy : 1 x 10,5 x 133 Ancrage : 80 x 16
TU-Delft Pays-Bas		KM-100HAS Capteur TML Résistance : 350 Ω Module : 40 MPa	Tokyo Sokki Kenkujo Co. Ltd	Longueur : 155 mm Ancrage cylindrique : 85 mm
CEDEX Espagne		MM EA-06-10CBE-120 Résistance : 120 Ω Module : 165 MPa	Vishay Measurements Group Inc. Raleigh, North Carolina	Longueur : 25,4 mm
LAVAL Québec Canada		Jauge à fibre optique Interféromètre : Fabry-Pérot	Fiso Technologie Inc. Québec, CAN	

Au cours des différentes missions du projet, une structure de chaussée constituée de trois couches d'enrobé bitumineux, d'une épaisseur totale de 220 mm, surmontant une fondation

granulaire de 280 mm a été instrumentée. Trois conditions de température, deux chargements axiaux, deux types de pneus gonflés à deux pressions différentes et deux vitesses de charge ont été testés. Plusieurs positions de la charge relativement aux capteurs ont été testées afin de définir les signaux types associés à chaque capteur. Sur une même ligne de sollicitation, un capteur de chaque type a été installé afin de comparer la forme de chacun des signaux obtenus. La mission 1 a mis en place une procédure d'évaluation des résultats afin d'identifier les points caractéristiques des signaux de déformations. Six paramètres d'analyse ont servi de critère de comparaison entre les capteurs pour les différentes missions. Les paramètres d'analyse sont les suivants : (1) l'amplitude maximale mesurée, (2) l'amplitude entre le maximum de contraction précédent la charge et le maximum d'extension au passage de la charge, (3) le ratio entre le maximum de contraction et le maximum d'extension, (4) la vitesse de déformation, exprimée en $\mu\epsilon/s$, pour le passage de la contraction à l'extension, (5) le temps entre le maximum de contraction et le maximum d'extension et (6) le décalage temporel entre le passage de la charge et la mesure de la déformation maximale. Le même protocole d'analyse a été effectué pour l'ensemble des conditions expérimentales et les résultats ont été comparés par rapport à une condition de référence. La figure 2.17 présente (a) la déformation maximale relevée par les différents capteurs pour cette condition de référence (température de 15 °C, chargement de 115 kN, pneu simple gonflé à 8 bar et circulant à 11 km/h), (b) et (c) les ratios des déformations relevées pour les températures de 5 °C et de 30 °C par rapport à la température de référence. Cette même approche comparative a également été effectuée pour évaluer l'augmentation des déformations sous l'effet des deux chargements (80 kN et 115 kN).

L'analyse des signaux a montré que les capteurs présentaient tous la même forme pour la déformation transversale et longitudinale à l'exception des capteurs CEDEX où la phase de contraction s'exerçant après le passage de la charge n'apparaît pas. Cette absence s'expliquerait par le fait que les capteurs CEDEX ne possèdent pas d'ancrage et les efforts ne seraient alors pas correctement restitués à la jauge. Les différentes séries de mesure ont également montré que la mesure absolue des capteurs se situe dans une plage de valeur très étendue. Cette conclusion va à l'encontre des résultats escomptés pour des mesures effectuées simultanément pour une même condition expérimentale. Comme présenté à la figure 2.17 pour la condition de référence, les déformations maximales varient entre 80,6 $\mu\epsilon$ et

175,1 $\mu\epsilon$. L'analyse des ratios des maximums de déformations entre la contraction et l'extension montre cependant des comportements très similaires entre les capteurs, à l'exception du capteur CEDEX où les ratios sont deux fois plus élevés. Les valeurs pour la vitesse de déformation sont sensiblement les mêmes pour tous les capteurs, à l'exception des capteurs TU-Delft où les mesures sont beaucoup plus faibles d'un facteur 3 et plus. Il est à noter que les capteurs de type BAST présentent des vitesses de déformation légèrement plus grandes. L'augmentation de la charge engendre une augmentation de l'amplitude de la déformation maximale, du ratio des déformations et également de la vitesse de sollicitation. Cet effet est mesurable par l'ensemble des capteurs. Le taux de variation d'une condition expérimentale comparativement à une autre est cependant variable en fonction du type de capteur. Ce taux de variation peut être évalué en calculant le ratio entre la valeur d'une condition donnée et la valeur de référence. Le ratio des déformations est sensiblement le même pour tous les capteurs. Cela signifie qu'indépendamment du capteur utilisé, l'évaluation relative de l'effet de la charge est la même. Dans cette étude, les capteurs ont montré qu'une baisse de 30 % de la charge diminue d'environ 20 % les déformations. Les conclusions sont les mêmes en ce qui concerne le temps et les vitesses de sollicitation mesurés par les différents capteurs. L'augmentation de la température des couches bitumineuses entraîne une augmentation des déformations, des vitesses des déformations et impose également une baisse du temps d'application de la charge. En considérant l'amplitude maximale relevée par chaque capteur, il apparaît que tous les capteurs ne présentent pas la même sensibilité par rapport à la température. Lorsque la température passe de 5 °C à 15 °C, les déformations mesurées augmentent. Comme présenté à la figure 2.17(b) le ratio des déformations est d'environ 0,75. L'écart-type entre les capteurs est faible ce qui montre une bonne cohérence entre les valeurs obtenues par chaque type de capteur. Lorsque la température est plus élevée (30 °C), des écarts significatifs apparaissent entre les capteurs. Comme présenté à la figure 2.17(c), plusieurs capteurs sous-estiment l'effet de la température et inversement d'autres le surestiment. Lorsque les températures sont élevées, plusieurs capteurs d'un même type montrent également une grande dispersion au niveau de leurs mesures. Théoriquement, tous les capteurs du même type, ayant la même conception, devraient donner une seule et même valeur. Lorsque les températures sont élevées, cela n'est pas le cas à l'exception des capteurs du TU-Delft et des capteurs BAST où la dispersion des mesures est moins marquée. Finalement, une dernière

analyse basée sur la mesure du décalage temporel entre le passage de la roue et l'endroit où la déformation est maximale a été effectuée. Cette étude montre des résultats très similaires entre tous les capteurs.

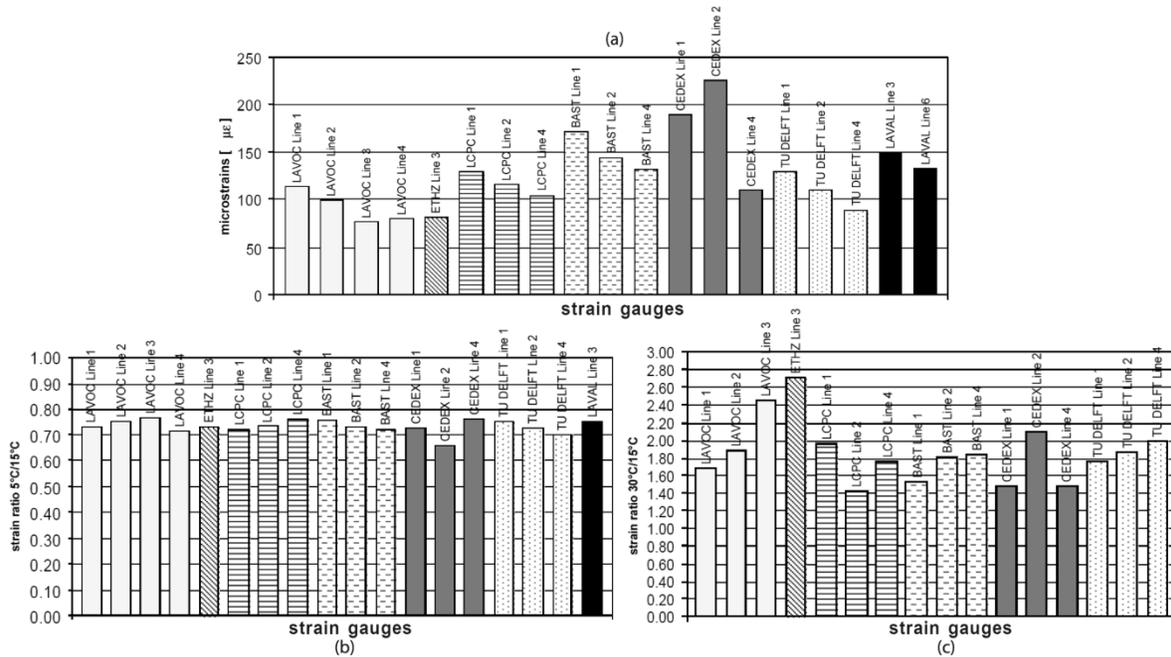


Figure 2.17 : Analyse comparative des capteurs du projet COST 347 suivant le critère : (a) maximum des déformations, (b) ratio des déformations entre 5 °C et 15 °C et (c) ratio des déformations entre 30 °C et 15 °C (Chenevière et coll., 2005)

Les écarts entre les différents capteurs s'expliquent en partie par leur positionnement dans la structure et par l'influence du matériau bitumineux entourant le capteur. Afin de supprimer ces effets et uniquement comparer l'influence de la forme des capteurs et des techniques de conception, Heinrich et Janauschek (2003) ont placé des capteurs dans une poutre d'époxy, sur laquelle ils ont effectué des essais de flexion 4 points. La déformation théorique du capteur est connue et comparée à la déformation mesurée expérimentalement. La poutre est constituée d'époxy qui est un matériau homogène, isotrope et son module est constant car le dispositif est placé dans une chambre environnementale. Ce protocole expérimental permet d'éliminer toutes les influences extérieures. Les écarts entre les capteurs sont donc uniquement dus à la conception du capteur. Trois niveaux de déformations ont été testés (100 $\mu\text{m}/\text{m}$, 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ et 300 $\mu\text{m}/\text{m}$). Pour ces trois niveaux, les déformations mesurées sont conformes aux valeurs calculées. Les écarts entre les données expérimentales et théoriques sont inférieurs à 5 %. Les capteurs LCPC, LAVOC, LAVAL et ETHZ présentent des déformations supérieures aux valeurs analytiques contrairement au capteur TU-Delft dont les valeurs sont légèrement

inférieures.

Le programme COST 347 et les travaux au laboratoire LAVOC ont permis de mieux comprendre le comportement des couches bitumineuses à travers la mesure des déformations à différents niveaux dans la couche. En ce qui concerne l'analyse comparative des capteurs, Chenevière et coll. (2005) concluent que les différentes techniques de mesure peuvent apporter différents résultats, en particulier au niveau de la mesure absolue de la déformation. Pour cette raison, ils concluent que chaque type de capteur peut être utilisé à des fins expérimentales, mais que les résultats doivent être exploités en considérant un intervalle de confiance qui leur est propre pour chaque condition expérimentale.

2.8.3 Instrumentation des couches bitumineuses proche de la surface

Dans les premiers centimètres sous le pneu, les capteurs de déformations doivent résister à des contraintes élevées imposées par la charge ainsi qu'à des variations de température importantes au cours d'une journée de mesure. Les capteurs précédemment discutés ne sont pas adaptés pour ce type d'instrumentation puisqu'ils ne peuvent pas résister aux températures élevées ni au compactage des couches bitumineuses. Seuls des capteurs dont l'installation est effectuée après la construction sont envisageables. Gokhale et coll. (2008) ont installé trois séries de jauge d'extensométrie par collage à même la surface de la couche bitumineuse. Une première série de jauge est placée au milieu du sentier de roue et les deux autres sont situées à 12,7 cm (5 pouces) et 38,1 cm (15 pouces) à partir de l'extérieur du sentier de roue. Dès les premiers passages de roues, les capteurs situés directement sous la charge ont été arrachés et aucune mesure n'a été possible. Les deux autres séries de capteurs ont montré une lecture fiable et répétable. Ces jauges ont permis d'identifier une extension et une contraction du revêtement en fonction de la position du pneu. Afin de pallier aux problèmes d'adhérence des jauges au passage des charges, Xue et Weaver (2011) ont collé plusieurs rosettes de capteur sur les parois d'un trou carré effectué en surface du revêtement. Les capteurs placés à 2,5 cm (1 pouce) de profondeur permettent une lecture suivant trois directions dans un plan donné (deux directions orthogonales et une troisième formant un angle de 45°). Cette technique d'instrumentation permet une lecture des déformations dans la direction désirée et permet également de calculer le cisaillement s'exerçant dans le revêtement au passage du pneu. L'exploitation des signaux après correction et ajustement des données permet d'évaluer

l'effet du type de pneu et d'identifier les déformations critiques s'exerçant proche de la surface. En fonction des conditions expérimentales, cette technique présente une dispersion importante dans la lecture des amplitudes mesurées sous le pneu. Lors de la mise en place des capteurs, les jauges sont placées à même les parois du trou puis un matériau vient combler le vide. Cette zone de discontinuité peut interférer sur la lecture des mesures. Le choix des matériaux à utiliser doit être fait afin d'être au plus proche des matériaux environnants.

Afin d'évaluer les déformations à 2,5 cm sous la surface, Pierre et coll. (2003) ont élaboré une plaque dont l'intégration dans la structure de chaussée est effectuée en la fixant dans un socle support. Cette plaque comprend 30 jauges verticales, 15 jauges transversales et 15 jauges longitudinales et ses dimensions sont de 30,48 cm x 60,9 cm x 10,16 cm (1 pied x 2 pieds x 4 pouces). La plaque est constituée de granulats liés entre eux par de la colle époxy. Plusieurs granulométries et types de colle ont été testés en laboratoire afin que le module du mélange soit au plus proche de celui d'un enrobé bitumineux. Cette technique de pose permet une bonne protection des jauges lors des mesures puisque les risques d'arrachement sont réduits. Ces capteurs ont permis d'analyser l'influence du type de pneu sur la distribution des déformations à 25 mm de profondeur dans le revêtement.

2.8.4 Synthèse

L'instrumentation des chaussées et en particulier la mesure des déformations pose un certain nombre de problématiques. Les capteurs doivent être conçus pour correctement adhérer aux couches bitumineuses et permettre un suivi de son comportement mécanique sous toutes les conditions expérimentales. Le capteur est placé dans un milieu hétérogène, non isotrope et viscoélastique et ne doit pas influencer localement le comportement de la couche bitumineuse. Les différentes conceptions existantes possèdent toutes des avantages et des inconvénients associés à leur mise en place et à la prise de mesure qui en découle. Les campagnes expérimentales visant à comparer les différents types de capteurs ne permettent pas de recommander un type de capteurs en particulier. Dans un milieu parfaitement contrôlé, les capteurs existants offrent des mesures fiables et fidèles. Une fois mis en place dans les couches bitumineuses, ces derniers présentent parfois des mesures très dispersées. Plusieurs capteurs apparaissent cependant plus adaptés lorsque les mesures visent à évaluer des paramètres de charges précis ou l'effet des conditions environnementales. Dans tous les cas, les mesures

prises avec ces capteurs sont à interpréter avec un intervalle de confiance. Il est recommandé de définir cet intervalle pour chaque capteur. À l'image des différentes campagnes expérimentales, il est aussi préconisé d'associer les mesures relevées expérimentalement à des calculs effectués à partir de logiciels de modélisation. Proche de la surface, l'instrumentation est très différente des capteurs en bas de couche. Seules des techniques de pose, effectuées après la construction de la structure, garantissent une bonne fonctionnalité des jauges. Ces techniques sont destructives, car les couches bitumineuses doivent être travaillées (forage, trait de scie) afin de pouvoir y installer les capteurs. Un dispositif de protection doit également être mis en place pour protéger les capteurs. Les sollicitations thermiques et celles imposées par les charges sont très élevées directement sous la charge et la conception des capteurs doit être pensée afin de résister à ces deux éléments.

2.9 Interfaces entre les couches de la chaussée

Dans une structure de chaussée, l'interface entre deux couches de chaussée se définit par la zone de contact entre deux couches de matériau. Les interfaces apparaissent chaque fois qu'une couche différente de matériau est utilisée et mise en place. Pour les matériaux liés et non liés, des épaisseurs limites de mise en œuvre sont imposées pour garantir la performance et les propriétés mécaniques des matériaux. Une mise en œuvre par couches successives est alors nécessaire créant une interface entre chacune. Entre chaque couche bitumineuse, une couche de liant d'accrochage assure le collage entre les matériaux bitumineux. C'est cette couche qui est considérée comme l'interface entre les couches bitumineuses.

2.9.1 La couche d'accrochage

La construction de la structure de chaussée est effectuée en plusieurs étapes. Lorsque plusieurs couches de revêtement bitumineux sont mises en place, une couche d'accrochage est répandue avant la pose de la couche suivante. Cette couche d'accrochage assure le collage des couches bitumineuses et le revêtement agit alors comme un bloc unique déformable. Les émulsions bitume sont de bons produits à utiliser comme liant d'accrochage. Les émulsions doivent être appliquées uniformément sur une surface propre et sèche au moyen d'une rampe de distribution (Québec, 2009). Le choix de l'émulsion dépend des couches en place et des conditions météorologiques. Plusieurs paramètres peuvent affecter le niveau de collage des

couches et conduire à une usure prématurée des couches bitumineuses, voire à un décollement des couches de roulement. La présence de polluant comme de la poussière ou des impuretés, la présence d'eau, un dosage mal contrôlé ou non homogène, l'absence de liant ou sa détérioration partielle lors de la mise en œuvre sont des éléments à proscrire lors de la pose des couches bitumineuses. Les propriétés physiques des couches d'accrochage et leur comportement mécanique sont influencés par la température et les vitesses de charge. Lors du dimensionnement d'une structure de chaussée, les propriétés associées aux interfaces ont une forte incidence sur la répartition des contraintes et des déformations dans la structure et par conséquent sur la durée de vie estimée des couches (Chupin et Chabot, 2009). L'interface entre deux couches peut être modélisée collée, glissante ou décollée. Dans le cas où l'interface est considérée comme collée, les modèles mathématiques de calcul imposent une continuité des déplacements et du vecteur contrainte suivant la normale à l'interface de part et d'autre de l'interface (Chupin et coll., 2010). Lorsqu'une interface est considérée comme glissante, il y a une possibilité de discontinuité entre les déplacements horizontaux des couches situées de part et d'autre de l'interface. Cependant, la continuité du déplacement vertical et de la contrainte verticale reste imposée. En d'autres termes, les déplacements relatifs entre les couches ne sont pas empêchés. Enfin, une interface est considérée comme décollée lorsqu'il y a une possibilité de discontinuité à la fois des déplacements tangentiels et verticaux de part et d'autre de l'interface.

2.9.2 Effet des conditions d'interface

La performance du collage entre deux couches bitumineuses est fonction du liant utilisé, de son dosage et de sa compatibilité avec les matériaux constituant chacune des couches bitumineuses. Cette performance varie au cours du temps en fonction de l'endommagement et de la fatigue des couches d'accrochage. L'évaluation de la performance des couches d'accrochage permet un dimensionnement plus adapté de la structure des chaussées. Chupin et Chabot (2009) et Chupin et coll. (2010) ont montré qu'en fonction des conditions d'interface imposées entre les couches bitumineuses, les critères de dimensionnement étaient modifiés. Une structure, constituée de trois couches bitumineuses d'épaisseurs 8 cm, 12 cm et 20 cm surmontant une fondation infinie est analysée sous plusieurs vitesses de charge et plusieurs températures. Dans un premier cas, toutes les interfaces sont modélisées

parfaitement collées. Dans un second cas, l'interface entre la couche 2 et 3 est modélisée comme glissante. Une partie des résultats est présentée à la figure 2.18. Cette figure représente la distribution des déformations et des contraintes longitudinales dans la structure.

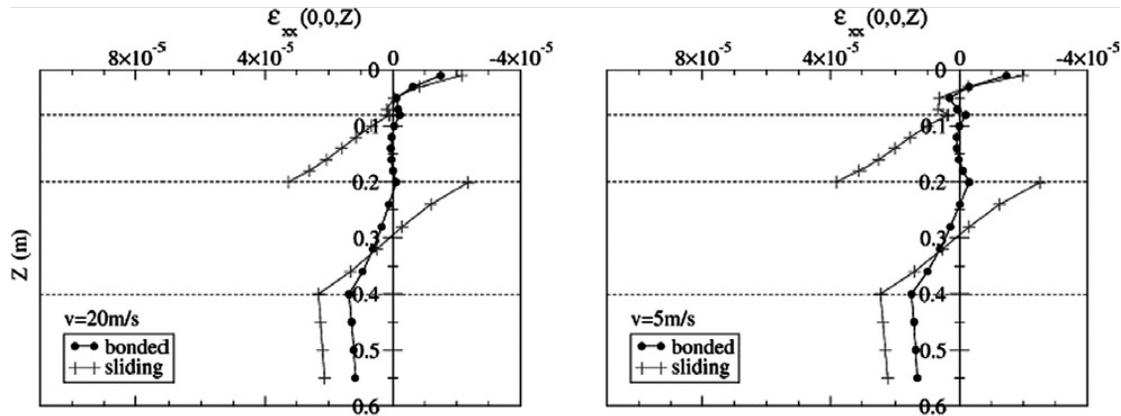


Figure 2.18 : Distribution de la contrainte longitudinale (σ_{xx}) et de la déformation longitudinale (ϵ_{xx}) suivant la profondeur en considérant l'interface entre la couche 2 et 3 comme étant collée ou glissante (Chupin et coll., 2010)

Dans le cas où l'interface est collée, le critère de dimensionnement est la déformation en extension située à la base de la couche 3. Lorsque l'interface est glissante, une discontinuité de la déformation et de la contrainte apparaît au niveau de l'interface. Les contraintes à la base de la couche numéro 2 qui étaient, dans le cas collé, en compression passent à un état de traction. De même, les déformations passent d'un état en contraction à de l'extension. Suivant cette observation, la couche numéro 2 peut s'endommager par fatigue par des sollicitations répétées en traction. L'interface glissante a aussi pour effet d'augmenter l'amplitude des déformations et des contraintes à la base de la couche numéro 3 réduisant par conséquent la durée de vie calculée de la chaussée. Au niveau de la couche 1, les calculs montrent une redistribution de la déformation en haut de la couche lorsque l'interface entre les couches 2 et 3 est considérée glissante. Des modélisations par éléments finis effectués par Wang, H. et Al-Qadi (2010) confirment que les conditions d'interface entre les couches bitumineuses modifient l'état de déformation dans les premiers centimètres sous la surface. Sous certaines conditions environnementales et pour certaines conditions de charge, cet état de déformation peut expliquer la fissuration s'exerçant proche de la surface dans les couches bitumineuses. Le comportement des interfaces a donc un effet direct sur la distribution des contraintes et donc des déformations dans la structure de chaussée.

2.9.3 Analyse des déformations au niveau des interfaces

L'analyse de la distribution des déformations suivant la profondeur permet d'obtenir une caractérisation des signaux de part et d'autre de l'interface. Afin de comparer ces résultats de modélisation avec des mesures in situ, et de mieux comprendre le comportement mécanique des couches d'interface, Vulcano Greullet et coll. (2010) ont installé des capteurs de déformation de part et d'autre d'une interface. La structure de chaussée étudiée est constituée de trois couches d'enrobé bitumineux. Les capteurs ont été placés à la base de la couche 1 et au sommet de la couche 2. L'instrumentation est effectuée par carottage de la première couche de chaussée jusqu'à l'interface. Des jauges d'extensométrie ont été collées au sommet de la couche 2 dans la direction transversale et longitudinale. Une autre série de jauge a été collée à la base de la carotte de la couche 1. La structure instrumentée a été testée au manège de fatigue de l'IFSTTAR, sous une charge tridem, pour une première température de 10 °C et une seconde de 42 °C. Les signaux montrent nettement deux comportements bien distincts de l'interface en fonction de la température d'essai. Les mesures prouvent que l'efficacité mécanique de liant d'accrochage est fortement dépendante de la température des couches bitumineuses. Une discontinuité très marquée (extension à la base de la couche 1 et contraction au sommet de la couche 2) apparaît lorsque la température est élevée, en particulier dans la direction transversale au mouvement de la charge. Vulcano Greullet et coll. (2010) préconisent de poursuivre les recherches en laboratoire et sur des structures réelles afin de comprendre le fonctionnement des interfaces entre les couches bitumineuses.

2.9.4 Synthèse

Lors de la construction d'une structure routière, un liant d'accrochage est appliqué entre les couches bitumineuses pour garantir un collage entre ces couches. En fonction des propriétés du liant, de la température et de la charge, l'efficacité mécanique de ce liant d'accrochage peut varier. La distribution des déformations et des contraintes dans la structure de chaussée est dépendante de cette efficacité. Lorsque les interfaces sont modélisées collées, les critères de dimensionnement correspondent aux critères classiques utilisés dans les méthodes de dimensionnement. Lorsqu'une ou plusieurs interfaces sont modélisées glissantes, les modèles montrent une perte de la durée de vie de la chaussée et une redistribution des déformations et des contraintes dans les couches de la structure. Les conditions d'interface peuvent expliquer

plusieurs phénomènes de rupture identifiés sur des structures réelles et dont l'approche classique de dimensionnement ne permet pas d'expliquer. La pose de capteurs de déformation de part et d'autre de l'interface permet d'analyser le comportement de celle-ci pour plusieurs conditions environnementales.

2.10 Conclusion

Les méthodes mécanistiques-empiriques de conception reposent sur le principe d'effectuer un calcul d'endommagement ou de durée de vie pour une structure donnée en ayant préalablement calculé les sollicitations internes pour des conditions de charge imposées en tenant compte des propriétés physiques et mécaniques des matériaux. L'analyse du comportement des chaussées peut être effectuée par des calculs théoriques ou par la mise en place d'instrumentation de mesure dans la chaussée. Ces deux approches sont complémentaires et montrent l'influence des paramètres de charge sur le comportement à long terme des structures de chaussées. Les risques de fissuration et d'orniérage de la chaussée sont fonction du nombre d'essieux, de la configuration des pneus, du matériau des couches et des conditions à l'interface entre le pneu et la chaussée. Les essais en vraie grandeur, combinés à des essais de laboratoire, permettent d'obtenir une caractérisation très précise du comportement mécanique de la structure. L'instrumentation des chaussées est nécessaire à une bonne analyse du comportement en petites déformations des structures de chaussées et en particulier des enrobés bitumineux. Cette instrumentation de chaussée doit cependant répondre à un nombre important de conditions afin de correctement évaluer les déformations ou les contraintes à plusieurs niveaux de la structure. Les techniques d'instrumentation du bas des couches bitumineuses sont nombreuses et sont à considérer avec un intervalle de confiance à définir pour chaque capteur. Les déformations situées proche de la surface restent très peu étudiées expérimentalement de par une difficulté marquée à pouvoir y installer des capteurs fiables et durables. Les sollicitations mécaniques combinées aux sollicitations climatiques sont très importantes et requièrent des capteurs robustes sans pour autant négliger la véracité des mesures. Les analyses théoriques de la répartition des déformations et des contraintes dans les premiers centimètres sous le pneu permettent d'expliquer plusieurs phénomènes de rupture s'exerçant proche de la surface. Les paramètres de charge et en particulier le type de pneu influencent significativement les sollicitations proche de la surface. L'analyse des interfaces

entre les couches de la chaussée a montré que les conditions d'interface modifient la répartition des déformations sur l'ensemble de la structure. La caractérisation des déformations, de part et d'autre d'une interface entre deux couches bitumineuses, reste peu étudiée puisque les méthodes de dimensionnement considèrent un collage parfait entre les couches. Il apparaît cependant que cette considération n'est pas toujours vérifiée en fonction des conditions climatiques. Une analyse de la distribution des déformations permettrait d'intégrer les conditions d'interface aux méthodes de dimensionnement. L'analyse de la réponse mécanique et l'identification des paramètres responsables de l'endommagement des chaussées doivent donc considérer la structure dans son ensemble.

Dans la littérature, il semble exister une lacune en ce qui concerne l'instrumentation des chaussées et en particulier sur l'instrumentation dans les parties hautes des couches bitumineuses et sur l'instrumentation des interfaces bitumineuses. L'accessibilité expérimentale aux déformations à plusieurs profondeurs dans les couches bitumineuses permettrait de valider les analyses théoriques d'ores et déjà effectuées à ces profondeurs critiques de la structure. Les mesures expérimentales doivent tenir compte du caractère viscoélastique des matériaux bitumineux et la littérature recommande d'effectuer des matrices expérimentales où les paramètres suivants doivent être évalués : la température de la structure, la vitesse de la charge, le tonnage appliqué à l'essieu, le type de pneu, la pression de gonflage et le nombre d'essieux. Il semble également nécessaire de pouvoir caractériser les déformations à plusieurs niveaux dans les structures de chaussée en utilisant un même type d'instrumentation. Un nouveau type d'instrumentation doit passer par des étapes de validation comprenant une analyse comparative avec les technologies existantes ainsi qu'avec des calculs théoriques effectués avec des logiciels de modélisation adaptés tels que ViscoRoute© 2.0. Considérer la performance globale d'une structure de chaussée nécessite d'analyser spécifiquement chaque mode d'endommagement et d'identifier les sollicitations susceptibles de les engendrer et cela pour un grand nombre de conditions expérimentales. L'approche de recherche proposée vise à améliorer les connaissances sur la répartition des sollicitations proche de la surface, aux interfaces entre les couches et à la base des couches, à l'aide de mesures expérimentales et de modélisation et ainsi évaluer spécifiquement, l'effet des charges et des types de pneus.

Chapitre 3

Essais en vraie grandeur : démarche expérimentale, procédure, modélisation et mesures à la base du revêtement

3.1 Présentation et objectifs

Les méthodes mécanistiques-empiriques requièrent le développement d'outils de modélisation afin d'associer la réponse mécanique des matériaux aux modèles de performance. Les modélisations ont pour objectif de reproduire au mieux les sollicitations extérieures et le comportement des matériaux. Plusieurs hypothèses sont mises en place afin de réduire la complexité des calculs qui permettent d'obtenir la réponse mécanique de la chaussée. Lorsque de nouvelles caractéristiques de charges apparaissent sur le réseau routier comme l'utilisation des pneus à bande large, les hypothèses de calcul et de modélisation précédemment utilisées avec les autres types de charges doivent être validées. Il est recommandé de quantifier l'effet de ces nouvelles charges à l'aide d'outils numériques associés à des essais en vraie grandeur. Les structures de chaussée, les charges ainsi que les conditions climatiques évaluées lors de ces essais doivent être représentatives du réseau routier et des conditions environnementales.

Les essais en vraie grandeur sont effectués sous des conditions de charge et des conditions environnementales contrôlées. Les mesures expérimentales présentées dans le cadre de ce projet proviennent de deux sites d'essais différents. Le premier est le Site Expérimental Routier de l'Université Laval (SERUL) et le second est le manège de fatigue des structures de chaussées de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) en France. Ces deux sites possèdent des installations spécialement conçues pour des essais routiers vraies grandeurs. Les structures de chaussées de ces sites ont été instrumentées pour mesurer les déformations à plusieurs niveaux

dans les couches de la chaussée. Les conditions environnementales et les paramètres de charge sont maîtrisés et contrôlés. Cela permet une analyse comparative entre plusieurs conditions d'essais tout en intégrant ces données aux outils de modélisation.

Ce chapitre détaille la démarche expérimentale qui a été suivie au cours des trois campagnes de mesures effectuées dans le cadre de ce projet. Les sites expérimentaux, les types d'instrumentation et les résultats préliminaires obtenus au cours de ces campagnes de mesures sont décrits dans la première partie du chapitre. Il présente par la suite une étude des déformations mesurées à la base du revêtement pour l'ensemble des conditions d'essais. Cette étude inclut une présentation des hypothèses considérées afin de modéliser les charges et les structures de chaussée évaluées. Elle inclut également une description détaillée des signaux de déformation mesurés à la base du revêtement bitumineux ainsi que l'effet des pressions de gonflage, de l'intensité du chargement et de la vitesse pour deux types de pneus.

3.2 Campagnes de mesures

Trois campagnes expérimentales ont été effectuées au cours du projet. Les deux premières ont eu lieu au SERUL sur des structures de chaussées et des conditions environnementales représentatives du réseau routier québécois. Les structures de chaussées ont été sollicitées par un camion 2 unités (tracteur et remorque) effectuant des allers et retours dans la zone d'essais. Les mesures entre deux conditions expérimentales peuvent être espacées de plusieurs heures. Le site n'étant pas dans une enceinte environnementale close, il est soumis aux variations climatiques journalières. Les paramètres environnementaux tels que la température extérieure, la température dans le revêtement bitumineux ou encore la teneur en eau dans les sols ne sont pas parfaitement contrôlés. Les capteurs installés dans la chaussée permettent cependant leur suivi. À l'IFSTTAR, les essais sont effectués simultanément sur plusieurs bras du manège de fatigue et sont de courte durée. Les conditions climatiques ne sont donc pas amenées à varier significativement au cours d'un essai. Il est ainsi possible d'évaluer un nombre important de conditions de charge sous plusieurs températures et d'effectuer une analyse comparative entre ces conditions expérimentales.

L'objectif des deux premières campagnes de mesure est d'évaluer l'instrumentation développée au cours du projet et de valider les protocoles expérimentaux. Le second objectif

est de quantifier l'effet du type de pneu et de la pression de gonflage sur le comportement mécanique des structures avec des chargements multiessieux. La troisième campagne expérimentale a pour objectifs l'analyse paramétrique des déformations sous un chargement à essieu simple, ainsi que le développement des modélisations du comportement mécanique de la structure.

Des essais de caractérisation ont également été effectués en laboratoire et sur les sites d'essais pour définir les propriétés physiques et mécaniques des matériaux qui sont des paramètres d'entrée pour les modélisations.

3.2.1 Campagne n° 1 : développement et validation des protocoles expérimentaux

3.2.1.1 Objectifs

La première campagne de mesures a été effectuée dans le cadre d'une étude effectuée en collaboration avec le centre de recherche FPInnovations. Cette étude avait pour but d'évaluer l'incidence des systèmes de contrôle de gonflement des pneus (SCGP) sur l'interaction entre le véhicule et la route. Cette campagne de mesures visait à instrumenter quatre structures de chaussées au SERUL et à déterminer si la variation de la pression de gonflage des pneus a une incidence significative sur les déformations engendrées dans la structure de chaussée. Les résultats détaillés de cette recherche sont disponibles dans le rapport de Transport Canada numéro TP 14950F (Doré et coll., 2009). Des essais complémentaires ont également été effectués afin d'évaluer l'impact engendré par l'utilisation des pneus à bande large en remplacement des pneus jumelés traditionnels sur la réponse mécanique de la chaussée. Les principaux résultats et la conclusion de l'étude sont détaillés à la section 3.2.1.4 et également à la référence suivante : Grellet et coll. (2012a).

La première partie de cette campagne de mesure consistait à relever la déformation dans les couches bitumineuses au passage d'un autobus urbain et d'un camion avec remorque pour différentes conditions de chargements et de températures. Le camion utilisé possédait trois groupes d'essieu : un essieu simple (essieu directeur), un essieu tandem (essieu moteur) et un essieu tridem (essieu remorque). Trois structures de chaussées ont été étudiées pour des conditions de température printanières et estivales. La seconde partie des mesures consistait à

modifier les types de pneumatiques du camion et d'analyser l'effet de ce paramètre sur les déformations dans les premiers centimètres sous la surface et à la base du revêtement.

La baisse de pression dans un pneu entraîne une redistribution de la charge au contact du pneu et de la chaussée. Lorsque la pression diminue, la surface de contact augmente et les contraintes se concentrent davantage sur les extérieurs du pneu. Afin de quantifier cet effet, la déformation dans les couches bitumineuses a été mesurée aux abords des arêtes de pneu.

3.2.1.2 Le site expérimental routier de l'Université Laval (SERUL)

Le site expérimental routier de l'Université Laval se situe à la forêt Montmorency à la hauteur du kilomètre 103 de la route 175, sur un tronçon de la route forestière 33 (coordonnée : 47.322668, -71.149239). Créé en 1998, ce laboratoire routier a été conçu pour évaluer l'agressivité des véhicules lourds (AVL) sur la chaussée. Long de 100 mètres, le site présente quatre sections de 25 mètres ayant des structures de chaussées différentes. Le profil de ces structures est donné à la figure 3.1. Les quatre structures sont constituées d'une fondation granulaire en MG-20 d'épaisseur 200 mm puis d'une sous-fondation en MG-112 d'au moins 400 mm d'épaisseur. Les matériaux granulaires sont conformes à la norme NQ-2560-114 (BNQ, 2002). Le sol d'infrastructure est constitué d'une ou plusieurs couches de sable classifiées SP, SM ou SW (classification unifiée des sols USCS, ASTM, 2010). Les sections diffèrent principalement par l'épaisseur du revêtement bitumineux. La section 1 possède un revêtement de 100 mm d'épaisseur en ESG-10 (posé en deux couches). La section 2 est constituée d'une couche de base en GB-20 de 100 mm d'épaisseur et surmontée d'une couche de 100 mm d'ESG-10. La section 3 ne possède qu'une seule couche de 50 mm en ESG-10. Finalement, aucun revêtement n'est présent sur la section 4, seul un traitement de surface a été appliqué. Les enrobés bitumineux sont conformes à la norme 4202 du tome VII- matériaux du ministère des Transports du Québec (Québec, 1994).

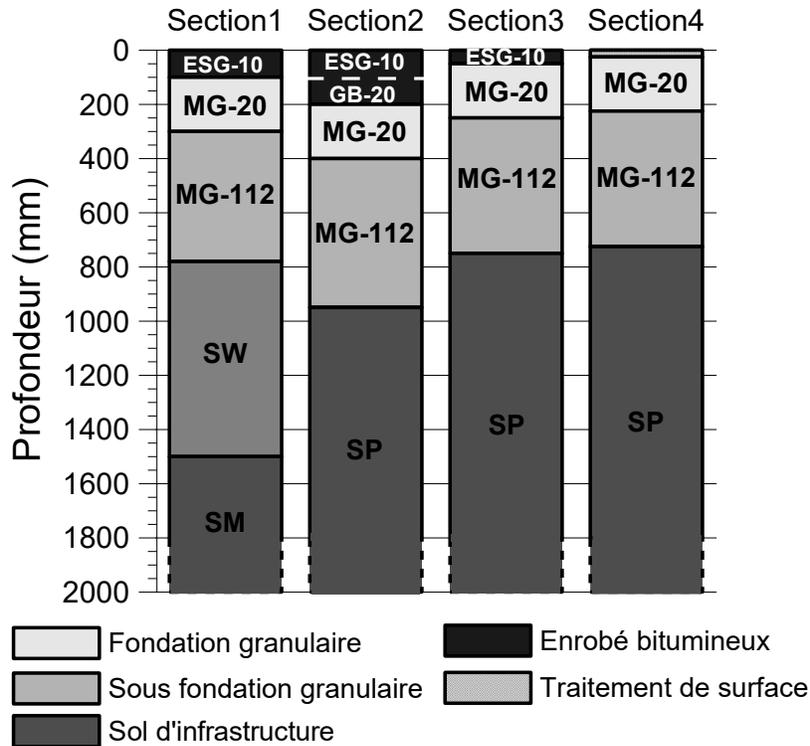


Figure 3.1 : Structure de chaussée au site expérimental routier de l'Université Laval (SERUL)

Où : ESG-10 = enrobé bitumineux semi-grenu de taille nominale maximale de 10 mm.
 GB-20 = couche de base en grave bitume de taille nominale maximale 20 mm.
 MG-20 = matériaux granulaires de taille nominale maximale de 20 mm.
 MG-112 = matériaux granulaires de taille nominale maximale de 112 mm.
 SP = sable uniforme ; peu ou pas de particules fines.
 SW = sable bien étalé ; sable graveleux ; peu ou pas de particules fines.
 SM = sable silteux ; mélange de sable et de silt.

3.2.1.3 Instrumentations et mesures expérimentales

Pour les sections 1 à 3 les déformations sont mesurées à la base de la couche bitumineuse et proche de la surface. Pour cela, l'instrumentation mise en place dans les structures des sections 1 et 2 est constituée de trois carottes instrumentées. Les carottes instrumentées sont des outils de mesure équipés de jauges à fibre optique. Elles permettent de mesurer la déformation à des profondeurs spécifiques dans les couches. La conception et le principe de fonctionnement des carottes instrumentées sont détaillés plus spécifiquement à la section 4.3.3. La section 3 est instrumentée de seulement deux carottes. Sur chaque section, des capteurs permettant une mesure de la température, de la teneur en eau et de la déflexion sous la couche d'enrobé

(déflectomètre) ont également été installés. Le positionnement de ces capteurs est schématisé à la figure 3.2. Les capteurs de température et de teneur en eau sont situés proche des carottes instrumentées, mais hors des sentiers de roues des véhicules. L'instrumentation de la section 4 est uniquement constituée d'un déflectomètre.

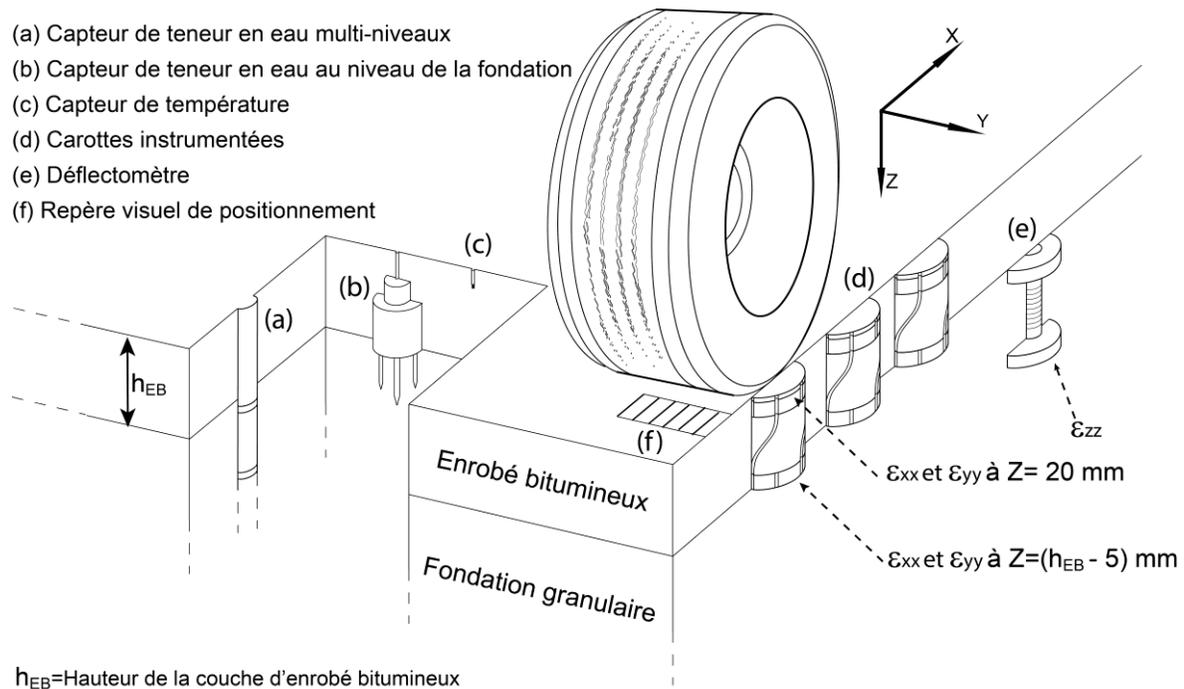


Figure 3.2 : Instrumentation des sections 1 et 2 au SERUL

Les carottes sont positionnées dans la structure afin de mesurer les déformations longitudinales (ϵ_{xx}) et les déformations transversales (ϵ_{yy}). La direction longitudinale correspond à la direction de roulement (direction X). Les carottes sont conçues et fabriquées pour mesurer les déformations à 5 mm du bas du revêtement, soit à une profondeur de 95 mm, 195 mm et 45 mm respectivement pour les sections 1 à 3. Des jauges sont également situées proche de la surface pour les sections 1 et 2 et mesurent les déformations à 20 mm de profondeur. La finesse de la couche d'enrobé de la section 3 ne permet pas une mesure des déformations aux deux niveaux. La figure 3.3 présente une photographie de l'instrumentation de la section 3.



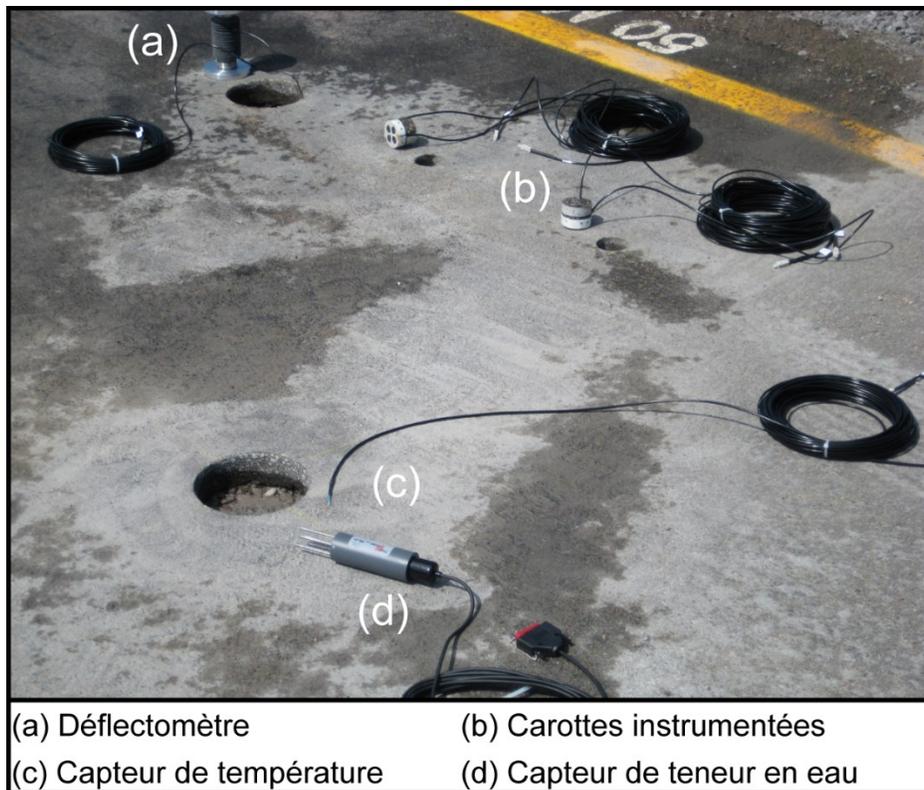


Figure 3.3 : Instrumentation de la section 3 au SERUL

Les véhicules utilisés pour l'étude sont un autobus urbain du Réseau de Transport de la Capitale (RTC) et un camion Kenworth muni d'une remorque Trailex. Une photographie de ces véhicules est présentée à la figure 3.4. L'autobus est de type Nova LFS. Il est équipé de pneu Michelin XZU2 305/70R22.5 et chargé à l'aide de masses afin de simuler la présence d'utilisateur dans l'autobus. La charge sur le demi-essieu de l'essieu directeur est de 2,20 tonnes et de 4,0 tonnes pour le demi-essieu du groupe d'essieux moteur. Ces tonnages sont mesurés du côté passager. Le camion est chargé à l'aide de billes de bois afin que la charge totale au niveau du groupe d'essieu moteur soit de 17,9 tonnes (soit une charge axiale de 8,95 tonnes) et que la charge au niveau du tridem de la remorque soit de 25,65 tonnes (soit une charge axiale de 8,55 tonnes). La charge au niveau de l'essieu simple directeur est de 5,46 tonnes. Les chargements détaillés pour chaque essieu, les types de pneus utilisés et les empreintes au sol associées sont détaillés en annexe du rapport n° TP 14950F (Doré et coll., 2009).



Figure 3.4 : Véhicules d’essais de la campagne n° 1 : (a) Autobus chargé du RTC de type Nova LFS, (b) Camion équipé d’une remorque chargé de billes de bois

Les essais ont été effectués au cours du mois de mai 2008 pour les essais de printemps et à la fin du mois de juillet 2008 pour les essais de l’été. La campagne de mesure se déroulant sur un site à ciel ouvert, la température de l’enrobé bitumineux est fortement dépendante des conditions météorologiques. Afin de maintenir une température constante pour l’ensemble de la campagne de mesures, une couverture thermique reliée à des bassins de refroidissement a été apposée en surface du revêtement entre chaque passage des véhicules. La température printanière a été fixée à 12 °C dans les couches bitumineuses avec une tolérance de plus ou moins 2 °C. La température pour les mesures estivales a été maintenue à 22 °C avec la même plage de variation. Le suivi des températures permet de contrôler l’ajustement de la couverture thermique au cours de la journée.

Un repère visuel permettant de contrôler la position du pneu par rapport aux capteurs est fixé à la chaussée et une caméra enregistre chaque passage du pneu sur le repère. L’analyse vidéo permet par la suite de définir la distance de passage avec une précision de l’ordre du centimètre. Pour chaque cas d’étude, une mesure est considérée comme valide lorsque l’arête extérieure du pneu, c’est-à-dire le bord de la bande de roulement, passe dans l’alignement de la ligne centrale des capteurs avec un offset de plus ou moins 30 mm. Cette méthodologie a pour objectif de mesurer les déformations au niveau des arêtes du pneu. Pour plusieurs conditions expérimentales, des mesures supplémentaires ont été effectuées avec des distances de passage variant de -800 mm à + 500 mm. Cette approche a permis d’obtenir une lecture des déformations engendrées directement sous le pneu ainsi qu’à l’extérieur de celui-ci.

L'ensemble de ces points de mesures permet de tracer le bassin de distribution des déformations aussi appelé bassin de déformation.

Dans le cas de l'autobus urbain, un obstacle occupant la pleine largeur de la route a été utilisé pour imposer un mouvement dynamique au véhicule. L'obstacle est une poutre rectangulaire fixée sur la surface de la route. L'effet dynamique s'atténue lorsque le véhicule s'éloigne de l'obstacle. Trois distances entre l'obstacle et les capteurs ont été testées afin de quantifier l'impact de l'écrasement du pneu sous l'effet dynamique. Ces états dynamiques ont également été comparés à l'état de référence qui correspond au cas sans obstacle sur la route.

Les mesures avec l'autobus urbain ont été effectuées en variant les paramètres suivants :

- La structure de chaussée :
 - Essais sur la section 1 et la section 2
- Les conditions de température :
 - Essais au printemps et à l'été
- Les pressions de gonflage :
 - Pressions de gonflage à 690 kPa (100 psi) et 517 kPa (75 psi)
- La présence d'un obstacle visant à créer un effet dynamique :
 - Aucun obstacle
 - Obstacle à une distance de 700 mm et à 1200 mm des capteurs (printemps)
 - Obstacle à une distance de 1200 mm et 1700 mm des capteurs (été)

Les mesures avec le camion ont été effectuées en variant les paramètres suivants :

- La structure de chaussée :
 - Essais sur la section 1, 3 et 4
- Les conditions de température :
 - Essais au printemps et à l'été
- Les types de pneus :
 - Essais avec des pneus jumelés 11R22.5
 - Essais avec des pneus à bande large Michelin Xone XTE 455/55R22.5
- Les pressions de gonflage au niveau de l'essieu tandem et tridem :
 - Gonflage à 830 kPa (120 psi), 690 kPa (100 psi) et 414 kPa (60 psi) au niveau du tandem

- Gonflage à 830 kPa, 690 kPa, 414 kPa et 380 kPa (55 psi) au niveau du tridem
- Le niveau de chargement :
 - Charge totale du camion à 49 000 kg (demi-essieu)
 - Charge réduite à 39 200 kg (80 % de la charge)

Au total, 25 conditions expérimentales ont été évaluées avec l'autobus urbain et 38 conditions avec le camion. Pour l'ensemble des cas, la vitesse des véhicules a été fixée à 30 km/h. Les matrices expérimentales complètes sont détaillées à l'annexe 1.

3.2.1.4 Principaux résultats de l'étude

Les principaux résultats de la première campagne de mesure se divisent en trois catégories : l'analyse et la validation de l'instrumentation, l'étude de la pression de gonflage des pneus et la caractérisation de la distribution des déformations sous une charge.

- Analyse et validation de l'instrumentation :

La répétabilité des capteurs a été évaluée pour tous les cas des matrices expérimentales. Cette évaluation consiste à comparer l'amplitude de la déformation entre plusieurs mesures ayant les mêmes conditions de charges. Pour ces mesures, la température du revêtement bitumineux, la distance du pneu par rapport aux capteurs et la vitesse des véhicules sont les mêmes. Cette approche montre que pour les jauges situées à la base du revêtement bitumineux, la différence d'amplitude entre deux séries de mesures est de l'ordre de 5 %. Cet écart s'élève à 10 % pour les mesures situées proche de la surface. Ces niveaux d'imprécision s'expliquent tout d'abord par la forte sensibilité de l'amplitude des déformations par rapport à la distance de passage entre le pneu et les capteurs et également par les variations mesurées au niveau de la température dans les couches bitumineuses et au niveau de la vitesse des véhicules. Ces effets sont plus marqués proche de la surface ce qui explique que les écarts d'amplitude y sont plus élevés. Deux capteurs situés à la même profondeur dans la chaussée et ayant la même orientation devraient théoriquement donner la même forme du signal et la même amplitude. Deux à trois carottes ayant été installées sur une même section d'essai, une analyse comparative entre ces capteurs est possible. Cette analyse consiste à comparer l'amplitude des déformations donnée par chaque carotte pour chaque condition expérimentale. Les résultats montrent que les écarts entre les capteurs varient de 10 % à 20 % en fonction des conditions

d'essais. Ces écarts s'expliquent dans un premier temps par les techniques de conditionnement des carottes. Les jauges ont été collées aux carottes et sont donc entourées d'enrobé bitumineux qui est un milieu très hétérogène. La présence d'un granulats proche de la jauge peut augmenter localement le module et réduire l'amplitude des déformations. La calibration des carottes avant leur installation dans la chaussée a pour objectif de diminuer cet effet mais il ne permet pas d'entièrement l'éliminer. Sur une section d'essai, les carottes sont espacées d'un minimum de 30 cm afin d'éviter une interaction entre elles. Les propriétés physiques de l'enrobé varient spatialement sur la section et ne sont donc pas les mêmes au niveau de chaque capteur ce qui influence les mesures des jauges. Les paramètres de charge tels que l'alignement des pneus sur le capteur et la vitesse du véhicule peuvent varier entre le passage sur un capteur et le suivant. La sensibilité des capteurs par rapport au positionnement de la charge explique donc en partie les écarts relevés entre les capteurs.

- Étude de la pression de gonflage des pneus :

Le tableau 3.1 présente les conclusions de l'étude sur l'impact de la pression de gonflage dans les pneus (Doré et coll., 2009). Ce tableau résume les écarts entre l'amplitude des déformations engendrées par un pneu à 690 kPa versus un pneu à 517 kPa, dans le cas de l'autobus urbain. Les écarts sont exprimés en pourcentage par rapport à la condition de référence qui est un gonflage à 690 kPa et ne concernent que les déformations mesurées à la base du revêtement bitumineux. Les valeurs positives signifient que la baisse de pression a pour effet de réduire les déformations à la base de la couche. Dans les cas sans obstacle, la baisse de pression dans les pneumatiques entraîne une baisse des déformations comprise entre 0,8 % et 5 % en fonction de la structure de chaussée et des conditions climatiques. L'étude montre que la baisse de pression a plus d'impact lorsque la sollicitation est de type dynamique. La baisse des déformations est comprise entre 8 % et 15 % lorsque l'obstacle est situé proche des capteurs c'est-à-dire à 0,7 m et à 1,2 m. Plus la distance de l'obstacle augmente, plus l'effet dynamique s'atténue. La baisse des déformations est donc moins importante. Les résultats détaillés de l'étude sont disponibles à la référence Doré et coll. (2009).

Tableau 3.1 : Effet de la réduction de 690 kPa à 517 kPa de la pression de gonflage sur l'amplitude des déformations pour l'autobus urbain

Section 1 (100 mm d'épaisseur d'enrobé bitumineux)				
Saison	Sans obstacle	Dynamique Obstacle à 0,7 m	Dynamique Obstacle à 1,2 m	Dynamique Obstacle à 1,7 m
Printemps	0,8 %	10,6 %	10,8 %	-
Été	5,0 %	-	8,8 %	2,5 %
Section 2 (200 mm d'épaisseur d'enrobé bitumineux)				
Saison	Sans obstacle	Dynamique Obstacle à 0,7 m	Dynamique Obstacle à 1,2 m	Dynamique Obstacle à 1,7 m
Printemps	2,0 %	15,8 %	8,3 %	-
Été	4,4 %	-	15,0 %	5,8 %

Le symbole - signifie que les mesures n'ont pas été effectuées

- Caractérisation de la distribution des déformations sous une charge :

Les mesures effectuées proche de la surface et à la base des couches bitumineuses montrent que l'amplitude des déformations est fortement dépendante de la position des capteurs par rapport à la charge. Afin de quantifier cet effet, plusieurs séquences de mesure ont été effectuées en faisant varier la position de la charge par rapport aux capteurs. Cette démarche expérimentale permet de tracer le bassin de l'amplitude maximale de la déformation par rapport à la position sous le pneu. La figure 3.5 (traduit de Grellet et coll., 2012a) présente les bassins obtenus sur la section 1, dans le cas de l'analyse comparative entre le pneu jumelé et le pneu à bande large. Les mesures ont été effectuées à 22 °C avec une pression de gonflage des pneus de 690 kPa. La figure se divise en quatre graphiques représentant le bassin des déformations longitudinales et transversales pour deux profondeurs, soit à la base du revêtement en $Z = 95$ mm et proche de la surface en $Z = 20$ mm. Pour l'ensemble des bassins, le positionnement des pneus est représenté par les traits pointillés verticaux. La position $Y = 0$ mm est associée à l'arête extérieure du pneu. Les points de mesure pour des positions suivant Y négatives sont des mesures effectuées à l'extérieur de la charge. Les déformations positives correspondent à une extension de la jauge et les déformations négatives à une contraction de la jauge.

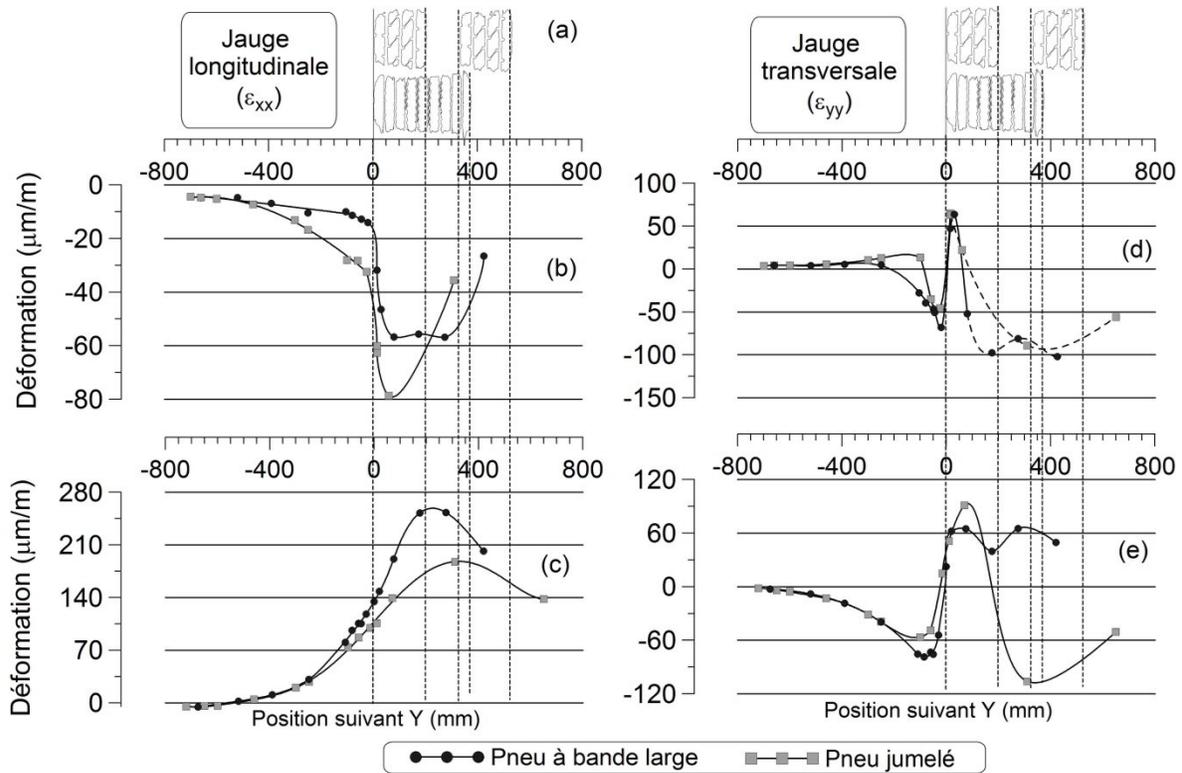


Figure 3.5 : Bassin des déformations sur la section 1 : (a) position des pneus, (b) déformation longitudinale à $Z = 20$ mm, (c) déformation longitudinale à $Z = 95$ mm, (d) déformation transversale à $Z = 20$ mm, (e) déformation transversale à $Z = 95$ mm

Le tracé des bassins de déformation permet de mettre en évidence l'influence du type de pneu sur la distribution des déformations et d'identifier les zones à analyser plus spécifiquement. Cette méthodologie permet d'identifier la position sous le pneu où la déformation est maximale et permet également de mesurer l'étendue des zones d'influence de chaque pneu. Les bassins de la déformation transversale montrent une variation très prononcée de l'amplitude mesurée aux abords des arêtes des pneus avec des passages successifs de la contraction à l'extension sur une zone spatiale réduite. Le tracé des bassins de déformation montre la nécessité d'augmenter le nombre de mesures et donc le nombre de passages de la charge afin d'obtenir une meilleure discrétisation pour le tracé des courbes et de pouvoir identifier l'effet des paramètres de charges sur la distribution des déformations dans l'ensemble du revêtement. Les bassins de déformation pour cette première campagne de mesures sont tracés avec 10 à 15 points de mesure. Pour la suite des essais, plus de 50 points de mesures sont utilisés pour le tracé et l'interpolation des bassins de déformation transversale.

3.2.2 Campagne n° 2 : caractérisation de la réponse mécanique des structures sous charges multiessieux

3.2.2.1 Objectifs

La seconde campagne de mesures a été effectuée dans le cadre d'un projet de la chaire de recherche industrielle du CRSNG i3C et dans la continuité du projet visant à évaluer l'impact de l'utilisation des pneus à bande large en remplacement des pneus jumelés traditionnels sur le comportement mécanique des couches bitumineuses. L'objectif principal de l'étude était d'effectuer une caractérisation tridimensionnelle des déformations engendrées dans les couches bitumineuses par le passage d'un camion équipé d'une remorque. À cette fin, une nouvelle instrumentation a été installée sur deux des sections du SERUL, en ajout des capteurs déjà présents. Cette instrumentation permet une lecture des déformations transversales et verticales dans les couches bitumineuses et est appelée : plaque de déformation multiniveau. La plaque et les carottes permettent de mesurer les déformations suivant les trois directions orthogonales : longitudinale, transversale et verticale. Conçue au cours du projet, la plaque de déformation requière dans un premier temps la mise en place d'un protocole de mesures et une validation de ces mesures. La première partie de la campagne de mesures consistait donc à effectuer cette première validation. La seconde partie visait à effectuer des mesures sous différentes conditions de charge et à obtenir la réponse mécanique des couches bitumineuses pour des chargements multiessieux avec des pneus jumelés et des pneus à bande large. Afin de compléter la caractérisation des déformations s'exerçant à faible profondeur de la surface, les déformations verticales et transversales obtenues avec la plaque ont été relevées simultanément aux mesures longitudinales et transversales obtenues avec les carottes. Une partie des résultats pour la structure de chaussée de la section 1 est détaillée à la référence suivante : Grellet et coll. (2010).

3.2.2.2 Le site expérimental routier de l'Université Laval (SERUL)

Les mesures expérimentales ont été effectuées comme pour la campagne précédente au SERUL. Les sections et les structures de chaussées sont les mêmes que celles détaillées précédemment. Les essais ont uniquement été effectués sur la section 1 et sur la section 2 (sections présentées à la figure 3.1).

3.2.2.3 Instrumentations et mesures expérimentales

Les plaques multiniveaux ont été installées dans les couches bitumineuses afin de mesurer les déformations à la base du revêtement et proche de la surface. Les sections 1 et 2 possèdent chacune une plaque de déformation multiniveau ainsi que les carottes instrumentées précédemment installées. Le principe de fonctionnement ainsi que la procédure d'installation des plaques de déformation sont détaillés au paragraphe 4.3.4

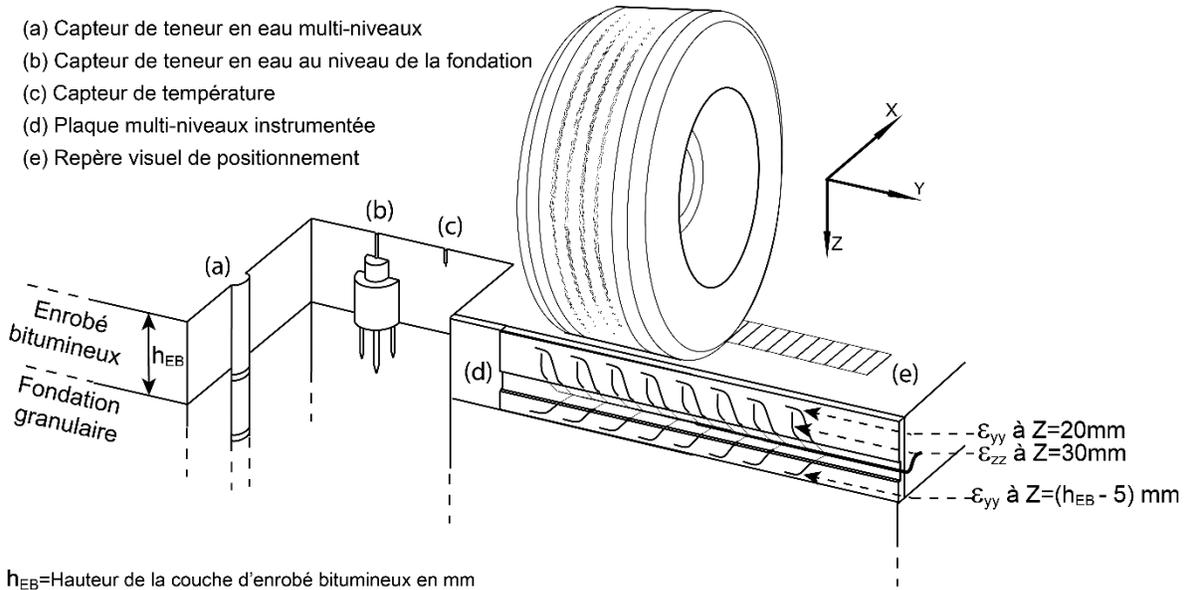


Figure 3.6 : Instrumentation des sections 1 et 2 avec la plaque multiniveau

Comme présenté à la figure 3.6, l'axe principal de la plaque est orienté suivant l'axe Y c'est-à-dire transversalement au sens de roulement. Les plaques de déformation sont instrumentées par trois séries de huit jauges placées aux profondeurs choisies lors de la fabrication de la plaque. L'orientation des jauges sur la plaque permet ainsi d'obtenir les déformations transversales (ε_{yy}) à 20 mm de profondeur et les déformations verticales (ε_{zz}) à 30 mm de profondeur. Finalement, la troisième série de jauges mesure les déformations transversales (ε_{yy}) à 5 mm du bas du revêtement bitumineux, soit à une profondeur de 95 mm pour la section 1 et de 195 mm pour la section 2. À chaque passage de la charge, les mesures sont prises simultanément en huit positions sous le pneu. Ces passages sont filmés. La lecture image par image de la vidéo permet de localiser la distance de passage de la roue par rapport au repère visuel et ainsi de calculer la distance relative par rapport aux capteurs. La figure 3.7 illustre des arrêts sur image issus des vidéos de deux passages successifs. Le passage du centre

du pneu sur le milieu de la plaque est fixé comme le point de référence pour laquelle la distance de passage est égale à 0 mm. La prise de mesures consiste à effectuer entre 20 et 30 passages pour des distances comprises entre -500 mm et + 500 mm. À chaque passage, huit mesures de la déformation sont enregistrées. Les bassins de déformation sont alors formés d'un nombre de points de mesures compris entre 160 et 240.



Figure 3.7 : Arrêts sur image du pneu passant sur le repère visuel

La figure 3.8 présente le camion utilisé lors des essais sur la section 1 et la section 2. La configuration du camion est la suivante : un essieu simple directeur, un essieu tandem moteur et un essieu tridem remorque. Le camion est chargé à l'aide de blocs de béton et les charges sont de 4,77 tonnes sur l'essieu avant, 16,99 tonnes sur l'essieu tandem et 23,09 tonnes sur l'essieu tridem. Le chargement est maintenu constant au cours des essais.



Figure 3.8 : Camion avec remorque tridem chargée avec des blocs de béton

Dans la continuité de la première campagne de mesures, le tridem de la remorque est équipé de deux types de pneus. La figure 3.9(a) présente le tridem équipé des pneus jumelés 11R22.5 et la figure 3.9(b) présente le tridem équipé des pneus à bande large Michelin Xone 455/55R22.5. Afin d'analyser l'effet du type de pneu et de conserver les caractéristiques mécaniques et physiques du camion, de la remorque, des amortisseurs et des charges, un unique véhicule est utilisé au cours de la campagne de mesures. Toutes les séquences de mesures ont été effectuées dans un premier temps avec les pneus jumelés. Ces pneus ont ensuite été remplacés par six pneus à bande large au niveau du tridem uniquement. L'essieu tandem est resté équipé en pneus jumelés.



Figure 3.9 : Tridem équipé de (a) pneus jumelés 11R22.5 et (b) de pneus à bande large 455/55R22.5

Les séquences de mesures ont été effectuées en faisant varier les paramètres suivants :

- La structure de chaussée :
 - Essais sur la section 1 et 2
- Les conditions de température :
 - Essais à l'automne pour la section 1 (température de 10 °C)
 - Essais à l'été pour la section 2 (température de 23 °C)
- Les types de pneus :
 - Essais avec des pneus jumelés Michelin XTE 11R22.5
 - Essais avec des pneus à bande large Michelin Xone XTE 455/55R22.5
- Les pressions de gonflage au niveau de l'essieu tridem :
 - Gonflage à 830 kPa, 690 kPa et 550 kPa (80 psi)
 - Gonflage d'un pneu du jumelé à 690 kPa et le second 550 kPa

Au total, 6 conditions expérimentales ont été évaluées sur la section 1 et 5 conditions sur la section 2. Pour l'ensemble de ces cas, la vitesse du véhicule a été fixée à 30 km/h. La matrice d'essais complète est détaillée à l'annexe 1.

Les plaques instrumentées possèdent chacune 24 jauges. L'acquisition des données a été effectuée à l'aide du conditionneur de signal équipé de huit canaux d'entrée ce qui ne permet pas un enregistrement simultané de l'ensemble des jauges. Il a donc été nécessaire pour la section 1 de réitérer à trois reprises les passages du camion pour une même condition expérimentale. Deux conditionneurs de signal ont été placés en parallèle pour la section 2 afin de permettre l'acquisition simultanée de seize jauges. Seulement deux cycles de mesures ont donc été nécessaires. Comme pour la campagne de mesures n° 1, la température a été maintenue constante avec une couverture thermique. Au cours du printemps 2009, la température a été maintenue à 10 °C avec une plage de variation de plus ou moins 2 °C. Au cours de l'été 2010, la température a été maintenue à plus ou moins 2 °C de la température de référence de 23 °C.

3.2.2.4 Principaux résultats de l'étude

En faisant varier la position de la charge par rapport aux jauges, il a été possible de comparer deux à deux les jauges installées sur une même plaque. Une analyse statistique a également été effectuée en faisant circuler plusieurs fois la charge à une distance fixe des jauges. Cette analyse a permis de déterminer la répétabilité des jauges de la plaque et de conclure sur une bonne fiabilité des capteurs (Grellet et coll., 2010). Cette analyse statistique a été complétée lors de la campagne n° 3 par l'étude de l'influence de la température et de l'intensité de la charge sur la répétabilité des capteurs. Cette seconde campagne de mesures a permis une acquisition simultanée des déformations transversales et verticales engendrées à faible profondeur par le passage du pneu. Les deux conditions de températures testées ont permis l'identification d'un signal de déformations verticales spécifique à chaque température. Elles ont mis en avant la nécessité de prendre en compte le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux pour l'analyse et la modélisation des déformations proche de la surface. Les mesures enregistrées pendant cette campagne de mesures ont également été exploitées afin d'évaluer l'effet des charges multiessieux.

3.2.3 Campagne n° 3 : étude paramétrique et développement des modélisations

3.2.3.1 Objectifs

La troisième campagne de mesures a été effectuée dans le cadre d'une collaboration avec l'IFSTTAR dont l'objectif était d'évaluer l'effet des paramètres de charge et l'effet de la température sur le comportement mécanique des couches bitumineuses. Deux structures de chaussées ont été instrumentées afin de mesurer les déformations à quatre profondeurs dans la chaussée, soit à la base du revêtement, proche de la surface et de part et d'autre de l'interface entre deux couches bitumineuses. L'instrumentation des structures comprenait une ou plusieurs plaques multiniveaux, deux carottes instrumentées et trois types de jauges d'extensométrie. Cette démarche a permis une comparaison entre les capteurs à fibre optique et les jauges les plus couramment utilisées pour l'instrumentation des couches bitumineuses. Une étude paramétrique faisant varier la pression de gonflage, la charge, la température et les vitesses de rotation a été mise en place. Les principales conclusions de cette étude sont détaillées au chapitre 4. Les deux structures de chaussée étant sur un même anneau du manège de fatigue, un bras du manège a été équipé d'un pneu à bande large et le second d'un pneu jumelé. La réponse mécanique de la chaussée a donc été obtenue simultanément avec les deux types de pneus. Les dommages respectifs de chaque pneu ont été quantifiés à partir de cette réponse et des lois d'endommagement utilisées dans les méthodes mécanistes-empiriques. Les conclusions de cette étude sont disponibles à la référence : Grellet et coll. (2013).

En complément des essais routiers, des essais de laboratoire ont été effectués afin de définir les propriétés physiques et mécaniques des matériaux bitumineux. Ces données sont nécessaires à la mise en place d'un modèle de comportement des couches bitumineuses et de leur interface. Un des objectifs de la campagne de mesure était de comparer les mesures expérimentales avec les déformations calculées à partir des modèles existants et de proposer une nouvelle approche de modélisation afin de permettre une interprétation des phénomènes s'exerçant proche de la surface. L'étude des déformations proche de la surface est détaillée au chapitre 5 et une partie des conclusions est disponible à la référence Grellet et coll. (2012b). L'objectif de l'étude était également d'analyser les déformations s'exerçant de part et d'autre d'une interface entre deux couches bitumineuses et d'évaluer l'influence du liant

d'accrochage sur le comportement mécanique des couches. Une nouvelle approche de modélisation de la couche d'interface a été proposée dont les résultats sont détaillés au chapitre 6 ainsi qu'aux références Grellet et coll. (2016, 2018). Finalement, les modèles développés ont été exploités afin d'analyser les phénomènes d'endommagement s'exerçant dans la partie haute des structures de chaussée.

3.2.3.2 Le manège de fatigue de l'IFSTTAR

Le manège de fatigue de l'IFSTTAR, détaillé au paragraphe 2.5.2.1, est localisé à Bouguenais proche de Nantes en France. Dans le cas de cette étude, l'anneau est divisé en quatre secteurs au niveau du rayon moyen de 19 m. Les secteurs ont une longueur de 40 m et la chaussée à une largeur de 3 m. Le revêtement bitumineux a été posé au mois de février 2011 et l'instrumentation des structures a été effectuée en mai 2011. Le profil des deux structures est donné à la figure 3.10. Ces deux structures possèdent une même fondation granulaire de 300 mm d'épaisseur en MG-31.5. Celle-ci repose sur un sol d'infrastructure de type sable argileux. L'épaisseur du revêtement bitumineux diffère sur les deux sections. Le revêtement bitumineux de la section A est constitué d'une couche de surface et d'une couche de base. La première en BBSG 0/10 est épaisse de 70 mm et possède une teneur en bitume 35/50 de 5,48 % et une teneur en vide de 7,9 %. La seconde couche en GB 0/14 est épaisse de 60 mm et possède une teneur en bitume 35/50 de 4,49 % et une teneur en vides de 9,6 %. Le revêtement de la section B est une couche unique d'épaisseur 70 mm en BBSG 0/10.

Lors de la construction de l'anneau, des essais ont été effectués sur les matériaux mis en œuvre afin de définir leurs propriétés physiques et mécaniques. Des mesures de portance à la *Dynaplaque* ont été effectuées sur le sol de fondation à une fréquence de trois mètres sur l'ensemble de l'anneau. Les modules mesurés sont détaillés à l'annexe 2. Pour garantir un module minimal de 90 MPa, les zones ayant un module inférieur à cette valeur ont été retravaillées. Sur les sections A et B, le module du sol d'infrastructure varie donc entre 90 MPa et 171 MPa. Les différences de module s'expliquent par le fait que le sable argileux a été mis en place il y a plus de 10 ans et que l'historique des sollicitations imposées par le manège varie en fonction des structures de chaussées précédemment construites. La compacité des sols et les teneurs en eau ne sont pas homogènes sur l'ensemble de l'anneau et par conséquent les propriétés mécaniques des sols varient en fonction de la position sur l'anneau.

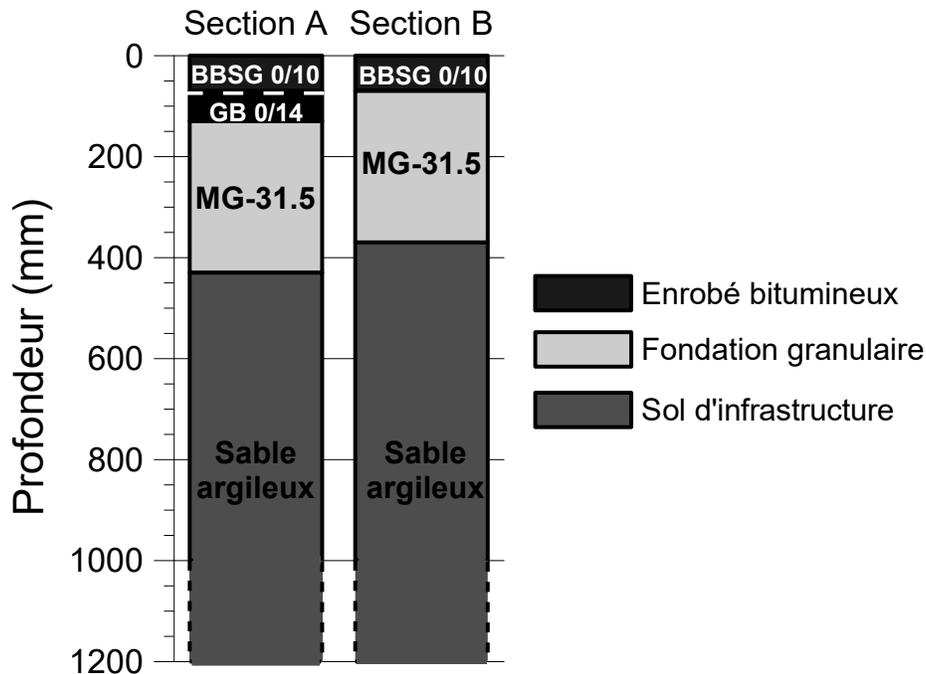


Figure 3.10 : Structure de chaussée de sections A et B au manège de fatigue de l'IFSTTAR

Où : BBSG 0/10 = enrobé bitumineux semi-greux de taille nominale maximale de 10 mm.
 GB 0/14 = couche de base en grave bitume de taille nominale maximale de 14 mm.
 MG-31.5 = matériaux granulaires de taille nominale maximale de 31,5 mm.

À chaque étape de la construction, des relevés ont été effectués afin de mesurer l'élévation du profil et donc l'épaisseur respective de chaque couche. Ces données sont mesurées tous les 1 m sur les rayons de l'anneau. Les épaisseurs réelles de la couche de fondation et du revêtement ont été calculées en chacun de ces points. La figure 3.11 présente les profondeurs du haut de ces couches pour les sections A et B. Le niveau de référence (profondeur = 0 cm) est déterminé par un point fixe au centre du manège. Pour la section A, l'épaisseur totale du revêtement varie entre 114 mm et 140 mm avec une valeur moyenne de 129 mm. Pour la section B, l'épaisseur d'enrobé varie entre 62 mm et 76 mm avec une valeur moyenne de 70 mm. Il est à noter qu'à chaque transition entre les sections, des bosses de 20 mm, engendrées par les techniques de mise en œuvre, peuvent apparaître. Les capteurs ont été placés à plus de 3 m du début des sections afin de se situer hors des zones d'influence de ces bosses.

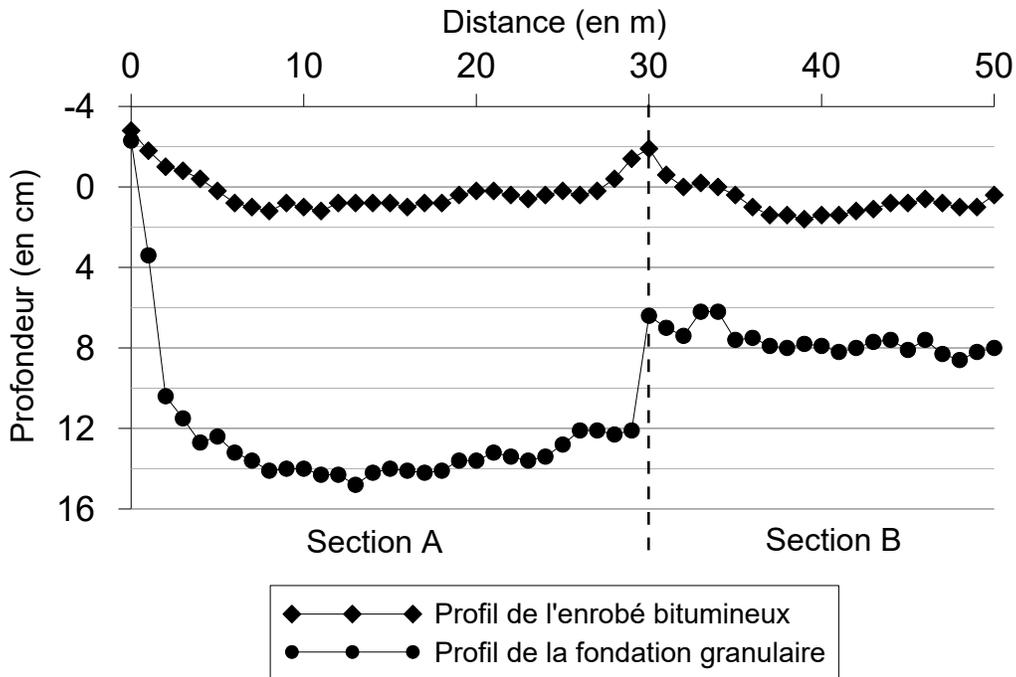


Figure 3.11 : Profil des couches d'enrobé bitumineux et de la fondation granulaire pour les sections A et B (manège de fatigue de l'IFSTTAR)

Des mesures de densité au gamma-densimètre ont été effectuées lors du compactage des couches bitumineuses afin de vérifier la compacité des matériaux et de déterminer les teneurs en vides des deux matériaux. Les valeurs obtenues sont données à l'annexe 2. Dès la fin de la construction des structures, des mesures de déflexion à la poutre de Benkelman ont été effectuées pour évaluer l'état initial des structures. Les mesures sont effectuées tous les 3 m et les résultats sont synthétisés à l'annexe 2.

3.2.3.3 Instrumentations et mesures expérimentales

Deux types de capteurs ont été installés sur les sections A et B : des capteurs résistifs et des capteurs à fibre optique. Les capteurs résistifs ont été installés à la construction de la chaussée à trois niveaux dans la chaussée : dans le sol d'infrastructure, dans la fondation et à la base des deux couches d'enrobé bitumineux. Les capteurs dans le sol et dans la fondation mesurent la déformation verticale (ϵ_{zz}) au sommet des couches. Les capteurs placés à la base des couches bitumineuses mesurent les déformations longitudinales (ϵ_{xx}) et transversales (ϵ_{yy}). Trois types de capteurs résistifs ont été utilisés, soit des capteurs aluminium, des capteurs plexiglas® et des capteurs TML. Le nom de ces capteurs vient des matériaux utilisés pour leur fabrication et est une appellation propre au projet. Les capteurs sont en forme de « H » et

mesurent les déformations suivant la direction de leur axe principal. Tous ces capteurs sont présentés en détail au paragraphe 4.3.1. La figure 3.12 schématise le positionnement des capteurs sur la section A.

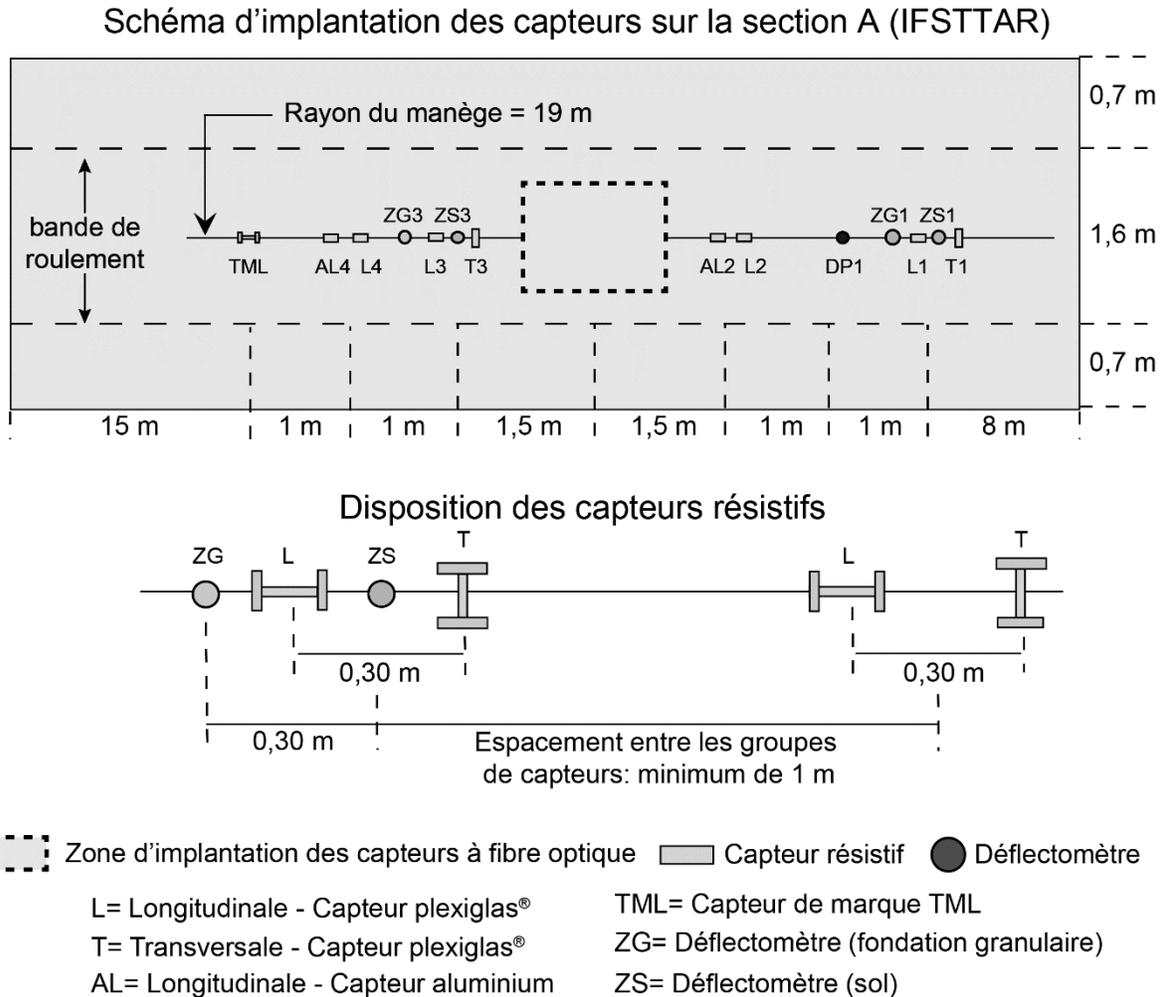


Figure 3.12 : Schéma d'implantation des capteurs pour la section A au manège de fatigue de l'IFSTTAR

Un espacement minimum de 1 m est imposé entre chaque groupe de capteurs et une distance de 30 cm sépare deux capteurs consécutifs. Cela permet d'éviter une interaction entre eux et offre un passage pour le câblage. Au total, sept capteurs dans le sens longitudinal et deux dans le sens transversal ont été mis en place à la base de la couche de GB. La section A étant composée de deux couches d'enrobé bitumineux, quatre capteurs plexiglas® ont également été placés à la base de la couche de BBSG. Le schéma d'implantation de ces capteurs n'est pas présenté étant donné qu'aucun de ces capteurs n'a été fonctionnel à la suite du compactage

des couches bitumineuses. Les efforts de compactage combinés aux hautes températures de la couche bitumineuse ont sectionné les câblages ou endommagé les jauges. Les capteurs verticaux placés dans le sol et la fondation sont nommés déflectomètres sur la figure 3.12. Le secteur d'implantation des capteurs à fibre optique est situé au milieu de la section et au centre de la bande de roulement. Les capteurs résistifs sont positionnés sur la ligne centrale de la bande de roulement, dans le même alignement que les capteurs à fibre optique afin de permettre une comparaison directe entre eux.

La figure 3.13 illustre la disposition des 29 jauges à fibre optique installées dans la couche de GB et dans la couche de BBSG de la section A. Une première carotte instrumentée permet une mesure des déformations longitudinales et transversales à 125 mm de profondeur. Une seconde carotte, installée uniquement dans la couche de BBSG, permet l'acquisition des déformations à 65 mm de profondeur, c'est-à-dire à 5 mm au-dessus de l'interface entre les deux couches bitumineuses. Une première plaque de déformation multiniveau instrumente la couche de GB et une seconde plaque instrumente la couche de BBSG. Au total, deux séries de cinq jauges ont été installées dans la plaque inférieure et trois séries de cinq jauges dans la plaque supérieure. Pour chaque série, les jauges sont transversalement espacées de 60 mm. La première série de jauges permet l'acquisition des déformations transversales à 15 mm de profondeur. La seconde série de jauges mesure les déformations verticales à 20 mm de profondeur. Deux autres séries sont disposées de part et d'autre de l'interface. La première est située à 65 mm de profondeur et la seconde à 75 mm. Cette disposition permet une mesure des déformations transversales de part et d'autre de l'interface, soit 5 mm au-dessus et 5 mm au-dessous. Finalement, la dernière série de jauges, située à 125 mm de profondeur, mesure les déformations transversales.

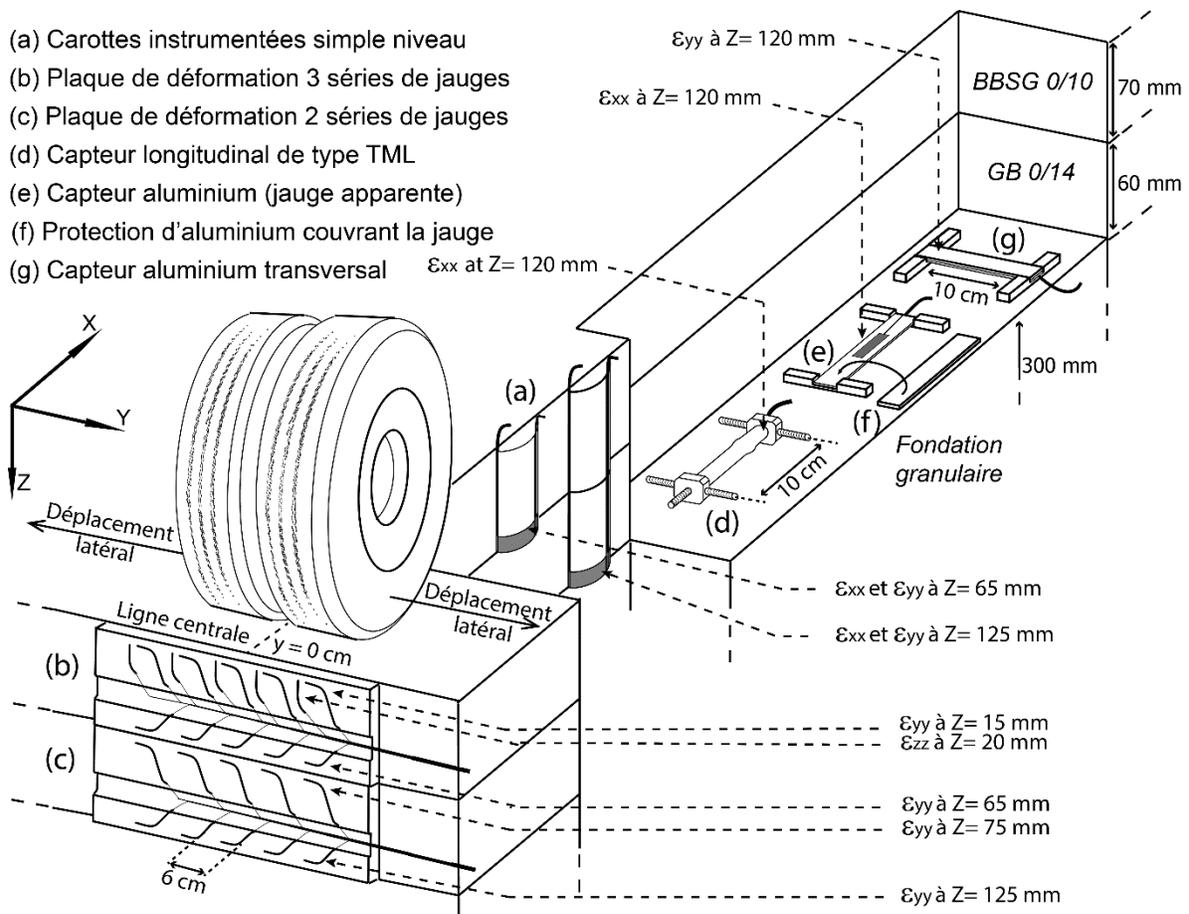


Figure 3.13 : Instrumentation du manège de fatigue de l'IFSTTAR– Section A

Une synthèse des jauges avec leur profondeur dans la structure de la section A est donnée au tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Synthèse des jauges au manège de fatigue de l'IFSTTAR - Section A

Profondeur	Jauge à fibre optique		Jauge résistive	
	Mise en place	Fonctionnelle	Mise en place	Fonctionnelle
Z = 15 mm	5 jauges T	4 jauges T	-	-
Z = 20 mm	5 jauges V	5 jauges V	-	-
Z = 65 mm	6 jauges T et 1 L	6 jauges T et 1 L	2 jauges T et 2 L	0 jauge T et 0 L
Z = 75 mm	5 jauges T	5 jauges T	-	-
Z = 120 mm	-	-	2 jauges T et 7 L	2 jauges T et 5 L
Z = 125 mm	6 jauges T et 1 L	6 jauges T et 1 L	-	-
Z = 180 mm	-	-	2 jauges V	1 jauge V
Z = 480 mm	-	-	2 jauges V	2 jauges V

- = Aucune jauge présente, L = Longitudinale, T = Transversale, V = Verticale

Le principe d'instrumentation de la section B est le même que pour la section A. Deux déflectomètres ont été placés verticalement dans le sol et dans la fondation granulaire afin de relever la déformation suivant l'axe Z. Six capteurs plexiglas[®] et un capteur TML ont été installés à la base de la couche de BBSG à Z = 65 mm et mesurent les déformations longitudinales et transversales. La figure 3.14 schématise la disposition des capteurs sur la section B.

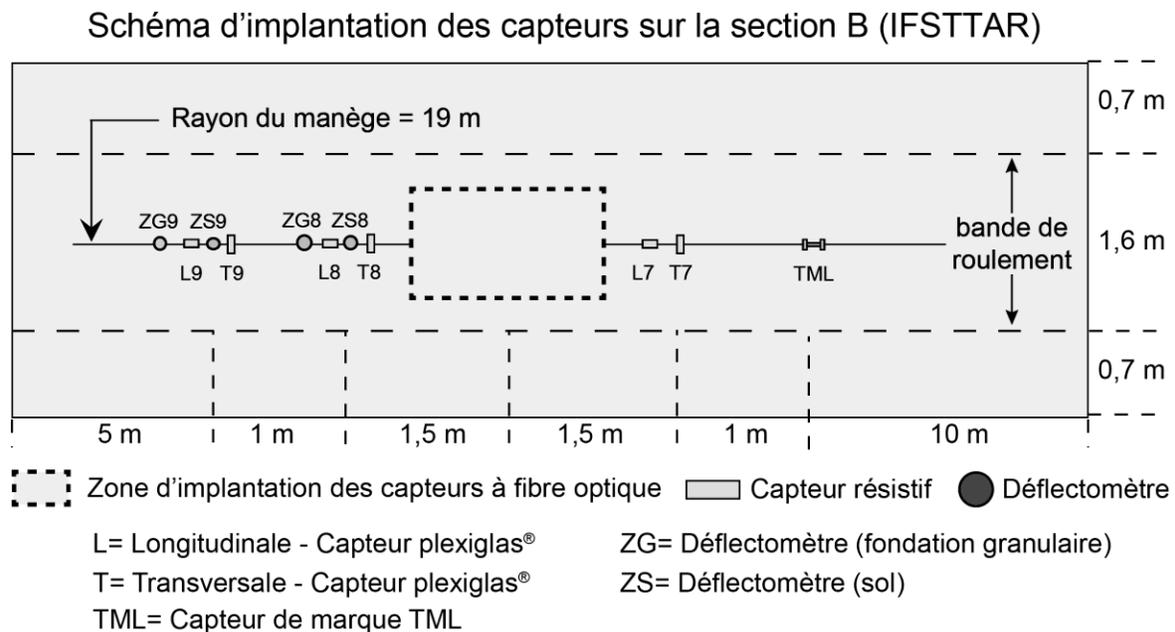


Figure 3.14 : Schéma d'implantation des capteurs pour la section B au manège de fatigue de l'IFSTTAR

La figure 3.15 illustre la disposition des 25 jauges à fibre optique et les capteurs résistifs qui ont été installés sur la section B. L'instrumentation de la couche de BBSG comprend une plaque de déformation multiniveau et deux carottes instrumentées. Les deux carottes mesurent les déformations longitudinales et transversales aux profondeurs de 10 mm et 65 mm. La plaque de déformation multiniveau est instrumentée par trois séries de sept jauges. Pour chaque série, les jauges sont transversalement espacées de 60 mm. Proche de la surface, la première série de jauges permet l'acquisition des déformations transversales à 10 mm de profondeur. La seconde série de jauges permet une lecture des déformations verticales à 20 mm de profondeur. Finalement, la dernière série de jauges située à 65 mm de profondeur mesure les déformations transversales à la base du revêtement.

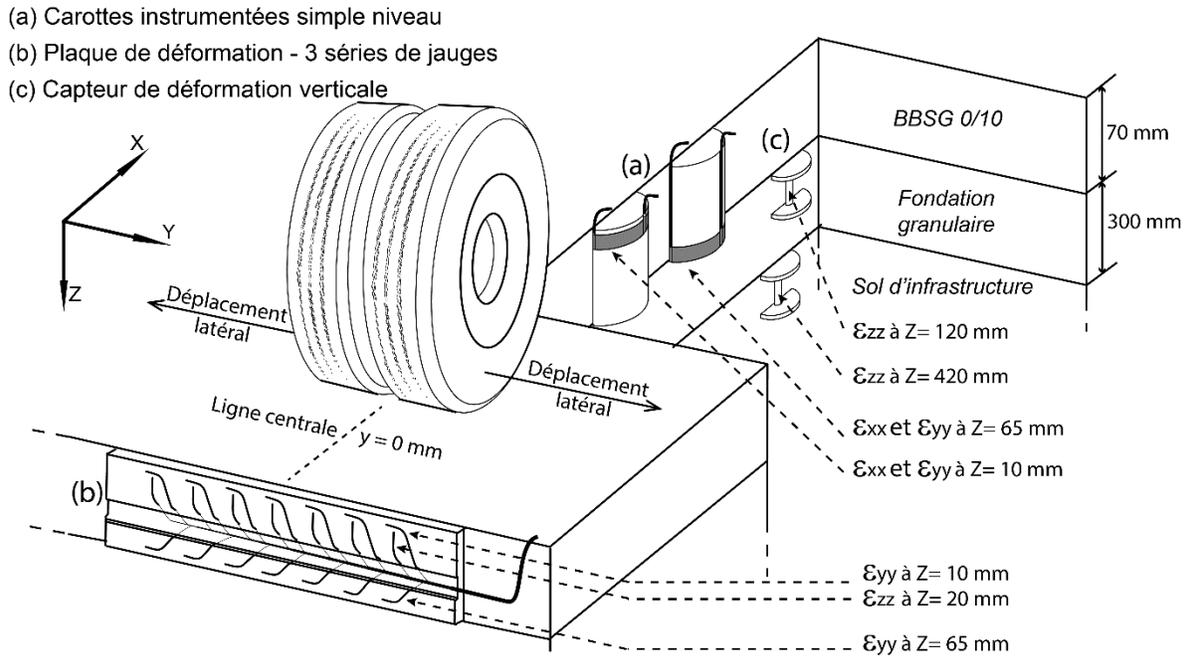


Figure 3.15 : Instrumentation du manège de fatigue de l'IFSTTAR – Section B

Une synthèse des jauges avec leur profondeur dans la structure de la section B est donnée au tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Synthèse des jauges au manège de fatigue de l'IFSTTAR - Section B

Profondeur	Jauge à fibre optique		Jauge résistive	
	Mise en place	Fonctionnelle	Mise en place	Fonctionnelle
Z = 10 mm	8 jauges T et 1 L	7 jauges T et 1 L	-	-
Z = 20 mm	7 jauges V	7 jauges V	-	-
Z = 65 mm	8 jauges T et 1 L	7 jauges T et 1 L	3 jauges T et 4 L	1 jauge T et 3 L
Z = 120 mm	-	-	2 jauges V	1 jauge V
Z = 420 mm	-	-	2 jauges V	2 jauges V

- = Aucune jauge d'installée, L = Longitudinale, T = Transversale, V = Verticale

Une fois en rotation, les modules des bras sont commandés pour se déplacer autour de leur position centrale. Un bras possède au total 11 positions, soit une position centrale et cinq de part et d'autre de celle-ci. L'espacement entre chaque position est de 10,5 cm. Sur l'anneau du manège, la position n° 6 correspond à la position centrale pour laquelle le rayon est de 19 m. Les positions n° 1 à 5 sont les positions situées vers l'intérieur de l'anneau et les positions n° 7 à 11 sont vers l'extérieur. La section A et B possédaient respectivement 29 et 23 jauges à fibre optique opérationnelles. L'appareil d'acquisition utilisé lors des essais ne possédant que

8 entrées, il a été nécessaire d'effectuer plusieurs fois le balayage des 11 positions des bras du manège. Au total, 4 balayages complets ont été nécessaires pour la section A (4 balayages x 8 jauges = 32 mesures possibles pour 29 jauges présentes) et 3 balayages pour la section B (3 balayages x 8 jauges = 24 mesures possibles pour 23 jauges présentes). Les entrées supplémentaires ont servi à vérifier la répétabilité de certaines jauges au cours des balayages. Pour chaque condition expérimentale, l'acquisition des données a suivi la même procédure. Les étapes de cette procédure sont :

- Étape 1 : les quatre bras du manège sont placés en position n° 1. Les mesures sont acquises pour les 8 premières jauges pendant 4 à 6 rotations complètes des bras. L'acquisition de ces passages successifs permet d'évaluer la répétabilité des mesures et la fiabilité des capteurs.
- Étape 2 : l'étape 1 est répétée pour les positions n° 2 à 11. Entre deux et trois minutes sont nécessaires pour que les bras passent d'une position à la suivante.
- Étape 3 : les 8 premières jauges sont remplacées par les 8 suivantes. Les étapes 1 et 2 sont ensuite répétées mais en commençant la procédure de la position n° 11 vers la position n° 1.
- Étape 4 : les étapes précédentes sont répétées jusqu'à ce que l'acquisition avec toutes les jauges soit terminée. La durée moyenne de la procédure est de l'ordre de 100 minutes pour la section A et de 70 minutes pour la section B.

Comme pour les campagnes de mesure précédentes, les mesures ont été effectuées pour deux types de pneus. Le premier type est un pneu jumelé de dimension 12.00R20 et le second est un pneu à bande large Michelin Xone 455/55R22.5. Un des quatre modules est équipé avec le pneu jumelé et un second avec le pneu large. La figure 3.16 présente les deux bras du manège équipés des pneus testés. Ces deux bras sont diamétralement opposés et les deux autres bras sont montés en configuration d'essieu simple à pneus jumelés. La pression de gonflage et la charge de ces deux autres bras ont été maintenues constantes pour toute la durée des mesures. Cette méthodologie permet de mesurer les déformations imposées par les deux types de pneus pour des conditions expérimentales identiques.



Figure 3.16 : Modules du manège de fatigue équipés avec (a) un pneu jumelé 12.00R20 et (b) un pneu à bande large 455/55R22.5

L'axe central de la bande de roulement correspond à la ligne centrale des capteurs résistifs (ligne de coordonnée $y = 0$ mm) tel que schématisé à la figure 3.13 et à la figure 3.15. Les carottes instrumentées et la jauge centrale des plaques de déformations sont également centrées sur cette ligne. La disposition des capteurs à fibre optique et la bande de roulement sont présentées au premier plan de la figure 3.16. Les déformations sont mesurées pour les 11 positions du manège en suivant la procédure expérimentale précédemment détaillée. Les bassins de déformation obtenus avec les plaques sont donc constitués de 55 points de mesure pour la section A (5 jauges x 11 positions) et de 77 points de mesure pour la section B (7 jauges x 11 positions). La figure 3.17 détaille la répartition spatiale de ces points pour les deux sections. Le nombre de jauges et de leurs espacements a été défini lors de la conception des plaques dans le but d'avoir une discrétisation des mesures régulière et suffisamment espacée afin de mesurer les déformations à la fois sous le pneu et à l'extérieur de celui-ci. Une empreinte du pneu jumelé est ajoutée à la figure afin de visualiser la position relative des points de mesure par rapport à la charge. Les coordonnées exactes sont détaillées à l'annexe 3. Les bassins de déformation formés à partir des capteurs résistifs et des jauges situées sur les carottes instrumentées sont constitués de 11 points de mesure (1 jauge x 11 positions).

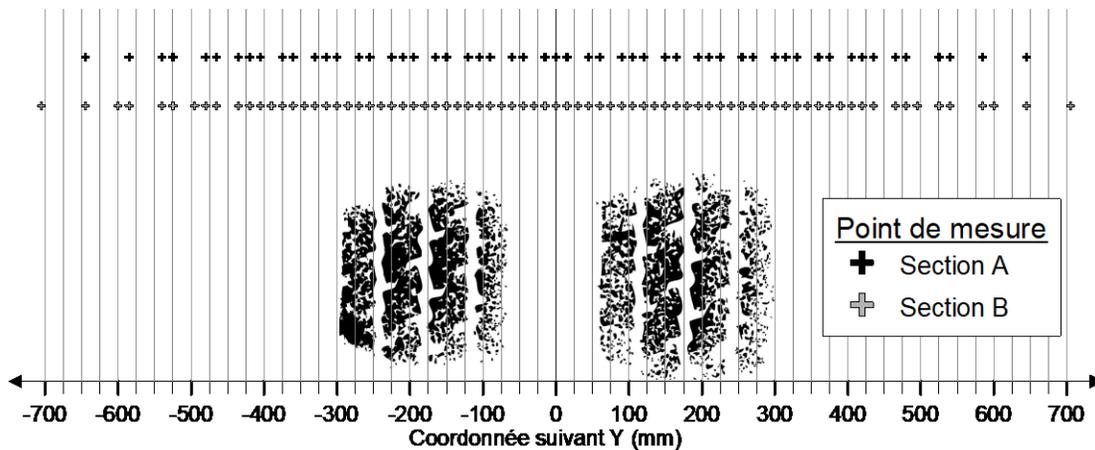


Figure 3.17 : Coordonnées des points de mesure sous les pneus

Les séquences de mesures sont effectuées en faisant varier les paramètres suivants :

- La structure de chaussée :
 - Essais sur la section A et B
- Les types de pneus :
 - Essais avec des pneus jumelés Michelin XZY-2 12.00R20
 - Essais avec des pneus à bande large Michelin Xone XTE 455/55R22.5
- Les pressions de gonflage :
 - Gonflage à 830 kPa et 690 kPa
- Le niveau de charge appliqué sur le bras monté en essieu simple :
 - Charge de 4 tonnes, 5 tonnes et 5,8 tonnes pour les deux types de pneus
 - Essai complémentaire sous 6,5 tonnes pour le pneu jumelé
- La vitesse de la charge :
 - Vitesse de la charge de 32,2 km/h, 43,0 km/h et 57,3 km/h correspondant à une rotation de 4,5 tours/min, 6 tours/min et 8 tours/min.
 - Un essai pour 9 vitesses variant entre 3,6 km/h et 57,3 km/h
- Les conditions de température :
 - Essais pour une température de référence autour de 20 °C
 - Essais pour des températures élevées, comprises entre 28 °C et 40 °C

Au total, 24 cas ont été évalués sur la section A et 27 cas pour la section B. Ces conditions expérimentales sont détaillées au tableau 3.4 et au tableau 3.5 respectivement pour les sections A et B. La date des mesures ainsi que le nombre de sollicitations appliquées aux structures pour chaque condition expérimentale sont donnés à l'annexe 1.

Tableau 3.4 : Cas d'étude pour la section A au manège de fatigue de l'IFSTTAR

Section A							
Charge	Pression	Vitesse	Température	Type de pneu	Cas n°		
4 tonnes	690 kPa	43 km/h	29 °C	Pneu jumelé	13		
				Pneu large	14		
	830 kPa	32 km/h	18,5 °C	Pneu jumelé	15		
				Pneu large	16		
				Pneu jumelé	11		
				Pneu large	12		
5 tonnes	830 kPa	32 km/h	19,5 °C	Pneu jumelé	27		
				Pneu large	28		
		43 km/h	19,2 °C	Pneu jumelé	21		
				Pneu large	22		
			28,3 °C	Pneu jumelé	25		
				Pneu large	26		
			34,7 °C	Pneu jumelé	23		
				Pneu large	24		
		57 km/h	18,8 °C	Pneu jumelé	29		
				Pneu large	30		
		5,8 tonnes	830 kPa	43 km/h	20 °C	Pneu jumelé	V1
						Pneu large	V2
32,8 °C	Pneu jumelé				31		
	Pneu large				32		
	Pneu jumelé				33		
	Pneu large				34		
6,5 tonnes	830 kPa	43 km/h	20,5 °C	Pneu jumelé	41		
			40,5 °C	Pneu jumelé	42		

La température correspond à la température à 3 cm de profondeur dans la couche n° 1

Des thermistances sont installées à différentes profondeurs dans la chaussée afin de suivre l'évolution des températures au cours des essais. Pour la section A, le relevé des températures est situé en surface, à 4 cm, 8 cm, 23 cm et à 38 cm de profondeur. Pour la section B, les mesures sont situées en surface, à 3 cm, 6 cm, 9 cm, 12 cm, 27 cm et à 42 cm de profondeur. Les températures sont fonction des conditions météorologiques du jour des essais étant donné qu'aucun système de contrôle de la température n'a été utilisé lors de la campagne de mesures. Les relevés ont été pris à différentes heures de la journée afin d'obtenir des mesures pour une température proche de 20 °C (température de référence) et des températures plus élevées. Au cours d'une journée des gradients de température apparaissent dans les couches des structures. Le suivi de ces variations a été effectué pour chaque condition expérimentale. Les températures ont été relevées aux 10 minutes pour toute la durée des essais. Toutes les températures ainsi que la date et les heures des relevés sont données à l'annexe 3. Les mois

de mai et juin à Nantes permettent d'avoir une température dans les couches bitumineuses autour de 20 °C en matinée et des températures pouvant atteindre 40 °C au cours de l'après-midi.

Tableau 3.5 : Cas d'étude pour la section B au manège de fatigue de l'IFSTTAR

Section B					
Charge	Pression	Vitesse	Température	Type de pneu	Cas n°
4 tonnes	690 kPa	32 km/h	24,2 °C	Pneu jumelé	53
				Pneu large	54
		43 km/h	22,5 °C	Pneu jumelé	51
				Pneu large	52
	830 kPa	32 km/h	24,8 °C	Pneu jumelé	57
				Pneu large	58
		43 km/h	28 °C	Pneu jumelé	55
				Pneu large	56
5 tonnes	830 kPa	43 km/h	22 °C	Pneu jumelé	61
				Pneu large	62
		43 km/h	29 °C	Pneu jumelé	67
				Pneu large	68
		43 km/h	30,5 °C	Pneu jumelé	65
				Pneu large	66
		43 km/h	36 °C	Pneu jumelé	63
				Pneu large	64
		57 km/h	19 °C	Pneu jumelé	69
				Pneu large	70
9 vitesses	21 °C	Pneu jumelé	V3		
		Pneu large	V4		
5,8 tonnes	830 kPa	43 km/h	23 °C	Pneu jumelé	71
				Pneu large	72
		43 km/h	32,6 °C	Pneu jumelé	73
				Pneu large	74
6,5 tonnes	830 kPa	43 km/h	19,2 °C	Pneu jumelé	81
			37 °C	Pneu jumelé	82
			27,2 °C	Pneu jumelé	83

La température correspond à la température à 4 cm de profondeur dans la couche n° 1

Afin de s'assurer de la charge appliquée sur les pneus, une pesée a été effectuée en arrêtant les bras du manège sur une balance. Comme illustré à la figure 3.18, la pression de gonflage est également contrôlée lors des pesées. Sur cette figure, la charge appliquée est de 4 tonnes et la pression de gonflage est de 690 kPa.

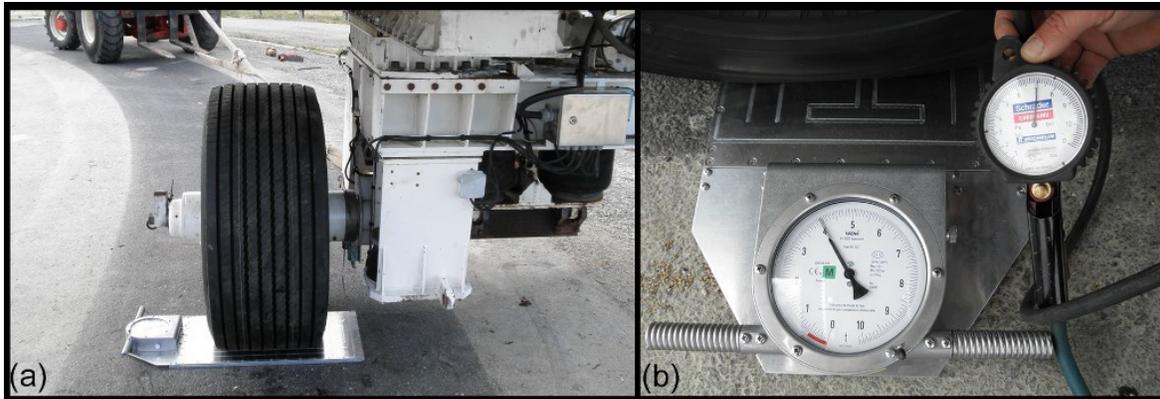


Figure 3.18 : Contrôle et ajustement (a) de la charge appliquée et (b) de la pression de gonflage des pneus

3.2.3.4 Principaux résultats de l'étude

Les résultats de l'étude se divisent en deux parties. La première partie concerne l'effet du type de pneu sur la durée de vie des structures et la seconde partie se concentre sur l'analyse et l'interprétation des signaux de déformation proche de la surface ainsi que de part et d'autre de l'interface. Cette seconde partie des résultats est plus spécifiquement présentée aux chapitres 5 et 6. En ce qui concerne l'effet du type de pneu, la procédure expérimentale permet une comparaison directe entre les déformations engendrées par le pneu à bande large versus celles du pneu jumelé. L'analyse comparative est basée sur l'identification des déformations critiques associées aux quatre modes d'endommagement suivants : la fissuration par fatigue, la fissuration par le haut, l'orniérage de l'enrobé bitumineux et l'orniérage structurale. Pour cela, les déformations transversales et verticales spécifiques au mode de rupture sont extraites des bassins de déformation mesurés pour les deux types de pneus. Le ratio des déformations engendrées par les deux types de pneus est par la suite calculé. Un ratio supérieur à 1 signifie que les déformations critiques engendrées par le pneu à bande large sont plus grandes que celles engendrées par le pneu jumelé. Le calcul est effectué pour chacune des conditions expérimentales testées au cours des campagnes de mesures n° 2 et 3. Les résultats sont regroupés en fonction des structures testées et des plages de températures. Les résultats pour les sections A et B sont divisés en deux catégories. La première correspond aux mesures obtenues pour des températures comprises entre 16 °C et 24,5 °C (température modérée) et la seconde pour des températures supérieures à 24,5 °C (température chaude). La synthèse des ratios est présentée à la figure 3.19. L'approche expérimentale et le traitement des données

suivis pour obtenir ces résultats sont détaillés à la référence Grellet et coll. (2013).

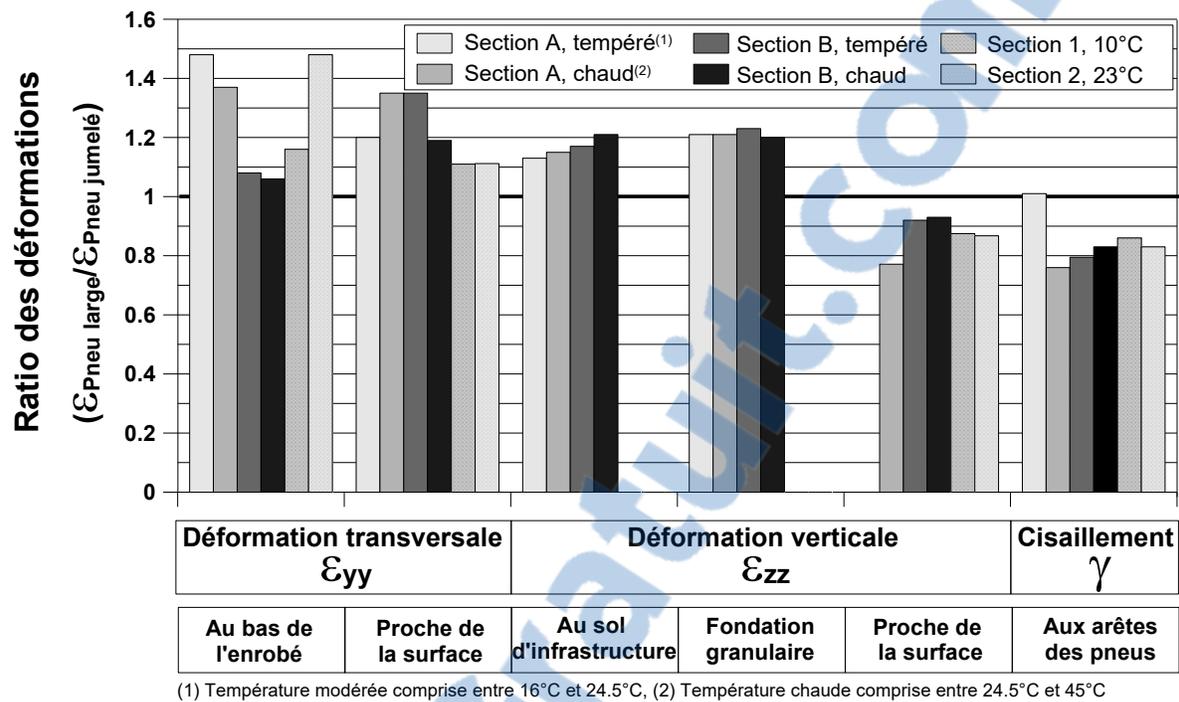


Figure 3.19 : Ratios des déformations critiques déterminés pour les quatre sections (adaptée de Grellet et coll., 2013)

Les résultats confirment que l'utilisation du pneu à bande large entraîne une augmentation des déformations transversales à la base du revêtement. Pour les cas étudiés, cette augmentation est comprise entre 5 % et 45 % en fonction des sections d'essais et des conditions environnementales. Pour les sections A et B, le ratio est moins élevé pour les températures chaudes comparativement aux températures modérées. Les déformations verticales mesurées au niveau du sol d'infrastructure et au niveau de la fondation granulaire sont également plus élevées pour le pneu à bande large. Le ratio est compris entre 1,1 et 1,2 au sommet du sol d'infrastructure en fonction des structures étudiées. Au niveau de la fondation, le ratio ne varie pas significativement entre les différentes configurations testées et il est égal à 1,2. Proche de la surface, les déformations transversales sont plus élevées avec le pneu à bande large, mais à l'inverse les déformations verticales sont plus faibles. Ces variations se traduisent par des ratios compris entre 1,05 et 1,35 pour les déformations transversales et entre 0,75 et 0,92 pour les déformations verticales. La figure 3.19 présente également le cisaillement sous les arêtes des pneus. Les capteurs en place ne permettant pas de directement le mesurer, une relation le reliant aux pentes des bassins des déformations verticales a été définie afin de le calculer pour

chaque condition expérimentale. Le cisaillement γ est calculé à partir de l'équation 3-1. La mise en place du modèle ainsi que la méthode de détermination des pentes du bassin sont détaillées à la référence Grellet et coll. (2013). Les coefficients de régression dépendent de la structure de chaussée et de la vitesse de la charge. Le cisaillement est calculé sous les quatre arêtes du pneu jumelé et sous les deux du pneu à bande large. La valeur maximale pour chaque pneu est retenue afin de calculer le ratio des déformations. Pour les conditions expérimentales étudiées, celui-ci est compris entre 0,75 et 1. Cela signifie que le pneu à bande large engendre moins de déformations en cisaillement comparativement au pneu jumelé.

$$\gamma = (aT^2 + bT + c) * Pente_{\varepsilon_{zz}} \quad \text{Équation 3-1}$$

Où : γ = déformation en cisaillement

T = température du revêtement

a, b, c = coefficients de régression

$Pente_{\varepsilon_{zz}}$ = pente du bassin des déformations verticales.

La durée de vie associée aux quatre modes d'endommagement énoncés précédemment est calculée en associant les déformations mesurées avec des modèles de performances. Pour chaque mode d'endommagement, plusieurs modèles ont été utilisés et le nombre d'applications de charges admissibles avant la rupture a été calculé. Le ratio des dommages tel que défini à l'équation 3-2 est ensuite calculé à partir de ces valeurs.

$$DR_i = N_{pneu\ jumelé} / N_{pneu\ à\ bande\ large} \quad \text{Équation 3-2}$$

Où : DR_i = ratio des dommages pour le mode d'endommagement i

N_j = durée de vie associée au type de pneu j

Le ratio des dommages est fonction des modèles de performances choisis et de l'approche de calculs considérée. Les résultats sont détaillés à la référence Grellet et coll. (2013). En conclusion de cette étude, il apparaît que pour les conditions expérimentales testées, les pneus à bande large engendrent un dommage plus important considérant la fissuration par fatigue et l'orniérage structural. Proche de la surface, leur utilisation permet cependant une baisse de la contraction verticale sous l'empreinte du pneu et ainsi une réduction de l'endommagement lié à l'orniérage des couches bitumineuses. Ces résultats montrent également que l'utilisation des pneus à bande large entraîne une baisse du cisaillement au niveau des arêtes des pneus, mais

également une augmentation de l'extension à l'extérieur des pneus. Cela a pour effet, considérant l'approche classique reliant la fissuration par le haut à l'extension proche de la surface, d'augmenter l'endommagement lié à ce mode de rupture.

3.3 Modélisation viscoélastique sous le logiciel ViscoRoute© 2.0

Le logiciel ViscoRoute© 2.0 permet le calcul des trois champs de déplacement, des six champs de contraintes et des six champs de déformations en tout point de la chaussée lors du passage d'une charge roulante. La définition du chargement, de la structure de chaussée et des points d'observation sont les trois données d'entrée requises pour le calcul. Un point d'observation correspond à un des quinze champs mécaniques calculés à la profondeur spécifiée. Afin de permettre une comparaison directe entre les capteurs et les résultats du logiciel, les points d'observation sont à la même profondeur que celle des capteurs. Les paramètres de charge et les propriétés des matériaux spécifiques aux conditions expérimentales sont détaillés dans les paragraphes qui suivent.

3.3.1 Paramètres de charge

Les paramètres de charge comprennent la vitesse, le nombre de cas de charge appliqué et leurs caractéristiques. La vitesse de charge est constante et requise pour les calculs intégrant la viscoélasticité des matériaux. Dans le logiciel ViscoRoute© 2.0, la charge se déplace suivant la direction X. Les charges peuvent être ponctuelles ou de forme rectangulaire ou elliptique. Dans le cas des charges rectangulaires ou elliptiques, les coordonnées du centre de la charge ainsi que les demi-dimensions de la charge sont requises. Dans le cadre de ce projet, les chargements étudiés sont décomposés en une multitude de charges rectangulaires afin d'intégrer la sculpture des pneus. Les forces appliquées à chaque charge sont définies par leur composante dans les trois directions X, Y et Z. Ces forces, notées F_x , F_y et F_z , sont définies en Newton et sont uniformément réparties sur la surface de la charge. Au cours des trois campagnes de mesure, des pesées ont été effectuées afin de déterminer la charge totale appliquée à chaque pneu. La somme des charges F_z est égale à cette charge totale F_T . Aucune charge tangentielle n'a été prise en compte dans les modélisations et les composantes F_x et F_y sont donc maintenues égales à zéro.

La décomposition du chargement en sous-charges rectangulaires est déterminée à partir des empreintes de pneus mesurées pour plusieurs conditions expérimentales. Les empreintes à la peinture sur papier blanc et celles avec le *Tekscan* ont servi à définir les empreintes de pneus pour les campagnes de mesures n° 1 et 2. L'appareil Tekscan est un tapis muni de capteurs de pression dont la disposition forme un quadrillage. La discrétisation du quadrillage est fonction du modèle d'appareil utilisé. Chaque cellule du tapis renvoie la pression de contact locale. Un exemple d'application est donné à la figure 2.14. L'appareil permet également la mesure des dimensions de chaque élément de la sculpture du pneu. Pour la campagne de mesures n° 3, du papier film *Fujifilm Prescale* a été utilisé pour mesurer les empreintes de pneu. La figure 3.20 présente les empreintes de pneu obtenues à partir du papier *Prescale* pour les pneus jumelés Michelin XZY-2 de dimension 12.00R20 et le pneu Michelin Xone XTE de dimension 455/55R22.5. Les taches plus claires au centre de l'empreinte du pneu large sont dues à un reflet engendré par le film plastique protecteur.

L'application d'une pression mécanique sur le film produit un éclatement de microcapsules. Une fois libéré, le liquide contenu dans les microcapsules réagit avec un révélateur et une teinte plus ou moins foncée apparaît en surface du papier. Plus la pression appliquée est élevée, plus la teinte rouge est marquée. Un logiciel de traitement d'images permet d'associer cette teinte à la pression appliquée. Dans le cadre de ce projet, le film papier a essentiellement été utilisé afin de déterminer la dimension et l'aire des sculptures du pneu. Les empreintes sont effectuées uniquement en statique, c'est-à-dire que la charge est soulevée puis posée sur les papiers films ou le Tekscan.

Les modélisations associées aux relevés *Tekscan* et aux empreintes de la figure 3.20 sont présentées à la figure 3.21. Les trois pneus sont considérés symétriques et sont centrés sur le point de coordonnées (0,0). La sculpture du pneu 12.00R20 est constituée de quatre nervures et de trois rainures. Les nervures représentées par les zones grises sur la figure sont modélisées par une surface de contact rectangulaire. Les largeurs et les longueurs de chaque zone de contact sont représentées sur la figure. Les rainures entre chaque nervure sont considérées d'une largeur constante. L'espacement entre les deux pneus est directement mesuré sur les papiers films. La sculpture du pneu 11R22.5 possède cinq nervures. Toutes les nervures et les rainures sont considérées d'une largeur constante. Sur les extérieurs des pneus, les nervures

sont cependant plus courtes. Les différences principales entre les deux pneus jumelés sont observables sur la figure 3.21. Le pneu jumelé 11R22.5 possède une largeur totale plus petite et les nervures des pneus sont plus nombreuses mais plus fines et plus rapprochées. Le pneu large 455/55R22.5 est constitué de neuf nervures de largeur égale. Leur longueur est variable. Les nervures vers le centre du pneu sont plus longues que celles sur les extérieurs. Les huit rainures ont une largeur constante.

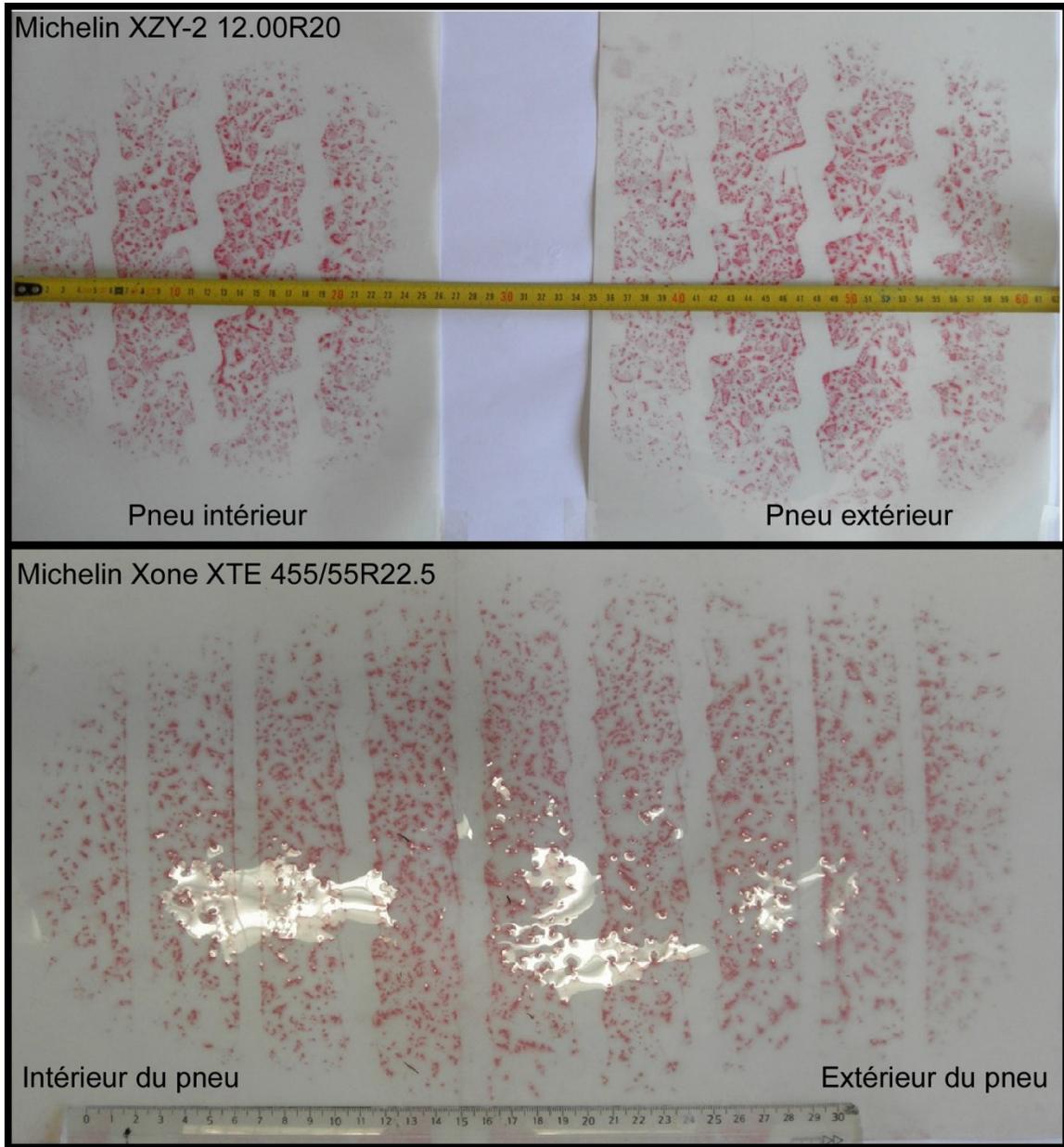


Figure 3.20 : Empreintes des pneus effectuées avec le papier film *Fujifilm Prescale* pour (a) Michelin XZY-2 12.00R20 et (b) Michelin Xone XTE 455/55R22.5

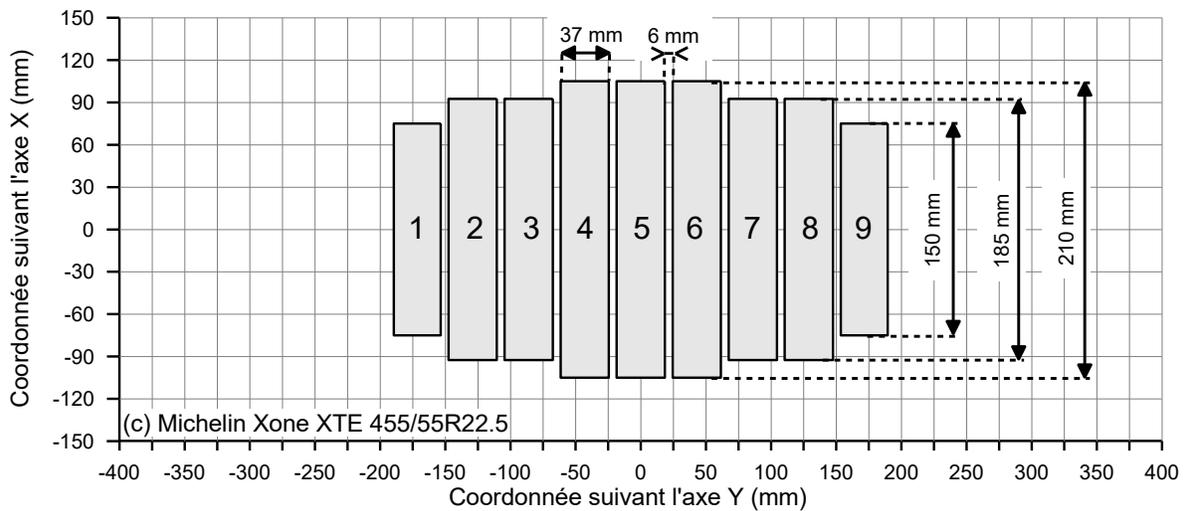
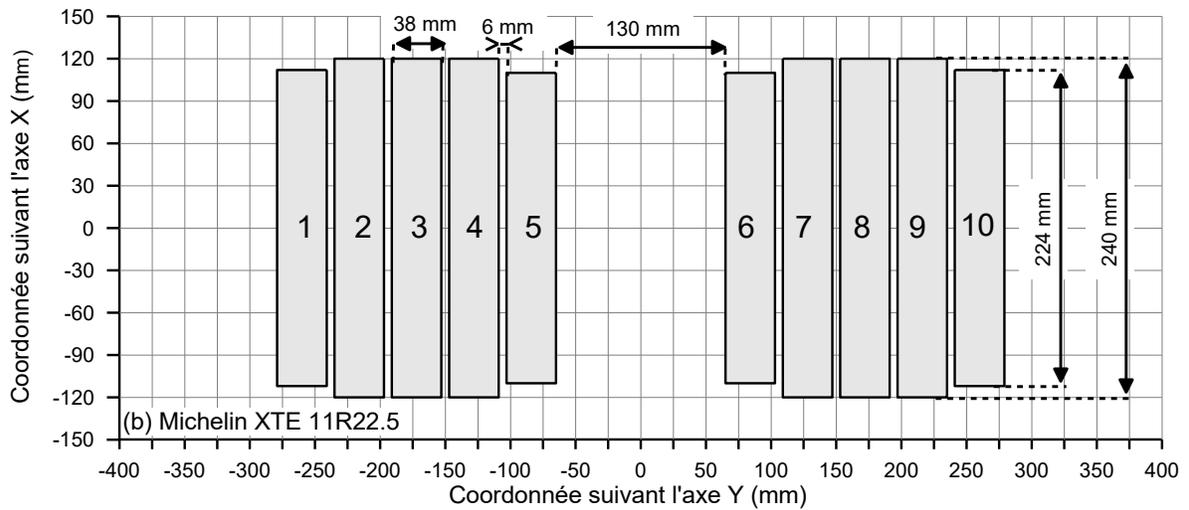
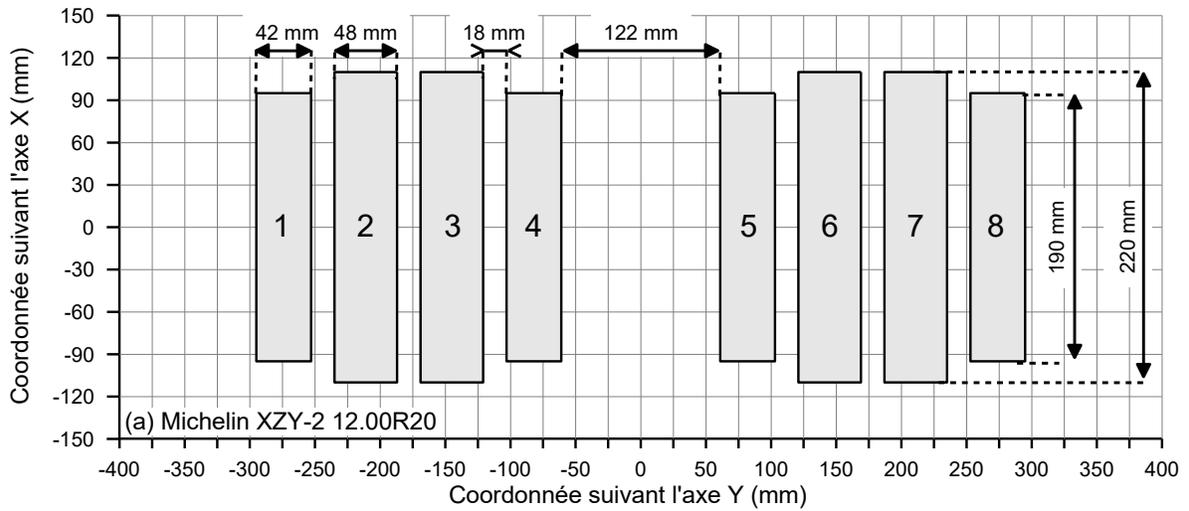


Figure 3.21 : Modélisation sous ViscoRoute© 2.0 des pneus jumelés : (a) Michelin XZY-2 12.00R20, (b) Michelin XTE 11R22.5 et du pneu à bande large : (c) Michelin Xone XTE 455/55R22.5

Les mesures effectuées au Tekscan montrent que l'augmentation de la charge totale appliquée sur un pneu a pour effet d'augmenter à la fois les pressions de contact et l'aire de contact. L'augmentation de l'aire de contact est essentiellement due à l'augmentation de la longueur des nervures puisque les largeurs restent constantes. Cet effet est le même lorsque la pression de gonflage des pneus diminue. Cette baisse se traduit par un écrasement du pneu quantifiable par l'augmentation de la longueur de l'empreinte au sol et elle engendre une redistribution des pressions de contact. Aucune augmentation de la largeur des empreintes n'a été observée. Les empreintes de pneus de la figure 3.20 montrent que les charges ne sont pas également réparties sur les deux pneus. Dans le cas du pneu jumelé 12.00R20, la charge sur le pneu extérieur est supérieure à celle du pneu intérieur. Cet effet se traduit par une empreinte de pneu plus longue et une teinte rouge plus vif. Bien que le pneu à bande large soit symétrique, son empreinte présente des nervures plus longues sur l'extérieur du pneu (à droite sur la photographie). Ce léger déséquilibre n'est ni considéré dans les aires de contact ni dans les forces appliquées sur chaque nervure et les modélisations sont maintenues symétriques.

3.3.2 Propriétés des matériaux

La structure de chaussée est un demi-espace multicouche constitué de couches élastiques (sol et fondation) et de couches thermoviscoélastiques (couche bitumineuse). La couche de sol est une couche unique de dimension infinie. Le module réversible des matériaux granulaires de fondation varie avec la profondeur. Les couches de fondation sont donc subdivisées en sous-couches afin d'intégrer cette variation dans les modélisations. Toutes les couches de sols et les sous-couches granulaires sont considérées linéaires élastiques et leur coefficient de Poisson est fixé à 0,35. Les interfaces entre les couches granulaires et les couches de sol sont considérées parfaitement collées. Les couches bitumineuses sont soit considérées élastiques, soit viscoélastiques. Dans le second cas, leur comportement mécanique est modélisé par le modèle de Huet-Sayegh. Dans les cas où les couches bitumineuses sont considérées élastiques, leur module est déterminé à partir des courbes maîtresses obtenues par les essais de caractérisation. Le tableau 3.6 synthétise les paramètres de modélisation associés au modèle de Huet-Sayegh. La température de référence pour la méthode LC-26-700 (Québec, 2007) est de 10 °C. Pour les matériaux du SERUL, les essais de module complexe ont été effectués en octobre 2014, après les campagnes de mesures. Aucune modélisation des sections 3 et 4 du

SERUL n'ayant été effectuée, les propriétés des matériaux ne sont pas présentées. Les modules complexes dans le plan de Cole et Cole et dans l'espace de Black des cinq mélanges bitumineux sont présentés à la figure 3.22.

Tableau 3.6 : Paramètres du modèle de Huet-Sayegh des cinq mélanges bitumineux des sections du SERUL et du manège de fatigue de l'IFSTTAR

Manège de fatigue de l'IFSTTAR - Section A et B								
Matériau	δ	k	h	E_∞	A_0	A_1	A_2	E_0
BBSG 0/10	2,4809	0,2193	0,6622	28 743	3,9078	-0,3837	$1,629.10^{-3}$	23,3
GB 0/14	2,5119	0,2203	0,6671	28 723	3,9357	-0,3836	$1,629.10^{-3}$	28,4
SERUL - Section 1								
Matériau	δ	k	h	E_∞	τ_0	a_1	a_2	E_0
ESG - 10	2,455	0,156	0,493	32 600	0,015	-0,142	$7,23.10^{-4}$	0,1
SERUL - Section 2								
Matériau	δ	k	h	E_∞	τ_0	a_1	a_2	E_0
ESG - 10	2,557	0,165	0,505	35 100	0,027	-0,146	$8,54.10^{-4}$	20,1
GB - 20	2,893	0,174	0,549	30 300	0,216	-0,152	$7,93.10^{-4}$	0,1

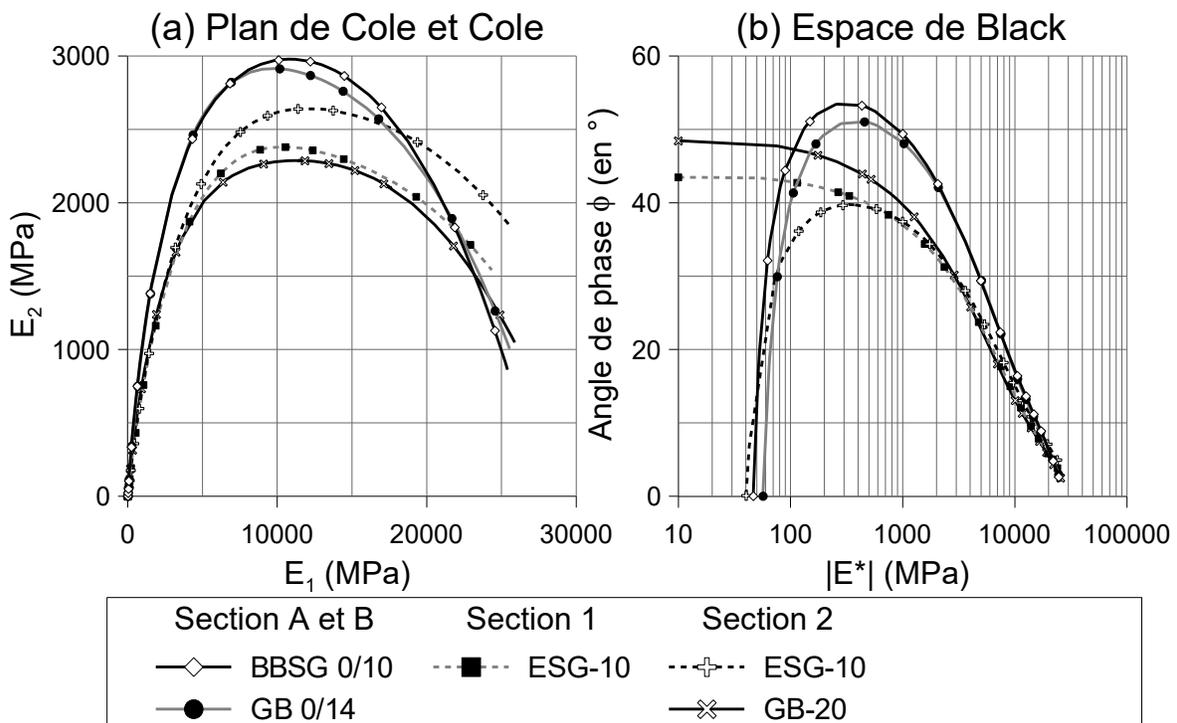


Figure 3.22 : Représentation dans le plan de Cole et Cole et dans l'espace de Black du module complexe des cinq mélanges bitumineux des sections du SERUL et du manège de fatigue de l'IFSTTAR

Sur les sections A et B, la fondation en MG-31.5 a une épaisseur de 300 mm. Pour les modélisations, cette couche est divisée en trois sous-couches de 100 mm d'épaisseur. Les modules réversibles de ces sous-couches sont 180 MPa, 130 MPa et 100 MPa. En se basant sur les essais de plaques effectués lors de la construction des structures, le module du sol est fixé à 80 MPa. Au SERUL, la fondation de MG-20 est divisée en deux sous-couches de 100 mm ayant 250 MPa et 200 MPa de module réversible. La couche de 400 mm de MG-112 est divisée en deux sous-couches de 200 mm ayant 150 MPa et 100 MPa de module réversible. Le module du sol est imposé à 80 MPa.

3.4 Déformations longitudinales et transversales à la base des couches bitumineuses

Des contraintes verticales et tangentielles s'exercent sur l'ensemble de l'aire de contact entre le pneu et la chaussée. Elles se distribuent dans la structure de chaussée et imposent une déformation dans les couches bitumineuses. L'interprétation du signal de ces déformations et l'influence des paramètres de charge sur les déformations à la base du revêtement sont détaillées par la suite.

3.4.1 Signaux caractéristiques

3.4.1.1 Réponse spatiale et temporelle

Un signal de déformation se caractérise par deux éléments : sa forme générale et son amplitude. La figure 3.23 illustre les déformations longitudinales et transversales mesurées au passage d'un essieu simple, pour le pneu jumelé chargé à 6,5 tonnes, gonflé à 830 kPa et circulant à 43 km/h. Les signaux présentés sont ceux mesurés à la profondeur $Z = 125$ mm au niveau de la section A et pour une température de 20,5 °C. La figure présente la réponse temporelle et la réponse spatiale.

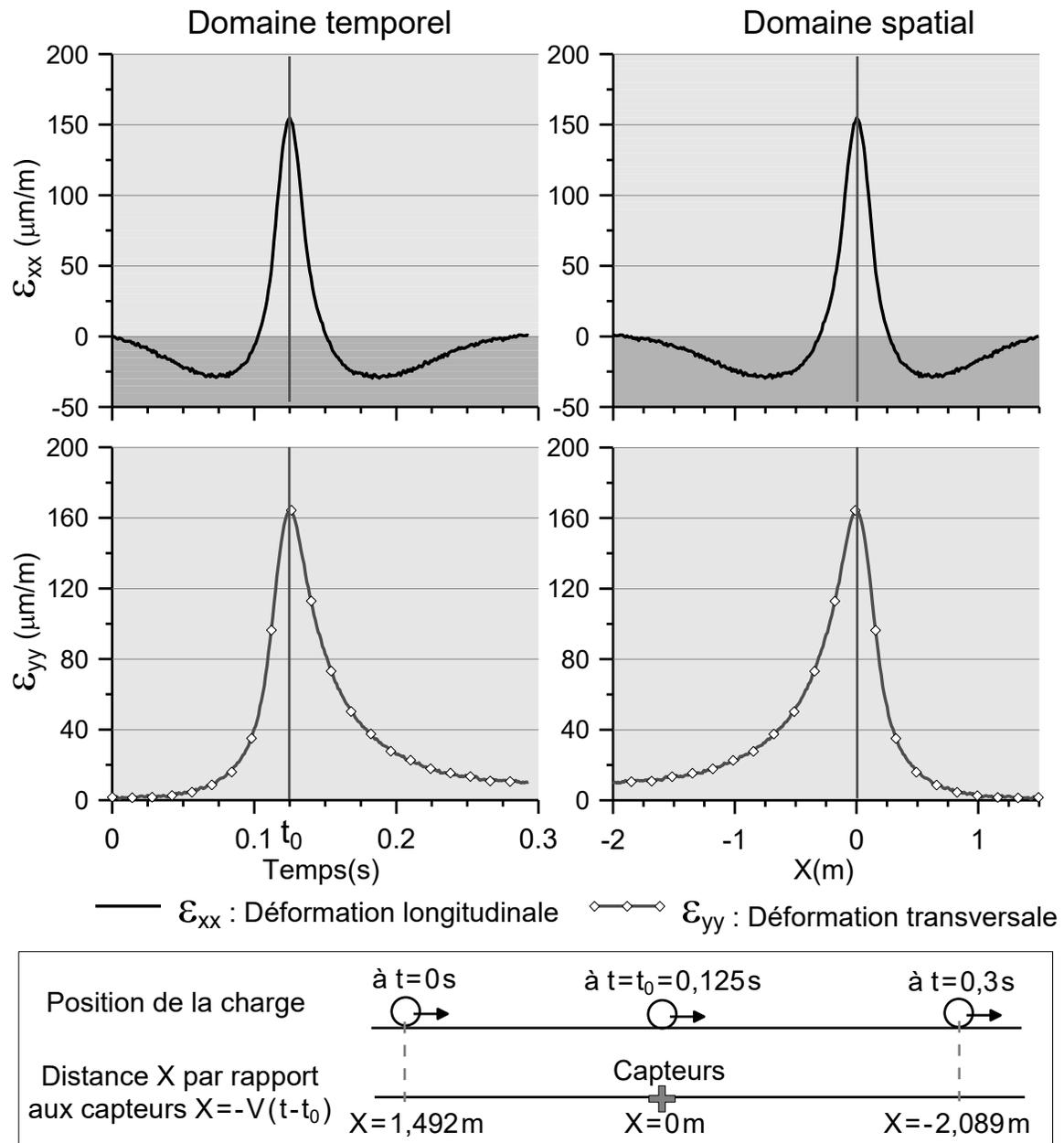


Figure 3.23 : Déformations longitudinale et transversale imposées à la base des couches d'enrobés bitumineux dans le domaine temporel et spatial

Les mesures ont été effectuées à une fréquence d'acquisition de 1 000 Hz. Les signaux sont tracés à partir des valeurs enregistrées toutes les 0,001 seconde. Dans le domaine temporel, les courbes ont en abscisse le temps et en ordonnée l'amplitude de la déformation (en $\mu\text{m/m}$). Dans le domaine spatial, la déformation est tracée en fonction de la coordonnée suivant la direction longitudinale (coordonnée suivant X). Le passage d'une représentation dans le domaine temporel au domaine spatial s'effectue à partir de la vitesse de la charge suivant la

formule donnée à l'équation 3-3. Le temps t_0 correspond à l'instant où la charge passe directement au-dessus du capteur. Dans le domaine temporel, le capteur mesure tout d'abord l'arrivée de la charge puis son départ. Les mesures effectuées à l'approche de la charge sont donc situées à gauche de l'amplitude maximale (mesures à l'avant du pneu). Les mesures effectuées après le passage de la charge au droit des capteurs (mesure à l'arrière du pneu) sont donc à droite de l'amplitude maximale. Dans le domaine spatial, la charge se dirige suivant la direction X . L'abscisse $X = 0$ mm correspond au passage de la charge sur les capteurs. Les mesures situées à l'avant du pneu sont associées aux valeurs positives de X et celles à l'arrière aux valeurs négatives. Le signe - dans l'équation permet cette inversion entre les deux domaines de représentation. La représentation spatiale est principalement utilisée à des fins de comparaison avec les modèles numériques. Elle permet une comparaison directe entre les conditions expérimentales en plaçant l'ensemble des signaux dans un même référentiel spatial.

$$X = -V \cdot (t - t_0) \quad \text{Équation 3-3}$$

Où : X = coordonnée suivant l'axe longitudinal (en m)

V = vitesse de la charge (en m/s)

t_0 = temps correspond au passage de la charge sur le capteur (en s)

t = temps (en s)

À la base du revêtement, la forme du signal est principalement fonction de l'orientation du capteur et du type d'essieu (essieu simple, tandem ou tridem). Les mesures expérimentales montrent que l'amplitude du signal est fonction de la structure de chaussée étudiée, des propriétés de l'enrobé bitumineux et des matériaux sous-jacents et également de la profondeur de mesure et de la distance du capteur par rapport à la charge. L'amplitude est également fonction des paramètres de charge tels que l'intensité du chargement, le type de pneu, la pression de gonflage et la vitesse.

Les signaux présentés à la figure 3.23 correspondent aux mesures effectuées directement sous le centre du pneu. Les déformations longitudinales alternent entre de la contraction et de l'extension. Le pic d'extension marque le passage de la charge au droit du capteur et les deux pics de contraction sont caractéristiques de l'arrivée et du départ de la charge. Les déformations transversales présentent uniquement un signal en extension. Les deux signaux montrent une dissymétrie importante de part et d'autre des pics d'extension. Cette dissymétrie

est induite par le caractère viscoélastique des matériaux. Dans le cas des déformations longitudinales, le pic de contraction à l'avant de la charge est plus important que celui à l'arrière. Plus la température du revêtement est élevée, plus cet effet est marqué. Dans le cas des déformations transversales, cet effet se traduit au départ de la charge par un temps de retour à une valeur nulle plus élevée que le temps requis à l'arrivée de la charge pour atteindre la déformation maximale. Le caractère visqueux des matériaux étant prédominant aux températures élevées, les temps de convergence après le passage de la charge sont plus importants.

3.4.1.2 Caractéristiques de formes des signaux de chargement

L'analyse des signaux requiert l'identification des points caractéristiques de la courbe. Ces points sont définis par une amplitude et une coordonnée temporelle (ou spatiale). Les points caractéristiques dans le cas d'un essieu simple et d'un essieu tridem sont présentés à la figure 3.24. Les signaux présentés ont été obtenus au cours de la campagne de mesure n° 2 sur la section 1 du SERUL. La vitesse des charges est de 30 km/h et les pneus sont gonflés à 690 kPa. La température du revêtement est de 10 °C. Les déformations présentées sont celles mesurées à 95 mm de profondeur à partir des deux jauges placées orthogonalement sur une même carotte.

Le signal longitudinal est caractérisé, dans le cas d'un essieu simple, par sept points tels qu'identifiés à la figure 3.24. Le point 1 correspond à l'instant où la contraction débute. Ce point marque le début de la zone d'influence de la charge sur le capteur. Les points 2 et 6 sont les deux pics en contraction situés à l'avant et à l'arrière de la charge. Les points 3 et 5 sont les instants où la transition entre la contraction et l'extension s'opère. Le maximum de déformation est obtenu au point de mesure 4. Finalement, le point 7 correspond à la fin de la zone d'influence de la charge sur le capteur. La déformation maximale en extension ($\epsilon_{xx \max}$) et les deux déformations maximales en contraction ($\epsilon_{xx \min 1}$ et $\epsilon_{xx \min 2}$) sont identifiées sur la figure. Le temps entre les points 2 et 4 (t_{2-4}) est défini comme le temps d'extension et le temps entre les points 4 et 6 (t_{4-6}) correspond au temps de contraction (Perret, 2003). Le temps entre les points 2 et 6 est défini comme le temps de chargement ($t_{\text{chargement}}$) et celui entre les points 3 et 5 comme le temps de sollicitation ($t_{\text{sollicitation}}$). Dans le cas d'un essieu tridem, les deux maximums de contraction et le maximum d'extension sont identifiables pour chaque essieu.

Pour certaine structure de chaussée et sous certaines conditions de température, de la vitesse et de charge (type de pneu et espacement), les maximums de contraction entre les essieux peuvent se confondre. Ainsi, les points 4 et 5 et les points 7 et 8 peuvent ne former qu'un seul extremum dont l'amplitude dépend des paramètres précédemment cités.

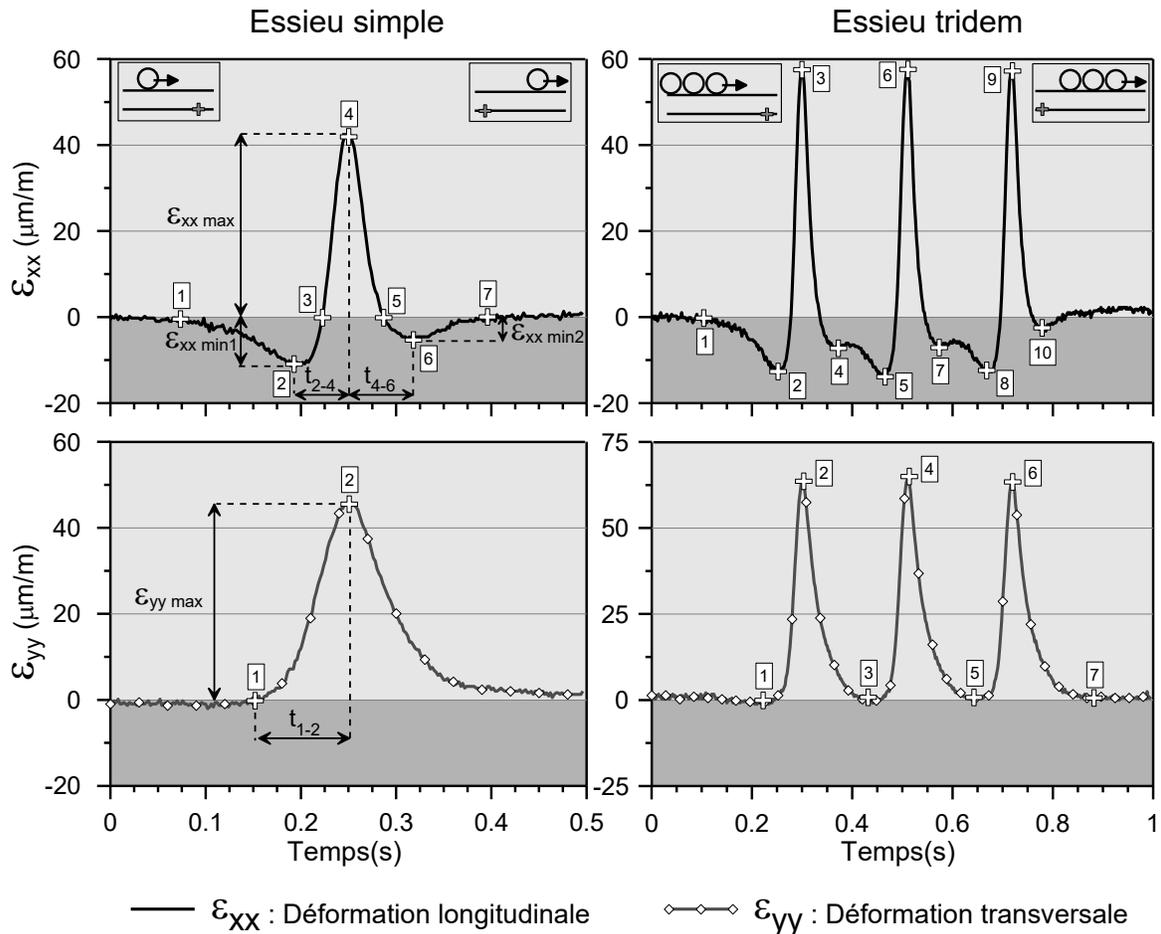


Figure 3.24 : Points caractéristiques des signaux longitudinaux et transversaux pour le cas d'un essieu simple et d'un essieu tridem

Dans le cas des déformations transversales, la courbe caractéristique ne présente que deux points particuliers. Le point 1 correspond à l'instant où l'extension débute. Ce point marque le début de la zone d'influence de la charge pour la direction transversale. Le second point correspond au maximum d'extension mesuré par la jauge ($\epsilon_{yy \max}$). En fonction de la structure de chaussée, de la température et des caractéristiques de charge, l'identification de l'instant où la phase d'extension se termine n'est pas toujours possible. Le temps de sollicitation de la charge est donc défini comme étant égal à deux fois le temps entre les points 1 et 2 ($t_{\text{sollicitation}} = 2 \cdot t_{1-2}$), c'est-à-dire deux fois la demi-période (Garcia et Thompson, 2008). Dans le

cas d'un essieu tridem, le passage de chaque essieu se traduit par un maximum local (points 2, 4 et 6). Comme pour les déformations longitudinales, l'amplitude entre chaque essieu (points 3 et 5) dépend de la structure de chaussée et des conditions environnementales.

L'effet des paramètres de charges est évalué en déterminant les points caractéristiques de chaque signal et en identifiant les amplitudes qui sont utilisées afin d'évaluer leur agressivité respective. Plusieurs méthodes sont utilisées pour analyser les signaux et en extraire les informations pertinentes à l'étude.

3.4.1.3 Les méthodes d'analyse du signal

L'amplitude de la déformation à la base du revêtement et le temps de sollicitation sont des paramètres nécessaires à la conception des chaussées, car ils sont requis pour déterminer la durée de vie des chaussées. L'analyse de l'effet des charges et du climat sur l'endommagement des chaussées nécessite de définir des points de comparaison au niveau des déformations relevées. Les travaux effectués par Hajek et Agarwal (1989), Chatti, Karim et coll. (2009) et Salama et Chatti (2010) définissent plusieurs approches de comparaisons pour les signaux de déformation. L'objectif de ces études est de déterminer le dommage relatif d'une condition de charge par rapport à un ÉCAS (Équivalent de la Charge Axiale Simple) de référence. Les charges étudiées sont des charges multiessieux. Les méthodes de calculs se divisent en deux catégories : les méthodes de sommation discrète et les méthodes de sommation continue. La méthode des *pics*, la méthode des *demi-pics* et la méthode du *dernier pic* sont trois méthodes discrètes. La figure 3.25 illustre celles-ci. La méthode des pics consiste à mesurer l'amplitude maximale associée à chaque essieu (notée $\varepsilon_{xx \max}$ et $\varepsilon_{yy \max}$) et de les considérer comme étant des essieux distincts. L'essieu tridem est ainsi divisé en trois essieux simples d'amplitude $\varepsilon_{xx \max i}$ et $\varepsilon_{yy \max i}$. La méthode des demi-pics consiste à mesurer la différence entre l'amplitude maximale sous l'essieu et l'amplitude qui précède le passage de l'essieu (noté $\varepsilon_{xx pp}$ et $\varepsilon_{yy pp}$). Dans le cas des déformations longitudinales, l'amplitude $\varepsilon_{xx pp}$ correspond à la différence entre le maximum en contraction et le maximum en extension. Dans le cas des déformations transversales, la mesure $\varepsilon_{yy pp}$ correspond à la différence entre le maximum en extension et l'amplitude entre les essieux. Dans le cas d'un essieu simple et du premier essieu du tridem, les deux approches donnent la même valeur ($\varepsilon_{yy pp1} = \varepsilon_{yy \max1}$). Comme pour la méthode des

pics, les essieux sont ensuite considérés comme des essieux simples d'amplitude $\varepsilon_{yy\ pp\ i}$. Enfin, la méthode du dernier pic consiste à ne retenir que l'amplitude maximale du dernier pic ($\varepsilon_{xx\ max\ 3}$ et $\varepsilon_{yy\ max\ 3}$).

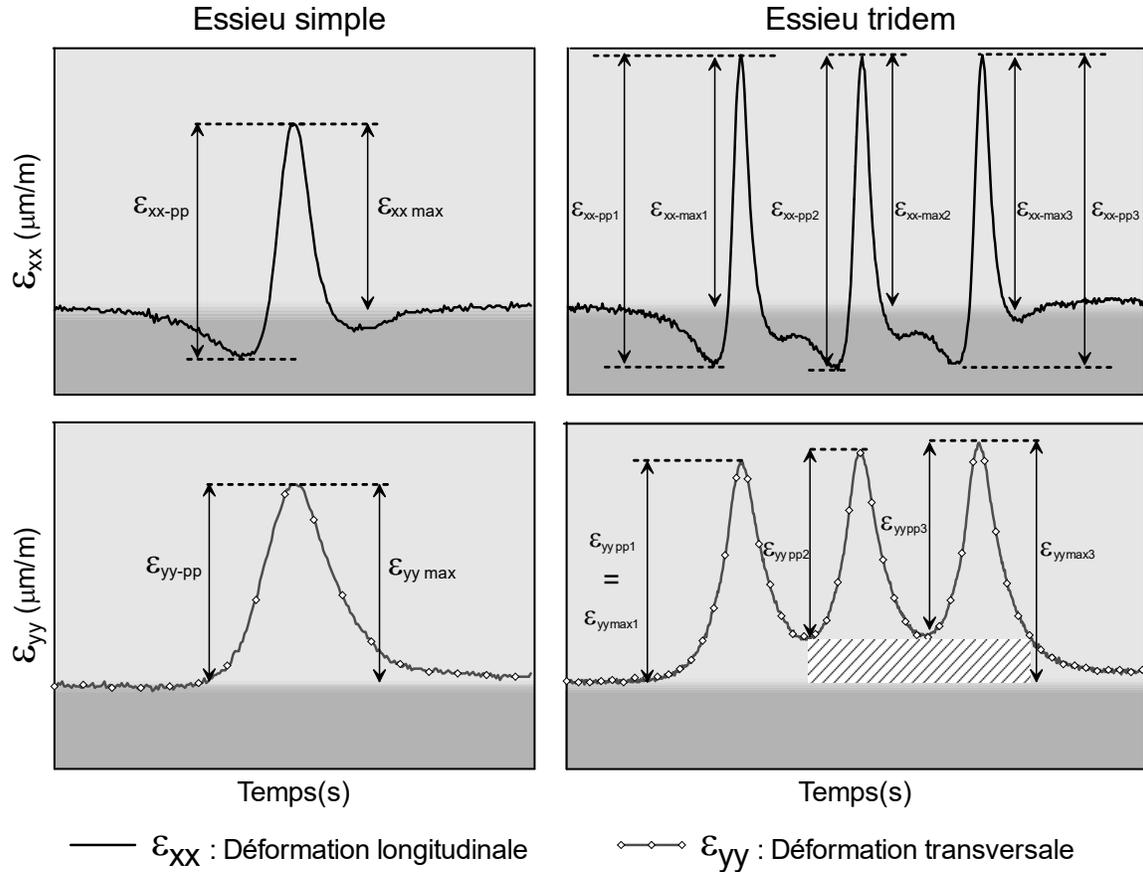


Figure 3.25 : Les méthodes de mesures du signal appliquées à un essieu simple et un essieu tridem : la méthode des pics, des demi-pics et du dernier pic

Les méthodes continues se composent principalement des méthodes suivantes : la méthode *intégrale*, la méthode *des aires*, la méthode *du taux de déformation* et la méthode de *l'énergie dissipée*. L'approche des méthodes intégrales et des aires consiste à mesurer l'aire sous la courbe pour toute la durée du signal de déformation. La méthode du taux de déformation est une sommation continue de la pente du signal. Un pas de temps pour le calcul de la pente doit être défini et celui-ci est fixe pour toute durée complète du signal. Enfin, la méthode de l'énergie dissipée consiste à calculer l'aire comprise dans la boucle d'hystérésis de la courbe contrainte-déformation. Les conclusions des travaux de Chatti, Karim et coll. (2009) préconisent que l'énergie dissipée soit la méthode la plus adaptée puisqu'elle permet une mesure complète de la réponse des matériaux aux passages des charges contrairement aux

approches discrètes qui ne donnent que des valeurs ponctuelles. Cette méthode n'est cependant pas la plus accessible dans le cadre de mesures expérimentales puisqu'elle nécessite une mesure simultanée de la déformation et de la contrainte. Pour chaque condition de charge, un calcul du dommage équivalent et un calcul de l'agressivité équivalente ont été effectués avec les méthodes des pics, des demi-pics et de l'énergie dissipée. Ces calculs effectués pour plusieurs structures de chaussées permettent une comparaison directe des approches à considérer lorsque les calculs énergétiques ne sont pas possibles. Pour les structures minces, les trois méthodes possèdent des résultats similaires. Pour les chaussées moyennes, la méthode des demi-pics est à favoriser comparativement à la méthode des pics. Enfin pour les structures épaisses, les deux méthodes sous-estiment l'agressivité des charges. La méthode des demi-pics est cependant celle qui la sous-estime le moins pour des essieux de type tandem et tridem. Ces études comparatives sont uniquement basées sur les signaux longitudinaux. En ce qui concerne les signaux transversaux, la méthode des demi-pics néglige une zone importante du signal de déformation. Comme illustré à la figure 3.25, la zone hachurée pour le signal transversal sous chargement tridem n'est alors pas prise en compte pour le calcul du dommage. Plus l'espacement entre les essieux est réduit, plus la zone négligée sera importante ce qui n'est pas recommandé puisque l'extension est la principale cause de fissuration par fatigue à la base du revêtement.

En conclusion, l'énergie dissipée est la méthode recommandée pour l'évaluation comparative des dommages puisqu'elle considère l'ensemble du signal de déformation et de contrainte, mais elle requiert cependant une calibration avec des mesures expérimentales. Pour l'évaluation comparative de l'agressivité des charges, la méthode des demi-pics est recommandée pour les déformations longitudinales. Pour les déformations transversales, les deux méthodes sont identiques dans le cas d'un essieu simple. Dans le cas des charges multiessieux, les travaux de Bodin et coll. (2009) montrent que la baisse d'amplitude entre deux essieux n'a pas un impact significatif sur la fatigue des matériaux contrairement aux vitesses de sollicitation et au temps total de chargement. Les études de Chatti, K. et coll. (2000) recommandent de considérer la méthode des demi-pics afin d'obtenir une meilleure prédiction de l'agressivité d'une charge par rapport à une charge de référence. La méthode des demi-pics est donc la méthode qui a été utilisée dans le cadre de ce projet.

3.4.2 Effet de la position des pneus

3.4.2.1 Détermination d'un bassin de déformation

L'amplitude des déformations est fonction de la position sous la charge. Afin d'évaluer cet effet, les déformations sont tracées en fonction de la position Y sous la charge. Cette représentation est appelée un bassin de déformation. Il est tracé avec en abscisses la coordonnée Y sous le pneu et en ordonnées l'amplitude des déformations. La position $Y = 0$ mm correspond au centre du pneu. La position Y est déterminée à partir de la vidéo et est calculée à partir de la distance de passage de la charge vis-à-vis des jauges de déformation. La déformation est directement mesurée à partir du signal obtenu par les 8 jauges tel que présenté à la figure 3.26. Sur la figure, l'essieu moteur et l'essieu tandem ne sont pas représentés. Pour les 8 jauges, seule l'amplitude du premier essieu du tridem est relevée afin de tracer le bassin de déformation. À chaque passage de la charge, 8 points sont ajoutés au bassin de déformation. La figure 3.27(a) illustre l'ajout des 8 points de mesure de la figure 3.26. À chaque passage de la charge, les points obtenus sont ajoutés au graphique. Après 26 passages de charge, le bassin de déformation est par exemple constitué de 208 points comme présenté à la figure 3.27(b). Les mesures présentées correspondent à celles obtenues lors de la campagne de mesure n° 2 sur la section 1 au SERUL. Le camion est équipé de pneus jumelés gonflés à 690 kPa. Lorsque la courbe est constituée de suffisamment de données, une courbe d'interpolation est ajoutée aux données (figure 3.27(c)). La position théorique des quatre arêtes du pneu jumelé est également représentée sur la figure par les traits continus verticaux. Le pneu jumelé est centré en $Y = 0$ mm.

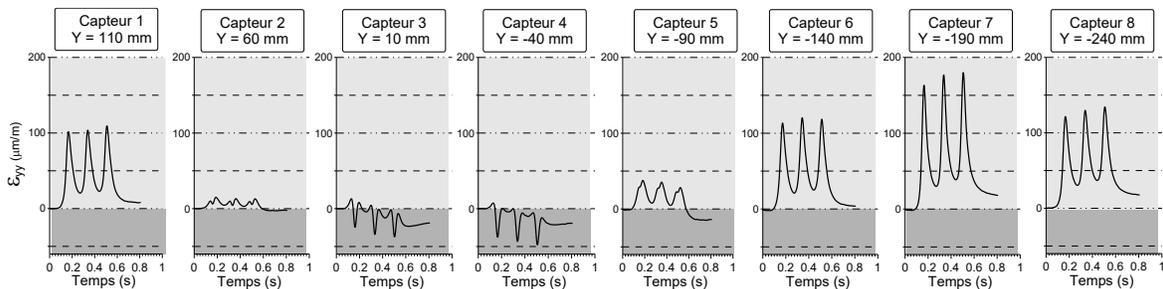


Figure 3.26 : Construction d'un bassin de déformation : acquisition simultanée des déformations par huit capteurs situés à la base des couches bitumineuses

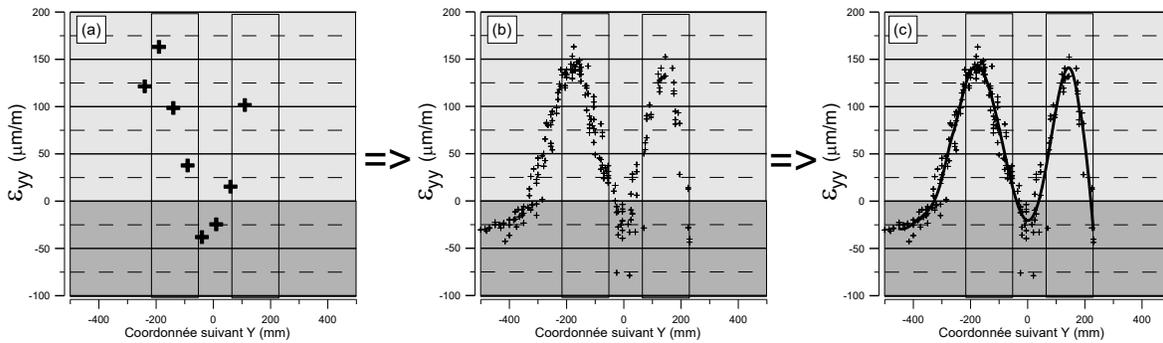


Figure 3.27 : Construction d'un bassin de déformation : ajouts successifs des données acquises des déformations situées à la base des couches bitumineuses

Le bassin de déformation permet une visualisation directe de l'influence des types de pneus et des paramètres de charge. Il permet également d'extraire les valeurs critiques associées aux différents modes de rupture. L'analyse comparative entre les conditions de charge n'est pas effectuée à partir de valeurs ponctuelles mesurées par une jauge, mais à partir de l'interpolation du nuage de points obtenus. Cette approche permet de limiter les erreurs intrinsèques aux capteurs ainsi que les erreurs induites par leur installation dans la chaussée. L'interpolation du bassin de déformation est une donnée plus représentative de la distribution des déformations à la base du revêtement puisque l'impact des données erratiques est minimisé. Le bassin de déformation permet également d'homogénéiser les mesures expérimentales sur toute la longueur de la plaque. En effet, localement, les jauges de la plaque peuvent se situer proche de gros granulats ce qui a pour effet de réduire l'amplitude des déformations. À l'inverse, d'autres jauges peuvent se situer proche d'une zone riche en bitume et en composants fins et par conséquent les amplitudes mesurées sont plus grandes. En traçant la courbe d'interpolation, l'hétérogénéité du matériau a moins d'influence sur les valeurs extraites du bassin de déformation.

3.4.2.2 Signaux caractéristiques à l'extérieur de la charge

Les bassins de déformation transversale de la figure 3.27 présentent une zone en extension et une zone en contraction. La zone d'extension est située directement sous le pneu et le maximum est atteint au centre de chacun des pneus. La zone de contraction est située de part et d'autre des pneus et également dans certains cas au niveau de l'espacement interjumelage. La contraction à l'interjumelage apparaît pour des structures peu épaisses ou pour des hautes températures. La précision des jauges et le nombre important de mesures permettent de suivre

l'évolution des signaux lors du passage de la contraction à l'extension. La figure 3.28 montre quatre signaux relevés au niveau des arêtes extérieures des pneus jumelés d'un tridem. Ces signaux correspondent également aux mesures compilées sur le bassin de déformation de la figure 3.27. Loin de la charge, en $Y = -400$ mm, trois pics de contraction sont observables. Pour $Y = -375$ mm, une alternance entre l'extension et la contraction apparaît. En se rapprochant du centre de la charge, cette alternance disparaît et le signal est uniquement en extension. Contrairement aux signaux caractéristiques présentés à la figure 3.24, les signaux en $Y = -325$ mm, le passage de chaque essieu engendre deux maximums d'extension. Cet effet est également présent en $Y = -300$ mm mais il est moins marqué. La figure 3.29 présente les déformations transversales au niveau de l'espacement interjumelage pour $Y = -75$ mm, -60 mm, -30 mm et 0 mm. La forme des signaux pour $Y = -75$ mm et $Y = -60$ mm est similaire à celle relevée sur l'extérieur du pneu. En ce qui concerne les signaux pour $Y = -30$ mm et $Y = 0$ mm, les signaux sont très différents. Au passage de la charge, le maximum de contraction est précédé et suivi de deux maximums d'extension. Plus les mesures sont prises au centre de l'espacement entre les deux pneus, plus l'amplitude de chaque maximum est élevée. Les différences d'amplitude entre les trois essieux du tridem s'expliquent par la viscoélasticité de l'enrobé bitumineux, mais également par le fait que les trois pneus du tridem ne sont pas parfaitement alignés. Les trois pneus du tridem sont décalés de quelques millimètres.

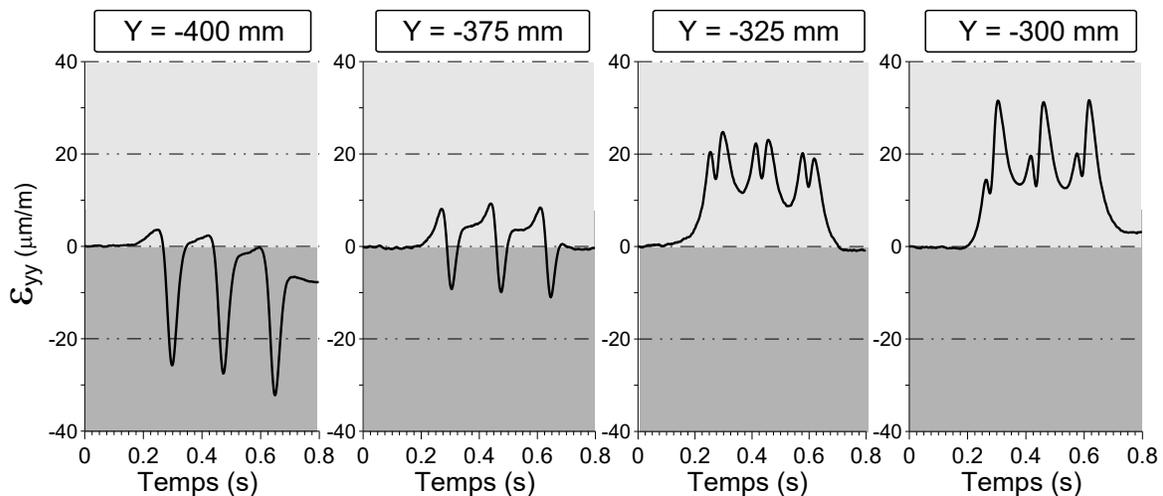


Figure 3.28 : Évolution de la contraction à l'extension au niveau d'une arête du pneu pour les déformations mesurées à la base du revêtement bitumineux

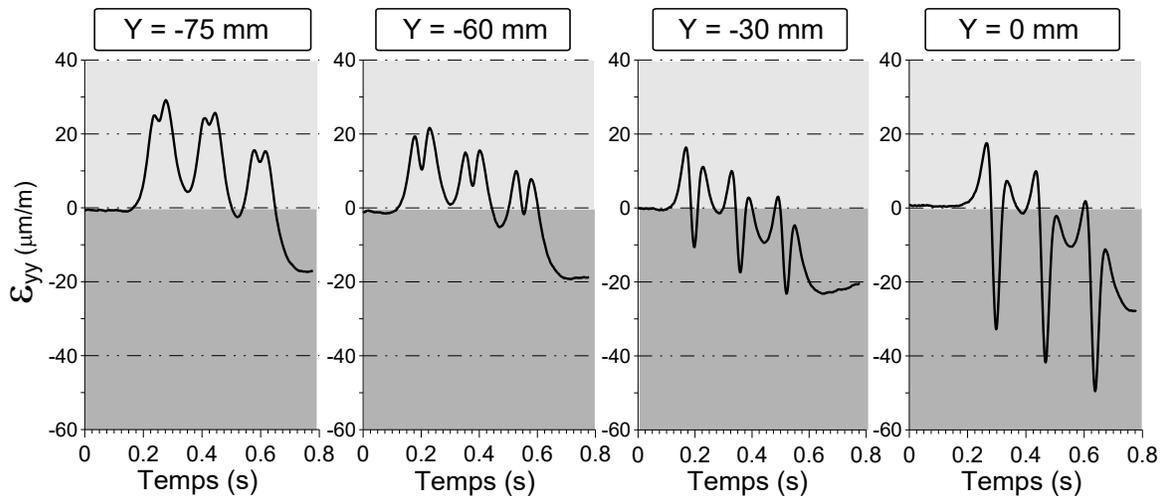


Figure 3.29 : Évolution de l’extension à la contraction au niveau de l’espace interjumelage pour les déformations mesurées à la base du revêtement bitumineux

3.4.3 Développement d’un outil de traitement de données

Afin d’être constant dans le traitement des signaux et d’optimiser leur analyse, un outil de traitement a été développé au cours du projet. Cet outil intitulé *SoftAnalyse* a été programmé à partir du logiciel *Matlab*. Il est composé d’interfaces graphiques (GUI) qui rendent l’outil accessible à tous. Cet outil de calcul a deux fonctions principales : l’analyse et le traitement des données obtenues à partir du conditionneur de signal et le tracé des bassins de déformations associés à chaque condition expérimentale. Pour l’analyse des données, un premier écran d’accueil permet de sélectionner la série à analyser et d’identifier les conditions expérimentales qui lui sont associées. L’utilisateur doit donc ouvrir le fichier de sortie du conditionneur de signal et compléter les informations suivantes : type de pneu, pression de gonflage, chargement, structure de chaussée, vitesse du véhicule, type de camion, température du revêtement et enfin la distance de passage des essieux. Cette dernière information est requise afin d’associer la position relative des jauges par rapport à la charge. L’écran d’accueil est présenté à la figure 3.30.

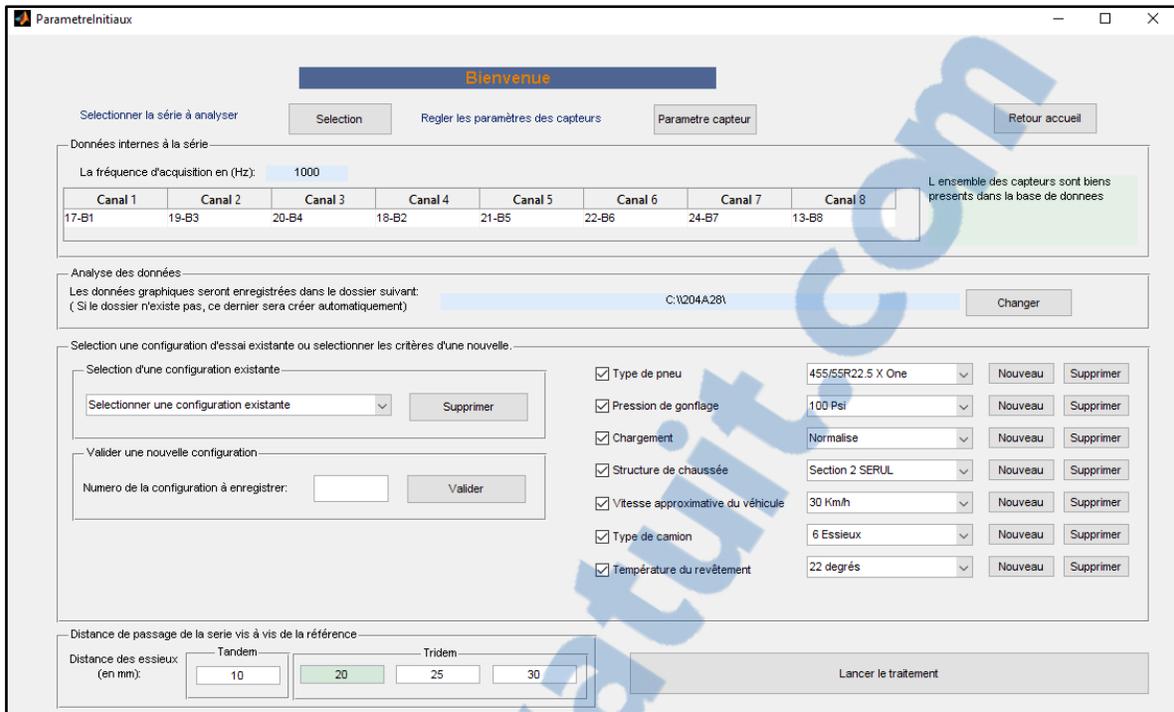


Figure 3.30 : Écran d'accueil de l'outil de traitement des données développé dans le cadre du projet

Lors du lancement du traitement des données, un second écran apparaît permettant de traiter la saturation ponctuelle de certains signaux, d'appliquer si désiré une moyenne mobile au signal, d'initialiser les courbes à une amplitude nulle et enfin d'extraire les extremums locaux. Comme présenté à la figure 3.31, le logiciel identifie à la fois les maximums et les minimums locaux du signal. Le conditionneur de signal étant muni de 8 canaux, le logiciel trace les 8 graphiques associés. Les amplitudes associées à chaque essieu sont sauvegardées et stockées dans le logiciel. Cette démarche permet de toujours suivre les mêmes étapes d'analyse tout en s'assurant d'un contrôle visuel des données. Les courbes présentées à la figure 3.31 illustrent les 8 mesures effectuées simultanément à la base du revêtement de la section 2, dans la direction transversale, lors du passage du camion avec remorque. Les 8 jauges présentent des signaux de forme et d'amplitude différentes puisqu'elles ne se sont pas situées à la même coordonnée Y.

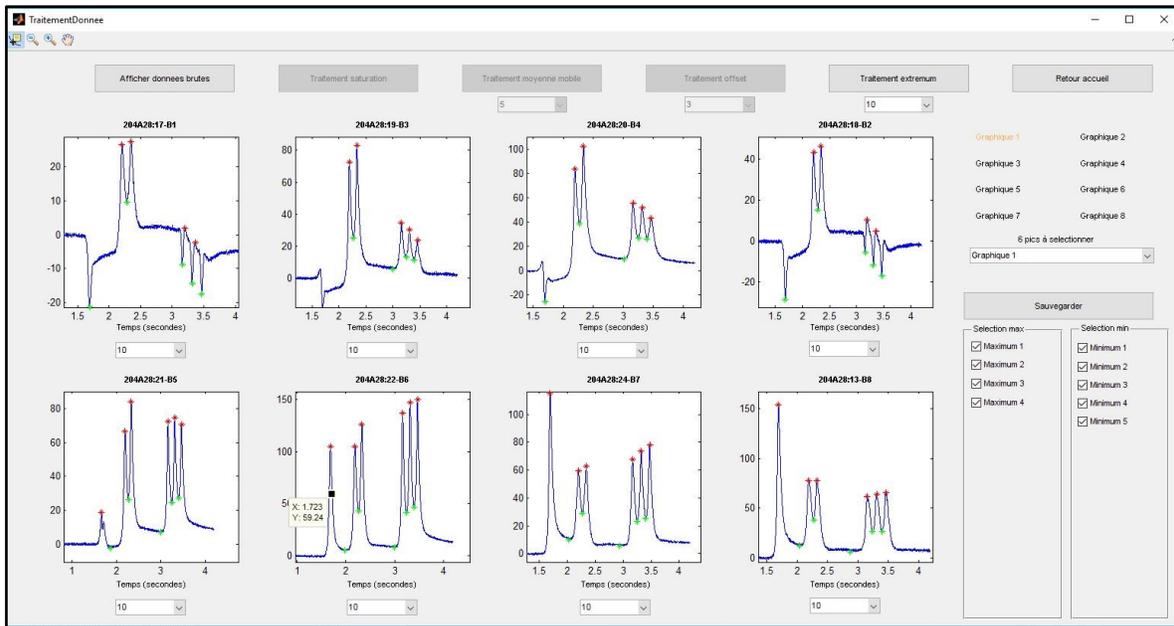


Figure 3.31 : Module d'extraction des extremums de l'outil de traitement des données développé dans le cadre du projet

Le logiciel analyse toutes les formes de signaux et les données sont classées en fonction de la profondeur de la jauge, de son orientation et de la condition expérimentale. Une fois ces trois paramètres sélectionnés, le logiciel permet de tracer le bassin de déformation et de choisir les jauges, les essieux et les séries à afficher. Le bassin des déformations transversales situées à la base du revêtement de la section 2 est présenté en exemple à la figure 3.32. Les 8 jauges de la plaque et la jauge située sur une des carottes sont affichées simultanément. Le logiciel affiche toutes les séries prises en compte dans le tracé dans le bas de la fenêtre. Une couleur est définie pour chaque jauge ce qui permet d'identifier si une des jauges donne des valeurs non cohérentes. L'outil de traitement permet par la suite de tracer la courbe d'interpolation du bassin et d'extraire toutes les données nécessaires aux analyses complémentaires. Le logiciel est adapté pour traiter les déformations mesurées à partir des capteurs résistifs et des capteurs à fibre optique.

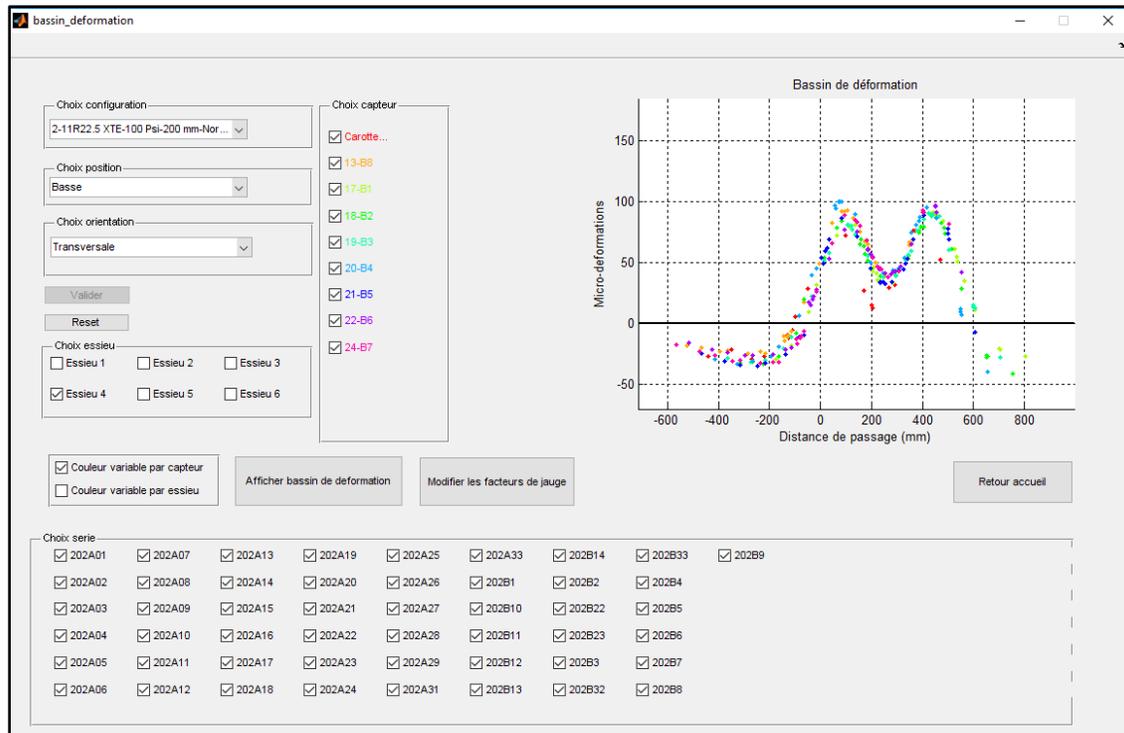


Figure 3.32 : Module pour le tracé du bassin de déformation de l’outil de traitement des données développé dans le cadre du projet

3.4.4 Effet des paramètres de charge sur la mesure des amplitudes maximales de déformation

Les bassins de déformation obtenus au cours des trois campagnes de mesures permettent de quantifier l’effet des quatre paramètres suivants : le type de pneu, la pression de gonflage, la charge totale appliquée et la vitesse de la charge. L’effet de la pression de gonflage sur la déformation transversale est présenté à la figure 3.33. Les déformations et la courbe d’interpolation associées sont tracées pour les deux types de pneus pour les sections 1 et 2. La courbe d’interpolation de chaque bassin est une série de Fourier d’ordre 4. L’équation associée est la somme de cinq sinusoïdes telle détaillée à l’équation 3-4.

$$y = \sum_{n=0}^4 (a_n \cos(n.w.x) + b_n \sin(n.w.x)) \quad \text{Équation 3-4}$$

- Où :
- y = l’ordonnée de la courbe, c’est-à-dire la déformation transversale ϵ_{yy}
 - x = l’abscisse de la courbe, c’est-à-dire la coordonnée suivant Y
 - w = la pulsation des fonctions cosinus et sinus
 - a_n, b_n = coefficients de corrélation associés aux fonctions cosinus et sinus

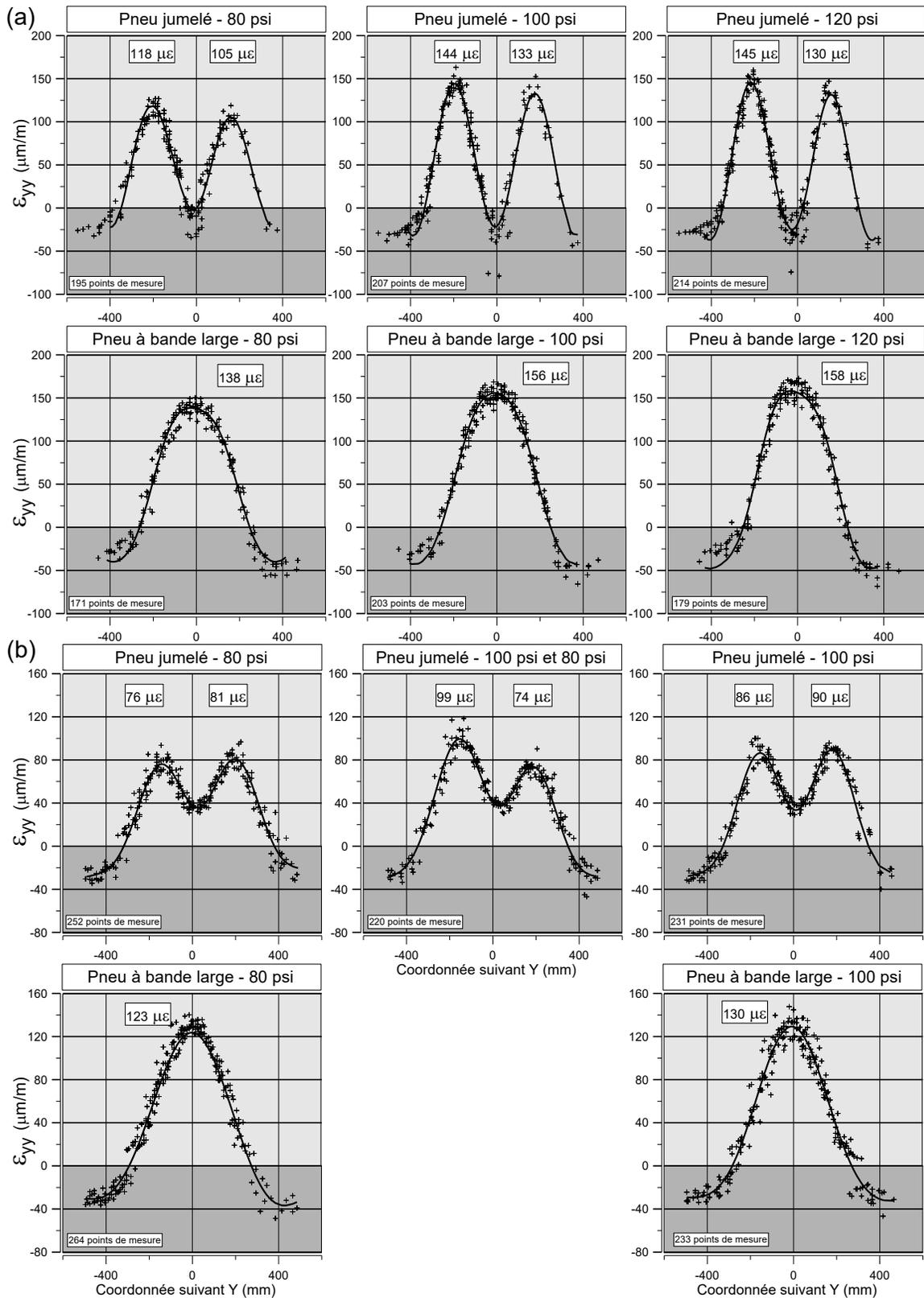


Figure 3.33 : Effet de la pression de gonflage sur les déformations transversales engendrées à la base du revêtement pour (a) la section 1 et (b) la section 2 au SERUL

L'extension maximale de chaque pneu, soit deux pour le pneu jumelé et une pour le pneu à bande large, est déterminée à partir de la courbe d'interpolation. Ces valeurs sont notées sur chaque graphique ainsi que le nombre de points de mesure constituant les bassins. Dans chaque cas, les maximums d'extension sont situés directement sous le milieu du pneu. Sur la section 1, les déformations sous le pneu jumelé présentent une dissymétrie. La déformation sous le pneu gauche (pneu extérieur du jumelé) est plus élevée que sous le pneu droit et des différences allant jusqu'à 12 % sont mesurées. La dissymétrie est observée indépendamment de la pression de gonflage. Elle s'explique par le fait que la charge n'est pas également répartie sur les deux pneus du jumelé et sa répartition est fonction de la géométrie de la route, du positionnement du chargement sur la remorque et des propriétés mécaniques de la remorque (essieu, amortisseur). Plus la structure présente un revêtement épais, moins cet effet est mesurable puisque la zone de distribution de la charge augmente. Sur la section 2, le pneu jumelé présente une déformation légèrement plus importante sous le pneu droit comparativement au pneu gauche à la fois pour la pression de gonflage de 550 kPa et de 690 kPa. Les différences sont de l'ordre de 4 % à 6 %. Au vu de ces résultats, il est recommandé de mesurer les déformations sous les deux pneus d'un jumelé et pas uniquement sous l'un ou l'autre des pneus. L'extension maximale entre les deux pneus est la valeur considérée dans l'analyse comparative des types de pneus et dans les calculs de la durée de vie en fatigue des chaussées.

En augmentant la pression de gonflage de 690 kPa à 830 kPa, aucune variation significative de l'extension n'est mesurée. Cette observation est valide pour le pneu jumelé comme pour le pneu à bande large. Pour les deux pneus, le dégonflage des pneus est associé à une augmentation de l'aire de contact. La surface de distribution des charges étant plus grande, l'amplitude des déformations à la base du revêtement diminue. Cet effet a été mesuré sur la section 1 et la section 2 pour les deux types de pneus lors de la réduction de 690 kPa à 550 kPa. La déformation baisse de 18 % et de 10 % pour le pneu jumelé, respectivement, au niveau des sections 1 et 2. La diminution est moins significative pour le pneu à bande large puisque les pourcentages sont de 11,5 % et de 5,4 %. En considérant l'endommagement par fatigue des couches bitumineuses, une réduction de la pression de gonflage des pneumatiques a pour effet d'augmenter la durée de vie des chaussées. Cette considération est uniquement basée sur l'étude des déformations à la base du revêtement et ne considère pas les autres modes

d'endommagement de la chaussée.

La figure 3.33 présente également le bassin de déformation, intitulé « pneu jumelé – 690 kPa et 550 kPa », pour lequel un différentiel de pression de gonflage est imposé entre les deux pneus du jumelé. Le pneu gauche du jumelé est gonflé à 690 kPa alors que le pneu de droite est à 550 kPa. Cette configuration se retrouve sur les réseaux routiers suite à un mauvais entretien des flottes de véhicules comme expliqué dans les études de Freund et Brady (2009). Le bassin de déformation montre que dans cette configuration la charge n'est plus équilibrée entre les deux pneus. Les déformations imposées par le pneu sous-gonflé sont 25 % plus faibles que celles du pneu à 690 kPa. Cet effet s'explique par la combinaison de deux phénomènes. La baisse de pression du pneu droit engendre tout d'abord une diminution des déformations sous celui-ci et également une augmentation des déformations sous le pneu gauche. L'extension mesurée sous le pneu à 690 kPa est en effet 10 % supérieure à celle mesurée lorsque les pressions sont identiques dans les deux pneus.

L'effet de l'intensité de la charge sur les déformations longitudinales et transversales mesurées à la base du revêtement bitumineux est présenté à la figure 3.34. Les valeurs présentées sur la figure correspondent à la moyenne mesurée par l'ensemble des capteurs (résistif et à fibre optique). Les valeurs sont tout d'abord extraites des bassins de déformation pour chaque capteur puis moyennées. Les déformations sont tracées pour les sections A et B pour deux plages de température, soit à 20 °C et pour des températures élevées, c'est-à-dire supérieures à 28 °C. La température exacte, mesurée le jour des essais, est précisée en abscisse des graphiques sous la valeur de la charge. L'amplitude de la déformation est également ajoutée sur les graphiques. Le ratio des déformations, c'est-à-dire le rapport entre les déformations pour le pneu à bande large divisées par celles du pneu jumelé, est présenté au-dessus des graphiques. Trois intensités de charges sont testées pour les deux types de pneus : 4 t, 5 t et 5,8 t. La charge de 5,8 t correspond à la charge maximale admissible pour le pneu large. La charge de 6,5 t est donc uniquement testée avec le pneu jumelé.

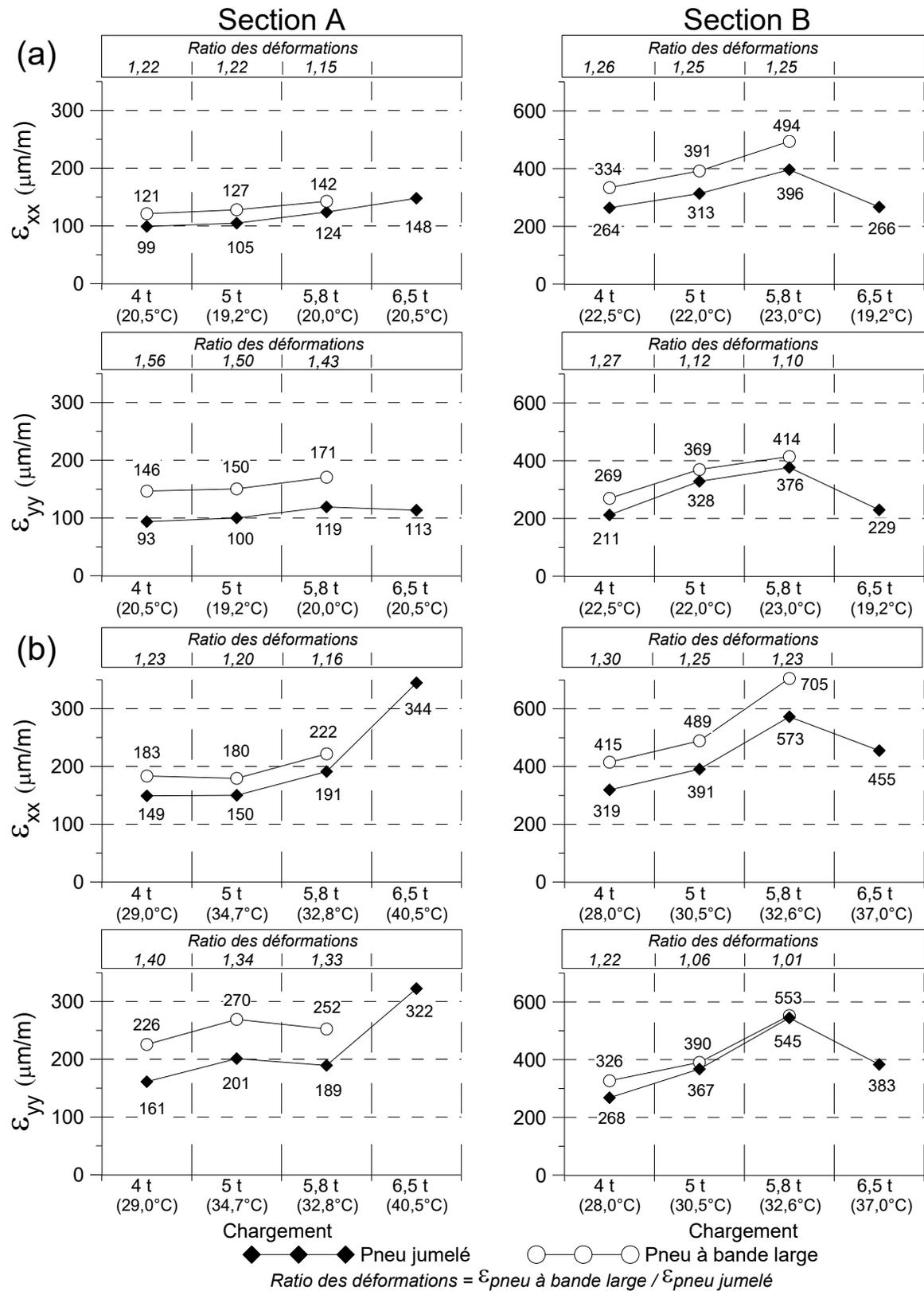


Figure 3.34 : Effet de la charge sur les déformations longitudinales et transversales pour des températures (a) autour de 20 °C et (b) > à 28 °C aux sections A et B (IFSTTAR)

Dans les directions longitudinale et transversale, l'augmentation de la charge engendre une hausse de l'extension mesurée à la base du revêtement à l'exception des valeurs sous 6,5 t. Historiquement, les mesures sous 6,5 t ont été effectuées au début de la campagne expérimentale. Au moment des mesures, les sections A et B avaient subi entre 10 000 et 16 000 sollicitations de charges. Pour les mesures de 4 t à 5,8 t, les sections avaient été sollicitées par 50 000 à 150 000 chargements. Plus un enrobé bitumineux est sollicité, plus son module diminue puisque celui-ci s'endommage. Ce phénomène explique en partie les faibles déformations mesurées sur la section B dans le cas du chargement à 6,5 t. La température lors des mesures à 6,5 t était de 19,2 °C, c'est-à-dire 3 à 4 degrés de moins que pour les autres chargements. Sous une fréquence de sollicitation de 20 Hz, le module du BBSG est égal à 10 370 MPa à 19,2 °C et 8 170 MPa à 23 °C. Ces écarts de module expliquent que les déformations mesurées sont plus faibles alors que le chargement est plus élevé.

L'augmentation des températures engendre une augmentation significative des déformations longitudinales et transversales pour les deux structures de chaussée. Sur la section A, les déformations transversales mesurées sous le pneu à bande large sont supérieures aux déformations longitudinales et cela pour les deux gammes de températures. Pour le pneu jumelé, les déformations transversales sont plus faibles que les déformations longitudinales pour les températures autour de 20 °C. Cette observation est également vraie pour les températures élevées pour les deux charges de 5,8 t et 6,5 t. Sur la section B, les déformations longitudinales sont plus élevées que les déformations transversales pour les deux types de pneus et pour les deux températures. Ces résultats sont cependant fonction de la méthode de mesure considérée. En effet, les amplitudes présentées sur cette figure utilisent la méthode de mesure des demi-pics. En considérant la méthode des pics, les déformations longitudinales sont plus faibles que les déformations transversales pour les sections A et B.

Les ratios des déformations montrent que le pneu à bande large engendre une augmentation de l'extension dans la direction longitudinale et transversale à la base du revêtement bitumineux et cela pour l'ensemble des cas étudiés. Le ratio des déformations dépend des quatre paramètres suivants : l'intensité de la charge, la structure de chaussée, la température et finalement de l'orientation des capteurs. Les principales observations sont synthétisées au tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Effet des conditions expérimentales sur le ratio des déformations mesurées à la base du revêtement bitumineux

Paramètres	Ratio des déformations longitudinales	Ratio des déformations transversales
Charge	Baisse du ratio avec l'augmentation de l'intensité de la charge	Baisse du ratio avec l'augmentation de l'intensité de la charge
Température	Augmentation du ratio avec l'augmentation de la température	Baisse du ratio avec l'augmentation de la température
Structure de chaussée	Ratio plus élevé pour la structure moins épaisse.	Ratio plus faible pour la structure moins épaisse

Le ratio des déformations longitudinales et celui des déformations transversales ont un comportement similaire en ce qui concerne l'influence de l'intensité de la charge. Ils ont cependant un comportement inverse en ce qui concerne l'effet de la température et de la structure de chaussée. Lorsque la température augmente, le ratio des déformations longitudinales augmente alors que celui des déformations transversales diminue. La plage de variation du ratio des déformations longitudinales est faible. Pour les 12 cas analysés, ils sont compris entre 1,16 et 1,30 avec une moyenne de 1,23 et un écart-type de 0,04. Les ratios de la déformation transversale varient entre 1,01 et 1,56 avec une moyenne de 1,28 et un écart-type de 0,18. Les conditions d'essais ont une influence plus marquée dans la direction transversale que longitudinale.

Les 12 conditions expérimentales ont été modélisées avec le logiciel ViscoRoute© 2.0 afin de comparer les ratios obtenus expérimentalement et ceux déterminés avec les modélisations. Les résultats sont présentés au tableau 3.8 pour les sections 1 et 2 (SERUL) et à la figure 3.35 pour les sections A et B (IFSTTAR). Les résultats obtenus avec les modélisations et présentés au tableau 3.8 correspondent uniquement aux valeurs calculées pour une pression de gonflage de 690 kPa. La surface des pneus pour les pressions de 550 kPa et 830 kPa n'ayant pas été quantifiée expérimentalement, la comparaison avec les modélisations n'a pas été effectuée. Pour ces deux sections, le ratio des déformations modélisées est significativement plus élevé que celui mesuré expérimentalement.

Tableau 3.8 : Effet des conditions expérimentales sur les ratios des déformations mesurées et modélisées à la base du revêtement pour les sections 1 et 2 au SERUL

Paramètres	Section 1 (10 °C)						Section 2 (23 °C)			
	4 t (550 kPa)		4 t (690 kPa)		4 t (830 kPa)		4 t (550 kPa)		4 t (690 kPa)	
	mesure	modèle	mesure	modèle	mesure	modèle	mesure	modèle	mesure	modèle
Ratio ϵ_{xx}	—	—	—	1,38	—	—	—	—	—	1,30
Ratio ϵ_{yy}	1,17	—	1,08	1,62	1,09	—	1,52	—	1,44	1,66

— = mesure ou modélisation non effectuée

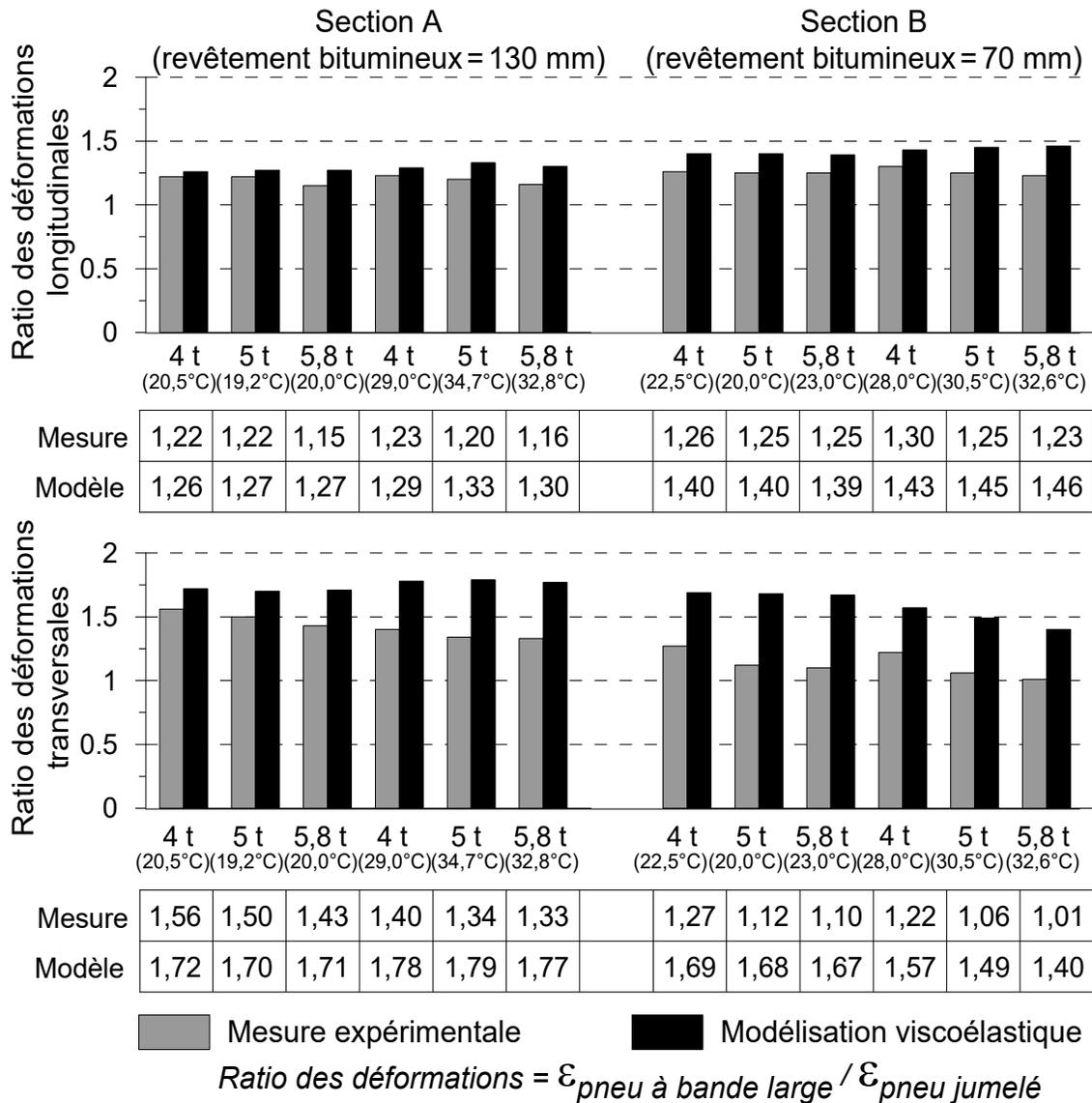
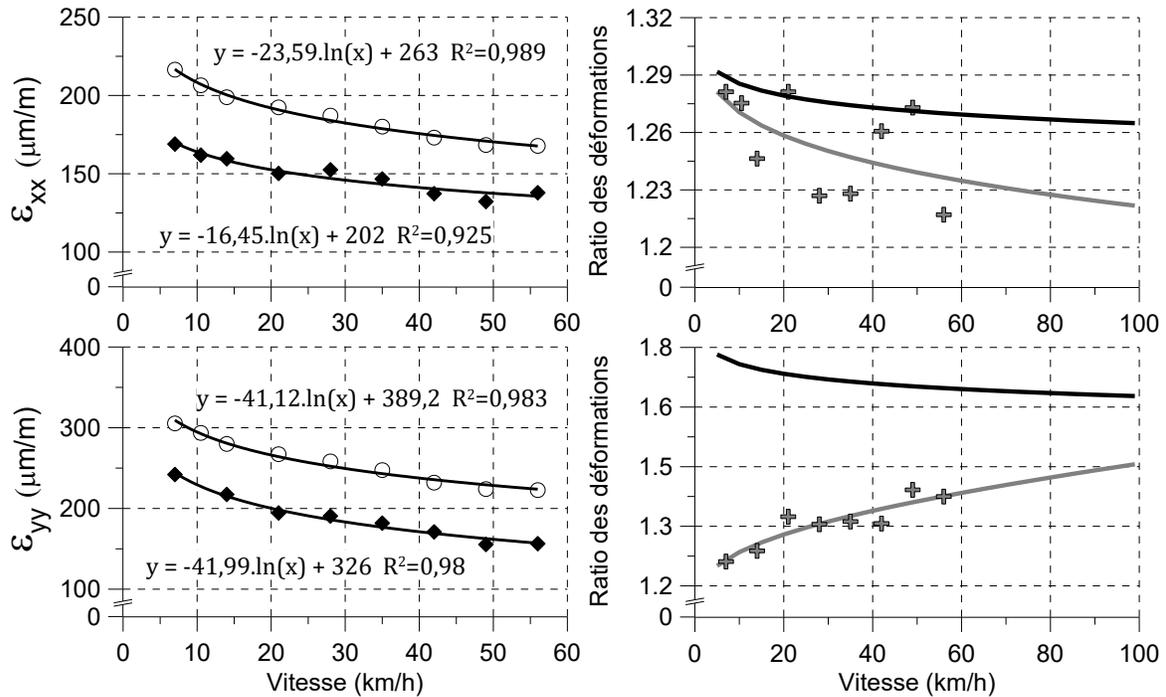


Figure 3.35 : Effet des conditions expérimentales sur les ratios des déformations mesurées et modélisées à la base du revêtement pour les sections A et B (IFSTTAR)

Tous les ratios obtenus à partir des modélisations sont plus élevés que les mesures expérimentales. Les différences sont particulièrement marquées sur la section B, qui est la structure la plus fine. Les écarts entre les valeurs modélisées et calculées sont également plus importants pour les températures chaudes. Les modélisations fournissent néanmoins une bonne estimation de l'ordre de grandeur des ratios pour les déformations longitudinales et traduisent correctement l'effet de l'intensité de charge et de la température identifié expérimentalement et résumé au tableau 3.7. Les écarts élevés entre les deux ratios pour les déformations transversales s'expliquent en partie par les hypothèses de modélisation considérées au niveau de la répartition de la charge sur l'aire de contact. À charge équivalente, le pneu jumelé possède une surface de contact plus grande que le pneu à bande large. Les pressions de contact sont donc moins élevées, ce qui se traduit à la base du revêtement par des déformations plus faibles. Les écarts s'expliquent également par la non-prise en compte dans les modélisations des efforts tangentiels imposés par le mouvement de la charge. Plus les structures sont épaisses et rigides, moins ces efforts vont avoir un impact sur l'amplitude des déformations à la base du revêtement bitumineux. Les écarts entre les ratios sont donc plus faibles au niveau de la section A et pour les températures proche de 20 °C.

L'effet de la vitesse sur les déformations et sur le ratio des déformations est présenté à la figure 3.36 pour les sections A et B. Les graphiques montrent l'évolution des déformations longitudinales et transversales pour des vitesses variant de 3,5 km/h à 56 km/h. Chaque point correspond à une mesure obtenue à partir d'une seule jauge à fibre optique située directement sous le centre du pneu. Les pneus sont chargés à 5 tonnes et la température du revêtement est de 21 °C. Les valeurs pour les deux types de pneus sont présentées sur un même graphique. Une interpolation logarithmique est déterminée à partir des mesures dont l'équation et le coefficient de corrélation associés sont indiqués sur les graphiques. Le ratio des déformations est calculé à partir des interpolations et à partir des mesures expérimentales. Ces données sont par la suite extrapolées pour des vitesses supérieures à 56 km/h.

Section A - Déformations en Z = 125 mm



Section B - Déformations en Z = 65 mm

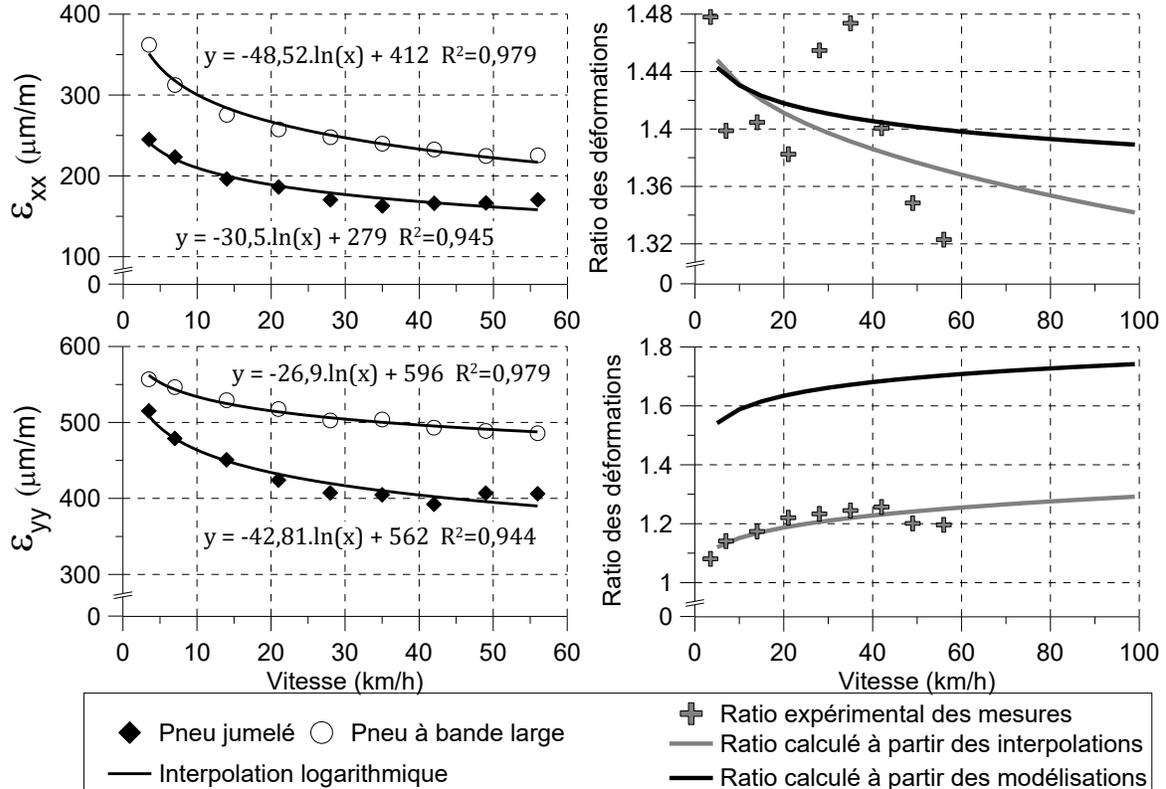


Figure 3.36 : Effet de la vitesse sur les déformations longitudinales et transversales et sur le ratio des déformations mesurées et modélisées à la base du revêtement bitumineux pour les sections A et B (IFSTTAR) sous une charge de 5 t à 21 °C

Plus la vitesse augmente, plus l'amplitude des déformations longitudinales et transversales diminue. L'enrobé bitumineux étant un matériau viscoélastique, son module augmente avec l'augmentation de la fréquence de sollicitation à laquelle il est soumis et augmente donc avec la vitesse. Pour les sections A et B, les courbes expérimentales montrent que le ratio des déformations longitudinales diminue lorsque la vitesse augmente. Ce ratio varie entre 1,22 et 1,28 pour la section A et entre 1,34 et 1,45 pour la section B. Les valeurs modélisées confirment cet effet bien que leur variation est plus modérée. Inversement, pour les déformations transversales le ratio obtenu expérimentalement augmente avec la vitesse. Il varie entre 1,25 et 1,5 pour la section A et entre 1,12 et 1,29 pour la section B. Les modèles sont concordants avec ces mesures uniquement pour la section B. Au niveau de la section A, les modèles montrent que le ratio de la déformation transversale diminue avec l'augmentation de la vitesse ce qui n'est pas le cas avec les mesures expérimentales. Comme pour les cas précédents, les modèles surestiment les ratios déterminés expérimentalement.

3.5 Conclusion

Les essais en vraie grandeur permettent de quantifier l'effet des paramètres de charge et des conditions environnementales sur le comportement mécanique des chaussées. L'intensité de la charge, la pression de gonflage, la vitesse du véhicule, le type de pneu et la température du revêtement sont les cinq paramètres spécifiquement étudiés au cours du projet. Les mesures expérimentales effectuées sur quatre structures de chaussée montrent que l'épaisseur du revêtement et sa température sont les deux facteurs qui influencent le plus la rigidité de la structure et donc l'amplitude des déformations à la base du revêtement. Les résultats expérimentaux et les modélisations montrent également que tous les paramètres de charge ont une influence sur la distribution des déformations et sur l'amplitude maximale mesurée.

Les déformations mesurées à la base du revêtement ont des formes et des amplitudes qui dépendent à la fois de la position de la jauge par rapport à la charge et également des conditions environnementales. Au passage d'un essieu simple, la déformation longitudinale présente deux pics de contraction et un pic d'extension alors que la déformation transversale ne présente qu'un seul pic d'extension. La viscoélasticité des enrobés influence l'amplitude maximale de ces pics et doit être prise en compte dans la modélisation du comportement mécanique d'une structure. L'approche d'analyse, visant à déterminer le bassin de

déformation, permet d'identifier les zones les plus sollicitées sous le pneu tout en réduisant l'erreur pouvant provenir des instrumentations de mesure.

Le pneu à bande large engendre une extension en bas du revêtement supérieure à celle relevée pour le pneu jumelé. Ce résultat est vrai dans la direction longitudinale et transversale. Les ratios de déformation mesurés expérimentalement entre le pneu à bande large et le pneu jumelé sont en moyenne de 1,24 avec une plage de variation comprise entre 1,01 et 1,56 ce qui est cohérent avec les résultats des travaux de recherche antérieurs à ce projet. Les ratios de déformation montrent que le pourcentage d'augmentation des déformations engendrées par le pneu à bande large est principalement fonction de la rigidité de la structure et de l'intensité de la charge. Plus l'épaisseur du revêtement diminue ou plus les températures sont élevées (ou les vitesses sont lentes), plus le ratio des déformations longitudinales augmente alors que celui des déformations transversales diminue. Afin de quantifier le dommage relatif engendré par le pneu à bande large comparativement à un pneu jumelé, il est nécessaire d'identifier la déformation critique associée à chaque type de pneu et à chaque mode de rupture. Cette quantification doit être faite pour une gamme de conditions expérimentales et pour des structures de chaussée représentatives du réseau routier afin de pondérer les résultats à partir de ces données et ainsi déterminer l'endommagement relatif pour l'ensemble des conditions routières.

Chapitre 4

Instrumentation des structures de chaussée

4.1 Présentation et objectifs

Un capteur est constitué de deux parties : la jauge aussi appelée le transducteur et le corps du capteur. Un transducteur est l'élément qui transforme une grandeur physique (le mesurande) en une autre grandeur physique qui est fonction de la première. Une jauge résistive par exemple, traduit la variation de longueur d'un élément en variation de résistance électrique. Une fois connectée à un appareil d'acquisition, l'information émise par le capteur est analysée puis traitée afin d'en extraire la grandeur physique désirée. Les jauges sont fixées ou intégrées au corps du capteur préalablement à son installation sur un site d'essais. Les jauges, les matériaux ainsi que la forme géométrique des capteurs sont sélectionnés afin de retranscrire au mieux les variations physiques pouvant s'exercer dans la zone instrumentée.

Afin de mesurer les déformations dans les couches de matériaux non liés (sol, sous-fondation et fondation) et dans les couches bitumineuses, deux types de jauges ont été utilisés : des jauges résistives et des jauges à fibre optique. Ce chapitre détaille, dans un premier temps, l'instrumentation utilisée pour les matériaux non liés puis dans un second temps, les trois types de capteurs résistifs et les deux types de capteurs à fibre optique mis en place dans les couches bitumineuses. Le principe de fonctionnement de ces jauges, leur installation sur le corps du capteur et les procédures de mise en place dans la chaussée sont décrits dans ce chapitre. Une procédure de validation des capteurs à fibre optique a été effectuée et est également détaillée dans ce chapitre. Cette procédure comprend entre autres une comparaison des valeurs obtenues avec les différents types de capteurs et avec les résultats de modélisations avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Cette comparaison porte uniquement sur les capteurs de déformation situés à la base des couches bitumineuses. Une analyse de la fiabilité des capteurs est également effectuée pour les différentes conditions expérimentales rencontrées lors des

campagnes de mesure et est présentée dans ce chapitre.

4.2 Instrumentation des matériaux non liés

4.2.1 Capteurs de déformations pour les sols et matériaux granulaires

Les capteurs mis en place dans les matériaux non liés sont des capteurs résistifs en forme d'haltère. La jauge est située dans la partie centrale du capteur et permet d'obtenir la déformation suivant l'axe principal de l'haltère. Plus spécifiquement, le capteur est constitué d'un axe central qui est une barre rectangulaire en plexiglas® de 120 mm de long dans laquelle la jauge résistive a été préalablement intégrée par le fournisseur. La jauge est de type KM-120-120-H2-11W1M3 de la marque Kyowa. Elle est fonctionnelle pour des températures comprises entre -10 °C et 70 °C et possède une résistance de $120\ \Omega \pm 1\%$. Comme présenté à la figure 4.1 deux rondelles sont ajoutées à la barre rectangulaire afin d'assurer un bon ancrage dans les couches granulaires. Les deux rondelles sont initialement usinées afin de permettre l'insertion et le collage de la barre centrale. La figure 4.1(a) présente un des capteurs de déformation avant sa mise en place dans la couche de sol. Ces capteurs permettent de mesurer la déformation verticale s'exerçant au sommet des couches. Pour cela, les capteurs sont mis en place après le compactage des matériaux. Un trou d'un diamètre supérieur à celui du capteur est creusé au sommet des couches. Le capteur est placé dans le trou puis les matériaux prélevés sont ajoutés afin de combler le vide présent autour du capteur et entre les deux rondelles. Le compactage des matériaux est effectué à la main afin de ne pas endommager le capteur et de s'assurer de sa perpendicularité dans la structure. La figure 4.1(b) illustre un des capteurs une fois installé au sommet de la fondation. La profondeur du capteur est préalablement ajustée afin que le haut du capteur soit au niveau du sommet de la couche de matériau.

Il est recommandé de placer successivement plusieurs capteurs le long d'une même section, car lors de la mise en place des couches supérieures, les charges appliquées par le compactage peuvent endommager les connexions. La jonction située au niveau de la rondelle où le câble de la jauge sort de la barre en plexiglas® est la zone la plus sensible du capteur. Lors de la mise en place de l'haltère dans la couche de matériau, il est recommandé de placer cette zone vers le bas afin de l'éloigner de la sollicitation.

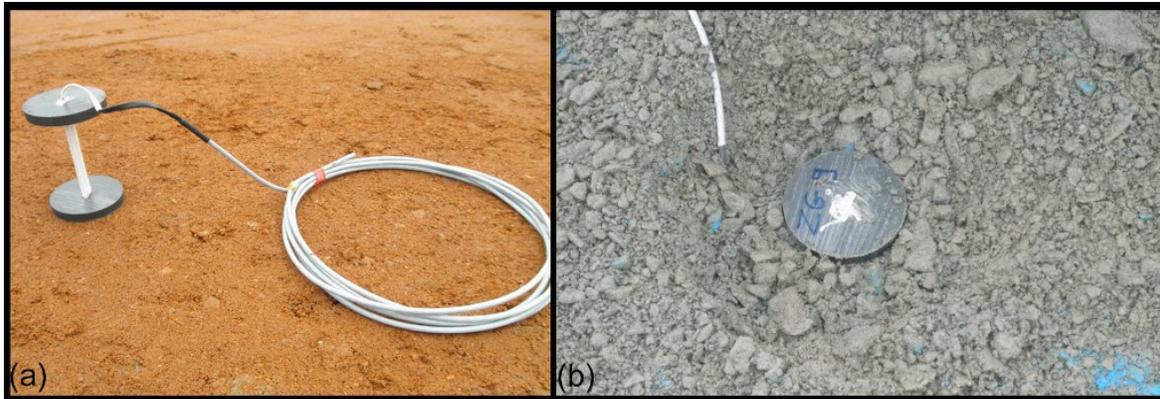


Figure 4.1 : Capteur de déformation pour les sols et les matériaux granulaires : (a) vue d'ensemble et (b) capteur installé au sommet de la fondation

4.2.2 Capteurs de température

Les capteurs de température installés au cours de la campagne de mesure n° 3 sont des thermistances, c'est-à-dire que la résistance du matériau constituant la jauge varie en fonction de la température. Des thermistances peuvent être utilisées pour instrumenter les couches de matériaux non liés et les couches bitumineuses. L'échange thermique entre le capteur et le matériau se fait par conduction. Au cours des campagnes de mesure n° 1 et 2, aucun capteur de température n'a été installé dans les matériaux non liés. Un capteur de température à fibre optique a cependant été installé dans les couches bitumineuses afin de suivre l'efficacité du conditionnement thermique utilisé pendant les mesures.

4.3 Instrumentation des enrobés bitumineux

4.3.1 Capteurs résistifs

4.3.1.1 Description

Trois types de capteurs résistifs ont été mis en place dans les sections A et B du manège de fatigue de l'IFSTTAR : des capteurs plexiglas®, des capteurs aluminium, et des capteurs TML. Ces capteurs ont un profil en H, c'est-à-dire qu'il possède un axe central et deux barres d'ancrage à chaque extrémité. La figure 4.2 illustre ces trois types de capteurs avant leur mise en place dans la structure.

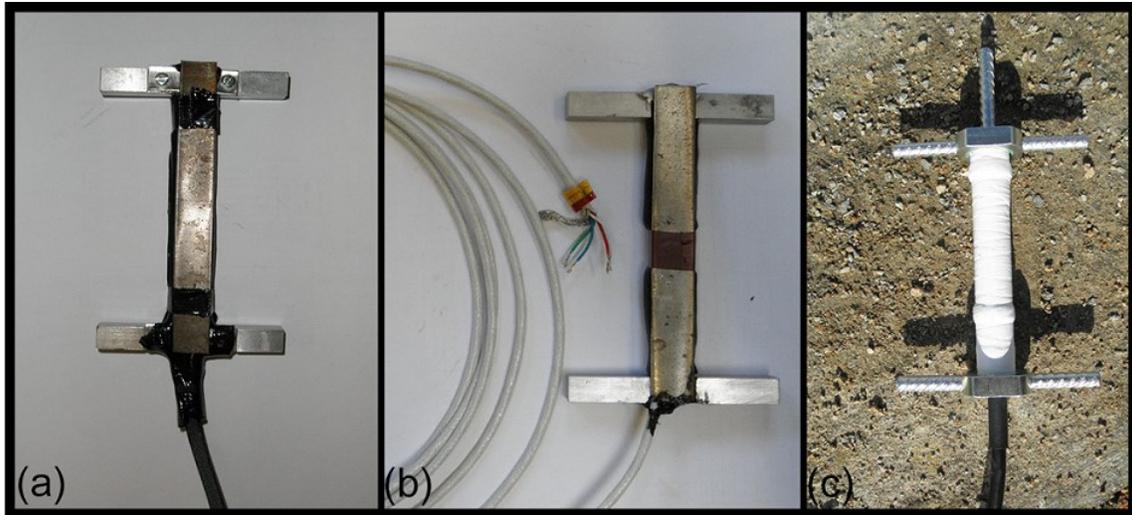


Figure 4.2 : Capteurs de déformation résistifs : (a) capteur plexiglas®, (b) capteur aluminium et (c) capteur TML

- Le capteur plexiglas®

La barre centrale du capteur plexiglas® est la même que celle utilisée pour les matériaux non liés et présentés au paragraphe 4.2.1. Son module d'élasticité est de 2 750 MPa. La barre de plexiglas® est collée et vissée aux deux extrémités à des ancrages carrés d'aluminium. Ces deux barres en aluminium ont une longueur de 80 mm et une section de 100 mm². Une bande de mastic isolant et deux fines lames d'acier sont disposées sur le dessus et le dessous de la jauge. Ces lamelles ont les mêmes dimensions que la barre centrale et assurent une protection supplémentaire à la jauge en limitant les risques d'écrasement imposés par des granulats. Elles ne sont pas solidaires au capteur afin de ne pas le rigidifier. Le ruban adhésif autour assure seulement leur maintien en position lors des étapes de pavage du revêtement. La figure 4.2(a) présente le capteur plexiglas® une fois toutes les étapes de conditionnement terminées. L'orientation de l'axe principal du capteur définit l'orientation des déformations mesurées.

- Le capteur aluminium

Le capteur aluminium est entièrement fabriqué en laboratoire avant sa mise en place dans la chaussée. Comme présenté à la figure 4.3, une jauge résistive (élément rectangulaire marron sur la figure) est collée sur une fine lame d'aluminium. Les dimensions de cette lamelle sont 0,8 x 10 x 120 mm. Deux barreaux d'aluminium sont ensuite vissés et soudés aux deux extrémités de la lamelle. Comme pour la jauge plexiglas®, une protection constituée de mastic et de lamelles d'aluminium est ajoutée au capteur. La dimension finale du capteur est la même

que celle des jauges plexiglas®, c'est-à-dire 120 mm de longueur. La figure 4.2(b) présente un capteur aluminium une fois les étapes de conditionnement terminées.

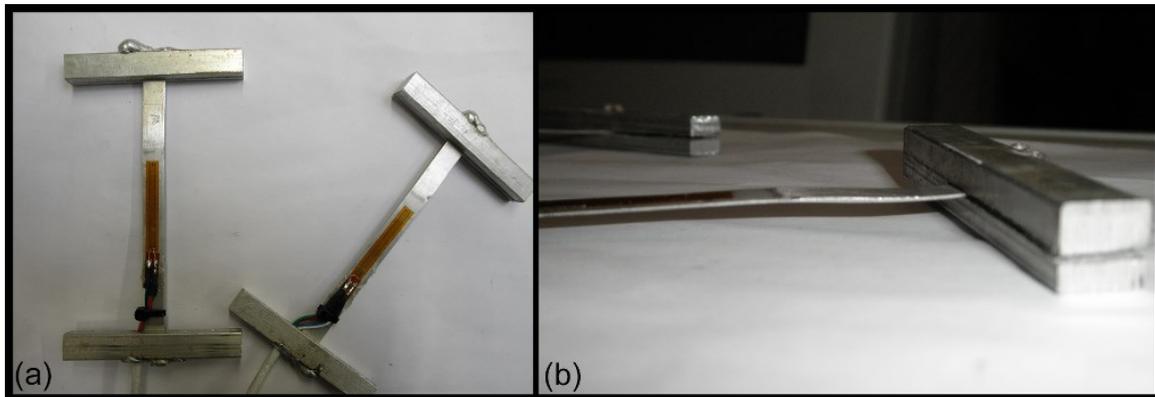


Figure 4.3 : Capteur aluminium avant son conditionnement : (a) vue de dessus et (b) vue de profil

- Le capteur TML

Le capteur TML est un capteur de type KM-100HAS de la marque TML Tokyo Sokki Kenyujo Co. Le capteur TML ne nécessite aucune préparation additionnelle avant sa mise en place dans l'enrobé bitumineux et il est livré tel que présenté à la figure 4.2(c). Ce capteur est constitué d'un tube central métallique (partie blanche) qui protège la jauge résistive et qui assure l'étanchéité du capteur. À l'intérieur du tube, la jauge est fixée sur une lamelle métallique qui est elle-même fixée à deux ancrages à ses extrémités. La jauge mesure la déformation s'exerçant entre ces deux ancrages. Les ancrages sont texturés et de forme cylindrique afin de permettre l'adhérence dans la couche bitumineuse. Le tube métallique est rigide à l'exception d'une section déformable en son centre formée par un ressort. Cette conception permet au tube métallique de ne pas augmenter la rigidité du capteur et de s'assurer que les efforts appliqués au capteur sont transmis à la lamelle située au centre. La longueur entre les deux ancrages est de 100 mm et la longueur totale est de 147 mm. Les ancrages ont une longueur de 84 mm et le diamètre du tube métallique est de 17 mm. Contrairement aux autres capteurs en H, les capteurs TML possèdent un ancrage supplémentaire orienté suivant l'axe principal du capteur, visible sur la figure 4.2(c). Ce dernier est également cylindrique et texturé. La plage de mesure du capteur est de $\pm 5000 \mu\text{m/m}$ et il peut être utilisé pour des températures comprises entre $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Sa résistance est de 350Ω (montage en pont complet) et son module élastique apparent est d'environ 40 MPa.

4.3.1.2 Mise en place

Les capteurs résistifs instrumentent le bas des couches bitumineuses. Ils sont installés au cours des travaux de mise en œuvre du revêtement. Les capteurs sont positionnés sur un lit d'enrobé bitumineux, qui n'est pas compacté afin d'y intégrer le capteur et ainsi permettre un bon enrobage autour de celui-ci. La figure 4.4(a) illustre le positionnement des capteurs sur le lit d'enrobé. Sur cette image, les capteurs sont espacés de 30 cm et placés orthogonalement afin que l'un mesure les déformations longitudinales et le second les déformations transversales. Une fois positionnés, les capteurs et une partie du câblage sont recouverts manuellement d'une couche d'enrobé (figure 4.4(b)). Cette méthode permet de limiter le déplacement et de protéger les câblages que le finisseur pourrait endommager lors de son passage. Comme présenté à la figure 4.4(c), les chenilles du finisseur passent sur les fils reliés au capteur et peuvent les arracher ou les écraser. Finalement, le finisseur termine d'appliquer la couche d'enrobé bitumineux sur l'ensemble de la section.

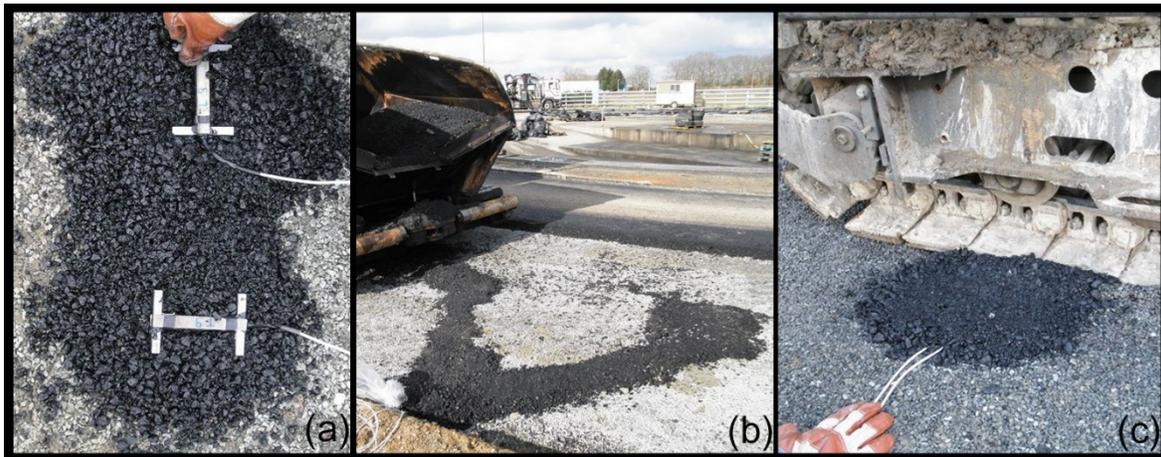


Figure 4.4 : Mise en place des capteurs résistifs : (a) positionnement, (b) protection et recouvrement et (c) passage du finisseur

4.3.2 Capteurs à fibre optique

4.3.2.1 Principe de fonctionnement

L'interférométrie optique est une méthode de mesure basée sur le phénomène d'interférences intervenant lors de la superposition de plusieurs ondes lumineuses cohérentes. La superposition des ondes lumineuses qui ont circulé dans le transducteur à fibre optique est réalisée grâce à un interféromètre. L'analyse de la figure d'interférence résultante permet

d'extraire un résultat représentatif du mesurande. Dans le domaine routier, il existe des capteurs de température, de déformation, de contrainte et de déplacement qui reposent sur cette technologie. Pour l'ensemble de ces capteurs dit à fibre optique, le dispositif de mesure est constitué de deux éléments : le transducteur à fibre optique (aussi appelé jauge à fibre optique) et le conditionneur de signal. Le principe de fonctionnement du dispositif est schématisé à la figure 4.5 . La figure est adaptée de Doré et coll. (2007).

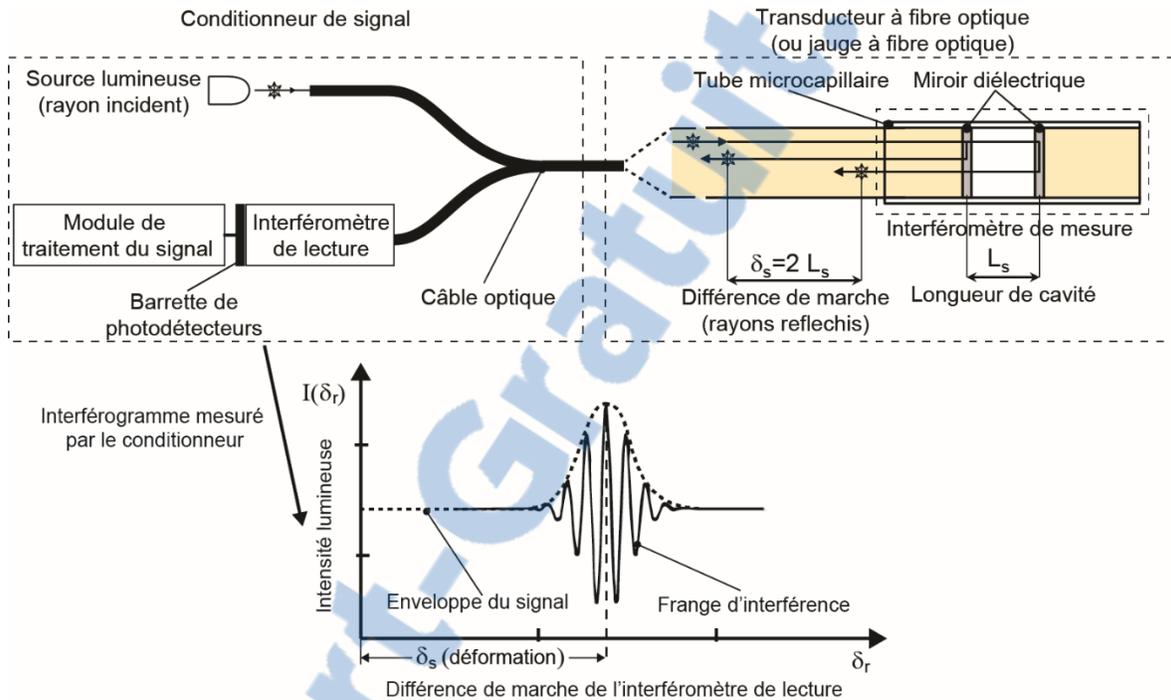


Figure 4.5 : Principe de fonctionnement des capteurs à fibre optique

Le conditionneur de signal a pour rôle d'injecter la lumière dans la fibre du transducteur, de détecter et d'analyser le signal retour et finalement d'en extraire l'information représentative du mesurande. Le transducteur se compose d'un dispositif optique sensible à la grandeur physique à mesurer (la déformation). Il a pour rôle de diviser l'onde incidente en deux ou plusieurs ondes qui viendront après traitement se superposer. Le transducteur est conçu afin que le mesurande modifie ou module l'intensité, la phase, la polarisation ou la longueur d'onde du signal. Dans le cas des capteurs de déformation, le transducteur fonctionne sur le principe d'interféromètre de type Fabry-Pérot. Les deux miroirs diélectriques placés en parallèle forment cet interféromètre dit interféromètre de mesure. Leurs positionnements forment une cavité de longueur (L_s). Lorsque le capteur est sollicité, la longueur de la cavité

varie proportionnellement à l'élongation de la jauge. Les miroirs, qui forment l'interféromètre, permettent de diviser le rayon lumineux incident issu de la source lumineuse en deux rayons réfléchis. Ces deux rayons présentent une différence de marche (δ_s) proportionnelle à la longueur de la cavité. De retour vers le conditionneur de signal, les deux rayons réfléchis passent à travers un interféromètre. Ce dernier, dit interféromètre de lecture, est formé par une série de composants optiques qui polarisent les signaux et leur imposent une différence de marche supplémentaire (notée δ_r). Ce traitement optique permet aux signaux lumineux de former un interférogramme au niveau des barrettes de photo-détecteurs situées après l'interféromètre de mesure. L'interférogramme est ensuite analysé par un module de traitement du signal. Comme illustré à la figure 4.5, il est constitué de franges d'interférence de forme sinusoïdale. L'enveloppe du signal atteint un maximum lorsque $\delta_r = \delta_s$. δ_r étant connu, il est possible par lecture de l'interférogramme d'obtenir la différence de marche δ_s . Cette dernière est fonction de l'élongation de la jauge et donc est fonction de la déformation. Dans ce type d'interférogramme, les franges d'interférence sont observées pour une zone de différence de marche définie. Ce phénomène est dû au type de lumière injecté par le conditionneur qui est une lumière blanche. Une lumière est dite blanche quand elle possède une large étendue spectrale ou encore une faible longueur de cohérence.

4.3.2.2 Application au domaine des chaussées

Les capteurs utilisés dans le domaine des chaussées doivent être robustes afin de résister aux conditions de charges et aux conditions environnementales. Ils doivent également garantir une bonne précision de mesure sur l'ensemble de sa durée de vie afin de permettre un suivi du comportement des chaussées. Le premier avantage des capteurs à fibre optique et de l'interférométrie polarimétrique en lumière blanche est l'indépendance du signal face aux variations d'intensité lumineuse. Ce dispositif n'est constitué d'aucun système mécanique ni résistif. Il n'y a donc pas d'usure, ni de fatigue des matériaux, ni de dérive dans le temps. Le spectre à large bande permet d'éviter les problèmes de dérive en longueur d'onde ou en puissance. Un autre avantage est que la source de lumière est robuste et ne nécessite aucune maintenance particulière. Contrairement aux capteurs résistifs, les fibres optiques ne sont ni sensibles à la température, ni à la déformation transverse. Ils sont aussi insensibles aux actions du gel, de l'eau, aux interférences électromagnétiques et aux champs électriques.

L'inconvénient principal de ces capteurs est leur fragilité principalement lors des étapes de manipulation. Une fois amenée à son point de rupture, la fibre optique ne permet plus aucune lecture puisque la lumière n'est plus transmise. Contrairement aux capteurs résistifs qui peuvent être réparés par une série de soudures et de réparations mécaniques, les jauges optiques sont très difficilement réparables. Afin de protéger la portion de fibre, située entre la jauge et le conditionneur, plusieurs couches protectrices viennent entourer la fibre. Cette succession de fils permet de résister aux écrasements pouvant être entraînés par le passage répété des charges. Afin de les protéger, les jauges sont insérées puis collées dans un corps polymère qui forme une partie du capteur. Les conceptions du corps polymère dépendent du type de capteurs et sont détaillées dans les prochains paragraphes.

Les dimensions du capteur sont minimales pour respecter les critères exprimés dans le paragraphe 2.8.1. Les jauges de la marque *Opsens* et de type OSP-A possèdent un diamètre de 0,23 mm et une longueur de 9 mm. Le tableau 4.1 présente les différentes spécifications des jauges à fibre optique pouvant être utilisées pour une mesure de la déformation. Plus la plage de mesure est étendue, plus la résolution de la jauge est grande et le facteur de jauge moins précis. Le facteur de jauge est un paramètre d'étalonnage intrinsèque fourni par le fabricant. Il permet la conversion entre la lecture optique réalisée par le conditionneur et la déformation imposée au niveau de la jauge. Dans le cadre du projet, des calculs préliminaires ont montré que la plage de mesure de - 2 500 à 2 500 $\mu\epsilon$, était la mieux adaptée compte tenu des charges appliquées et des épaisseurs des structures de chaussée du projet.

Tableau 4.1 : Spécifications des jauges à fibre optique de type OSP-A (*Opsens*) pour la mesure des déformations

Plage de mesure	-1 000 à 1000 $\mu\epsilon$	-2 500 à 2 500 $\mu\epsilon$	-5 000 à 5 000 $\mu\epsilon$
Résolution de la jauge	0,15 $\mu\epsilon$	0,3 $\mu\epsilon$	0,5 $\mu\epsilon$
Précision du facteur de jauge	$\pm 3 \%$	$\pm 3 \%$	$\pm 10 \%$
Température de service	-40 °C à 250 °C	-40 °C à 250 °C	-40 °C à 250 °C

L'acquisition des mesures est effectuée à l'aide de deux types de conditionneurs de signal présentés à la figure 4.6. Le premier est un conditionneur monocal de type PicoSens, pouvant effectuer des acquisitions à une fréquence de 50 Hz. Le second conditionneur de type

RadSens possède jusqu'à huit canaux. Les mesures sont prises simultanément et enregistrées dans un fichier à des fréquences allant jusqu'à 1000 Hz. Le RadSens est soit autonome grâce à une interface utilisateur, soit commandé par un ordinateur via le logiciel SoftProSens. Les connexions se faisant par câble Ethernet, il est possible de placer plusieurs appareils en parallèle. Le PicoSens a été utilisé pour la calibration des capteurs et les lectures des températures puisque la fréquence de lecture n'avait pas à être élevée. Le RadSens a été utilisé lors des essais routiers pour enregistrer les mesures des jauges de déformations puisque ce dernier permet des mesures multiples et à hautes vitesses.



Figure 4.6 : Conditionneur de signal : (a) modèle PicoSens, (b) modèle RadSens

4.3.3 Instrumentation d'une carotte d'enrobé bitumineux

L'instrumentation par fibre optique d'une carotte d'enrobé bitumineux a été développée à travers une collaboration entre l'Université Laval et la société *Opsens*. La technologie est brevetée (Doré et coll., 2010) et a rencontré plusieurs évolutions depuis ses premières utilisations (Doré et Duplain, 2002 ; Doré et coll., 2007 ; Doré et coll., 2009). Le principe de fonctionnement ainsi que la mise en application de ces capteurs présentés ici sont les derniers développements de la technologie.

4.3.3.1 Principe de fonctionnement

L'instrumentation d'une structure de chaussée à l'aide d'une carotte instrumentée est un procédé dit après-coup. Ce procédé consiste à extraire une carotte d'enrobé bitumineux de la structure à analyser puis de la replacer une fois instrumentée des jauges de déformations. Cette

technique permet d'instrumenter des chaussées neuves, mais aussi des chaussées ayant subi plusieurs cycles de sollicitation. La carotte, prélevée dans la structure où les essais ont lieu, possède les mêmes propriétés physiques et mécaniques que les couches bitumineuses étudiées, ce qui permet d'assurer une continuité des matériaux et ainsi de minimiser la présence des capteurs. La figure 4.7 schématise les différents éléments constitutifs d'une carotte à deux niveaux. Une carotte est constituée d'un corps principal en enrobé bitumineux sur lequel sont collées une ou plusieurs rondelles polymères. Les jauges de déformation sont préalablement intégrées à ces rondelles par le fabricant. Chaque rondelle instrumente un niveau de la carotte et leur nombre est fonction des besoins du projet. Deux jauges à fibre optique sont insérées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre dans la rondelle polymère. Cette approche permet de mesurer les déformations suivant deux directions orthogonales, usuellement les directions longitudinales et transversales. À l'intérieur de la rondelle, les jauges sont collées afin d'assurer l'adhérence entre la fibre et le plastique. La rondelle est en polyphénylène sulfide (PPS) qui est un matériau homogène, possédant une bonne résistance chimique et pouvant être facilement usiné en laboratoire. Il est chimiquement stable et insensible à la présence d'eau. Son module en traction est de 3 450 MPa (norme ASTM D638) et son coefficient d'expansion thermique linéaire est de 50,4 $\mu\text{m}/\text{m} / ^\circ\text{C}$ (norme ASTM E831). Les travaux d'Artamendi et coll. (2012) et d'Olard (2003) indiquent que dépendamment des granulats et des bitumes constituant l'enrobé bitumineux, celui-ci possède des coefficients thermiques compris entre 15 et 40 $\mu\text{m}/\text{m} / ^\circ\text{C}$. Le PPS possède des propriétés mécaniques et thermiques comparables à ceux de l'enrobé bitumineux.

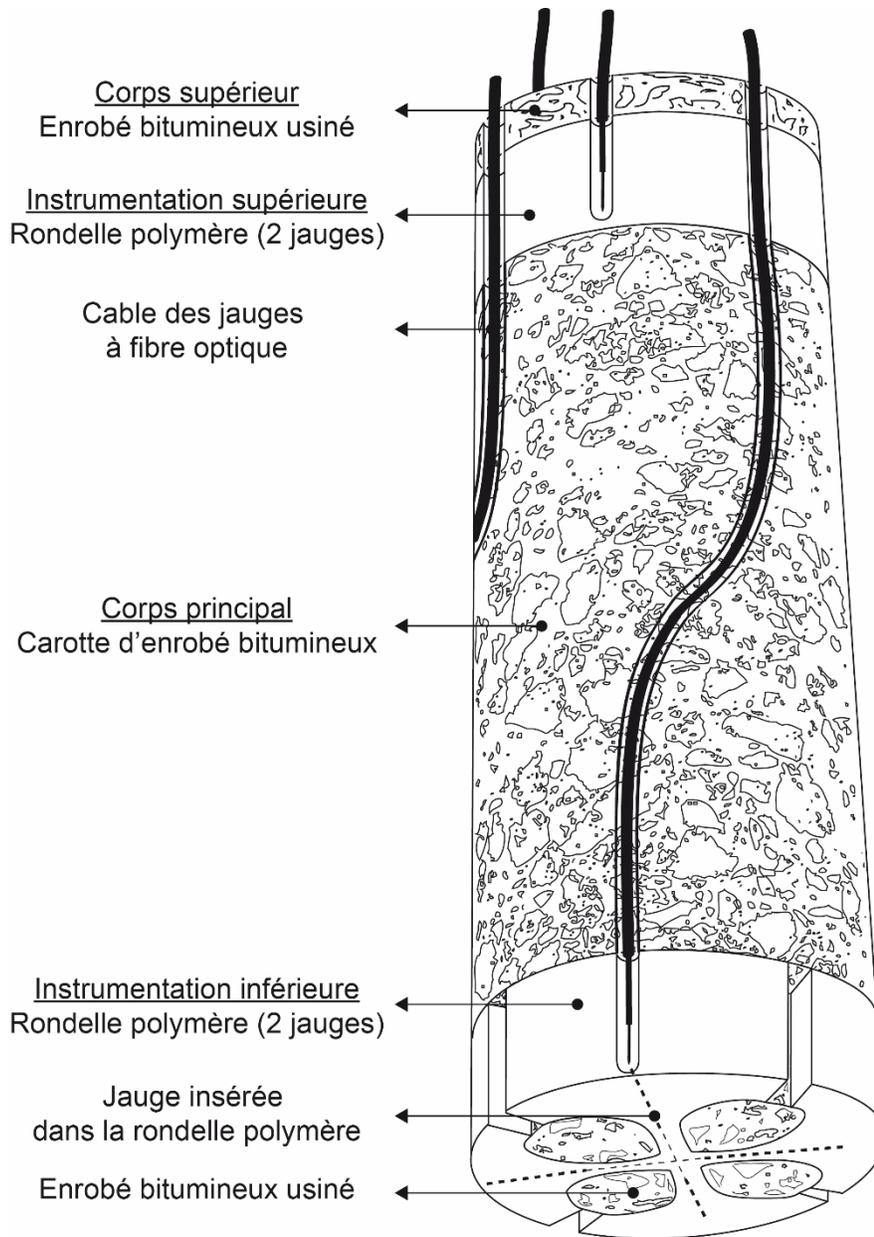


Figure 4.7 : Schéma d'une carotte instrumentée de capteurs à fibre optique suivant deux directions et à deux niveaux (traduit de Grellet et coll., 2012a)

4.3.3.2 Fabrication

La rondelle et la carotte sont usinées en laboratoire afin de s'assurer de la complémentarité de leur géométrie comme présentée à la figure 4.8(a) et (b). Leur géométrie est symétrique par rapport au centre de la carotte. Au niveau de la carotte, la forme géométrique est composée de deux rainures en croix. Les rainures sont d'une largeur constante sur environ 10 mm de part et d'autre du centre puis s'évasent ce qui forme quatre protubérances en forme de goutte en

surface. Un épaulement est également usiné à l'extrémité de la carotte afin d'y accoter la rondelle de polymère lors des étapes de collage. La géométrie de la rondelle est conçue pour maximiser le volume d'enrobé bitumineux autour des jauges tout en minimisant les concentrations de contraintes. Une fois en position, le bas de la carotte et la rondelle forment une surface plane.

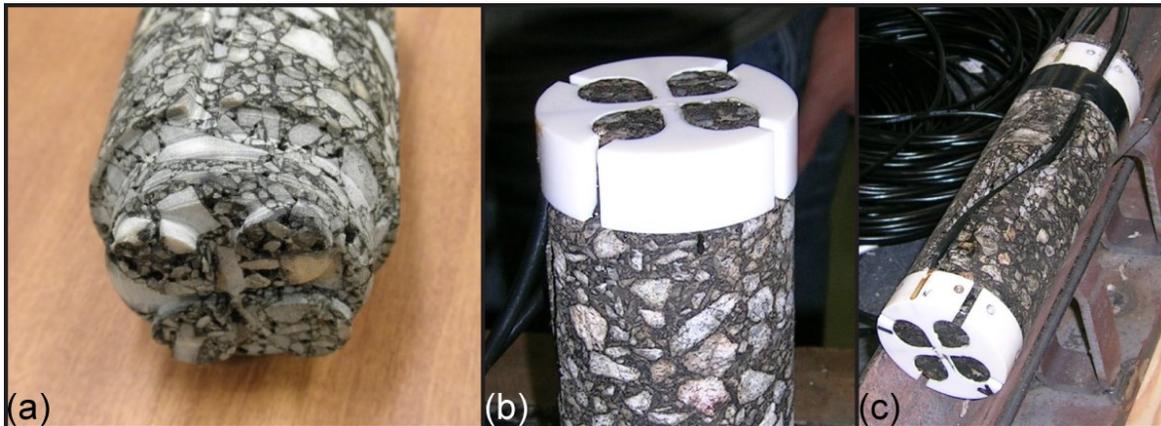


Figure 4.8 : Instrumentation d'une carotte d'enrobé bitumineux : (a) usinage, (b) installation des capteurs à fibre optique intégrés dans la rondelle polymère et (c) instrumentation complétée à deux niveaux et suivant deux directions

La rondelle est fixée à la carotte avec de la colle époxy. La colle est uniquement appliquée sur l'épaulement et sur la surface extérieure de la carotte en contact avec la rondelle. Les rainures verticales sur l'extérieur de la rondelle, comme illustrées sur la figure 4.8(b) et (c), permettent de dissocier les deux capteurs en évitant un transfert des contraintes via l'extérieur de la rondelle. Afin de permettre le passage des câbles qui contiennent les fibres optiques, des rainures sont aussi creusées en surface de la carotte sur toute sa hauteur. Pour instrumenter deux niveaux sur la carotte, il est nécessaire de scier la carotte à la profondeur où sera fixée la seconde rondelle. Le morceau scié est ensuite usiné afin de permettre le collage de la rondelle polymère. Par la suite, cette section de carotte est collée au premier morceau pour reformer une carotte complète. La taille finale de la carotte est celle de l'épaisseur de la couche bitumineuse. Étant donné que l'enrobé bitumineux n'est pas un matériau homogène, la section sur laquelle la jauge est fixée est constituée de granulats, de bitume et de vides tel qu'illustré à la figure 4.8(a). Un diamètre de 55 mm a été sélectionné pour la carotte afin que la section, suivant laquelle la jauge mesure l'élongation, soit représentative du matériau.

Une fois les étapes de conditionnement terminées, les carottes sont calibrées. La calibration permet de s'assurer que le transfert des contraintes à travers le polymère, la colle et l'enrobé bitumineux s'effectue correctement. La figure 4.9 schématise une carotte instrumentée montée sur le bâti de calibration. La calibration consiste à comparer l'élongation du diamètre extérieur de la rondelle polymère avec la déformation mesurée par la jauge à fibre optique. L'élongation du diamètre est mesurée par un capteur de déplacement fixé au bâti et aux tiges de guidage. La déformation réelle est obtenue en divisant l'élongation de la rondelle par son diamètre initial. La carotte est installée sur le bâti de calibration en l'assemblant par frettage puis en la vissant à un anneau métallique. L'anneau est fixé d'un côté au bâti et de l'autre à une pièce mobile qui se translate en tournant la molette. La translation impose une traction à la rondelle métallique qui transmet la contrainte à la carotte. L'anneau métallique transmet la contrainte suivant la direction de translation. Cette procédure permet de définir un facteur de correction pour chaque jauge qui est appliqué lors des essais expérimentaux. Ce facteur de correction est déterminé en traçant la déformation obtenue par la jauge à fibre optique en fonction de la déformation calculée avec le capteur de déplacement. La figure 4.10 présente deux exemples. Le facteur de correction est l'inverse de la pente de la droite d'interpolation linéaire.

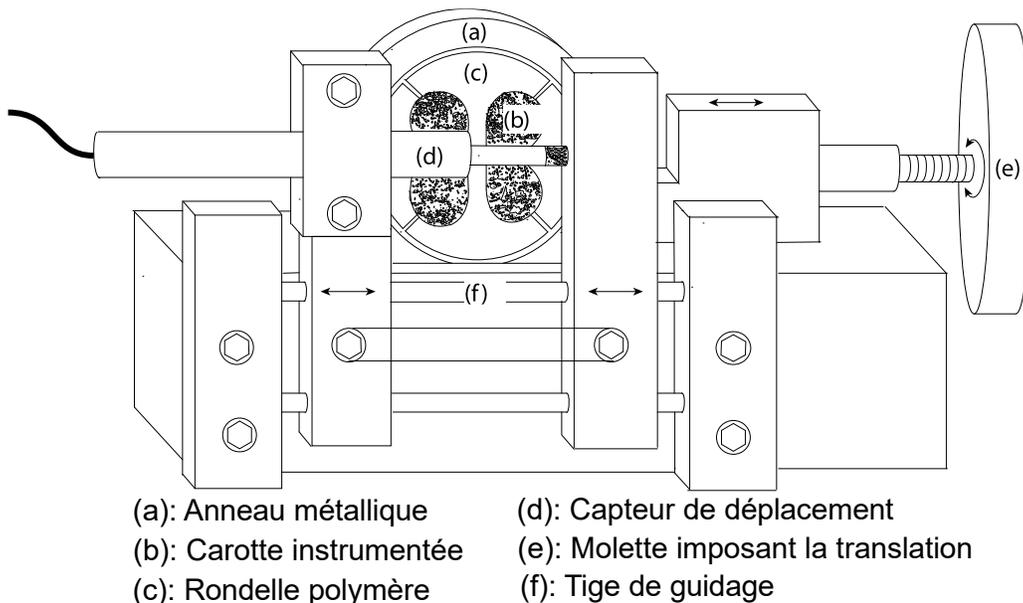


Figure 4.9 : Représentation schématique du bâti de calibration des carottes instrumentées (traduit de Grellet et coll., 2012a)

La figure 4.10 présente deux droites de calibration. La première est un exemple obtenu pour une jauge située sur une rondelle polymère non collée à une carotte d'enrobé bitumineux. La seconde est celle d'une jauge située sur une carotte dont la fabrication est complétée. La droite d'interpolation pour la rondelle seule (figure 4.10(a)) possède une pente de 0,985. Une pente proche de 1 signifie qu'il y a très peu de perte dans la transmission de la contrainte. La principale perte se situe au niveau du collage entre la jauge et le corps polymère. La droite d'interpolation pour la carotte instrumentée (figure 4.10(b)) possède une pente de 0,890, ce qui signifie que la déformation relevée par la jauge à fibre optique est plus faible que celle calculée à partir du capteur de déplacement. Cette lecture plus faible s'explique en partie par l'hétérogénéité de l'enrobé dont le module peut être plus ou moins élevé en fonction de la présence ou non d'un granulats à proximité de la jauge. La principale perte de transmission des contraintes se situe au niveau du collage entre la rondelle et l'enrobé. Le coefficient de correction permet de quantifier cet effet. Il est appliqué à chaque jauge lors des mesures expérimentales afin d'obtenir la déformation réelle s'exerçant suivant le diamètre de la carotte.

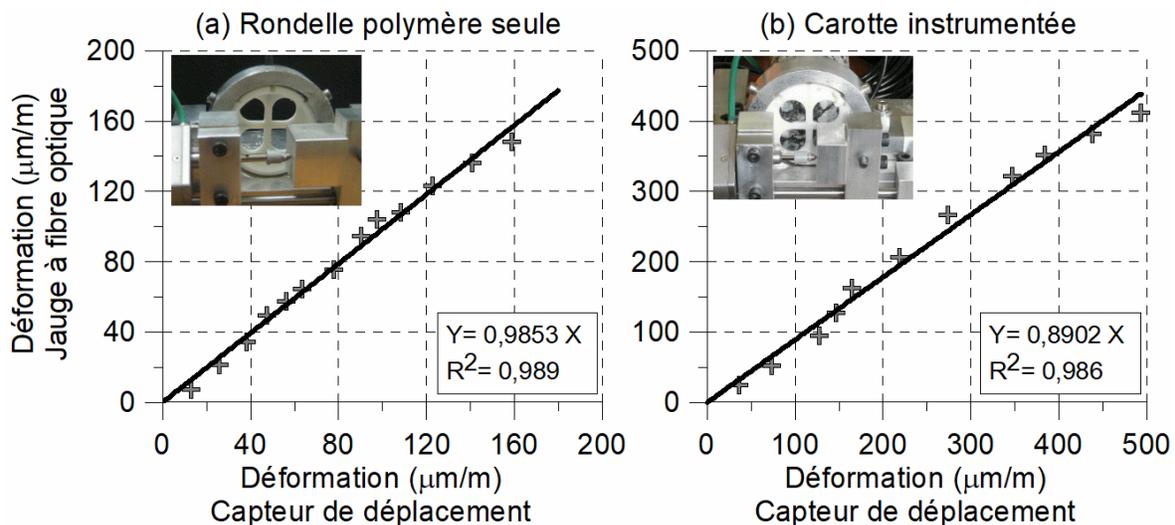


Figure 4.10 : Courbe de calibration d'une rondelle polymère seule et d'une carotte d'enrobé bitumineux instrumentée d'une rondelle polymère

4.3.3.3 Mise en place

Après calibration, les carottes sont placées puis scellées dans la chaussée à l'aide de colle époxy. La figure 4.11 présente les deux principales étapes de l'installation. La première étape consiste à forer la zone d'essais où sera installée la carotte. Initialement, la carotte sur laquelle sont installées les rondelles polymères a été prélevée dans la structure de chaussée analysée

mais à l'extérieur de la zone étudiée. La carotte instrumentée n'est pas replacée à sa position initiale mais dans un nouveau trou de forage. Ce trou est effectué avec un carottier dont le diamètre extérieur est égal au diamètre de la carotte plus 2 mm. Cela permet de limiter à 1 mm l'espace entre la carotte et les parois extérieures du trou ce qui réduit le volume de colle autour de la carotte.

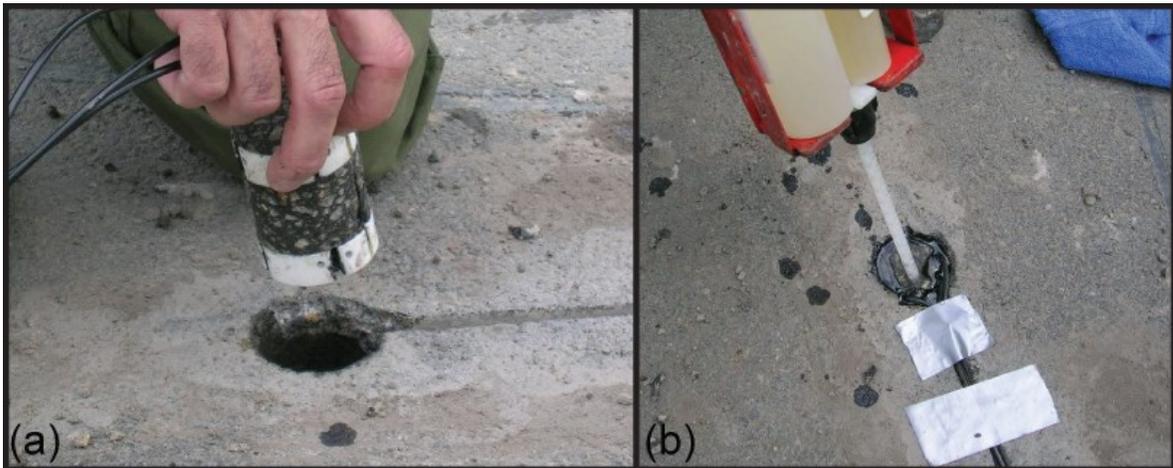


Figure 4.11 : Étape d'installation d'une carotte instrumentée : (a) mise en place dans le trou de carottage puis (b) collage à l'aide de colle époxy (épaisseur de colle de 1 mm)

La seconde étape consiste à sceller la carotte en injectant de la colle époxy sur son pourtour (figure 4.11(b)). La colle époxy utilisée possède une faible viscosité ce qui permet au produit d'adhérer aux parois du trou sur toute la hauteur de la carotte. Avant cette étape, la profondeur d'enfoncement et l'orientation des jauges sont vérifiées afin de s'assurer du positionnement final de chaque jauge dans la structure. Comme illustré à la figure 4.11, une rainure est usinée en surface du revêtement pour passer les câbles et éviter leur écrasement aux passages des charges. La rainure fait la connexion entre le trou de forage et le bord de la chaussée. Après le scellement de la carotte, la rainure est comblée avec du scellant à fissure. Les étapes d'installation des carottes sont détaillées à l'annexe 5.

4.3.3.4 Durée de vie

La fonctionnalité des carottes instrumentées des campagnes de mesure n° 1 et 2 au SERUL ont été testées plusieurs fois par année. Ces relevés indiquent que les capteurs sont capables de résister à plusieurs cycles de gel et de dégel. En hiver, la contraction thermique imposée par les températures froides et le soulèvement au gel des couches engendre des déformations

élevées dans les capteurs. Plusieurs jauges peuvent alors être sollicitées au-delà de leur plage de mesure et ne plus être fonctionnelles. Lorsque les températures augmentent et que ces sollicitations diminuent, les jauges redeviennent opérationnelles.

Les mesures de la campagne expérimentale n° 3 ont été arrêtées après 120 000 chargements. Les essais routiers se sont poursuivis jusqu'à la rupture par fatigue de la structure de la section B. Des mesures ponctuelles ont été effectuées après 650 000 chargements afin de vérifier si les capteurs étaient toujours fonctionnels. Tous les capteurs opérationnels au début de la campagne de mesure sont restés fonctionnels. Alors que la section A ne présentait pas de fissuration, un taux fissuration qualifié de très élevé a été mesuré sur la section B. Sur la figure 4.12(a), les fissures identifiées sont tracées à la peinture blanche afin de permettre leur visualisation. Il est à noter que certaines fissures s'arrêtaient à l'approche du capteur alors que d'autres le contournaient. Les capteurs ont été extraits par carottage afin de vérifier le collage et la qualité de leur mise en place. La figure 4.12(b) présente l'extraction de la carotte qui instrumentait la couche de BBSG de la section A. Les observations montrent un collage de bonne qualité puisque la colle était présente tout autour du capteur et aucune bulle d'air ni de vide n'a été observée. Sur la figure 4.12(c), la colle est observable sur toute la surface de la carotte. Une partie de la colle a été usinée autour de la rondelle afin de permettre la distinction.



Figure 4.12 : Extraction de l'instrumentation : (a) carottage, (b) carotte extraite contenant le capteur et (c) vérification du collage autour de la carotte initiale

4.3.4 Instrumentation d'une plaque de déformation multiniveau

La plaque de déformation multiniveau est une instrumentation complémentaire aux carottes instrumentées. Elle permet de mesurer les déformations transversales et verticales à plusieurs

profondeurs dans les couches bitumineuses. Sa conception permet l'acquisition simultanée des déformations en plusieurs positions sous le pneu. Son principe de fonctionnement est décrit dans les paragraphes qui suivent.

4.3.4.1 Principe de fonctionnement et fabrication

La plaque de déformation est préparée en laboratoire puis installée dans la structure de chaussée après sa construction. La figure 4.13 présente un schéma des plaques installées sur les sections 1, 2 et B et présente également une photographie de la plaque installée sur la section 2. Il est à noter que la plaque installée sur la section B ne contient pas de jauges numérotées 8. Les deux plaques installées dans la structure A sont détaillées à la figure 4.14

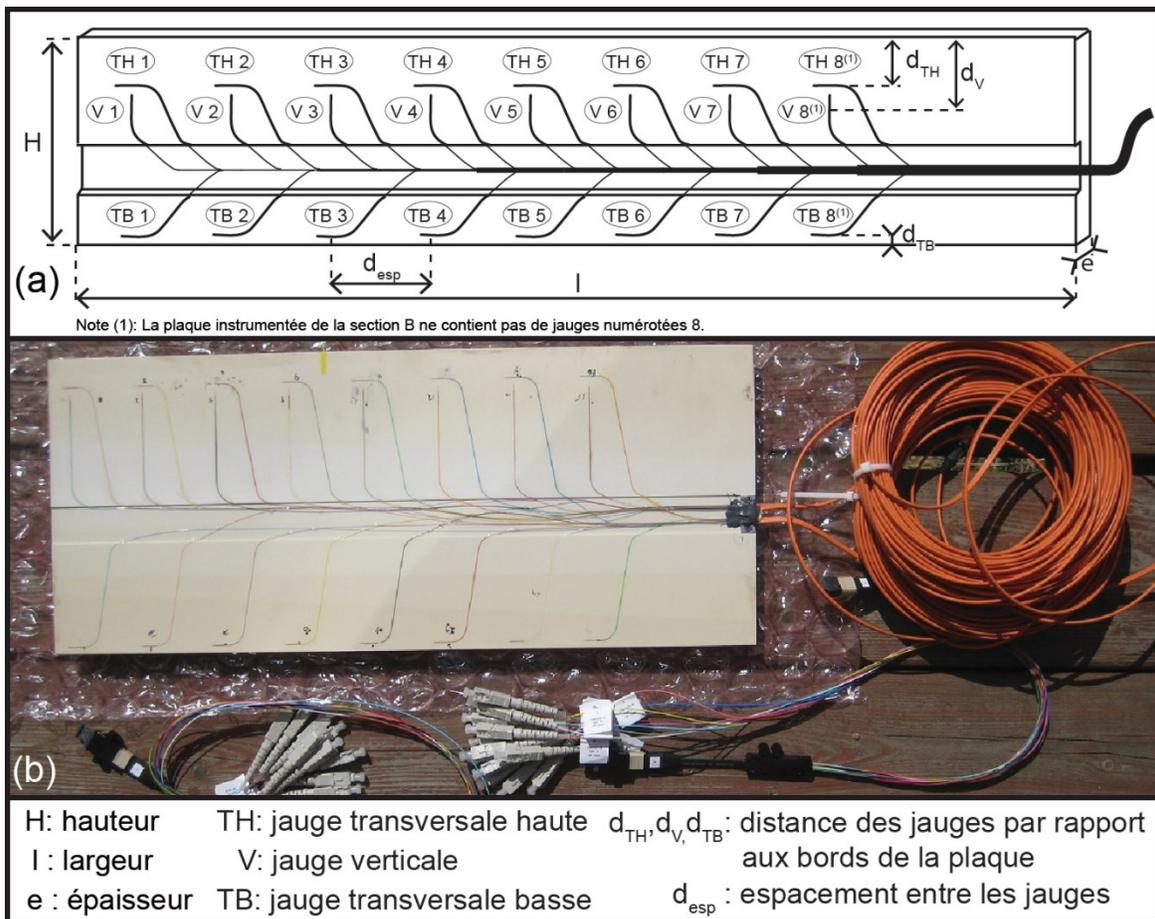
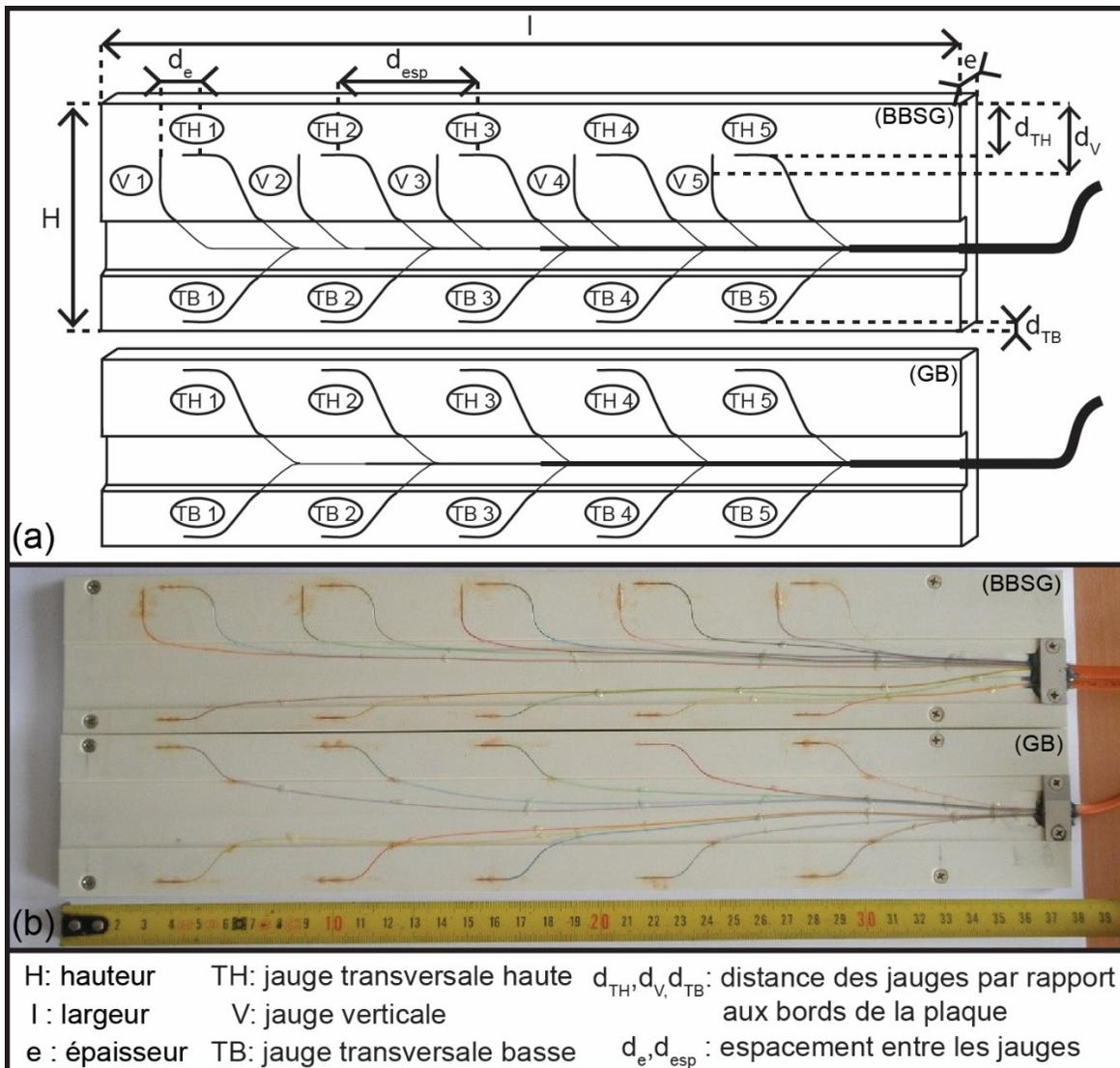


Figure 4.13 : Plaque de déformation multiniveau : (a) représentation schématique des plaques des sections 1, 2 et B, (b) photographie de la plaque de la section 2



**Figure 4.14 : Plaques de déformation multiniveaux installées sur la section A :
 (a) représentation schématique, (b) photographie des deux plaques**

Les plaques sont fabriquées sur mesure en fonction du nombre de jauges désiré et de l'épaisseur des couches bitumineuses. Leurs dimensions et le positionnement des jauges sur chacune des plaques du projet sont détaillés au tableau 4.2. Toutes les plaques ont une épaisseur de 5,2 mm et leurs hauteurs sont égales aux épaisseurs des couches bitumineuses. La longueur d'une plaque est fonction du nombre de jauges et de leur espacement. Les plaques sont fabriquées en polyphénylène sulfide. Des rainures de 0,5 mm de profondeur sont usinées en surface de la plaque pour accueillir les jauges à fibre optique. Les jauges sont installées et collées dans les rainures par le fournisseur. Les rayons de courbure des rainures permettent un guidage sécuritaire des fibres vers la rainure centrale. Cette rainure de 25 mm de largeur

permet la convergence des fibres vers l'extrémité de la plaque où elles sont regroupées dans un ou deux câbles de protection (en orange sur les photographies). Les jauges installées sur la plaque sont du même type que celles utilisées pour les carottes.

Tableau 4.2 : Dimensions des plaques et positionnement des jauges

Longueur	Section 1	Section 2	Section A (BBSG)	Section A (GB)	Section B
H (mm)	100	200	60	60	70
l (mm)	500	475	375	375	475
e (mm)	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
d _{esp} (mm)	50	50	60	60	60
d _e (mm)	0	0	10	0	0
d _{TB} (mm)	5	5	5	5	5
d _{TH} (mm)	20	20	5	5	10
d _V (mm)	30	30	10	—	20

— = Aucune jauge dans la direction verticale

Tel que présenté à la figure 4.15, les plaques de déformation sont installées transversalement à la direction de la charge. Dans cette position, les jauges de la plaque mesurent les déformations transversales et verticales. La première série de jauges, notée TH, mesure les déformations transversales proche de la surface. Pour les plaques des sections 1, 2 et B, la seconde série de jauges, notée V, mesure les déformations verticales 10 mm en dessous de la première série et l'axe des jauges est aligné avec le centre des jauges TH. La hauteur de la plaque installée dans la couche de BBSG n'est que 60 mm, les jauges verticales ont dû être transversalement décalées de 10 mm afin de garantir un rayon de courbure suffisamment élevé de la fibre. Pour cette plaque les jauges V mesurent la déformation 5 mm en dessous de la série TH. La couche de BBSG à une épaisseur de 70 mm, la plaque a été fixée 10 mm plus bas que la surface et les jauges TH, situées à 5 mm du haut de la plaque mesurent donc les déformations à 15 mm de profondeur comme indiquées à la figure 3.13. Finalement, la dernière série de jauges, située au bas de la plaque et notée TB, mesure les déformations transversales à 5 mm à partir du bas de la plaque.

Les plaques de la section 1 et 2 comportent 3 séries de 8 séries de jauges et celles-ci sont transversalement espacées de 50 mm. Pour les essais au manège de fatigue, sur les sections A

et B, l'espacement est de 60 mm afin d'obtenir des positions équitablement distribuées sous le pneu en fonction des positions des bras du manège. La plaque de la section B comporte 3 séries de 7 jauges alors que les séries des plaques de la section A n'en comportent que 5.

4.3.4.2 Mise en place

Les plaques instrumentées sont placées puis scellées dans la chaussée à l'aide de colle époxy. La figure 4.15 présente les deux principales étapes de leur installation. La première étape consiste à scier la chaussée avec une lame d'une épaisseur d'environ 7 mm. Après nettoyage et séchage des parois du trait de scie, la plaque est insérée. La rainure centrale de la plaque est préalablement remplie de colle époxy afin de protéger les fibres. Une fois la plaque en position, l'espacement avec les parois est d'environ 1 mm. Ce vide est comblé avec de la colle époxy afin de fixer la plaque aux couches bitumineuses.

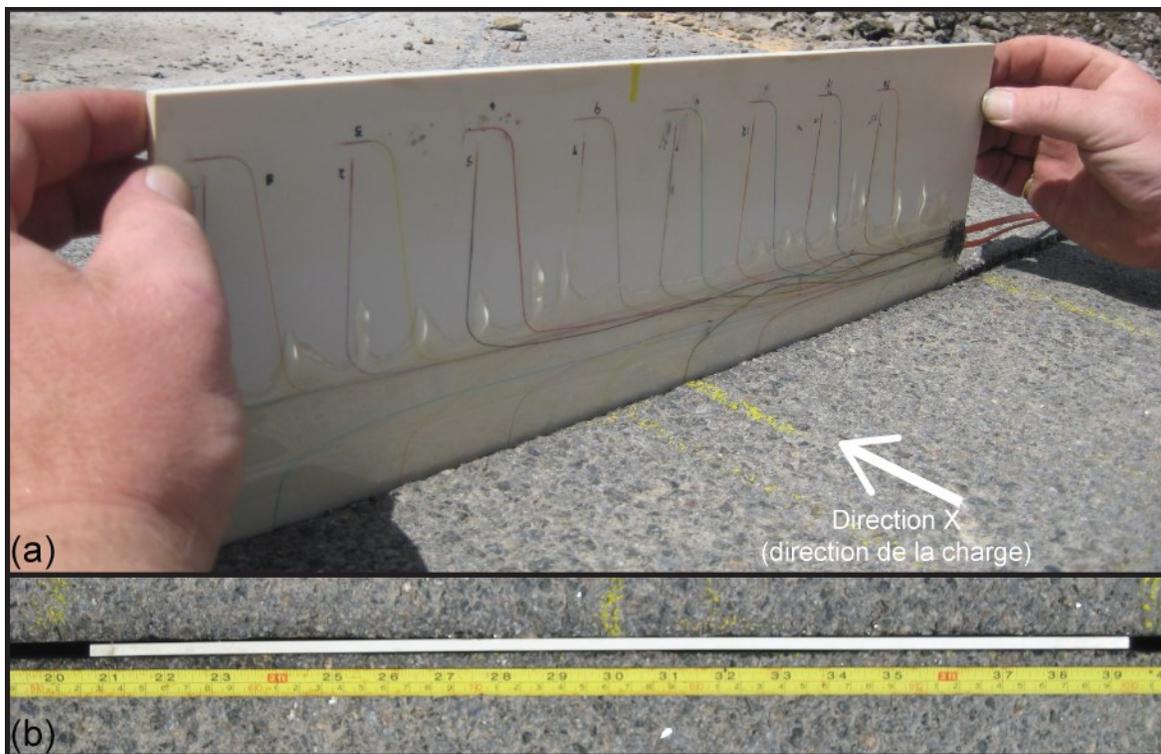


Figure 4.15 : Mise en place d'une plaque de déformation multiniveau : (a) mise en place dans la couche bitumineuse, (b) position finale avant collage (vue de dessus)

Dans le cas de la section A, les deux plaques sont installées l'une au-dessus de l'autre. L'objectif de cette disposition est de mesurer les déformations de part et d'autre de l'interface entre la couche de BBSG et la couche de GB. L'installation est effectuée en deux temps pour

ne pas coller les deux plaques ensemble avec la colle époxy. La plaque dans la couche de BBSG est donc mise en place une fois l'installation de la plaque dans la couche de GB complétée c'est-à-dire après le séchage complet de la colle époxy.

4.3.4.3 Durée de vie

La fonctionnalité des plaques de déformation multiniveaux des campagnes de mesure n° 1 et 2 au SERUL a été testée plusieurs fois par année. Ces relevés indiquent qu'elles sont capables de résister à plusieurs cycles de gel et de dégel. Comme dans le cas des carottes instrumentées, les mesures de la campagne expérimentale n° 3 au manège de fatigue se sont arrêtées après 120 000 chargements. Des mesures ponctuelles effectuées par la suite ont indiqué que pour la section A, toutes les jauges sont restées fonctionnelles jusqu'à 650 000 chargements. Pour la section B, un taux de fissuration élevé et un orniérage de plus de 15 mm ont été mesurés en surface de la structure. Tel que présenté à la figure 4.16(a), une importante fissure s'est développée transversalement à la plaque et à proximité de la zone de sortie des fibres (extrémité droite de la plaque). Les fibres optiques ont dû être sectionnées à ce niveau puisque toutes les jauges ont cessé de fonctionner simultanément après environ 300 000 chargements. La rupture de l'instrumentation est liée à l'endommagement des couches bitumineuses et non des capteurs eux-mêmes.

Les plaques des deux sections ont été extraites de la chaussée après 1 million de chargements afin de vérifier le collage et la qualité de leur mise en œuvre. Des barreaux d'enrobé contenant les plaques ont été découpés à la scie (figure 4.16(a)) puis usinés afin de contrôler l'épaisseur de colle autour de la plaque. La figure 4.16(b) montre un collage de bonne qualité pour la section A, puisque la colle époxy est présente sur l'ensemble de la plaque sans qu'aucune bulle d'air ne soit observée. La figure 4.16(c) présente l'état de l'interface entre les deux couches de la section A. Le liant d'accrochage a été correctement appliqué sur l'ensemble de la surface. La colle époxy ne liait pas les deux plaques ensemble puisqu'aucune présence de colle n'a été identifiée au niveau de l'interface. Pour la section B, l'enrobé entourant la plaque était très fissuré et des blocs se détachaient de la plaque. La colle était fissurée et il est difficile de conclure quant à la qualité du collage.



Figure 4.16 : Extraction des plaques de déformation : (a) découpe d'un bloc contenant les plaques (section B), (b) extraction (section A), (c) interface des couches (section A)

4.4 Validation des capteurs de déformation

La validation des capteurs de déformation comprend trois étapes : l'analyse de la précision des jauges à fibre optique en déterminant leur répétabilité, l'étude de leur fiabilité en comparant les écarts de mesure entre les jauges d'une même plaque et la comparaison de la réponse des trois types de capteurs résistifs et des deux types de capteurs à fibre optique avec les modélisations effectuées avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Les jauges étudiées sont uniquement celles localisées à la base du revêtement.

Les étapes de validation ont été effectuées pour les capteurs des 4 sections. Quatorze cas expérimentaux ont été sélectionnés pour la section A et la section B. Ces cas permettent d'analyser l'influence du type de pneu, de l'intensité de la charge et de la température sur la fiabilité des capteurs. Les cas sélectionnés sont détaillés au tableau 4.3 pour la section A et au tableau 4.4 pour la section B. Pour les sections 1 et 2, les analyses sont effectuées pour toutes les conditions expérimentales.

Tableau 4.3 : Cas expérimentaux sélectionnés pour la validation des capteurs de la section A au manège de fatigue de l'IFSTTAR

Cas n°	Type de pneu	Date	Rotation du manège (en tour)	Pression	Charge	Vitesse T=Tour	T° à 3 cm	T° à 9 cm
11	Jumelé	08/06/2011	13 200	830 kPa (120 psi)	4 tonnes	6 T/min (43 km/h)	20,5 °C	21 °C
12	Large							
13	Jumelé	08/06/2011	14 000	690 kPa (100 psi)	4 tonnes	6 T/min (43 km/h)	29 °C	28 °C
14	Large							
21	Jumelé	17/06/2011	19 100	830 kPa (120 psi)	5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	19,2 °C	20 °C
22	Large							
23	Jumelé	29/06/2011	38 400	830 kPa (120 psi)	5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	34,7 °C	31,8 °C
24	Large							
31	Jumelé	24/06/2011	27 400	830 kPa (120 psi)	5,8 tonnes	6 T/min (43 km/h)	20 °C	19,8 °C
32	Large							
33	Jumelé	24/06/2011	29 300	830 kPa (120 psi)	5,8 tonnes	6 T/min (43 km/h)	32,8 °C	28,7 °C
34	Large							
41	Jumelé	25/05/2011	4 000	830 kPa (120 psi)	6,5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	20,5 °C	20,1 °C
42	Jumelé	25/05/2011	4 800	830 kPa (120 psi)	6,5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	40,5 °C	36,2 °C

Tableau 4.4 : Cas expérimentaux sélectionnés pour la validation des capteurs de la section B au manège de fatigue de l'IFSTTAR

Cas n°	Type de pneu	Date	Rotation du manège (en tour)	Pression	Charge	Vitesse T=Tour	T° à 4 cm	T° à 8 cm
51	Jumelé	09/06/2011	14 800	690 kPa (100 psi)	4 tonnes	6 T/min (43 km/h)	22,5 °C	21 °C
52	Large							
55	Jumelé	09/06/2011	15 800	830 kPa (120 psi)	4 tonnes	6 T/min (43 km/h)	28 °C	25 °C
56	Large							
61	Jumelé	29/06/2011	36 500	830 kPa (120 psi)	5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	22 °C	21 °C
62	Large							
65	Jumelé	16/06/2011	18 600	830 kPa (120 psi)	5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	30,5 °C	28 °C
66	Large							
71	Jumelé	22/06/2011	26 200	830 kPa (120 psi)	5,8 tonnes	6 T/min (43 km/h)	23 °C	21 °C
72	Large							
73	Jumelé	22/06/2011	26 876	830 kPa (120 psi)	5,8 tonnes	6 T/min (43 km/h)	32,6 °C	29,8 °C
74	Large							
81	Jumelé	24/05/2011	2 700	830 kPa (120 psi)	6,5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	19,2 °C	21,5 °C
82	Jumelé	24/05/2011	3 400	830 kPa (120 psi)	6,5 tonnes	6 T/min (43 km/h)	37 °C	33,8 °C

4.4.1 Analyse de la répétabilité de la mesure des jauges à fibre optique.

La répétabilité de la mesure des capteurs est calculée pour les jauges à fibre optique installées sur les sections A et B. L'analyse statistique consiste à relever la déformation pour les 11 positions des bras du manège pendant quatre passages consécutifs. L'amplitude maximale du signal associée à chaque passage est extraite en suivant la méthode pic à pic.

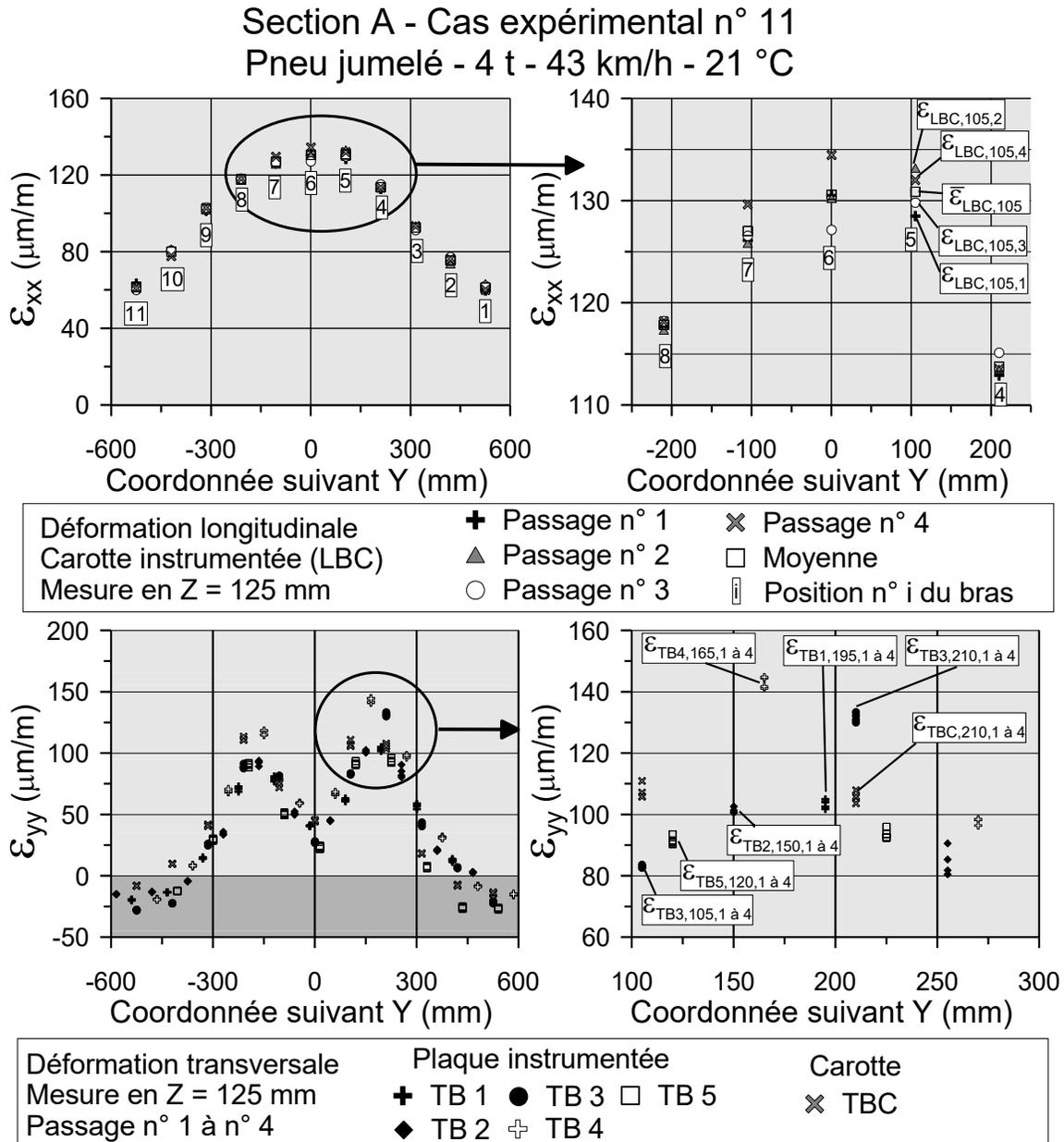


Figure 4.17 : Analyse de la répétabilité des mesures effectuées en Z = 125 mm avec la plaque multiniveau (capteurs TB) et la carotte (capteurs LBC et TBC) en fonction de la position sous la charge pour le cas expérimental n° 11 sur la section A

À partir de ces valeurs trois paramètres sont calculés : la moyenne (équation 4-1), la variance (équation 4-2) et l'écart-type (équation 4-3). L'écart-type possède la même dimension que la variable étudiée et permet de juger de la dispersion des valeurs autour de leur moyenne.

$$\bar{\varepsilon}_{i,y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \varepsilon_{i,y,j} \quad \text{Équation 4-1}$$

$$V(\varepsilon_{i,y}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{i,y,j} - \bar{\varepsilon}_{i,y})^2 \quad \text{Équation 4-2}$$

$$\sigma(\varepsilon_{i,y}) = \sqrt{V(\varepsilon_{i,y})} \quad \text{Équation 4-3}$$

$$COV(\varepsilon_{i,y}) = \frac{\sigma(\varepsilon_{i,y})}{\bar{\varepsilon}_{i,y}} \quad \text{Équation 4-4}$$

- Où : $\varepsilon_{i,y,j}$ = amplitude de la déformation de la jauge i en coordonnée y pour le passage j
 n = nombre de passages effectués lors des essais de répétabilité ($n=4$)
 $\bar{\varepsilon}_{i,y}$ = déformation moyenne de la jauge i en coordonnée y
 $V(\varepsilon_{i,y})$ = variance de la déformation de la jauge i en coordonnée y
 $\sigma(\varepsilon_{i,y})$ = écart-type de la déformation de la jauge i en coordonnée y
 $COV(\varepsilon_{i,y})$ = coefficient de variation de la déformation de la jauge i en coordonnée y

L'écart-type est un paramètre qui dépend du type de capteur et des conditions expérimentales. La figure 4.18 illustre la variation de l'écart-type des six capteurs transversaux de la section A, en fonction de la position sous le pneu et de la température. Le cas n° 11 correspond à des conditions de température modérée (autour de 20 °C) alors que pour le cas n° 13, les températures sont élevées (> 28 °C). Pour les six capteurs, l'écart-type est inférieur à 5 $\mu\text{m/m}$, ce qui correspond à une très bonne répétabilité des capteurs. Il est en moyenne plus élevé lorsque les mesures sont effectuées directement sous le pneu et lorsque les températures sont élevées. L'écart-type est un paramètre qui dépend de l'amplitude de la déformation mesurée par la jauge. Étant donné que l'amplitude des déformations varie entre les différentes conditions expérimentales, il est nécessaire d'associer l'écart-type à cette amplitude. Le coefficient de variation, noté COV, également appelé écart-type relatif permet cette association. Il est défini comme le ratio entre l'écart-type et la moyenne des valeurs (équation 4-4). La figure 4.18 représente la distribution du COV (%) en fonction de la position sous le pneu pour les deux mêmes conditions expérimentales que précédemment.

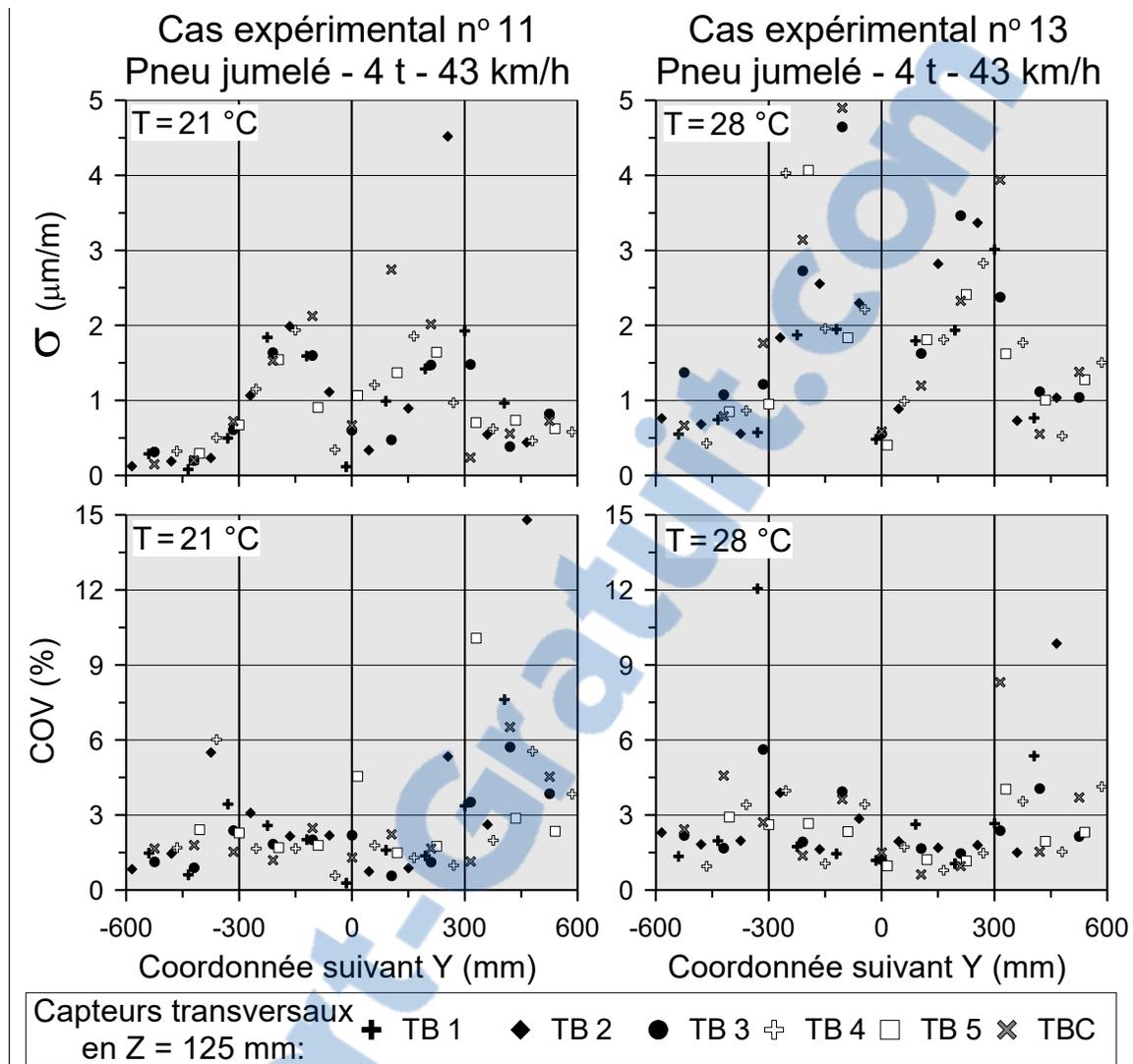


Figure 4.18 : Écart-type et COV des mesures effectuées en Z = 125 mm avec la plaque multiniveau (capteurs TB) et la carotte (capteur TBC) en fonction de la position sous la charge pour les cas expérimentaux n° 11 et 13 sur la section A

Pour les deux cas présentés, le COV est inférieur à 3 % à l'exception des données autour de -300 mm et +300 mm. Ces deux zones correspondent au passage de la contraction à l'extension proche de l'extérieur des pneus et par conséquent les déformations mesurées sont proche de zéro. Le COV est un outil d'analyse qui permet une comparaison directe entre toutes les conditions expérimentales, mais une attention particulière doit être portée aux valeurs pour lesquelles les amplitudes mesurées sont proche de zéro. L'écart-type a été moyenné pour les 11 positions sous le pneu et les résultats sont présentés à la figure 4.19. La figure présente les valeurs obtenues pour les jauges à fibre optique des sections A et B. Elle distingue également les résultats des températures modérées de ceux des températures chaudes.

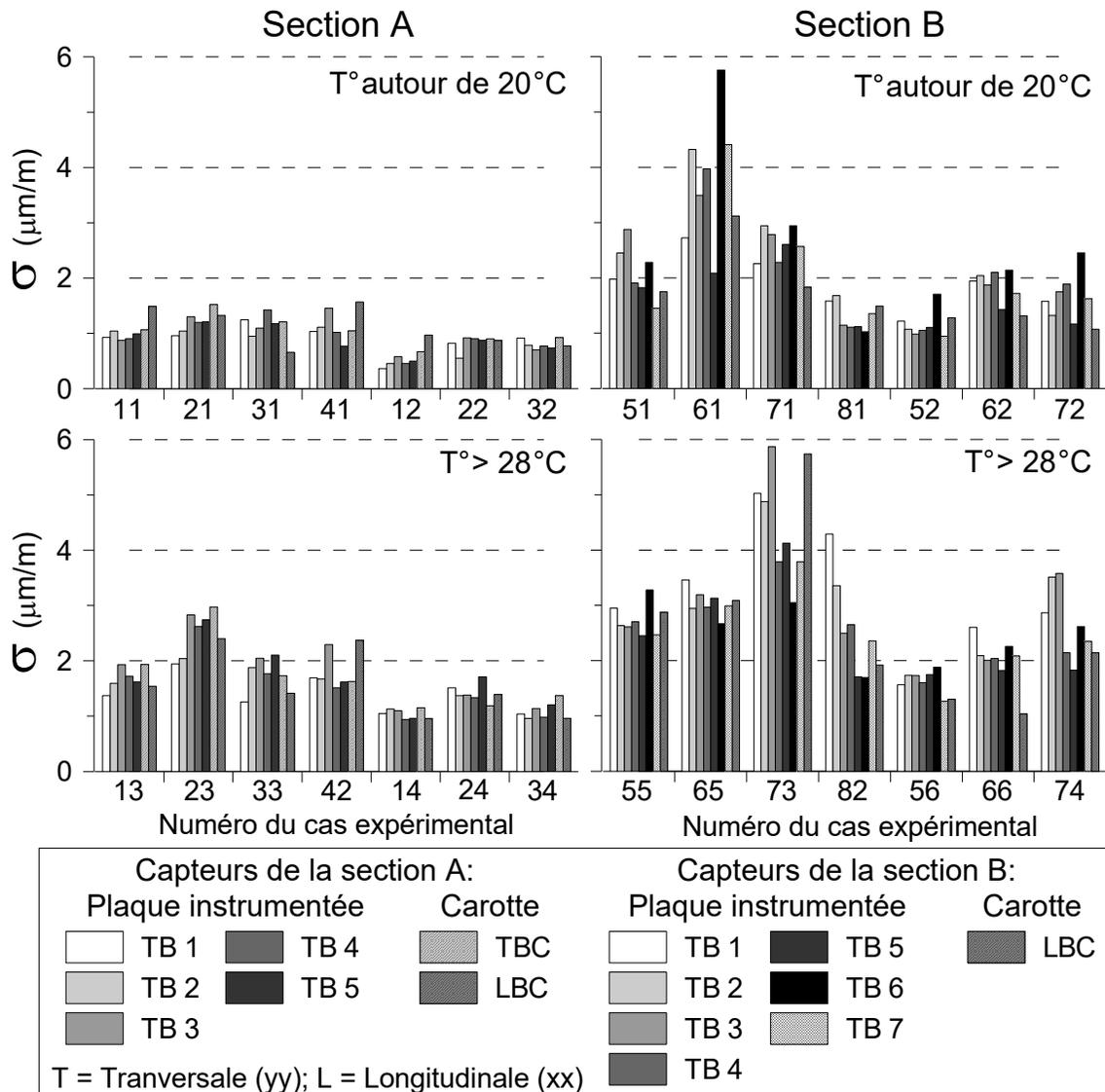


Figure 4.19 : Écart-type moyen des mesures effectuées en $Z = 125$ mm pour la section A et en $Z = 65$ mm pour la section B avec les capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique ont une très bonne répétabilité puisque tous les écarts-types sont inférieurs à $6 \mu\text{m/m}$ avec une valeur moyenne pour la section A de $1,3 \mu\text{m/m}$ et de $2,4 \mu\text{m/m}$ pour la section B. Il est à noter que tous les capteurs installés sur une même plaque possèdent approximativement le même écart-type. Lorsque les températures augmentent, les écarts-types sont plus élevés. Ils sont également plus élevés pour la section B car l'amplitude des déformations y est plus élevée. Les écarts-types calculés dans le cas des pneus jumelés sont en moyenne plus élevés que pour le pneu large. L'intensité de la charge n'a par contre pas d'influence significative sur les écarts-types. La figure 4.19 présente les écarts-types pour les

jauges installées sur les plaques et celles installées sur les carottes. Les résultats ne dépendent pas du type de capteur, mais uniquement des conditions expérimentales puisque les écarts-types sont du même ordre de grandeur pour les deux. Aucune différence significative n'apparaît entre les jauges orientées transversalement et longitudinalement.

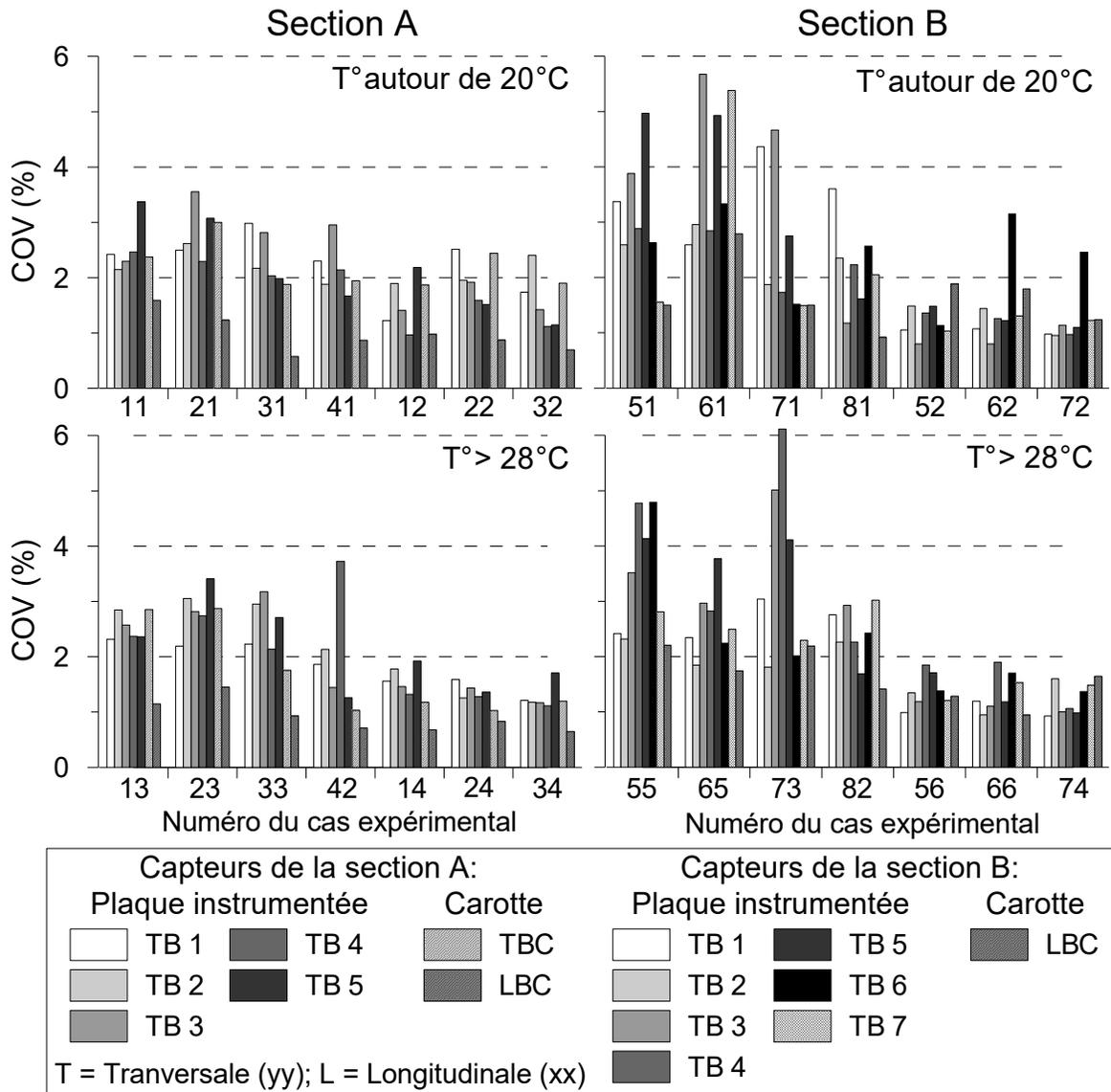


Figure 4.20 : COV moyen des mesures effectuées en $Z = 125$ mm pour la section A et en $Z = 65$ mm pour la section B avec les capteurs à fibre optique

La figure 4.20 détaille les résultats obtenus pour le COV. Celui-ci est en moyenne égal à 1,9 % pour la section A, contre 2,2 % pour la section B. Pour chaque condition expérimentale, les valeurs sont uniformes entre les capteurs, à l'exception des mesures effectuées avec le pneu jumelé sur la section B et en particulier pour les cas n° 61, 71, 55 et 73. Il n'y a pas d'écart



significatif entre les mesures effectuées pour les températures modérées et les températures élevées. La dispersion des mesures ne dépend donc pas des conditions de températures. De même, la dispersion ne dépend pas de l'intensité de la charge. Les COV sont cependant fonction du type de pneu. Ils sont plus faibles pour le pneu à bande large étant donné que celui-ci présente un bassin de déformation plus large avec seulement deux arêtes extérieures contre quatre pour le pneu jumelé (zones où les déformations sont de faibles amplitudes). Les jauges longitudinales présentent des COV très faibles (autour de 1 %) comparativement aux jauges orientées transversalement. Le COV des jauges à fibre optique ne dépend pas du type de capteur (plaque ou carotte), mais de leur orientation dans la couche bitumineuse.

4.4.2 Analyse de la dispersion des jauges des plaques instrumentées.

4.4.2.1 Méthodologie

Tel que présenté au paragraphe 3.4, un bassin de déformation est constitué des mesures obtenues à partir des jauges de la plaque auxquelles s'ajoute une courbe d'interpolation. Celle-ci est une série de Fourier d'ordre 4 où les coefficients sont déterminés en minimisant le résidu par la méthode des moindres carrés. L'objectif de l'analyse consiste à utiliser cette courbe d'interpolation afin de quantifier la dispersion des mesures. D'un point de vue théorique, si l'on considère que deux jauges d'une même plaque sont espacées de 50 mm, la déformation mesurée par une jauge doit être égale à celle mesurée par la seconde une fois la charge décalée d'un offset de 50 mm. Cette approche peut être généralisée à tous les capteurs de la plaque. Ainsi en mesurant la dispersion du nuage de point autour de la courbe d'interpolation, il est possible de quantifier la fiabilité des capteurs. Tous les bassins de déformation ainsi que les courbes d'interpolation sont détaillés à l'annexe 6. Un exemple du calcul de la dispersion pour le cas expérimental n° 11 (tableau 4.3) est présenté à la figure 4.21.

La dispersion des jauges se mesure en calculant le résidu entre les mesures expérimentales et la courbe d'interpolation. Ce calcul est effectué individuellement pour chaque jauge et pour toutes les coordonnées « y » sous la charge tel que présenté à l'équation 4-5. Les résidus sont ensuite standardisés afin de pouvoir être comparés pour les différentes conditions expérimentales. Cette étape consiste à les diviser par l'écart-type des valeurs estimées (ou valeurs interpolées) tel que détaillé à l'équation 4-6. Ce résidu standardisé, aussi appelé résidu

de Pearson, est de signe positif lorsque la jauge donne une valeur supérieure à l'interpolation. L'influence des conditions expérimentales sur la fiabilité des valeurs est évaluée en calculant pour chaque jauge la somme de leur résidu.

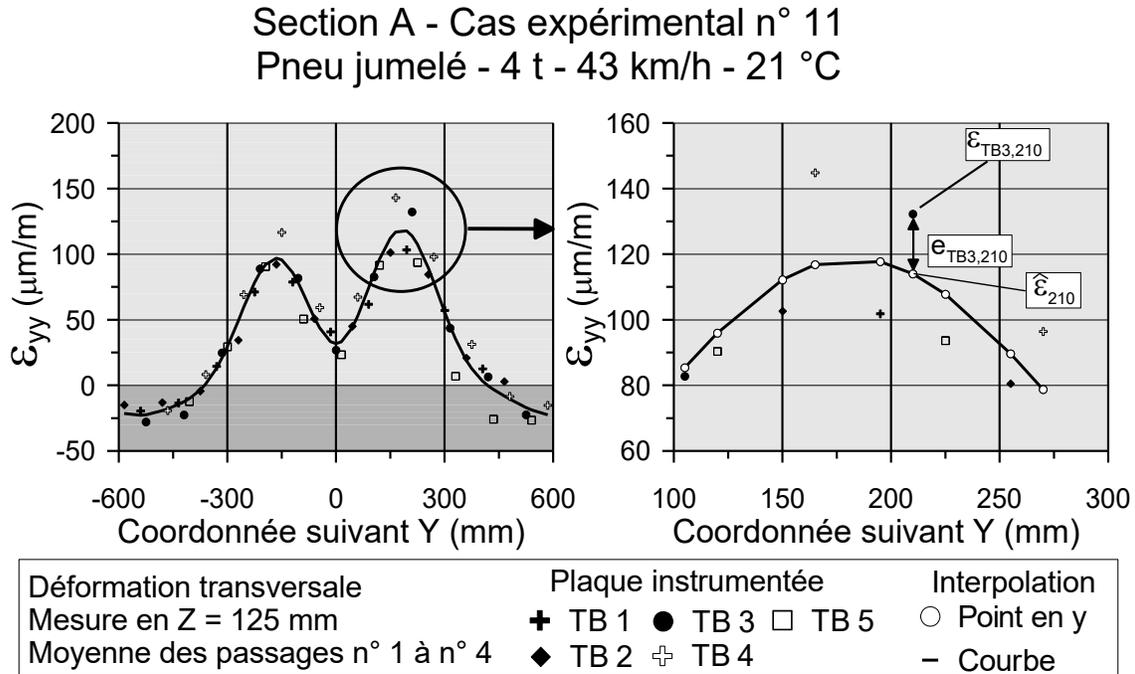


Figure 4.21 : Analyse de dispersion des mesures effectuées en Z = 125 mm avec la plaque multiniveau (capteurs TB) en fonction de la position sous la charge pour le cas expérimental n° 11 sur la section A

$$e_{i,y} = (\varepsilon_{i,y} - \hat{\varepsilon}_y) \quad \text{Équation 4-5}$$

$$r_{p_{i,y}} = e_{i,y} / \sqrt{V(\hat{\varepsilon})} = e_{i,y} / \sigma(\hat{\varepsilon}) \quad \text{Équation 4-6}$$

$$\chi_i^2 = \sum_y r_{p_{i,y}}^2 \quad \text{Équation 4-7}$$

Où : $\varepsilon_{i,y}$ = amplitude de la déformation de la jauge i en coordonnée y

$\hat{\varepsilon}_y$ = amplitude de la courbe d'interpolation en coordonnée y

$e_{i,y}$ = écart ou résidu de la jauge i en coordonnée y

$r_{p_{i,y}}$ = résidu standardisé ou résidu de Pearson de la jauge i

$\sigma(\hat{\varepsilon})$ = écart-type des valeurs interpolées

χ_i^2 = statistique du χ^2 pour la jauge i

La dernière étape de validation consiste à faire la somme des carrés des résidus. Ce paramètre statistique, présenté à l'équation 4-7 et noté χ^2 , permet de quantifier l'influence respective de

chaque jauge sur la qualité de l'interpolation. Il permet également de contrôler la fiabilité d'une jauge en la comparant aux autres jauges de la plaque. Une valeur de χ^2 faible signifie qu'il y a peu de dispersion entre les jauges. Si une jauge présente une défaillance et que celle-ci se traduit expérimentalement par des mesures plus élevées (ou plus faibles) que les autres jauges, sa valeur de χ^2 augmente significativement. Le paramètre χ^2 amplifie les écarts pouvant exister entre les mesures expérimentales et la courbe d'interpolation.

4.4.2.2 Résultats

La figure 4.22 présente la somme des résidus des capteurs transversaux des plaques des sections A, B, 1 et 2. La somme des résidus pour les sections A et B est calculée pour les 11 positions des bras du manège. Pour les sections 1 et 2, la somme est calculée pour 23 positions sous le pneu. Les sommes sont donc plus élevées pour les sections 1 et 2. Par définition de la courbe d'interpolation, les jauges présentent des résidus positifs ou négatifs puisque les valeurs se situent de part et d'autre de la courbe. Les graphiques montrent 3 types de comportements. Certaines jauges sont caractérisées par des résidus toujours positifs par exemple le capteur TB 1 de la section A. Cette observation est vraie indépendamment de l'intensité de charge, du type de pneu et de la température. À l'inverse, plusieurs jauges ont systématiquement des résidus négatifs par exemple le capteur TB 4 de la section A. Enfin, certaines jauges ont des résidus dont le signe est fonction des conditions expérimentales. Le nuage de point est engendré par la présence de jauges qui donnent systématiquement des valeurs plus faibles et d'autres des valeurs plus élevées. Les écarts restent cependant faibles et homogènes entre les différentes conditions expérimentales. Aucune corrélation n'a été trouvée entre l'amplitude des résidus et les conditions expérimentales ce qui signifie que la fiabilité des jauges est restée constante au cours des mesures. La différence d'amplitude des résidus de chaque jauge s'explique par le fait que celles-ci mesurent les déformations localement. À l'échelle du capteur, l'enrobé bitumineux possède une rigidité variable. Tel qu'énoncé précédemment, les jauges situées proche de granulats, dont le module est élevé, mesurent des déformations plus faibles que les jauges situées dans une zone où la proportion de granulats est plus faible. Ces différences se traduisent expérimentalement par des résidus plus ou moins importants. L'interpolation du nuage de points permet de moyenner ces valeurs et de réduire l'influence de l'hétérogénéité de l'enrobé bitumineux sur les mesures.

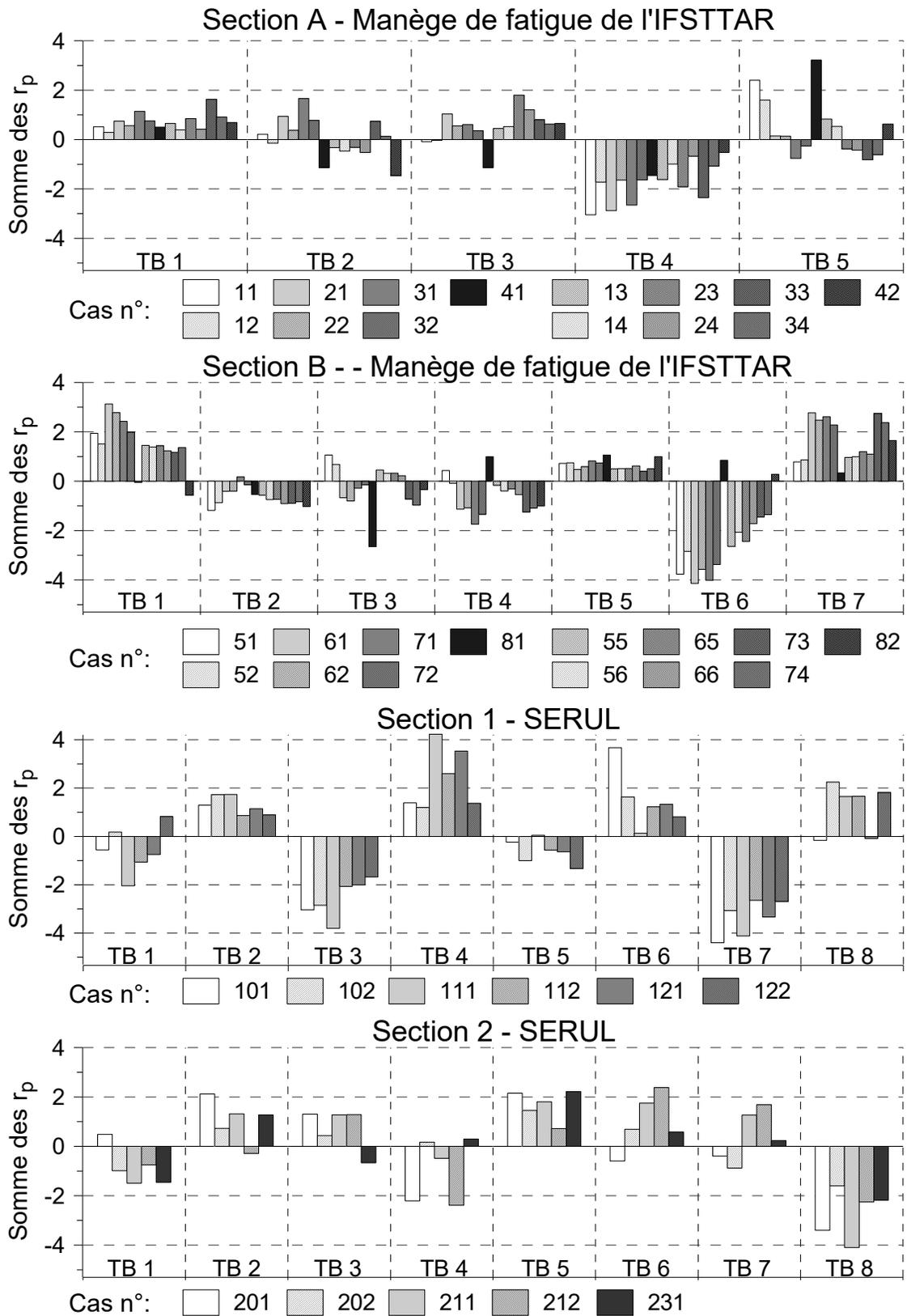


Figure 4.22 : Somme des résidus des mesures au bas du revêtement pour les jauges des plaques de déformation multiniveaux pour les quatre sections

La figure 4.23 détaille le paramètre χ^2 pour chaque jauge transversale des quatre sections. Pour les sections A et B, il est calculé en faisant la somme des carrés des résidus standardisés pour les 11 positions des bras du manège. Pour ces deux sections, une valeur d'environ 0,2 représente une erreur par rapport à la courbe d'interpolation de l'ordre de 10 % et des valeurs de l'ordre de 0,6 et 1,5 représentent des erreurs de 20 % et de 30 %. Pour la section A, χ^2 est en moyenne compris entre 0,3 et 0,6 ce qui représente de faibles écarts entre les valeurs mesurées et la courbe d'interpolation. De plus, la dispersion des mesures reste faible sur l'ensemble des conditions expérimentales de la section. Il est à noter que le paramètre χ^2 est cependant plus élevé lorsque le calcul est effectué avec le pneu jumelé comparativement au pneu large. Une influence du type de pneu sur la dispersion des valeurs a également été observée au niveau de la section 1. Pour la section B, χ^2 est en moyenne compris entre 0,3 et 0,8 à l'exception du capteur TB 6 où, pour cinq conditions expérimentales, les valeurs sont très supérieures à 2. Ces valeurs représentent des écarts de plus de 50 % entre les déformations relevées par la jauge TB 6 et celles des six autres jauges de la plaque. Pour ces cinq conditions expérimentales, les données enregistrées avec cette jauge n'ont pas été prises en compte pour la suite du projet car jugées non fiables. Des analyses complémentaires ont été effectuées afin de déterminer la raison de cette défaillance. Aucune anomalie n'a été relevée au niveau du signal de la jauge, ni même au niveau de la répétabilité de sa réponse. Une corrélation a cependant été identifiée entre l'importante augmentation des amplitudes mesurées et la durée de vie de la chaussée. La figure 4.24 présente l'évolution de χ^2 en fonction du nombre de répétitions de charge appliquée à la chaussée. La jauge TB 6 présente des écarts très supérieurs aux autres jauges à partir de 60 000 chargements et principalement pour des températures modérées. Aucune défaillance n'ayant été identifiée dans le fonctionnement de la jauge, les problèmes peuvent s'expliquer localement par une perte de l'adhérence avec la colle et par une dégradation locale du revêtement bitumineux. À la fin des mesures expérimentales, l'extraction de la plaque n'a montré aucune rupture de la plaque. Le plastique de la plaque ne s'est pas fissuré malgré la présence d'une fissuration élevée du revêtement bitumineux et de la colle entourant de la plaque. La section B étant la section la plus faible, l'augmentation des déformations mesurées par la jauge TB 6 peut être liée à la dégradation de la structure.

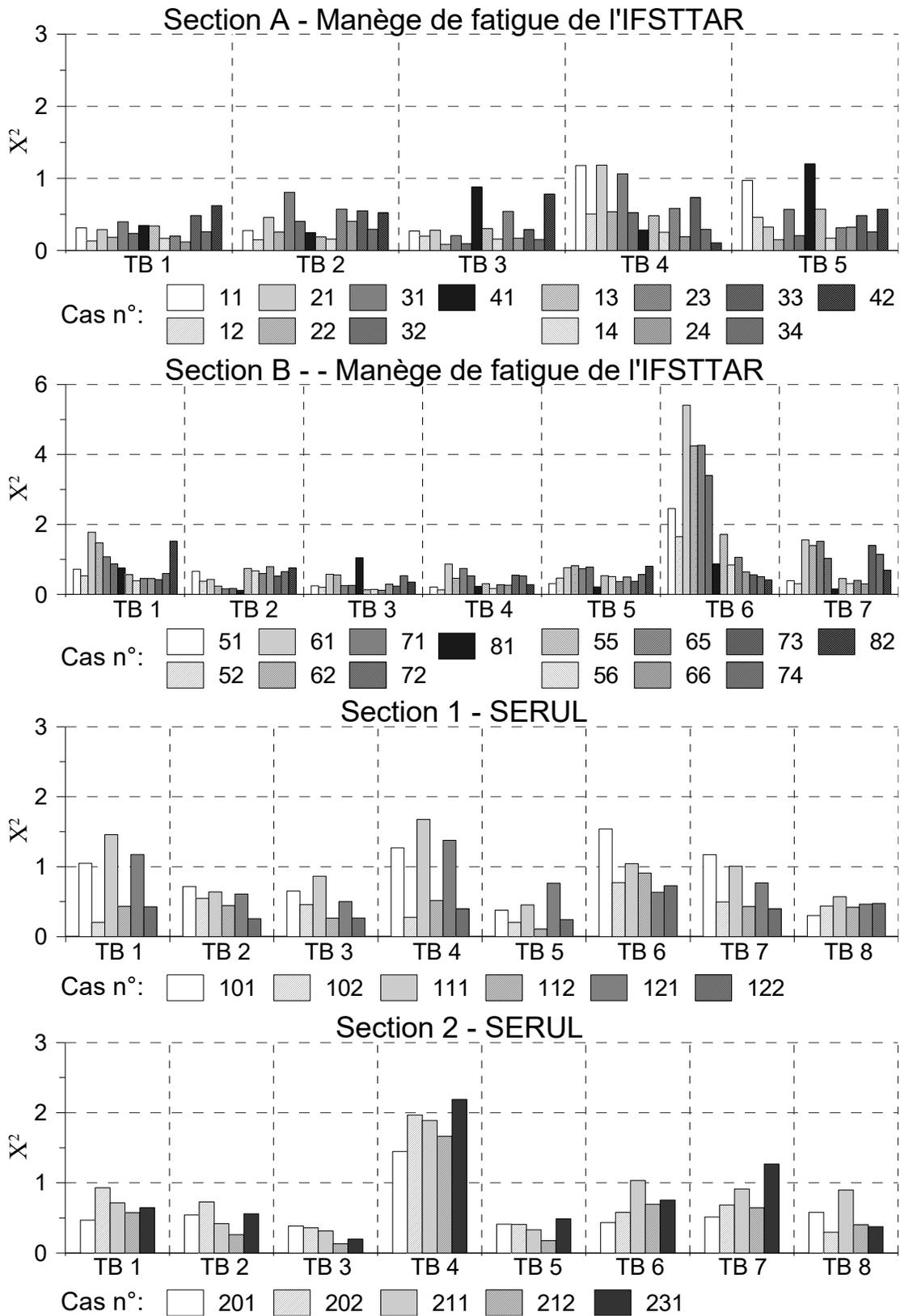


Figure 4.23 : Paramètre χ^2 des mesures au bas du revêtement pour les jauges des plaques de déformation multiniveaux pour les quatre sections

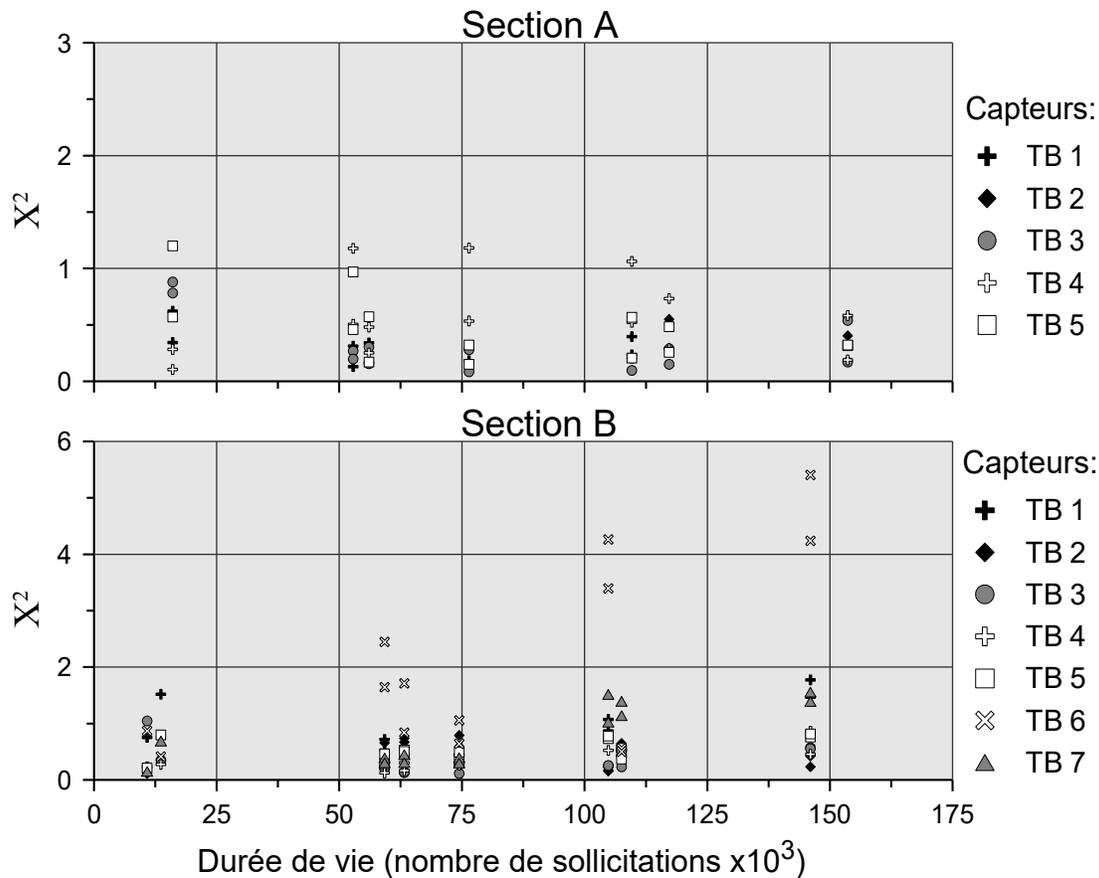


Figure 4.24 : Évolution du paramètre χ^2 des jauges transversales au bas des plaques de déformation multiniveaux en fonction de leur durée de vie pour les sections A et B

Pour les sections 1 et 2, χ^2 est calculé à partir de 23 positions distinctes de la charge par rapport aux capteurs. Pour ces deux sections, un paramètre χ^2 d'environ 0,5 représente une erreur entre les mesures et la courbe d'interpolation de 10 %. Pour des erreurs de l'ordre de 20 %, χ^2 est d'environ 1,5. Pour les deux sections, χ^2 est en moyenne compris entre 0,3 et 0,9 ce qui représente des écarts inférieurs à 15 % entre les valeurs mesurées et la courbe d'interpolation. Le capteur TB 4 est une exception avec une moyenne de 1,8. Une analyse complémentaire des bassins de déformations montre que les déformations mesurées directement sous le centre de la charge par la jauge TB 4 sont beaucoup plus élevées qu'avec les autres jauges (de l'ordre de 30 %). Cette observation est vraie pour les cinq conditions expérimentales. À l'exception de cette jauge, les écarts restent faibles pour les deux sections et le niveau de fiabilité des jauges est constant sur l'ensemble des conditions expérimentales.

4.4.3 Analyse comparative entre les différents types de capteurs

4.4.3.1 Méthodologie

L'analyse comparative entre les différents types de capteurs ne s'applique qu'aux mesures des sections A et B. Elle consiste à tracer le bassin des déformations obtenu à partir de chaque capteur et à les comparer aux modélisations ViscoRoute© 2.0. Les valeurs obtenues avec le logiciel ViscoRoute© 2.0 sont utilisées comme point de référence pour une comparaison entre tous les capteurs et n'a pas pour objectif de définir le type de capteur le mieux adapté à la lecture des déformations. La comparaison permet cependant d'évaluer l'effet des conditions de charges et des conditions de températures sur la lecture de chaque capteur. L'étude comparative a été effectuée pour les déformations longitudinales (ϵ_{xx}) et transversales (ϵ_{yy}). Les résultats pour le cas n° 21 (tableau 4.3) sont présentés à la figure 4.25. L'analyse des 28 conditions expérimentales est détaillée à l'annexe 6.

L'analyse des déformations longitudinales porte sur 6 capteurs (2 plexiglas®, 2 aluminium, 1 TML et 1 carotte instrumentée) pour la section A et 4 capteurs (2 aluminium, 1 TML et 1 carotte instrumentée) pour la section B. La jauge orientée longitudinalement et située au bas de la carotte instrumentée est notée LBC. Les points indiqués sur le graphique représentent les mesures relevées pour les 11 positions du manège. À chaque position y , l'écart entre la déformation mesurée et la modélisation ViscoRoute© 2.0 est calculé suivant l'équation 4-8. Cet écart est standardisé (équation 4-9) par l'écart-type des valeurs modélisées. Enfin, la somme des carrés des résidus est calculée (équation 4-10) afin d'obtenir une valeur de χ^2 pour chaque capteur. Plus ce paramètre est élevé, plus les écarts entre les mesures expérimentales et les modélisations sont élevés.

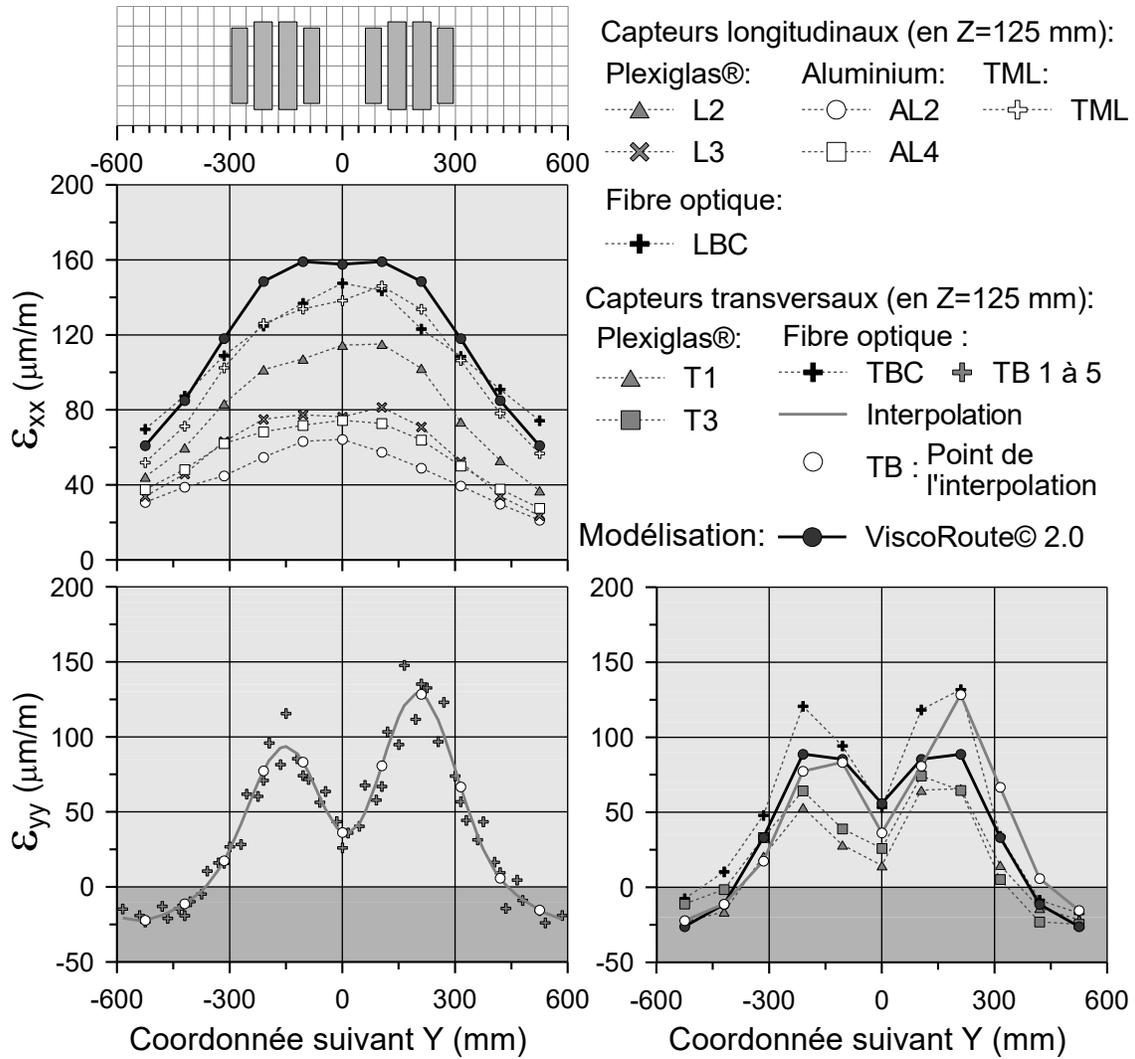


Figure 4.25 : Analyse comparative entre les mesures en $Z = 125$ mm des différents types de capteurs et les modélisations pour le cas expérimental n° 21 de la section A

$$e_{i,y} = (\varepsilon_{i,y} - \varepsilon_{Viscoroute,y}) \quad \text{Équation 4-8}$$

$$r_{p_{i,y}} = e_{i,y} / \sqrt{V(\varepsilon_{Viscoroute})} = e_{i,y} / \sigma(\varepsilon_{Viscoroute}) \quad \text{Équation 4-9}$$

$$\chi_i^2 = \sum_y r_{p_{i,y}}^2 \quad \text{Équation 4-10}$$

- Où :
- $\varepsilon_{i,y}$ = amplitude de la déformation du capteur i en coordonnée y
 - $\varepsilon_{Viscoroute,y}$ = amplitude de la déformation modélisée en coordonnée y
 - $e_{i,y}$ = résidu (ou écart) du capteur i en coordonnée y
 - $r_{p_{i,y}}$ = résidu standardisé ou résidu de Pearson du capteur i
 - $\sigma(\varepsilon_{Viscoroute})$ = écart-type des valeurs de la modélisation
 - χ_i^2 = statistique du χ^2 du capteur i

Au niveau de la section A, l'analyse des déformations transversales porte sur 4 capteurs (2 plexiglas®, 1 carotte instrumentée et la plaque de déformation). La jauge orientée transversalement et située au bas de la carotte est notée TBC sur les figures. Pour la section B, l'analyse est effectuée pour un capteur plexiglas® et la plaque de déformation. Comme pour les déformations longitudinales, l'écart entre les mesures expérimentales et les modélisations ViscoRoute© 2.0 est calculé puis standardisé pour les 11 positions sous le pneu. Le paramètre χ^2 associé à chaque capteur est ensuite calculé. L'analyse comporte cependant une étape préliminaire. Les données obtenues avec la plaque de déformation ne peuvent pas être directement comparées aux autres capteurs puisque les coordonnées y des jauges installées sur la plaque ne correspondent pas aux coordonnées des autres capteurs. L'étape préliminaire consiste donc à déterminer une mesure représentative pour les 11 positions du bras du manège en fonction du nuage de points obtenu avec l'ensemble des jauges de la plaque. L'analyse de la dispersion des jauges d'une plaque, effectuée au paragraphe 4.4.2, a montré que la courbe d'interpolation peut être utilisée à cette fin. Tel que présenté à la figure 4.25, 11 points dont les coordonnées « y » correspondent à ceux des autres capteurs sont extraits de la courbe d'interpolation. Ces 11 points, notés TB, sont ensuite représentés sur un même graphique que les autres capteurs et sont les valeurs considérées pour le calcul du résidu.

4.4.3.2 Résultats

Les résultats pour la section A sont présentés à la figure 4.26. Les résultats sont séparés suivant la direction des capteurs et sont individuellement détaillés pour chaque capteur en fonction des conditions expérimentales. Au niveau des déformations longitudinales, un paramètre χ^2 de l'ordre de 1, de 3, de 9 et de 25 représente respectivement des écarts entre les capteurs et les modélisations d'environ 10 %, 20 %, 30 % et 50 %. Le détail des bassins de déformation (annexe 6) montre que sur l'ensemble des conditions expérimentales, les capteurs longitudinaux mesurent des déformations plus faibles que les valeurs modélisées. Le capteur LBC pour le cas n° 41 et le capteur TML pour les cas n° 11 et 13 sont des exceptions puisque les déformations mesurées sont plus élevées que les modélisations. Les écarts les plus faibles ont été identifiés pour le capteur LBC, TML et pour le capteur plexiglas® L2. En moyenne, le paramètre χ^2 est compris entre 2 et 8, soit des écarts inférieurs à 25 %.

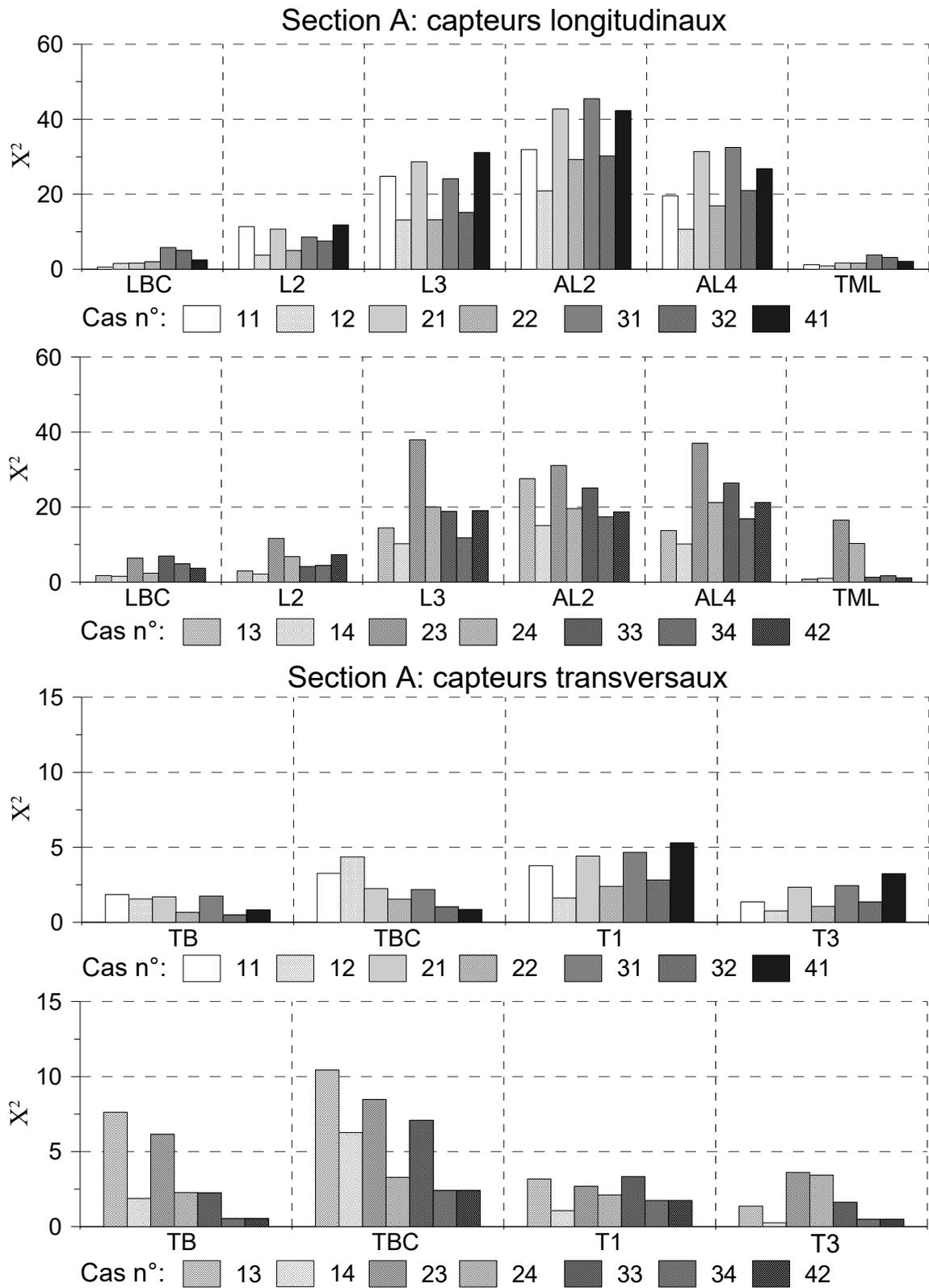


Figure 4.26 : Paramètre χ^2 pour les capteurs résistifs et à fibre optique situés à la base du revêtement bitumineux de la section A

Le second capteur plexiglas® (capteur L3) mesure des déformations beaucoup plus faibles de l'ordre de 40 %. Enfin, les deux capteurs aluminium présentent des écarts de plus de 50 % ce qui se traduit par des valeurs de χ^2 comprises entre 20 et 35. Pour les capteurs plexiglas® et aluminium, les écarts sont plus faibles pour les températures élevées comparativement aux températures modérées. À l'inverse, pour les capteurs LBC et TML, les écarts augmentent lorsque les températures augmentent. Pour les 4 types de capteurs, les écarts entre les mesures expérimentales et les modélisations sont plus élevés lorsque les comparaisons sont faites avec le pneu jumelé comparativement au pneu large.

Au niveau des déformations transversales, un paramètre χ^2 de l'ordre de 0,15, de 0,5, de 1,8 et de 3,0 représente respectivement des écarts entre les capteurs et les modélisations d'environ 10 %, 20 %, 30 % et 50 %. L'analyse détaillée des bassins de déformation montre que les capteurs plexiglas® T1 et T3 mesurent des déformations plus faibles que les valeurs modélisées sur l'ensemble des conditions expérimentales. À l'inverse, la plaque de déformation (TB) et la carotte instrumentée (TBC) mesurent des déformations plus élevées. En moyenne, les déformations relevées avec les capteurs plexiglas® sont plus de 30 % plus faibles que les modélisations pour les températures modérées. Lorsque la température augmente, les écarts diminuent, mais les différences restent supérieures à 30 %. Les capteurs à fibre optique mesurent en moyenne des déformations entre 20 % et 30 % plus élevées que les valeurs modélisées pour les températures modérées. Ces écarts sont plus élevés pour les températures chaudes. Pour une même condition de charge et de température, le paramètre χ^2 est plus faible lorsque les calculs sont effectués avec le pneu large comparativement au pneu jumelé.

Les résultats pour les capteurs de la section B sont présentés à la figure 4.27 et tous les bassins de déformation de l'étude sont également disponibles à l'annexe 6. Au niveau des déformations longitudinales, un paramètre χ^2 de l'ordre de 1,5, de 4, de 10 et de 20 représente respectivement des écarts entre les capteurs et les modélisations d'environ 20 %, 30 %, 50 % et 70 %.

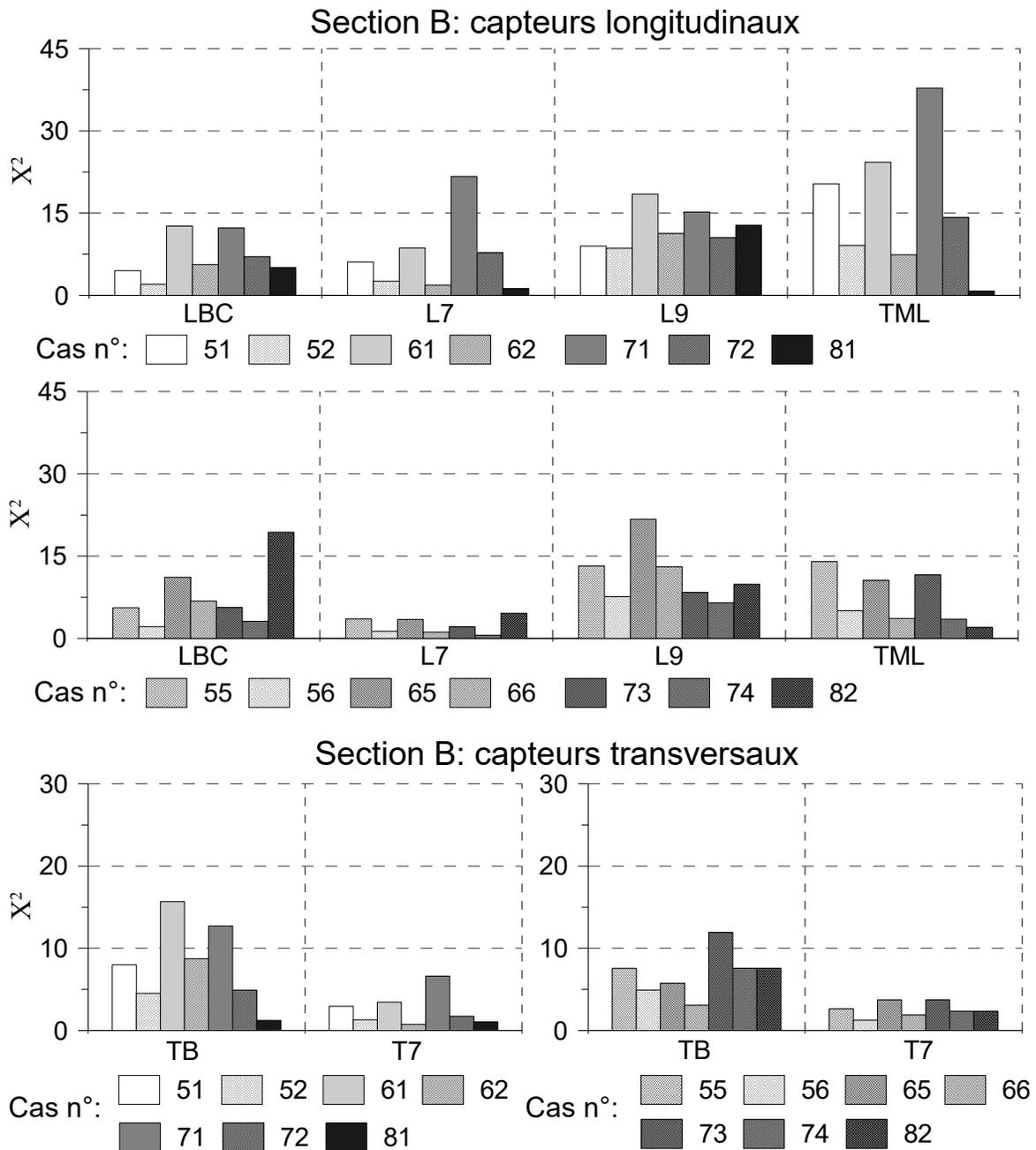


Figure 4.27 : Paramètre χ^2 pour les capteurs résistifs et à fibre optique situés à la base du revêtement bitumineux de la section B

Les bassins de déformation montrent que le capteur TML et le capteur aluminium L7 mesurent des déformations plus élevées que les modélisations à l'exception des cas 81 et 82 où les mesures sont plus faibles. Le capteur LBC et le capteur aluminium L9 mesurent systématiquement des déformations moins élevées que les valeurs modélisées. Cette différence est de l'ordre de 40 % à 60 %. Les deux capteurs aluminium ainsi que le capteur

TML présentent des écarts moins élevés lorsque la température augmente. Comme pour la section A, les valeurs de χ^2 sont beaucoup plus faibles lorsque le calcul est opéré avec les mesures effectuées avec le pneu large. Au niveau des déformations transversales, un paramètre χ^2 de l'ordre de 0,5, de 1, de 2,5 et de 5 représente respectivement des écarts entre les capteurs et les modélisations d'environ 20 %, 30 %, 50 % et 70 %. Le capteur aluminium T7 et la plaque de déformation mesurent des déformations plus élevées que les résultats des modélisations. En fonction des conditions expérimentales, les déformations mesurées sont en moyenne 40 % à 80 % plus élevés que les modélisations. Pour ces deux capteurs, les écarts sont plus faibles lorsque la température augmente et lorsque les mesures sont effectuées avec le pneu large.

4.4.4 Discussion

L'analyse comparative des bassins de déformation montre des écarts significatifs entre les différents types de capteurs mais également entre les capteurs d'un même type. Les jauges aluminium mesurent des déformations beaucoup plus faibles que les autres capteurs. À l'inverse, les déformations mesurées par les deux types de capteurs à fibre optique (la plaque et la carotte) et les capteurs TML sont les plus élevées. Pour plusieurs conditions expérimentales, les jauges aluminium mesurent des déformations deux à trois fois plus faibles que les autres capteurs. Le comportement des capteurs plexiglas® est plus hétérogène. Pour les déformations transversales, les mesures effectuées par ces capteurs sont plus faibles que celles des capteurs à fibre optique. À l'inverse, en direction longitudinale, leurs mesures sont parfois les plus élevées (L2 et L7) ou parmi les plus faibles (capteur L3 et L9). Pour l'ensemble des conditions expérimentales, les résultats sont donc très disparates et afin d'avoir un point de comparaison, les mesures expérimentales sont comparées aux modélisations effectuées avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Comme détaillé au paragraphe précédent, les mesures sont parfois proches des modélisations comme pour les capteurs LBC, L2 et TML de la section A ou les capteurs L7 et T7 de la section B. À l'inverse, les écarts sont parfois plus significatifs comme pour les capteurs L3, AL2, AL4 pour la section A et les capteurs TML, L9 et TB pour la section B.

Les différences de mesure entre un même type de capteurs, entre les différents capteurs et avec les modélisations s'expliquent par deux raisons principales :

- Incertitude sur l'emplacement et l'orientation des capteurs

Les capteurs résistifs sont installés pendant la phase de mise en œuvre des couches bitumineuses. Bien que ces capteurs soient installés sur une fine épaisseur d'enrobé bitumineux qui limite leur déplacement, des mouvements (rotation et translation) peuvent survenir lors de la pose de la couche bitumineuse et pendant le compactage. Afin de quantifier l'influence de l'orientation des capteurs sur la forme et l'amplitude des signaux de déformation, une étude est effectuée avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Elle consiste à déterminer le tenseur des déformations dans le repère principal (X,Y,Z) puis d'appliquer un changement de repère afin d'obtenir les déformations dans le repère du capteur. Les trois rotations possibles du capteur sont ainsi évaluées. La première, d'un angle α , est celle autour de l'axe X. La matrice de rotation associée est présentée à l'équation 4-11. La seconde, d'un angle β , correspond à une rotation du capteur autour de l'axe Y et enfin la dernière, d'un angle γ , est celle autour de l'axe Z. L'équation 4-12 et l'équation 4-13 détaillent les matrices associées à ces deux rotations. La figure 4.28 illustre ces trois rotations pour un capteur en H. Le tenseur des déformations dans le nouveau repère du capteur est alors déterminé à partir de l'équation 4-14.

$$R_X(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad \text{Équation 4-11}$$

$$R_Y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad \text{Équation 4-12}$$

$$R_Z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Équation 4-13}$$

$$\bar{\varepsilon}_{\alpha,\beta,\gamma} = R^{-1} \cdot \bar{\varepsilon} \cdot R \quad \text{Équation 4-14}$$

Où : $R_X(\alpha)$ = matrice de rotation d'angle α autour de l'axe X
 $R_Y(\beta)$ = matrice de rotation d'angle β autour de l'axe Y
 $R_Z(\gamma)$ = matrice de rotation d'angle γ autour de l'axe Z
R = matrice de passage (produit des trois matrices de rotation)
 $\bar{\varepsilon}$ = tenseur des déformations

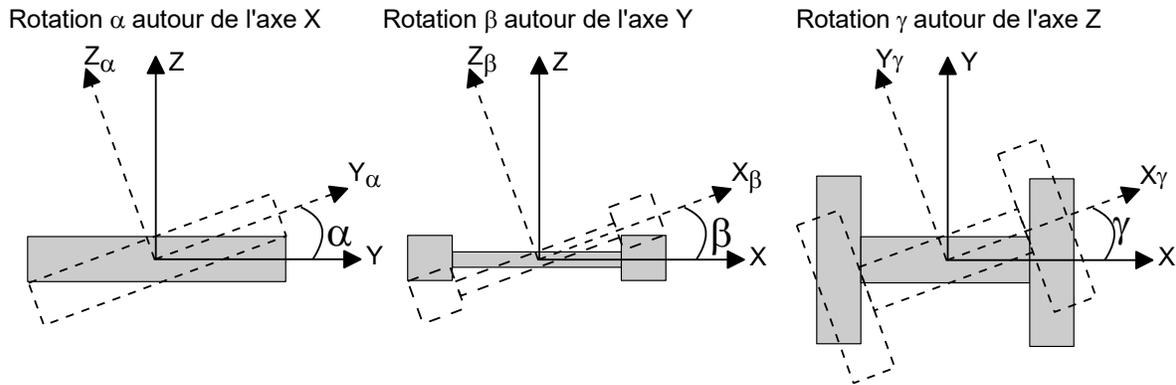


Figure 4.28 : Rotation des capteurs autour des trois axes par rapport à leur position théorique

Les données de modélisation sont celles du cas expérimental n° 21 (tableau 4.3). L'étude porte sur l'influence respective de chaque rotation. Lorsque l'un des angles varie, les deux autres sont maintenus à zéro. La figure 4.29 présente l'influence des angles β et γ sur les déformations longitudinales. La rotation autour de l'axe Y influence principalement l'extension maximale mesurée par le capteur. Plus l'angle β augmente, plus l'amplitude diminue. À l'inverse, la rotation autour de l'axe Z influence principalement la contraction maximale mesurée à l'avant et à l'arrière de la charge. Si l'angle γ est positif, le maximum de contraction mesurée à l'avant de la charge diminue. Lorsque celui-ci est négatif, la contraction à l'arrière de la charge diminue. L'effet de l'angle α n'est pas présenté sur les graphiques, car la rotation autour de l'axe X n'a théoriquement aucune influence sur les déformations. En pratique, cela n'est pas le cas puisque le capteur possède un profil en H et il n'est donc pas symétrique autour de l'axe X. L'orientation des ancrages influence la mesure de la déformation, mais cet effet n'est pas quantifiable avec le logiciel ViscoRoute© 2.0.

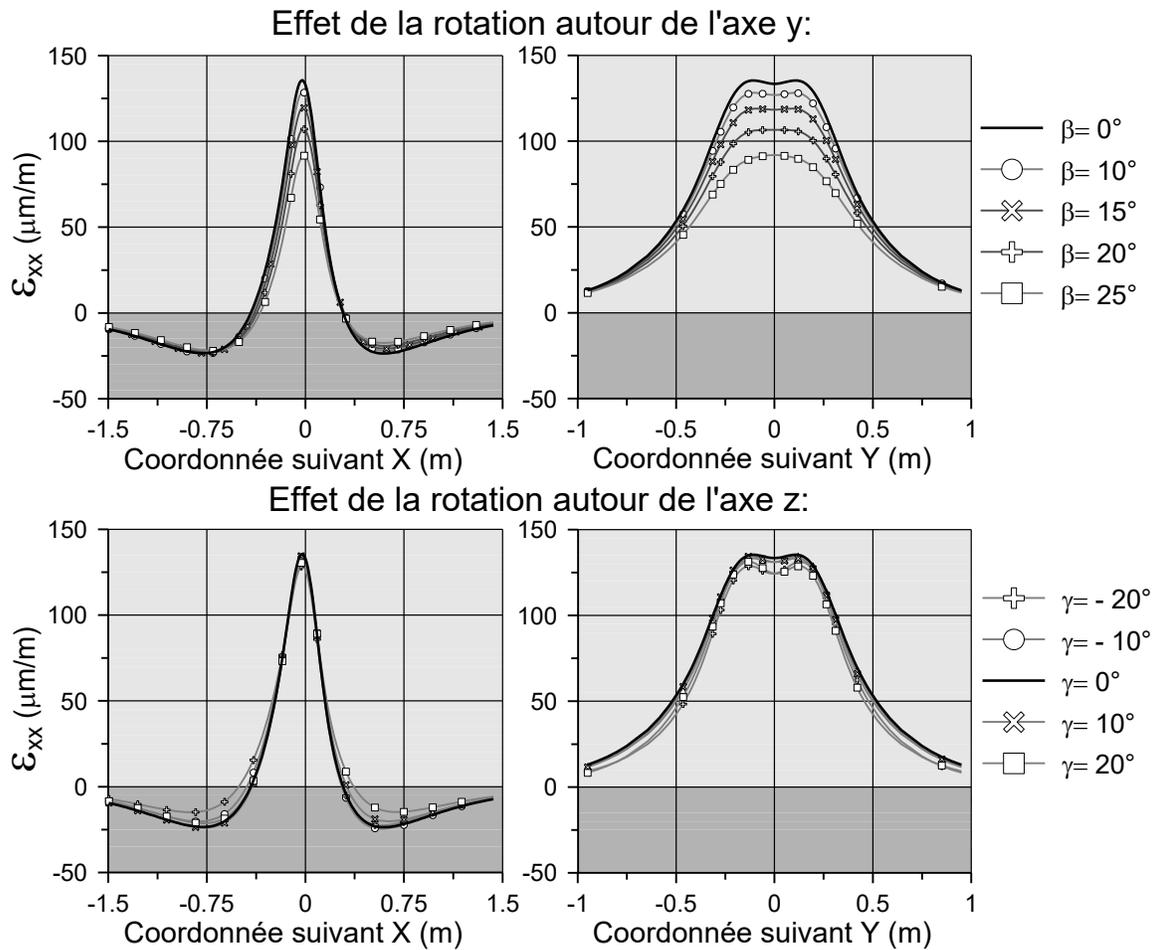


Figure 4.29 : Effet de l'orientation du capteur sur les déformations longitudinales

La figure 4.30 présente l'influence des angles α et γ sur les déformations transversales. Plus la rotation autour de l'axe x est importante, plus l'extension maximale mesurée par le capteur est faible. Comme pour les déformations longitudinales, l'angle γ n'influence pas l'amplitude du signal mais sa forme générale. Plus l'angle γ augmente, plus le temps de sollicitation du signal est faible. L'effet de l'angle β n'est pas présenté sur les graphiques, car la rotation autour de l'axe Y n'a théoriquement aucune influence sur les déformations transversales.

L'influence des angles β et α sur l'amplitude des déformations longitudinales et transversales est détaillée à la figure 4.31. Sur la figure, les déformations sont normalisées par le cas parfait où les angles sont tous nuls ($\alpha = \beta = \gamma = 0^\circ$) et présentées en pourcentage. La figure montre que pour des angles inférieurs à 10° , les écarts restent inférieurs à 10 % de l'amplitude maximale. Par la suite, l'amplitude diminue fortement. Si un capteur possède par exemple un angle β de 30° , un écart de 40 % de la déformation longitudinale pourrait être mesuré avec un

autre capteur parfaitement aligné. Dans la direction transversale, un angle α de 30° engendre une baisse de 55 % de la mesure.

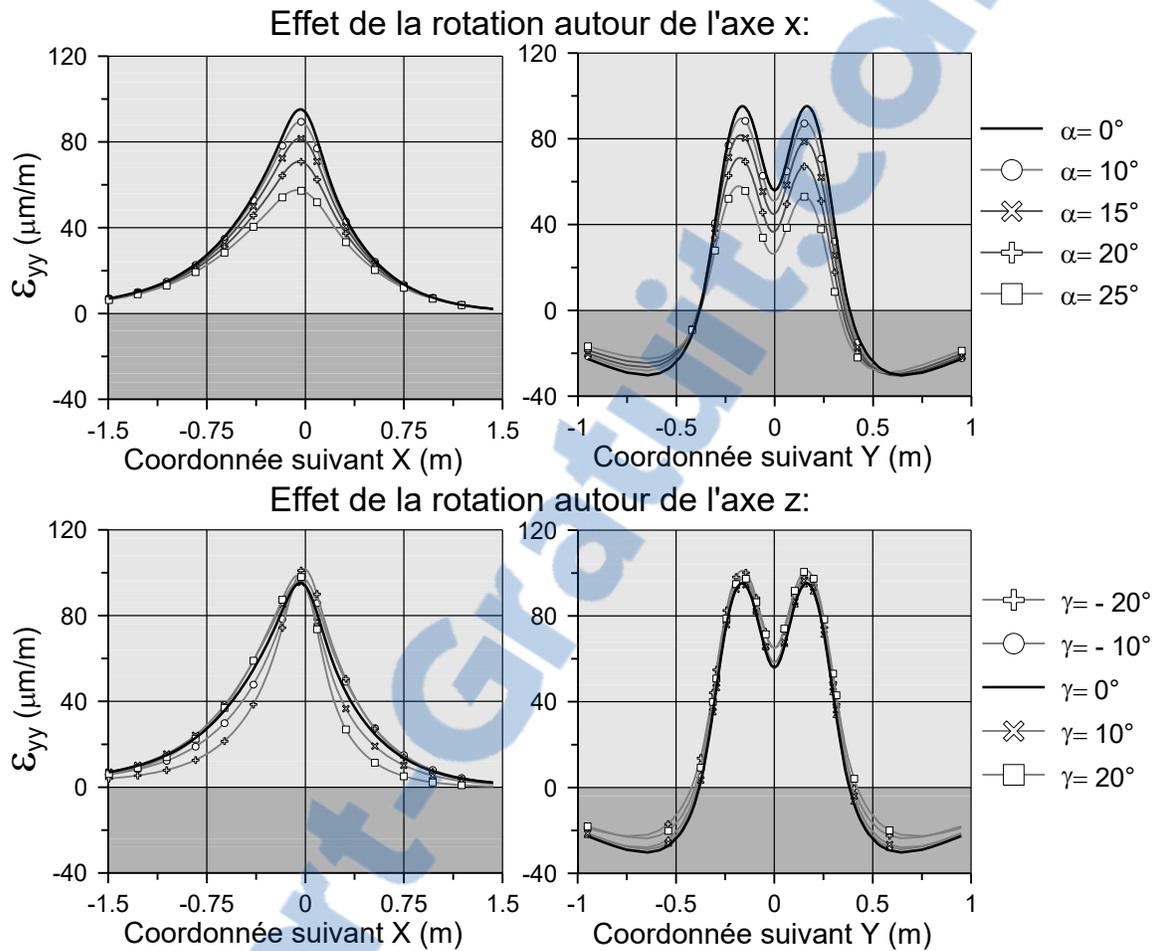


Figure 4.30 : Effet de l'orientation du capteur sur les déformations transversales

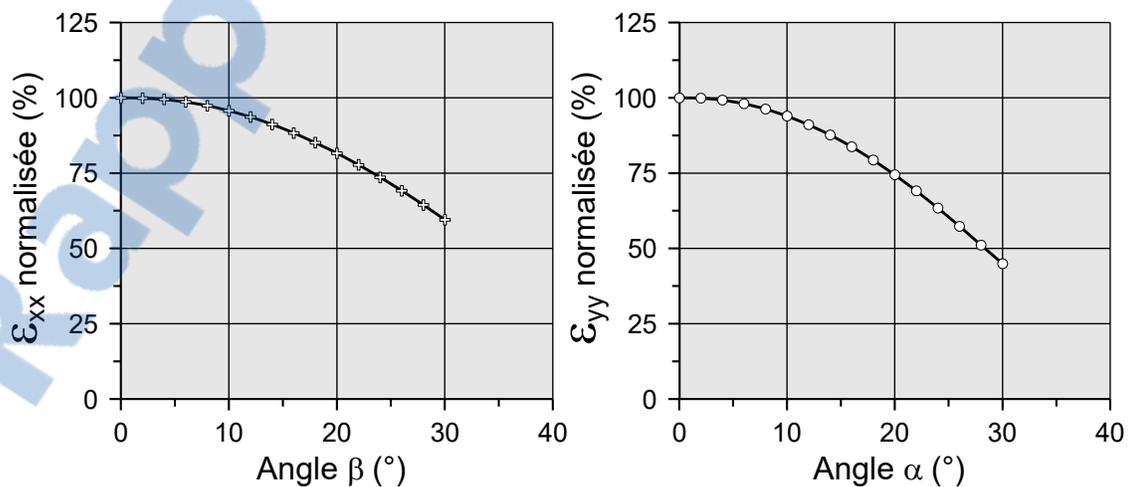


Figure 4.31 : Effet des angles β et α sur l'amplitude maximale des déformations

Dans la pratique, les trois rotations peuvent se combiner et modifier à la fois l'amplitude des signaux mesurés et la forme du signal. Aucun contrôle de la position du capteur n'est possible avant la destruction de la structure et ces écarts doivent être considérés dans l'interprétation des données expérimentales. L'installation des capteurs à fibre optique étant effectuée après la construction de la structure, un meilleur contrôle de l'orientation des capteurs est effectué comparativement aux capteurs résistifs.

- Hétérogénéité des couches de la structure de chaussée

Un suivi des matériaux a été effectué lors de la mise en place de la structure de chaussée. Les essais Dynaplaque présentés à l'annexe 2 montrent que le module du sol d'infrastructure varie le long des sections A et B de 50 MPa à 170 MPa. Plusieurs zones ont été retravaillées afin d'assurer un module minimal de 90 MPa. Il existe cependant une forte hétérogénéité des modules du sol et de la fondation granulaire. Cet effet se traduit expérimentalement par des déformations plus élevées à la base des couches bitumineuses au droit des zones où les modules des couches de sol sont plus faibles. Les modules des enrobés bitumineux ne sont également pas uniformes sur l'ensemble de la section. Les mesures de densité au gamma-densimètre montrent que l'indice des vides dans les couches et la densité varient le long des mesures. La compacité n'est donc pas uniforme et cela peut influencer les mesures de la déformation.

La figure 4.32 montre une coupe transversale de couche de GB de la section A. La couche bitumineuse présente localement des zones plus ou moins riches en particules grossières. Le trait de scie, imposé par la mise en place de la plaque de déformation, a pour effet de sectionner les granulats et d'offrir des surfaces de contact importantes. Les jauges possèdent une longueur de 9 mm. Leur positionnement, relativement à ces surfaces, va influencer la mesure. Cet effet d'échelle est moins important pour les capteurs résistifs étant donné que l'enrobé bitumineux se place tout autour du capteur sur une longueur de 10 cm.

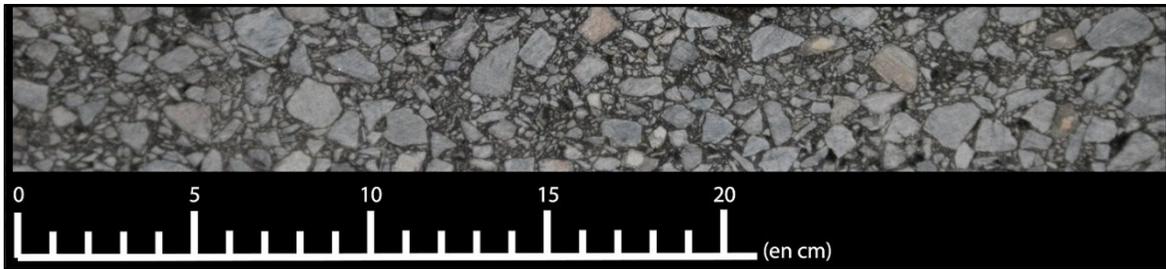


Figure 4.32 : Photographie de la couche de GB

Le profil des couches d'enrobé bitumineux et de la fondation montre que l'épaisseur des couches bitumineuses varie de 110 mm à 140 mm le long de la section A et de 60 à 80 mm le long de la section B. La figure 4.33 montre l'influence de l'épaisseur des couches bitumineuses et de la profondeur du capteur sur l'amplitude des déformations. Les résultats présentés sur cette figure ont été obtenus en modélisant la condition expérimentale n° 21 avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Les déformations sont normalisées par rapport à la condition de référence et présentées en pourcentage. La condition de référence correspond aux mesures relevées à 130 mm de profondeur dans une couche de 130 mm d'épaisseur. Les calculs pour cinq épaisseurs de revêtement bitumineux sont présentés sur la figure. Les épaisseurs varient de 110 mm à 150 mm. Pour chaque épaisseur, les calculs ont été effectués en considérant plusieurs profondeurs possibles du capteur. Il est considéré que le capteur peut se situer jusqu'à 20 mm moins profond que le bas de la couche.

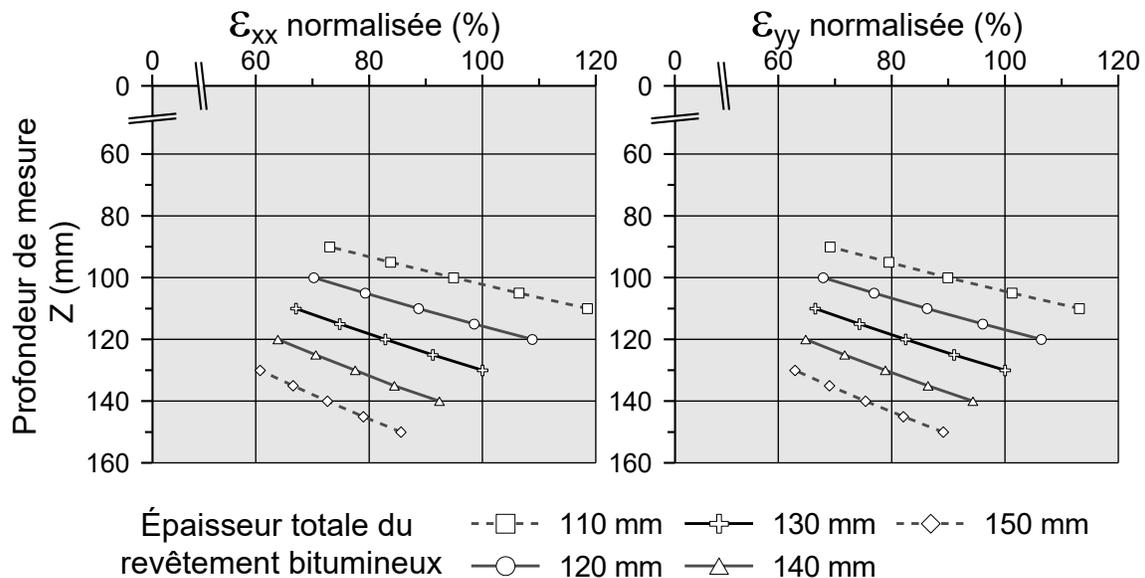


Figure 4.33 : Effet l'épaisseur des couches et de la profondeur de mesure sur l'amplitude maximale des déformations

La figure 4.33 montre par exemple qu'un capteur longitudinal placé à 120 mm de profondeur dans une couche de 140 mm d'épaisseur mesure des déformations 35 % plus faibles (déformation normalisée de 65 %) que le capteur de référence. À l'inverse, un capteur placé à 110 mm de profondeur, dans une couche de 110 mm d'épaisseur, mesure des déformations 20 % plus élevées (déformation normalisée de 120 %) que le capteur de référence. Des écarts significatifs et de l'ordre de grandeur de ceux mesurés expérimentalement peuvent être engendrés par les approximations sur la profondeur de pose du capteur et sur l'épaisseur totale de la couche bitumineuse.

4.5 Conclusion

Les jauges à fibre optique utilisées au cours du projet sont basées sur l'interférométrie par lumière blanche. L'applicabilité de cette technologie au domaine routier permet d'obtenir une caractérisation très fine et précise des déformations s'exerçant à plusieurs niveaux dans les couches bitumineuses. Les jauges à fibre optique sont installées sur des corps polymères puis fixées aux couches bitumineuses après la construction de la chaussée. Leur mise en place est simple et rapide. Elles ne présentent pas de dérive dans le temps, sont aptes à subir plusieurs cycles de gel et de dégel et plus de 600 000 sollicitations. La rupture du capteur est souvent liée à un niveau élevé d'endommagement de la couche bitumineuse. La répétabilité des capteurs est bonne puisque le COV des jauges reste inférieur à 3 %. La répétabilité dépend cependant des conditions environnementales, de l'orientation des capteurs et de la position de la jauge sous la charge. L'analyse du bassin de déformation, tracé à partir des données obtenues par les jauges installées sur une même plaque de déformation, permet de quantifier la fiabilité des capteurs. L'analyse des résidus normalisés entre les données et la courbe d'interpolation permet de faire un suivi de la performance des capteurs et d'identifier l'apparition de défaillance. L'analyse statistique des données, effectuée pour chaque condition expérimentale, montre que des écarts de 10 % à 30 % sont mesurables entre les jauges installées sur une même plaque de déformation. Ces écarts s'expliquent en partie par l'hétérogénéité des matériaux bitumineux.

L'instrumentation des couches bitumineuses doit répondre à plusieurs problématiques associées à la mise en place des capteurs dans la structure, à leur performance et à leur durabilité. Les deux types de capteurs à fibre optique, développés au cours du projet,

répondent à ces problématiques. Sur deux des quatre sections d'essais, ces capteurs sont comparés à trois types de capteurs résistifs traditionnellement utilisés pour l'instrumentation des chaussées souples. Cette démarche permet une analyse comparative entre les différents types de capteurs et permet également une comparaison avec les modélisations obtenues avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Cette analyse montre que pour une même condition expérimentale, l'amplitude des déformations peut varier du simple au triple en fonction du type de capteur considéré. D'importants écarts sont également relevés pour un même type de capteurs. Sur l'ensemble des conditions expérimentales, les deux types de capteurs à fibre optique mesurent des déformations plus élevées que les capteurs aluminium et plexiglas®, mais du même ordre de grandeur que celles mesurées par les capteurs TML. L'analyse comparative avec les modélisations ne permet pas d'identifier un type de capteur meilleur qu'un autre, car les conclusions dépendent des conditions expérimentales et de la structure de chaussée. Au niveau de la section A, les capteurs à fibre optique et le capteur TML présentent les plus faibles écarts avec les modélisations. Les capteurs aluminium en sont les plus éloignés. Au niveau de la section B, les capteurs plexiglas® offrent les plus faibles écarts avec les modélisations, mais les mesures effectuées par les différents capteurs plexiglas® ne sont pas consistantes. Pour une même condition expérimentale, certains capteurs plexiglas® mesurent de faibles déformations et d'autres, des déformations très élevées. Les écarts entre les capteurs s'expliquent entre autres par l'incertitude sur le positionnement des capteurs dans la structure et par l'hétérogénéité des propriétés physiques et mécaniques des matériaux le long des sections. Les capteurs résistifs subissent les efforts associés à la mise en œuvre du revêtement bitumineux et au compactage. Cela peut entraîner une rotation du capteur diminuant ainsi les déformations mesurées. Les rotations du capteur modifient à la fois la forme et l'amplitude du signal. Cette source d'erreur ainsi qu'un corps de capteur trop rigide ont pour effet de diminuer la valeur mesurée. Cette problématique est évitée avec les capteurs à fibre optique puisque ces derniers sont mis en place après la mise en œuvre des couches bitumineuses.

Chapitre 5

Analyse des déformations à faible profondeur sous la surface

5.1 Présentation et objectifs

Les deux principaux facteurs responsables de la fissuration par le haut sont les contraintes de cisaillement et de traction ainsi que l'extension située sous la charge et au bord de la charge (Myers et coll., 1998 ; Wang, H. et Al-Qadi, 2010). Les compressions sous la charge et le cisaillement au bord des pneus sont également responsables des ornières de fluage. Ce dernier est fonction de la température, de la vitesse de la charge, et de l'intensité des charges. L'objectif principal de ce chapitre est de déterminer les déformations qui se développent à faible profondeur, d'analyser et d'expliquer leur comportement sous plusieurs conditions expérimentales.

Les déformations sont mesurées à l'aide des plaques de déformations et des carottes instrumentées suivant les trois directions suivantes : longitudinale, transversale et verticale. Les campagnes de mesure permettent d'analyser ces déformations sous plusieurs conditions de charge (chargement, type de pneu, nombre d'essieux), de température et de vitesse. Les mesures sont détaillées pour les structures de chaussées des quatre sections 1, 2, A et B. Ce chapitre vise à caractériser les déformations, c'est-à-dire à analyser la forme et l'amplitude du signal puis à les comparer aux résultats obtenus à partir du logiciel ViscoRoute© 2.0. L'objectif de cette comparaison est de valider les mesures effectuées par les capteurs à fibre optique et d'évaluer l'influence des conditions de charge, des conditions environnementales et des propriétés mécaniques des matériaux sur les déformations.

Ce chapitre détaille successivement les déformations longitudinales, transversales puis verticales mesurées à une profondeur d'environ 15 mm. Chacune des sections présente à la fois les déformations mesurées expérimentalement et les résultats des modélisations. Les

bassins de déformations formés à partir des mesures effectuées en balayant latéralement la position de la charge sont détaillés afin de montrer l'influence des conditions de charge, telles que les empreintes de pneu, le chargement et le type de pneu. Les paramètres de modélisation choisis pour les calculs ViscoRoute© 2.0 sont discutés et analysés en fonction des comparaisons effectuées avec les mesures expérimentales. Finalement, ce chapitre présente le cisaillement s'exerçant au niveau des bords des pneus. Sur l'ensemble du chapitre, les analyses sont effectuées simultanément pour le pneu à bande large et pour le pneu jumelé. La différence entre les deux types de pneus est exprimée en calculant le ratio des déformations, c'est-à-dire en divisant l'amplitude des déformations engendrées par le pneu large par l'amplitude de celles engendrées par le pneu jumelé.

5.2 Analyse des déformations longitudinales à faible profondeur (10 à 20 mm sous la surface)

5.2.1 Signaux caractéristiques et bassins des déformations pour un essieu simple

Le signal de déformation se caractérise à la fois par sa forme générale et ses amplitudes. La figure 5.1(a) présente la déformation longitudinale mesurée à 10 mm de la surface au passage d'un essieu simple équipé avec un pneu à bande large, chargé à 4 tonnes et circulant à 43 km/h (cas expérimental n° 56 détaillé à l'annexe 1). Le signal correspond aux mesures relevées et modélisées à 10 mm de profondeur au niveau de la section B en $Y = -105$ mm. Le signal se caractérise par 5 points principaux numérotés de 1 à 5. Les signaux sont présentés suivant la coordonnée X (représentation spatiale). Le point caractéristique n° 1 correspond au début de la zone d'influence du pneu et précède l'arrivée de la charge. Le point n° 5 correspond à la fin de la zone d'influence de la charge. Les points n° 2 et 4 correspondent aux deux pics d'extension mesurés à l'avant et à l'arrière du pneu respectivement. Ces points sont situés entre 200 mm et 400 mm avant et après le passage du centre du pneu. L'amplitude maximale de la déformation est mesurée au point n° 3 et il correspond au moment où le pneu est positionné directement sur le capteur. Sur la figure, les deux maximums en extension sont notés $\epsilon_{xx \max 1}$ et $\epsilon_{xx \max 2}$. La contraction maximale est notée $\epsilon_{xx \min}$. Les deux amplitudes en extension possèdent une amplitude différente qui est la conséquence de la viscoélasticité des

matériaux. Bien que la forme du signal présenté corresponde à une position spécifique du capteur sous le pneu (en $Y = -105$ mm), celle-ci est commune à l'ensemble des positions de la charge et pour cela pour toutes les conditions expérimentales étudiées au niveau de la section B. L'amplitude des maximums et des minimums varie cependant en fonction des caractéristiques de charge et des conditions expérimentales.

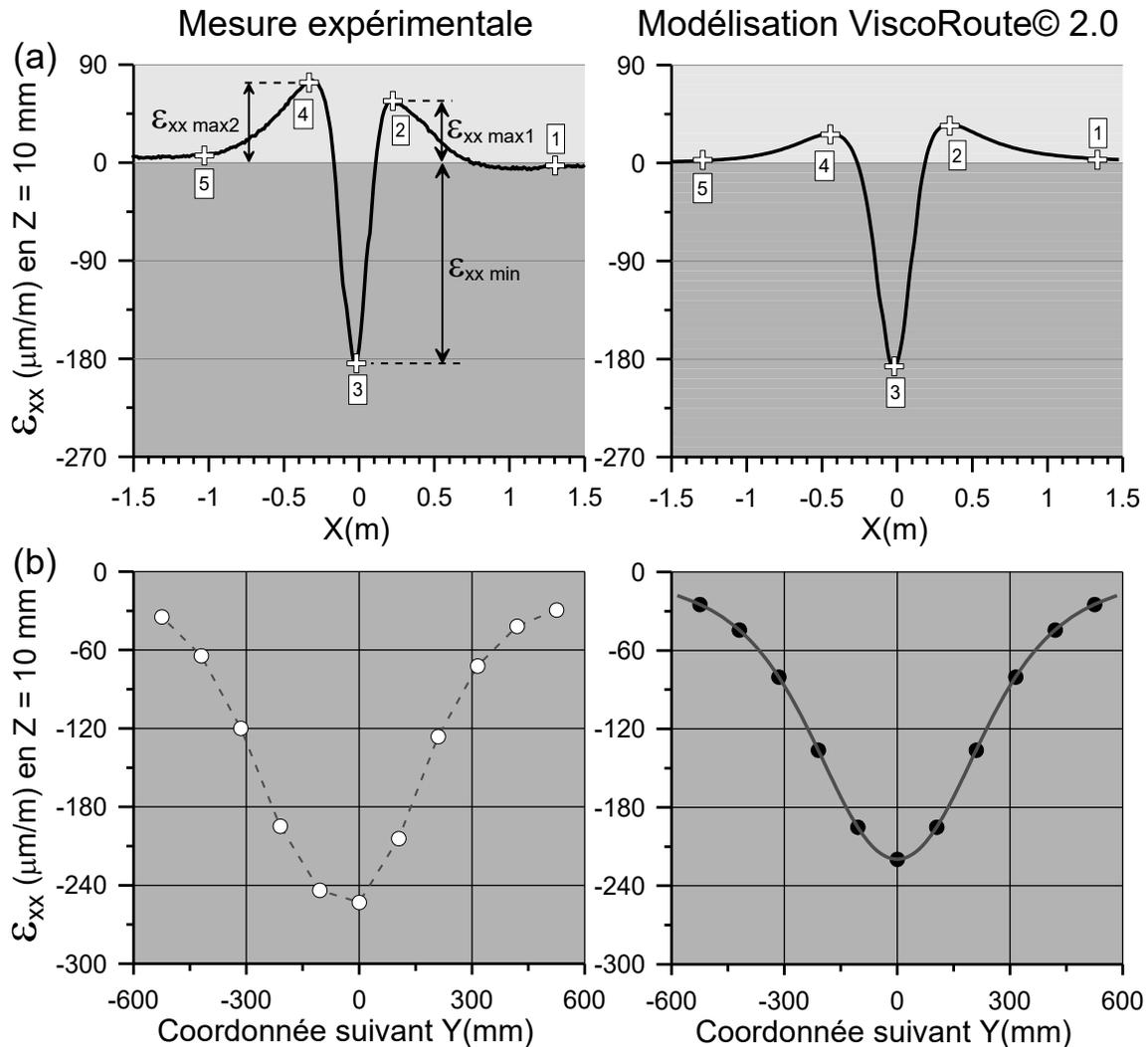


Figure 5.1 : Déformations longitudinales mesurées et modélisées en $Z = 10$ mm au passage d'un essieu simple (pneu à bande large, 4 t, 43 km/h, 24 °C) pour la section B : (a) signaux en position $Y = -105$ mm sous le pneu et (b) bassin des déformations

Les déformations obtenues à partir des calculs ViscoRoute© 2.0 montrent les mêmes 5 points caractéristiques. La principale différence entre les mesures expérimentales et les modélisations se situe au niveau de l'amplitude des extensions mesurées de part et d'autre de la charge. L'extension mesurée expérimentalement est deux à trois fois plus élevée que les

valeurs modélisées. Afin de tenir compte de cet effet, la méthode des demi-pics, suivie pour tracer le bassin des déformations à la base des couches bitumineuses, est également utilisée pour les déformations situées proche de la surface. Pour les 11 positions sous la charge, l'écart entre l'extension maximale et le maximum de contraction est calculé. Cette valeur est appelée l'amplitude de contraction. Le bassin des déformations représente l'amplitude de la contraction pour les 11 positions de la charge en fonction de leurs coordonnées Y. Une représentation de ce bassin est détaillée à la figure 5.1(b). Le bassin issu des modélisations est représenté en trait continu sur lequel sont ajoutés les 11 points spécifiques, dont les coordonnées Y correspondent à celles des mesures expérimentales. Le bassin des mesures expérimentales et celui de la modélisation possèdent une forme similaire. Pour l'ensemble des positions, la charge engendre une contraction et celle-ci est maximale directement sous la charge. Les amplitudes diminuent lorsque la charge s'éloigne du capteur. Les nervures et les rainures du pneu n'ont pas d'effet direct sur l'amplitude mesurée. Dans le cas du pneu jumelé, les bassins de déformation présentent deux maximums locaux situés en $Y = -105$ mm et $Y = 105$ mm, car l'espacement entre les deux pneus génère localement une baisse de l'amplitude. Compte tenu des hypothèses de calcul, le bassin modélisé est parfaitement symétrique. La dissymétrie des bassins expérimentaux s'explique par un chargement non uniformément réparti sur la surface de contact des pneus. Tous les bassins de déformation pour la section B sont présentés à l'annexe 6.

5.2.2 Effet des paramètres de charge sur les déformations longitudinales

L'évaluation de l'effet des paramètres de charge sur les déformations longitudinales est basée sur deux critères. Le premier critère correspond à l'amplitude de la contraction (amplitude entre le maximum de contraction et le maximum d'extension) et le second est l'extension maximale. Ce deuxième critère permet de quantifier l'extension maximale s'exerçant à l'avant et à l'arrière de la charge qui est, selon plusieurs lois de fatigue (paragraphe 2.4.1.1), responsable de la fissuration s'initiant en surface des couches bitumineuses. Ces deux critères sont mesurés expérimentalement pour toutes les conditions expérimentales de la section B et sont également calculés à partir des modélisations ViscoRoute© 2.0 pour les sections A et B. La figure 5.2 et la figure 5.3 présentent l'effet du type de pneu, de l'intensité de la charge et de la température, respectivement, pour les sections A et B. L'effet de la vitesse est également

détaillé pour les deux types de pneus à la figure 5.4 pour la section A et à la figure 5.5 pour la section B.

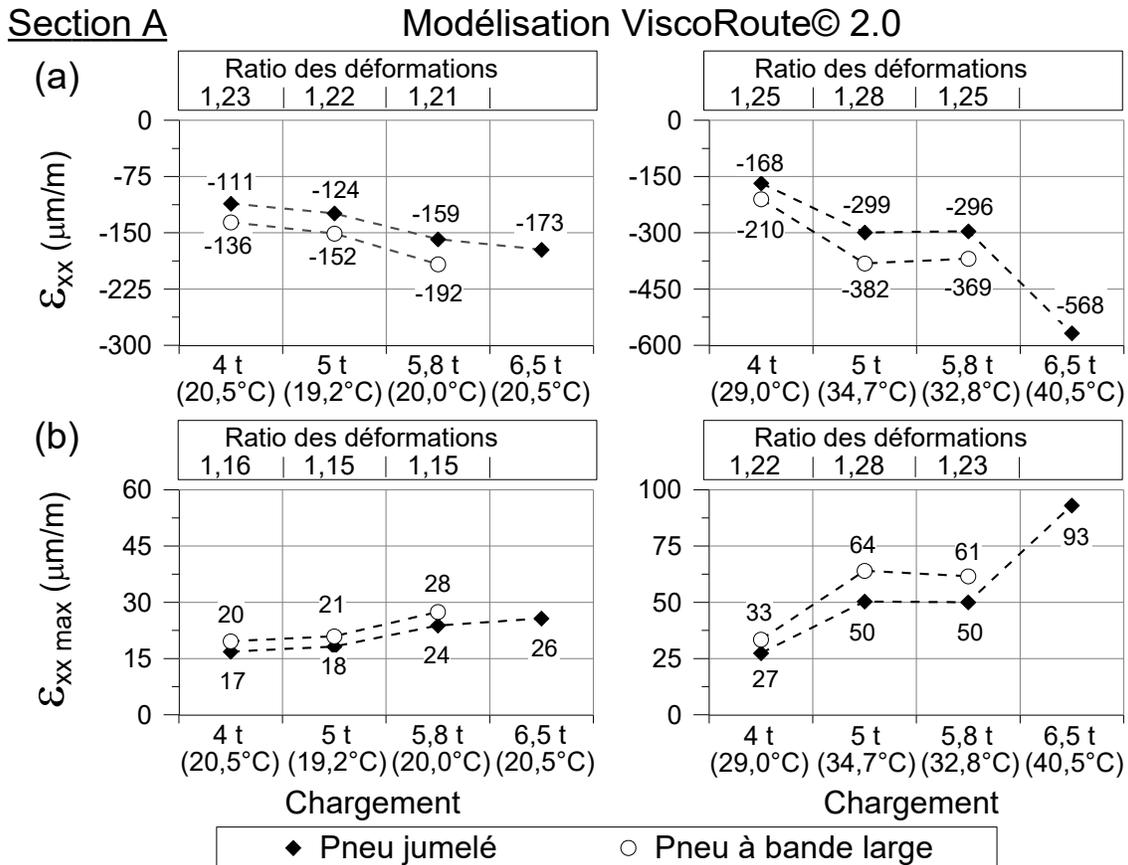


Figure 5.2 : Effet de la charge et de la température (section A, $Z = 15 \text{ mm}$) sur (a) l'amplitude de contraction et (b) l'extension maximale

Les modélisations montrent pour les deux sections que l'amplitude de la contraction et l'extension augmentent avec l'augmentation de la charge et des températures. Les mesures expérimentales de la section B confirment cet effet. Les deux cas expérimentaux n° 51 et n° 52 (annexe 1) correspondant au chargement de 4 tonnes à 22,5 °C font cependant exception. Ces écarts s'expliquent par le fait que la pression de gonflage des pneus était de 690 kPa contrairement à tous les autres cas où la pression était fixée à 830 kPa. Une pression de gonflage plus faible entraîne une redistribution des pressions de contact en surface ce qui influence l'amplitude des mesures en surface. Les déformations (contraction et extension) sont plus élevées pour la section B comparativement à la section A. Ces différences sont dues au fait que la structure B possède une plus faible rigidité puisque l'épaisseur du revêtement bitumineux y est seulement de 70 mm contre 130 mm à la section A.

Section B Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

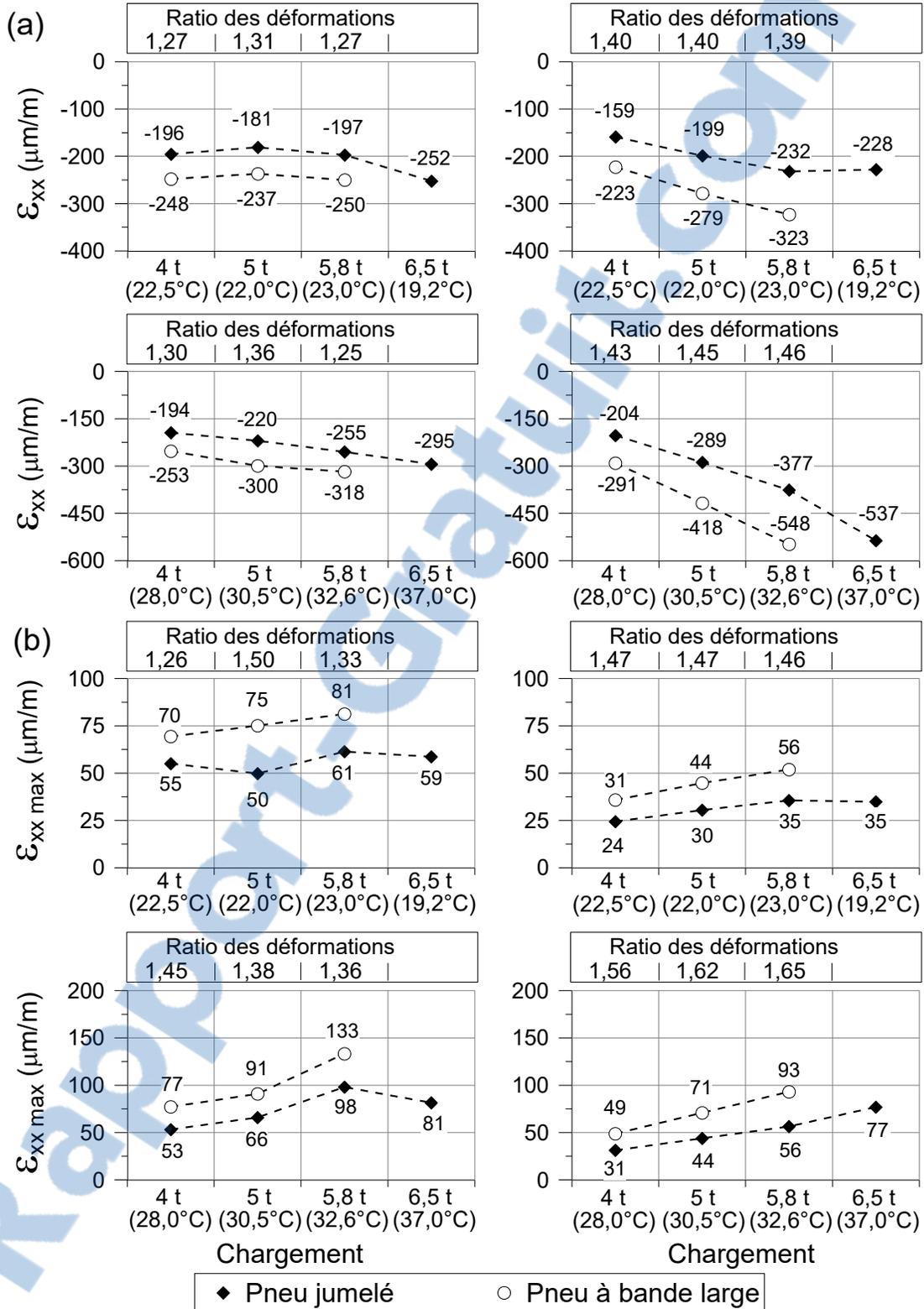


Figure 5.3 : Effet de la charge et de la température (section B, Z = 10 mm) sur (a) l'amplitude de contraction et (b) l'extension maximale

Au niveau de la section B, les mesures expérimentales donnent des amplitudes de contraction plus faibles que les valeurs obtenues à partir des modélisations. Ces mesures sont entre 10 % à 20 % plus faibles pour les températures modérées (autour de 20 °C) et entre 5 % et 45 % pour les températures élevées (> 28 °C). Pour les deux types de pneus, plus l'intensité de la charge augmente, plus ces écarts augmentent. Ils sont également plus élevés pour le pneu à bande large. Les différences s'expliquent principalement par les hypothèses de modélisation choisies dans la répartition des forces verticales imposées par le pneu. Bien que l'augmentation de la charge engendre une augmentation de l'aire de contact, celle-ci a été maintenue constante dans les modélisations. La répartition des charges entre les différentes nervures du pneu a été effectuée en tenant compte des mesures du Tekscan et du papier Fujifilm Prescale pour une charge de 4 tonnes. Aucune mesure n'ayant été effectuée pour les autres chargements, la force verticale appliquée à chaque nervure a été proportionnellement augmentée en fonction de l'augmentation du tonnage. Aussi, aucune force tangentielle suivant la direction X (F_x) n'a été prise en compte dans les modélisations. Ces forces sont caractérisées par une compression localisée sous l'avant du pneu et une traction à l'arrière du pneu. Ces contraintes ont une incidence sur les déformations puisqu'elles augmentent la contraction mesurée sous la charge. Ces deux effets, non considérés dans les modélisations, expliquent en partie les écarts mesurés entre les modélisations et les mesures expérimentales. Contrairement aux amplitudes de contraction, l'extension mesurée expérimentalement est beaucoup plus élevée que les valeurs obtenues par les modélisations. Les mesures expérimentales sont entre 1,5 à 2,0 fois plus élevées pour les températures modérées et entre 1,1 à 1,8 fois plus élevées pour les températures supérieures à 28 °C et ces écarts sont du même ordre de grandeur pour les deux types de pneus.

L'amplitude de contraction (ϵ_{xx}) et l'extension maximale ($\epsilon_{xx \max}$) sont plus élevées pour le pneu à bande large que pour le pneu jumelé pour les deux sections et pour l'ensemble des mesures expérimentales et des modélisations. Les modélisations montrent qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'amplitude de la charge sur le ratio des déformations. La température est par contre le paramètre ayant le plus d'effet sur ces ratios. Ils augmentent avec l'augmentation des températures. Au niveau de la section B, les ratios calculés à partir des mesures expérimentales sont plus faibles que ceux déterminés à partir des modélisations. En se basant sur les mesures expérimentales, le pneu à bande large génère des déformations plus

élevées et de l'ordre de 30 % pour la contraction longitudinale et de l'ordre de 38 % pour l'extension maximale.

La figure 5.4 et la figure 5.5 montrent l'effet de la vitesse respectivement au niveau de la section A pour les conditions expérimentales n° 21 et 22 soit des pneus chargés à 5 tonnes et une température de 19,2 °C (annexe 1) et au niveau de la section B pour les conditions expérimentales n° V3 et V4 soit des pneus chargés à 5 tonnes et une température de 22,5 °C. Plus les vitesses diminuent, plus les déformations augmentent. Les modélisations effectuées sur les sections A et B montrent que les déformations (contraction et extension) en fonction de la vitesse suivent une loi logarithmique. Les mesures expérimentales confirment cette observation. Les modélisations des sections A et B montrent que le pneu à bande large génère des déformations plus élevées que le pneu jumelé et les écarts augmentent lorsque la vitesse diminue. Les modélisations de la section B surestiment l'amplitude des contractions en particulier pour le pneu à bande large. À l'inverse, l'extension mesurée expérimentalement est plus élevée que celle calculée.

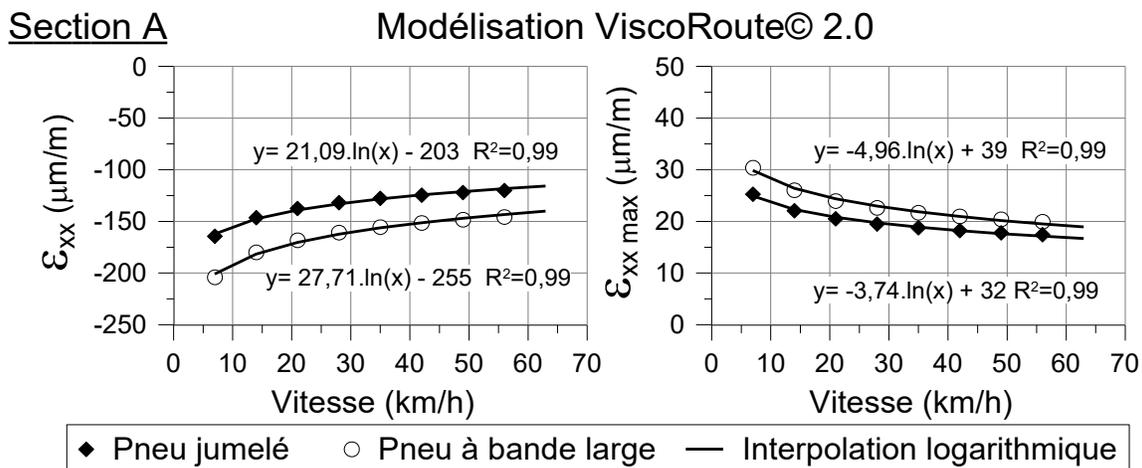


Figure 5.4 : Effet de la vitesse sur l'amplitude de contraction et l'extension maximale (section A, Z = 15 mm)

Section B Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

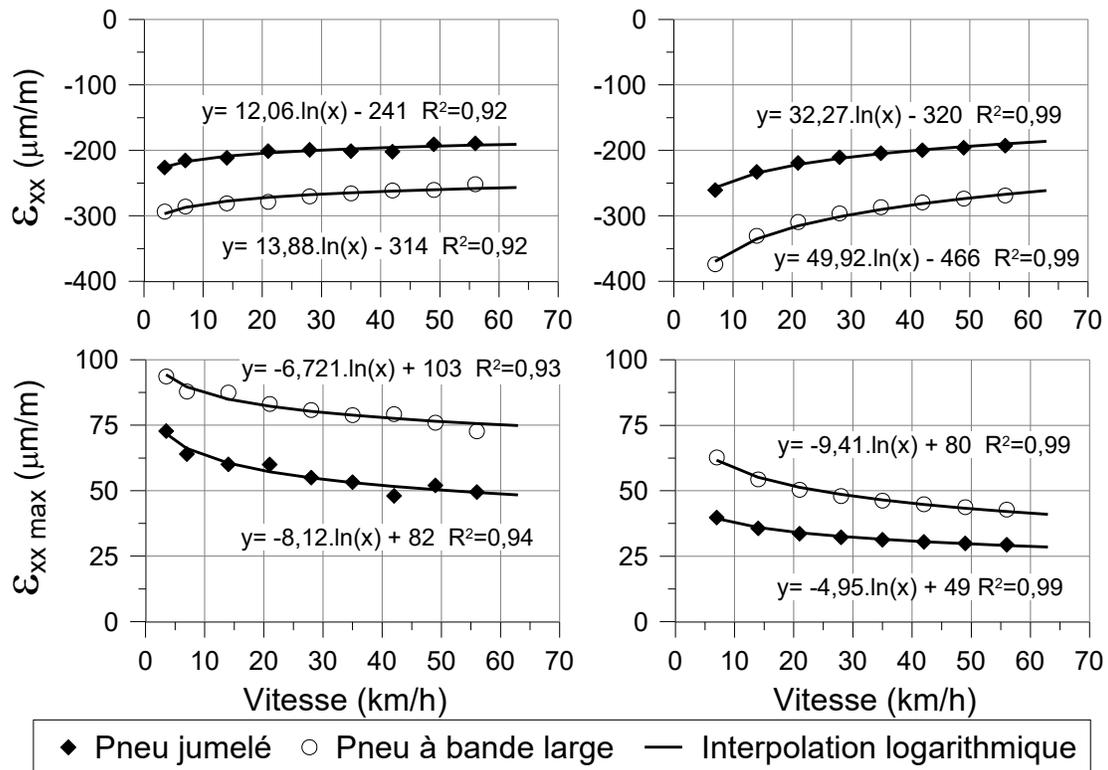


Figure 5.5 : Effet de la vitesse sur l'amplitude de contraction et l'extension maximale (section B, Z = 10 mm)

5.2.3 Signaux caractéristiques pour un essieu tridem

La figure 5.6 présente la déformation longitudinale au passage d'un essieu tridem au niveau de la section 1. L'essieu tridem est équipé de pneus jumelés et circule à 30 km/h. Les signaux correspondent aux mesures expérimentales et aux signaux modélisés à 20 mm de profondeur. La forme du signal est fonction de la position du capteur par rapport à la charge.

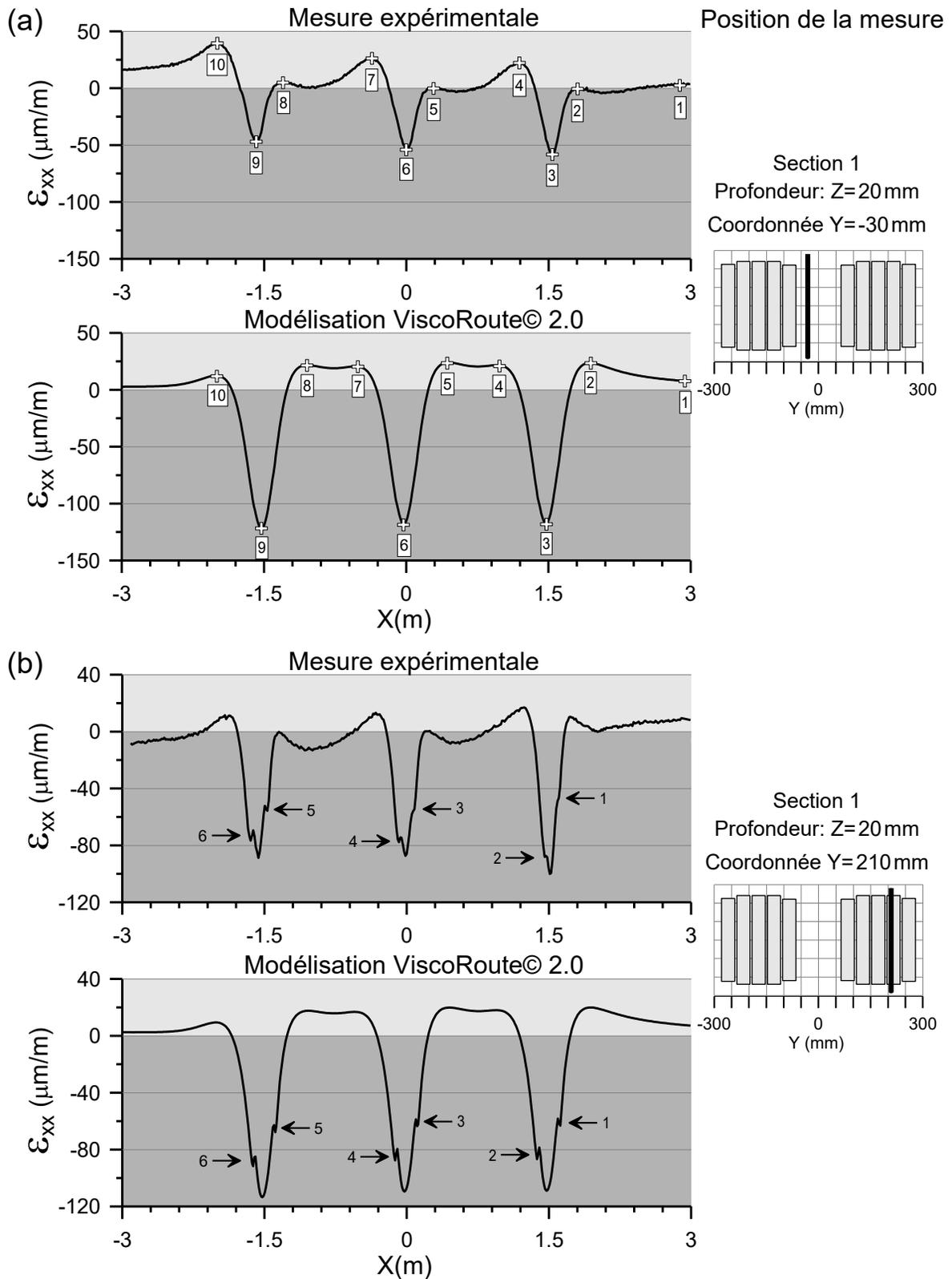


Figure 5.6 : Déformations longitudinales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 1 (cas n° 1-119) : (a) espacement interjumelage et (b) sous les pneus

La figure 5.6(a) détaille les signaux mesurés en $Y = -30$ mm, au niveau de l'espace interjumelage. Le signal est constitué de 10 points caractéristiques. Dans la représentation spatiale, le point n° 1 correspond au début de la zone d'influence de l'essieu tridem. Le passage respectif de chaque essieu est identifiable sur la figure. Les points n° 2 à 4 correspondent au passage du premier essieu. Les points n° 5 à 7 et 8 à 10 sont respectivement associés au passage du second et du troisième essieu. Le passage d'un essieu est caractérisé par un maximum de contraction (points n° 3, 6 et 9) qui est précédé et suivi par un pic d'extension (points n° 2, 4, 5, 7, 8 et 10). Les signaux obtenus à partir des modélisations présentent les mêmes 10 points caractéristiques. L'espace entre les essieux est associé localement à une baisse de l'extension. Cette baisse est plus marquée dans le cas des mesures expérimentales que sur les résultats de la modélisation.

La figure 5.6(b) détaille les signaux mesurés directement sous la charge (en $Y = 210$ mm). Les 10 points caractéristiques précédemment décrits sont identifiables sur les mesures expérimentales et sur les modélisations. À ces 10 points s'ajoutent 6 irrégularités identifiées par des flèches. Ces irrégularités sont systématiquement présentes lorsque les mesures sont effectuées directement sous l'empreinte du pneu. Elles se traduisent au niveau des signaux expérimentaux sous deux formes. La première forme est associée à un léger décrochement de la courbe comme aux points n° 1 et 3. La seconde forme est associée à un changement de pente de la courbe qui engendre un extremum local comme aux points n° 2, 4, 5 et 6. Les modélisations montrent essentiellement des irrégularités de la seconde forme. Ces irrégularités s'expliquent par l'évolution des contraintes lors du passage de la charge. Comme présenté à la figure 5.7, les contraintes longitudinales et transversales augmentent progressivement jusqu'au passage de la charge puis diminuent par la suite. Ces contraintes imposent une compression dans le revêtement bitumineux. Les contraintes verticales augmentent brusquement sous la charge puis diminuent également très rapidement suite à son départ. Par effet de Poisson, la contrainte verticale (compression) induit dans la direction longitudinale et transversale une extension. Ici, l'enrobé bitumineux étant déjà dans un état de compression, cette extension est empêchée. La contrainte verticale impose donc seulement localement une baisse de la contraction qui se traduit au niveau des signaux par l'apparition des irrégularités identifiées. L'amplitude des irrégularités dépend de l'amplitude de la contrainte verticale comparativement aux contraintes longitudinales et transversales et

également du coefficient de Poisson.

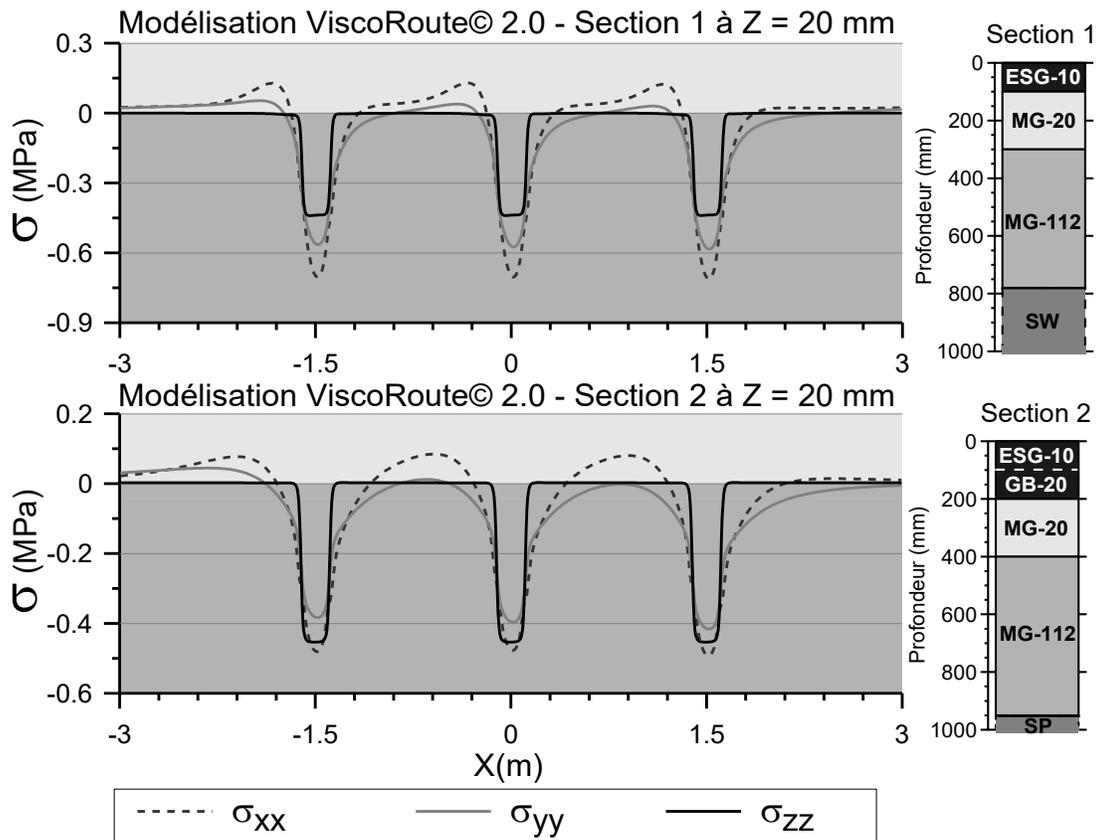


Figure 5.7 : Contraintes calculées en $Z = 20$ mm au passage de l'essieu tridem équipé de pneus jumelés pour les sections 1 et 2 (coordonnée $Y = 170$ mm sous le pneu)

La figure 5.8 présente les signaux identifiés à 20 mm de profondeur au niveau de la section 2. Comme pour la section 1, la forme des signaux est fonction de la position sous le pneu. La figure 5.8(a) illustre les signaux relevés au niveau de l'espacement interjumelage (en $Y = 55$ mm). Le signal est constitué de 8 points caractéristiques dont le n° 1 correspond à l'arrivée de la charge. Chaque essieu impose une contraction qui est maximale au passage du pneu (points n° 3, 5 et 7). Le passage du premier essieu du tridem est précédé par un pic en extension (point n° 2) et le passage du troisième essieu est suivi lui aussi d'un pic en extension (point n° 8). Deux autres pics d'extension (points n° 4 et 6) sont situés au niveau de l'espacement entre les essieux. Cela signifie que l'extension engendrée par le départ du premier essieu se combine à l'extension engendrée par l'arrivée du second essieu et ainsi de suite. Il y a une interaction plus marquée entre les essieux que sur la section 1.

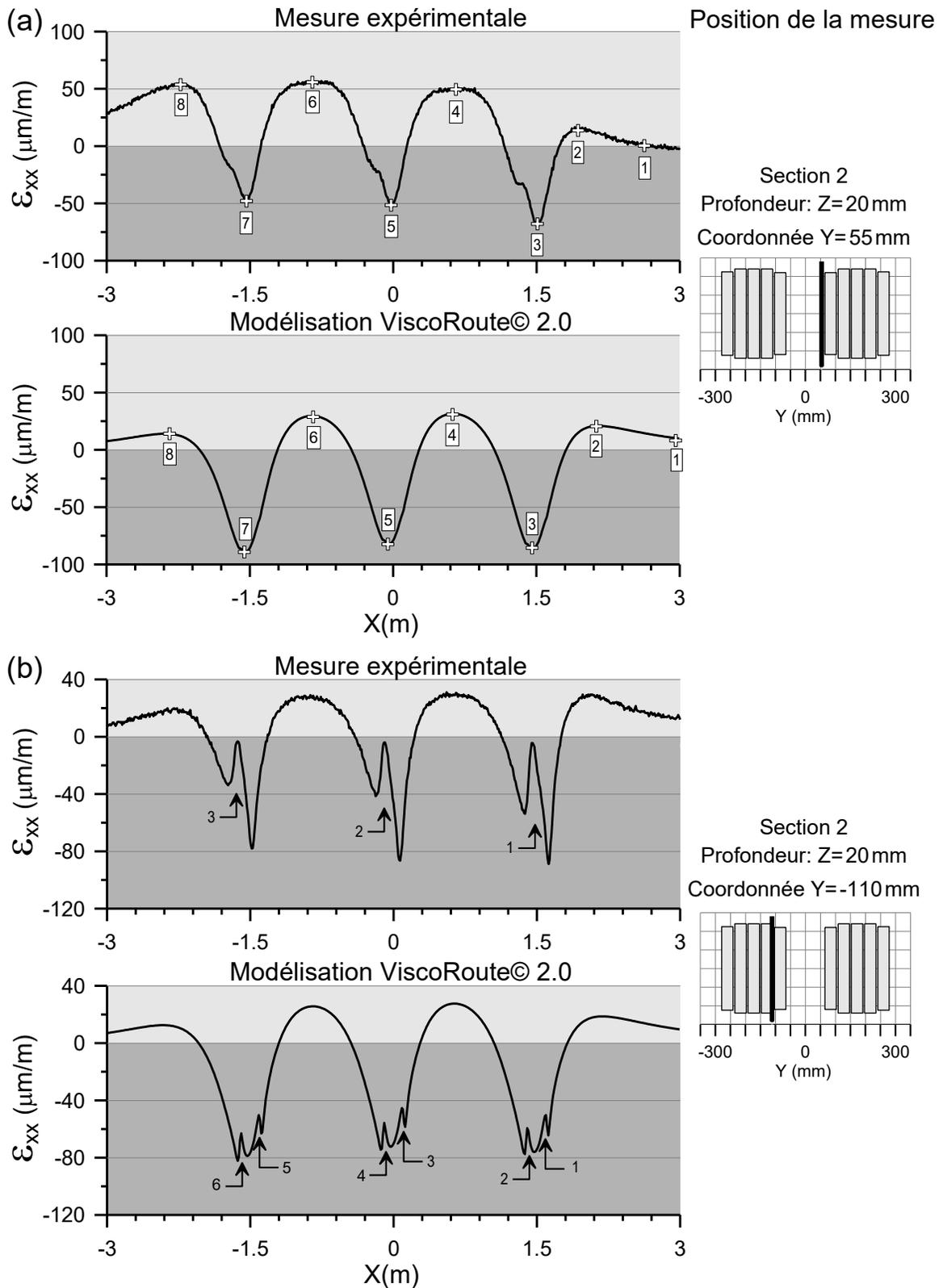


Figure 5.8 : Déformations longitudinales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 2 (cas n° 201): (a) espacement interjumelage et (b) sous les pneus

La figure 5.8 (b) présente les signaux relevés directement sous le pneu (en $Y = 110$ mm). Les modélisations montrent les mêmes irrégularités que celles notées au niveau de la section 1. Celles-ci sont identifiées sur la figure par des flèches numérotées de 1 à 6. Étant donné que la section 2 est plus épaisse, les contraintes longitudinales et transversales sont plus faibles que celles mesurées au niveau de la section 1. Comme illustré à la figure 5.7, l'amplitude de la contrainte verticale est sensiblement la même pour les deux sections. La contribution de la contrainte verticale sur la déformation longitudinale a une influence plus importante sur la section 2 comparativement à la section 1, ce qui se traduit par des pics d'irrégularité plus importants. Expérimentalement, les signaux montrent une forte diminution de la contraction au passage de la charge (c'est-à-dire lorsque la contrainte verticale est appliquée par la charge). Après le départ de la charge, la contraction augmente jusqu'à un second maximum puis diminue progressivement. Cette irrégularité est présente au passage de chaque essieu. Elles sont identifiées par des flèches numérotées 1 à 3. L'amplitude de l'irrégularité dépend de la position sous le pneu. La figure 5.8 (b) présente un des cas où cette diminution est la plus marquée.

Les irrégularités relevées expérimentalement au niveau des sections 1 et 2 n'apparaissent pas sur les mesures effectuées au niveau des sections A et B. Ces différences de comportement s'expliquent principalement par les propriétés viscoélastiques de la couche de BBSG 0/10 (sections A et B) comparativement à la couche d'ESG-10 (sections 1 et 2). La formulation de l'ESG-10 et en particulier le type de bitume fait que son comportement est moins visqueux que le BBSG 0/10. Sa composante élastique influence son comportement vis-à-vis de l'apparition brutale de la contrainte verticale au passage de la charge. Les modélisations supplémentaires effectuées pour les sections A et B montrent que des irrégularités apparaissent sur ces structures dès lors qu'un comportement élastique est utilisé pour modéliser les couches bitumineuses. Il est donc nécessaire d'utiliser un comportement viscoélastique afin de décrire le comportement des déformations longitudinales à faibles profondeurs.

5.2.4 Synthèse et enseignements

Les déformations longitudinales en haut des couches bitumineuses ont un comportement très similaire à celles en bas des couches bitumineuses mais leur signe est inversé. Le passage

d'une charge génère une contraction qui est maximale directement sous la charge. Cette contraction est suivie et précédée de pics d'extension. L'amplitude de contraction et l'extension maximale sont les deux paramètres utilisés afin d'évaluer l'influence des conditions expérimentales sur les déformations. Le tableau 5.1 résume l'influence de chacun des paramètres. Le tableau 5.2 présente les principales conclusions de la comparaison entre les mesures expérimentales et les résultats de modélisation pour la section B. Enfin, le tableau 5.3 résume l'effet des conditions expérimentales sur le ratio des déformations entre les deux types de pneus.

Tableau 5.1 : Effet des conditions expérimentales sur les déformations longitudinales

Paramètres	Amplitude de la contraction	Extension maximale
Charge	Augmentation de l'amplitude avec l'augmentation de l'intensité de charge	Augmentation de l'extension avec l'augmentation de l'intensité de charge
Température	Augmentation de l'amplitude avec l'augmentation de la température	Augmentation de l'extension avec l'augmentation de la température
Vitesse	Diminution de l'amplitude avec l'augmentation de la vitesse	Diminution de l'extension avec l'augmentation de la vitesse
Structure de chaussée	Augmentation de l'amplitude pour les structures plus faibles	Augmentation de l'extension pour les structures plus faibles

Tableau 5.2 : Comparaison des mesures expérimentales et des modélisations

Paramètres	Amplitude de la contraction	Extension maximale
Température modérée	Modélisation surestime les mesures de 3 % en moyenne	Modélisation sous-estime les mesures de 78 % en moyenne
Température élevée	Modélisation surestime les mesures de 27 % en moyenne	Modélisation sous-estime les mesures de 47 % en moyenne
Charge	Les écarts augmentent avec l'augmentation de l'intensité de la charge	Les écarts diminuent avec l'augmentation de l'intensité de la charge
Type de pneu	Surestimation de 9 % pour le pneu à bande large et de 12 % pour le jumelé	Sous-estimation de 73 % pour le pneu à bande large et de 66 % pour le jumelé

Tableau 5.3 : Effet des conditions environnementales sur le ratio des déformations

Paramètres	Ratio des déformations (contraction)		Ratio des déformations (extension)	
	Mesure expérimentale	Modélisation	Mesure expérimentale	Modélisation
Augmentation des températures	Augmente	Augmente	Augmente	Augmente
Augmentation de la charge	Pas d'effet identifiable	Constant à 20 °C	Pas d'effet identifiable	Constant à 20 °C
Ratio moyen	Section B : 1,29 Section 1 : ND Section A : ND Section 2 : ND	Section B : 1,42 Section 1 : 1,32 Section A : 1,24 Section 2 : 1,23	Section B : 1,38 Section 1 : ND Section A : ND Section 2 : ND	Section B : 1,54 Section 1 : 1,05 Section A : 1,20 Section 2 : 1,28

Note : ND = les valeurs ne sont pas disponibles

Les déformations longitudinales sont sensibles aux conditions expérimentales et environnementales. L'amplitude et la forme du signal ne dépendent pas seulement des paramètres de charges et de la température mais également des propriétés viscoélastiques des matériaux. Il est recommandé de tenir compte du caractère viscoélastique des matériaux afin de correctement évaluer les déformations longitudinales.

5.3 Analyse des déformations transversales à faible profondeur (10 à 20 mm sous la surface)

5.3.1 Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu simple

La forme et l'amplitude des signaux de la déformation transversale sont fonction de la position sous la charge. La figure 5.9 détaille les signaux de la section A mesurés à 15 mm de profondeur au passage du pneu jumelé. Les conditions expérimentales sont celles du cas n° 21 (annexe 1). Sur cette figure, les déformations sont présentées suivant une représentation spatiale et sont comparées aux signaux calculés à partir des modélisations ViscoRoute© 2.0.

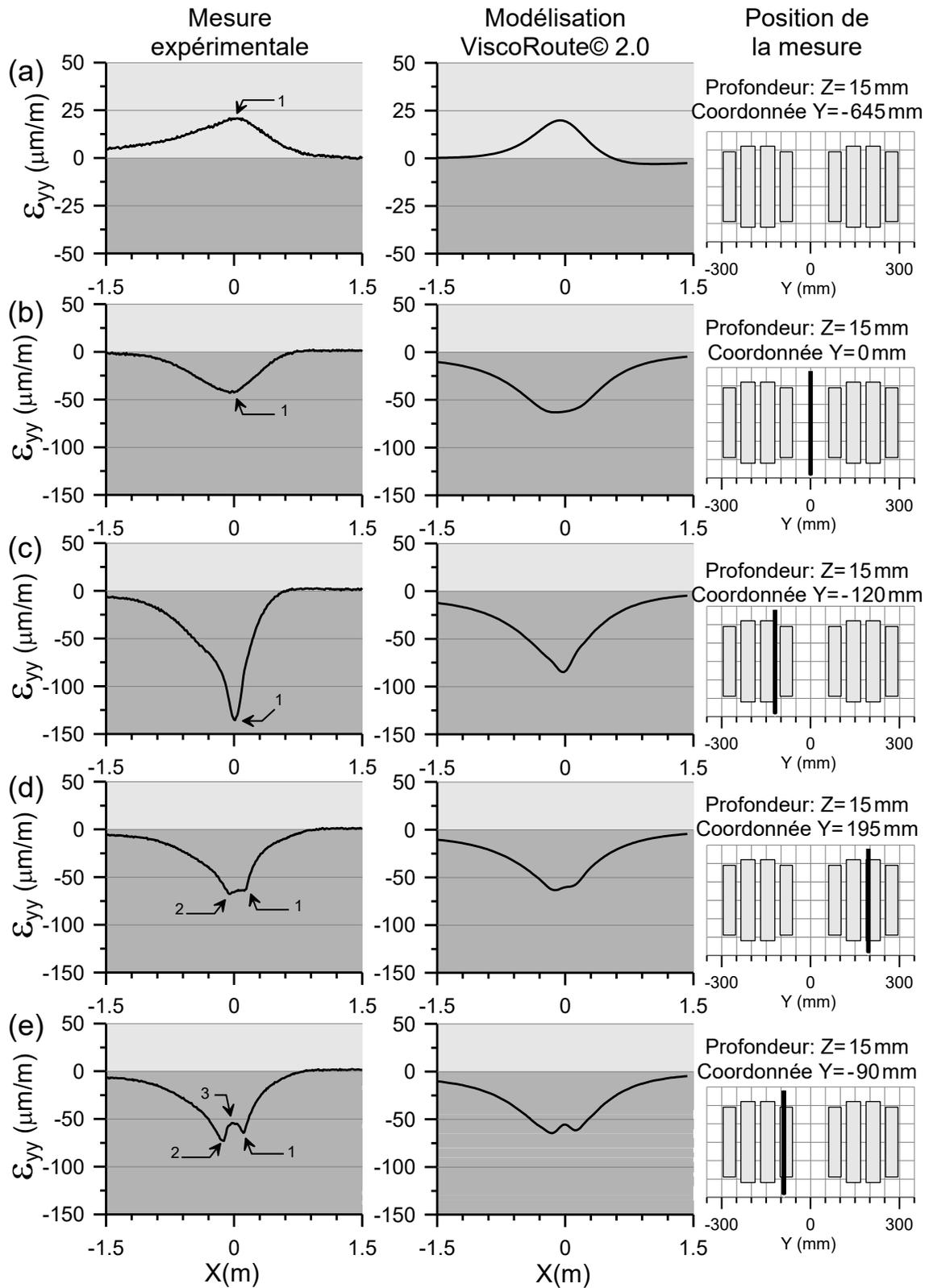


Figure 5.9 : Déformations transversales mesurées et modélisées en $Z = 15$ mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5 t, 43 km/h, 18 °C) pour la section A : (a)-(b) extérieur à la charge, (c)-(e) sous la charge

Lorsque la jauge est située à l'extérieur de la charge (figure 5.9(a)), les déformations mesurées sont positives (extension). Celles-ci augmentent au fur et à mesure que la charge approche de la jauge jusqu'à atteindre un maximum au passage du pneu (point n° 1 identifié sur la figure). Après le passage de la charge, les déformations diminuent progressivement jusqu'à atteindre une déformation nulle. Le signal n'est pas symétrique compte tenu de la viscoélasticité de la couche bitumineuse. Les prédictions du modèle ont une forme similaire. L'extension a une amplitude qui dépend de la distance par rapport à la charge et des conditions environnementales. Les modélisations montrent que l'extension est maximale entre 300 à 400 mm à l'extérieur de la charge. Au niveau de l'espacement entre les deux pneus (figure 5.9(b)), les déformations sont uniquement négatives (contraction). La contraction atteint son maximum sous la charge puis diminue progressivement.

Lorsque la jauge est située directement sous la charge, il est possible de distinguer trois formes caractéristiques. Lorsque la jauge est située au droit d'une rainure (figure 5.9(c)), le signal est de la même forme que celui au niveau de l'espacement entre les pneus. Les amplitudes mesurées sont cependant plus élevées. Le maximum est atteint lorsque la jauge est située directement sous la charge. Lorsque la mesure est située au droit d'une nervure ou sur les bords d'une nervure (figure 5.9(c)), la déformation augmente progressivement, puis atteint un palier et finalement diminue avec le départ de la charge. Le début et la fin du palier (points n° 1 et 2 identifiés sur la figure) coïncident avec l'application et le retrait de la contrainte verticale imposée par le pneu. Cela s'explique par la contribution respective des trois contraintes sur l'amplitude des déformations transversales. Lorsqu'aucune contrainte verticale n'est appliquée (c'est-à-dire avant l'arrivée de la charge), seules les contraintes transversales et longitudinales contribuent à la déformation. Les déformations sont alors en contraction et augmentent avec l'augmentation des contraintes. Par effet Poisson, l'application de la contrainte verticale a pour effet de limiter cette contraction ce qui entraîne le palier identifié. Les modélisations montrent que cette forme est obtenue lorsque les jauges sont situées sous les nervures, c'est-à-dire où les contraintes verticales sont les plus élevées. En fonction de l'amplitude respective de chacune des trois contraintes et en fonction des propriétés physiques (propriété viscoélastique et coefficient de Poisson) de la couche bitumineuse, la contrainte verticale peut imposer localement une diminution de l'amplitude du signal. Ce cas est illustré à la figure 5.9(e). Un extremum local (point n° 3) apparaît et correspond au passage du centre

de la charge. Les signaux de cette forme sont principalement présents au niveau des nervures extérieures des pneus, à l'endroit où les contraintes horizontales (transversale et longitudinale) sont moins élevées qu'au centre de la charge.

Au droit de la section B, les signaux présentent les mêmes formes que ceux de la section A. La principale différence se situe au niveau de l'amplitude des extensions mesurées de part et d'autre du pneu et au niveau de l'espacement entre les deux pneus. Tel que présenté à la figure 5.10(a) pour le cas expérimental n° 73 (annexe 1), l'extension mesurée par les jauges à l'extérieur des pneus est significativement plus élevée que celle déterminée à partir des modélisations. Plus les températures sont élevées, plus les écarts sont importants. Au niveau des nervures extérieures des pneus du jumelé, les jauges mesurent une extension qui est suivie et précédée par deux pics de contraction. Ces signaux sont présentés à la figure 5.10(b). Les modélisations montrent une forme du signal similaire à celle mesurée expérimentalement. Cependant, l'amplitude du point n° 3 est beaucoup moins élevée et l'ensemble du signal reste négatif contrairement aux mesures expérimentales.

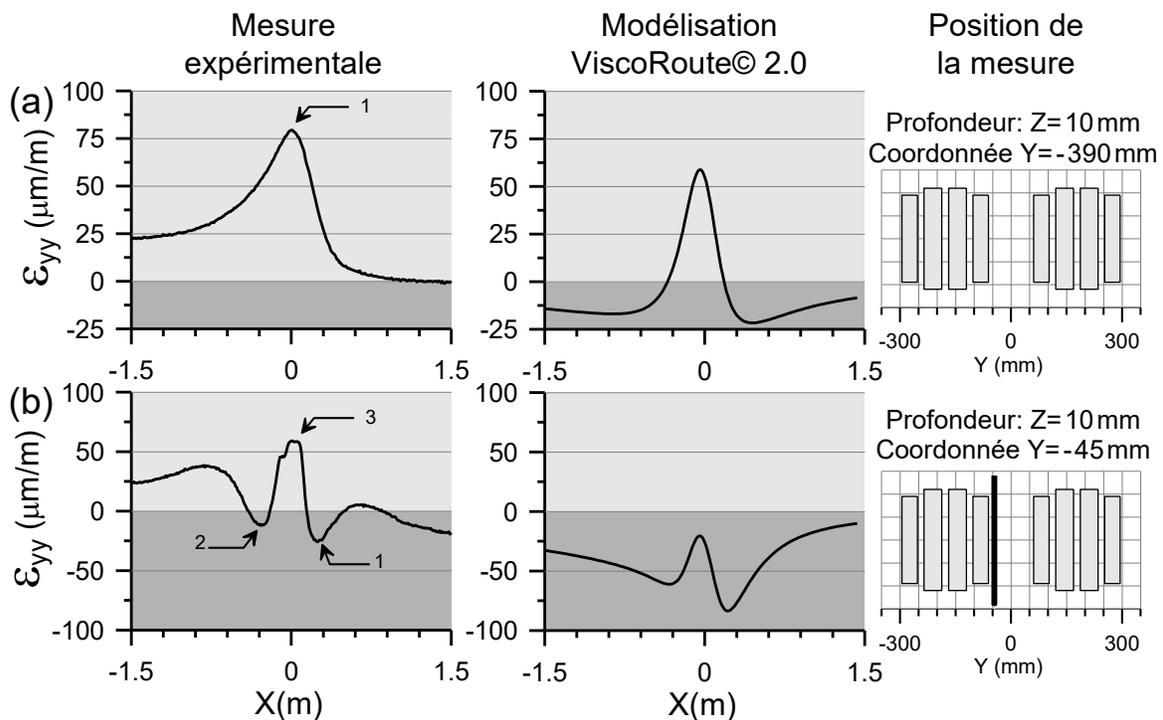


Figure 5.10 : Déformations transversales mesurées et modélisées à 10 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 23,5 °C) pour la section B : (a) extérieur à la charge, (b) bord de la charge

Pour toutes les positions sous le pneu, l'extremum local associé au passage de la charge (en $X = 0$ m) est retenu afin de tracer le bassin des déformations. La figure 5.11 présente les résultats pour 4 cas expérimentaux de la section A. Les bassins de déformations de toutes les conditions expérimentales sont présentés à l'annexe 6. Les cas présentés ici correspondent aux mesures prises sous les deux types de pneus, chargés à 5 tonnes et circulant à 43 km/h. La couche bitumineuse est à une température modérée d'environ 19 °C pour les cas n° 21 et 22 (annexe 1) et à une température chaude d'environ 34,5 °C pour les cas n° 23 et 24 (annexe 1).

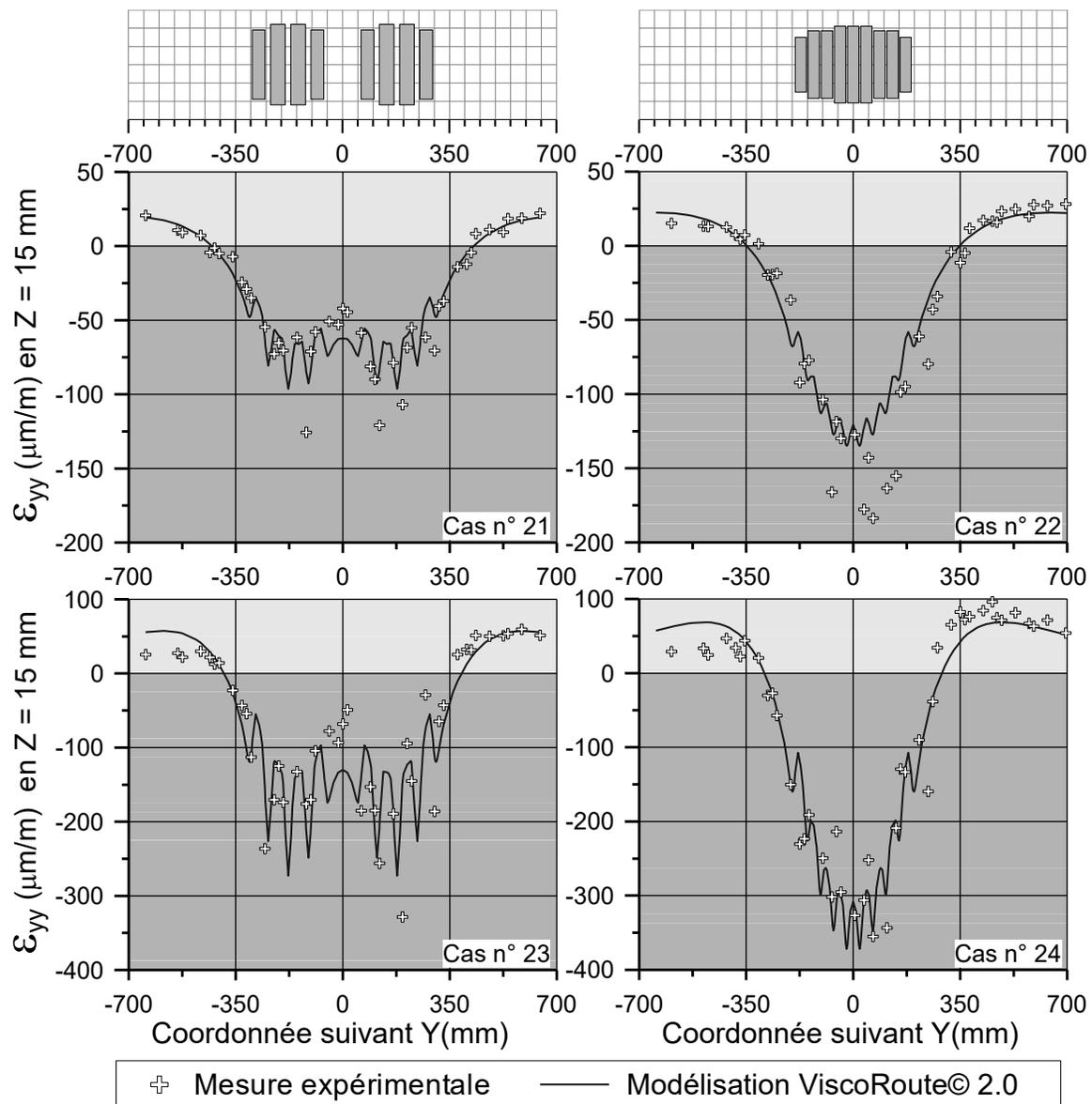


Figure 5.11 : Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 15 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 19 °C (cas n° 21 et 22) et de 34,5 °C (cas n° 23 et 24)

La figure 5.11 superpose les mesures expérimentales avec les bassins obtenus à partir des modélisations. L'acquisition des données consiste à mesurer successivement 4 passages du pneu. Les points présentés correspondent à la moyenne de ces passages. La modélisation des empreintes de pneu est également placée sur le graphique afin d'associer les résultats avec la position sous la charge. Comme précédemment décrit, les pneus engendrent une extension à l'extérieur du pneu et son amplitude augmente avec la température. Sous la charge, le maximum de contraction est atteint au niveau du centre du pneu. Les nervures et les rainures influencent l'amplitude des déformations. Les modélisations montrent que le maximum de déformation est relevé directement sous les rainures du pneu. Plus la température augmente, plus l'influence de l'empreinte de pneu est significative. À titre d'exemple pour le cas n° 23, les modélisations prédisent une amplitude sous la rainure centrale de $-275 \mu\text{m/m}$ contre $-120 \mu\text{m/m}$ sous les nervures adjacentes. Plus la profondeur de mesure augmente, plus l'effet s'estompe. Il est donc recommandé d'en tenir compte lorsque les mesures sont prises à faible profondeur. L'influence de la sculpture du pneu est moins significative avec le pneu large puisque ses rainures ont une largeur plus fine que celles du pneu jumelé

La figure 5.11 montre une bonne corrélation entre les mesures expérimentales et la modélisation ViscoRoute© 2.0. Ponctuellement, plusieurs mesures expérimentales sont plus élevées que les valeurs modélisées, en particulier pour les températures modérées. Au niveau de l'espacement interjumelage, les contractions modélisées sont plus élevées que les données expérimentales. La différence augmente avec la hausse des températures. Pour les cas présentés, le pneu à bande large engendre une extension à l'extérieur du pneu et une contraction sous la charge plus importante que le pneu jumelé. Cette observation expérimentale est confirmée par les modélisations.

La figure 5.12 détaille le bassin des déformations sur la section B pour les conditions expérimentales n° 61, 62, 65 et 66 (annexe 1). Ces cas correspondent aux mesures effectuées pour les deux types de pneus chargés à 5 t aux températures de 22 °C (cas n° 61 et 62) et de 30,5 °C (cas n° 65 et 66). La profondeur de mesure est située à 10 mm sous la surface de la chaussée. Comme pour la section A, les modélisations montrent l'influence de la sculpture du pneu et du type de pneu sur l'amplitude des déformations. Les modélisations montrent que la contraction maximale est obtenue au centre de la charge et sous les rainures du pneu.

L'extension maximale se situe à environ 150 mm du bord du pneu, ce qui est plus rapproché que pour la section A. Ces observations sont confirmées par les mesures expérimentales. Au niveau de la contraction sous le pneu, les graphiques montrent une bonne corrélation entre les mesures expérimentales et les modélisations. Il existe cependant des écarts significatifs au niveau de l'extension à l'extérieur des pneus. Les bassins de déformations confirment les observations précédemment faites au niveau de la lecture du signal de la déformation.

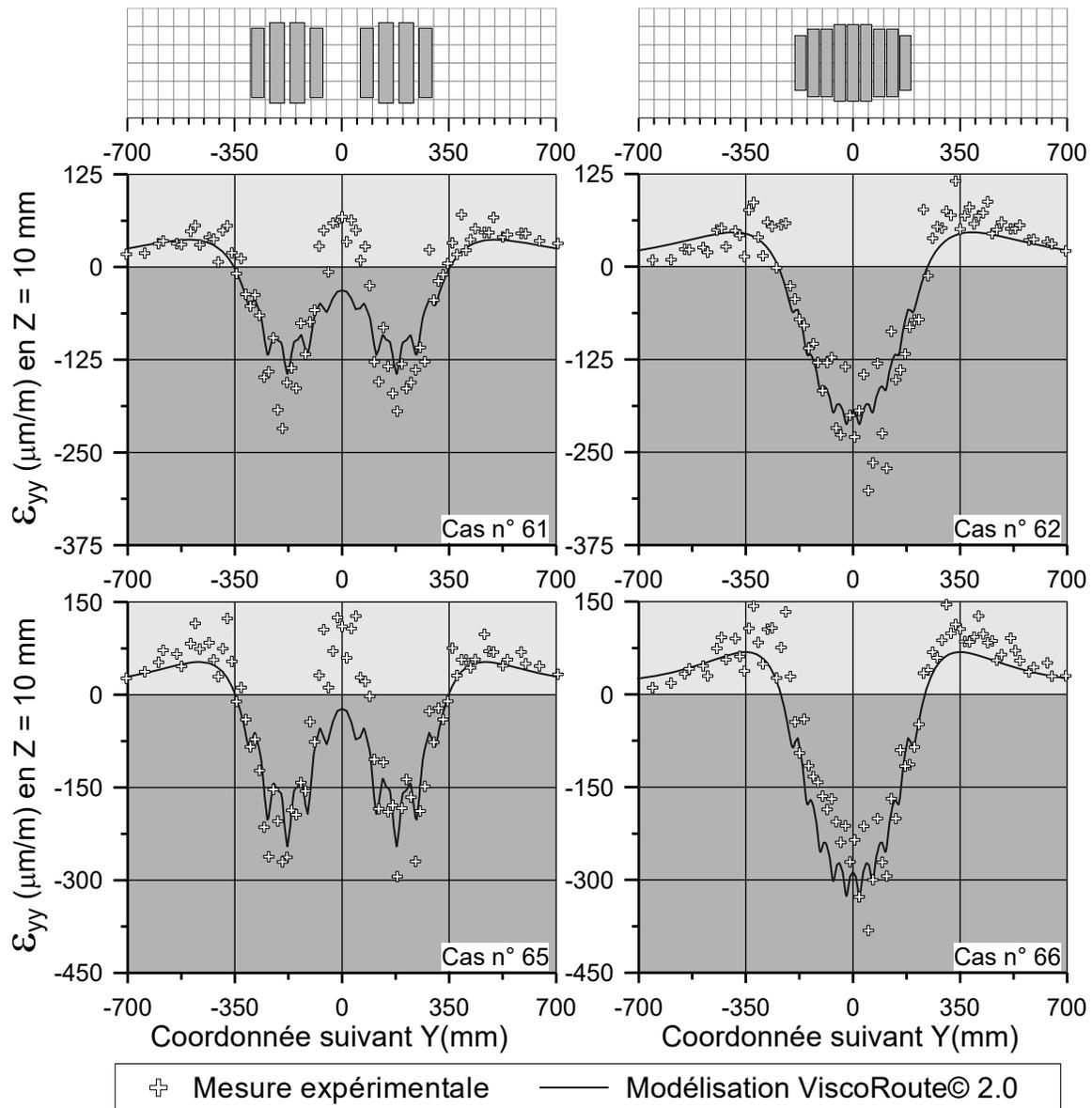


Figure 5.12 : Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 10 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5 t, 43 km/h) pour la section B à une température de 22 °C (cas n° 61 et 62) et de 30,5 °C (cas n° 65 et 66)

Les modélisations montrent une baisse significative de la contraction au niveau de l'espacement entre les deux pneus du jumelé. L'interaction entre les deux pneus du jumelé est moins marquée que sur la section A car les mesures sont effectuées plus proche de la surface soit, 10 mm contre 15 mm précédemment. Les données expérimentales mesurent une extension entre les deux pneus et son amplitude est équivalente à celle mesurée à l'extérieur de la charge.

5.3.2 Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu tridem

La figure 5.13 présente les déformations mesurées à l'extérieur de la charge (figure 5.13(a)), directement sous le pneu (figure 5.13(b)) et proche du bord du pneu (figure 5.13(c)) lors du passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés gonflés à 690 kPa au niveau de la section 1. La température du revêtement est de 10 °C et les jauges sont situées à 20 mm de profondeur. Le comportement de la couche bitumineuse de la section 1 est similaire à celle de la section A. Le maximum d'extension est mesuré à environ 200 mm à l'extérieur de la charge et le maximum de contraction est situé au centre des pneus au niveau des rainures.

À l'extérieur de la charge (en $Y = -530$ mm), les trois essieux du tridem imposent successivement trois pics d'extension (point identifié 1 pour le premier essieu) dont le maximum est associé au passage du pneu au droit de la jauge. Expérimentalement, l'amplitude augmente légèrement au passage de chaque essieu. Cet effet est également identifiable au niveau de la contraction mesurée directement sous la charge (en $Y = 145$ mm). À cette position, le passage de chaque essieu est associé à un pic de contraction (point identifié 1 pour le premier essieu) et son amplitude dépend de la position sous la charge. Entre chaque essieu, la contraction diminue jusqu'à une valeur qui est non nulle compte tenu de l'interaction entre les essieux. Au bord du pneu (en $Y = -90$ mm), le même phénomène que celui identifié pour les sections A et B se produit. Le passage du pneu sur la jauge impose localement par une baisse de la contraction (point identifié 3) ce qui génère deux pics de contraction (points identifiés 1 et 2). Ce phénomène est confirmé par les modélisations mais l'amplitude de la baisse est plus faible que celle mise en avant expérimentalement.

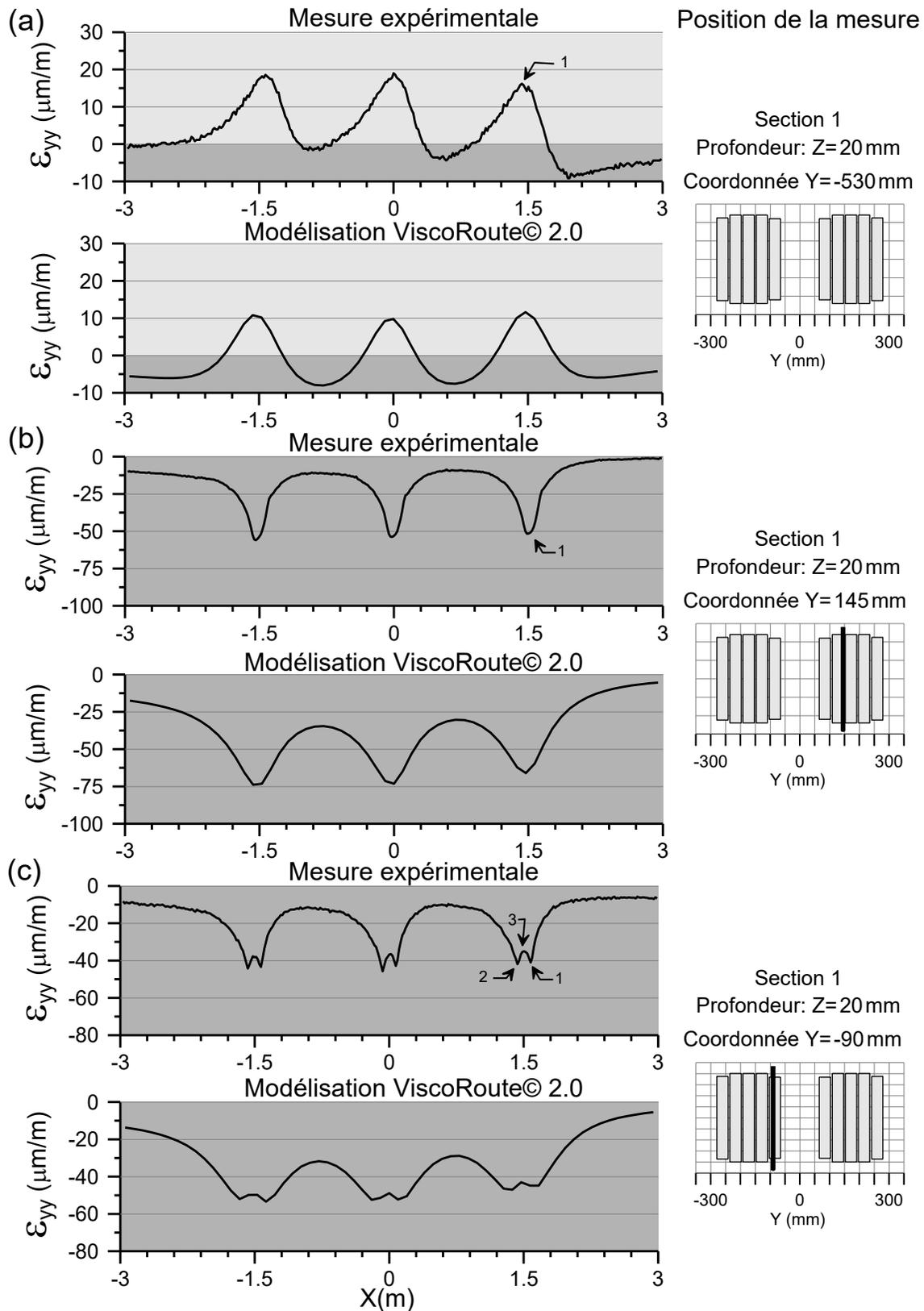


Figure 5.13 : Déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 1 (cas n° 101)

L'amplitude de la déformation, associée au premier essieu du tridem, est utilisée afin de tracer le bassin des déformations. La figure 5.14 présente les bassins de déformations pour les deux types de pneus et pour les trois pressions de gonflage. Les résultats de la modélisation pour la pression de 690 kPa sont également présentés sur les graphiques. Cette figure montre que la modélisation surestime l'amplitude de la contraction et sous-estime l'extension à l'extérieur des pneus. Sous la charge, les données expérimentales sont de 20 % à 30 % plus faibles que les modélisations.

Les mesures expérimentales et modélisées confirment une baisse de la contraction au niveau de l'espacement interjumelage. La déformation reste négative à l'exception de quelques valeurs à la pression de gonflage de 550 kPa. Ces valeurs sont situées autour de $Y = -100$ mm et $Y = 100$ mm pour le pneu jumelé et autour de $Y = -175$ mm et $Y = 175$ mm pour le pneu à bande large. Ces positions coïncident avec les nervures extérieures de chaque pneu. En modifiant la pression de gonflage des pneus, il y a une redistribution de la charge sur l'aire de contact. La baisse de pression diminue les contraintes de surface au centre du pneu mais augmente celles sur le bord du pneu. Elle a donc pour effet d'augmenter la contrainte verticale imposée par les nervures extérieures du pneu. Le phénomène mis en évidence à la figure 5.13(c) est accentué lorsque la pression diminue et une extension apparaît au passage de la charge. Les modélisations pour les pressions de gonflage de 550 kPa et 830 kPa n'ont pas été effectuées étant donné que les contraintes de surface pour ces pressions de gonflage n'ont pas été évaluées lors de la campagne expérimentale.

L'influence des nervures et des rainures est moins marquée que sur les sections A et B étant donné que la mesure est effectuée à une température plus basse et à une profondeur plus grande. Plus le module de la couche bitumineuse est élevé, plus l'influence des rainures est atténuée. Il est à noter que les rainures du pneu jumelé utilisé sur les sections 1 et 2 sont plus étroites que celles du pneu utilisé sur les sections A et B.

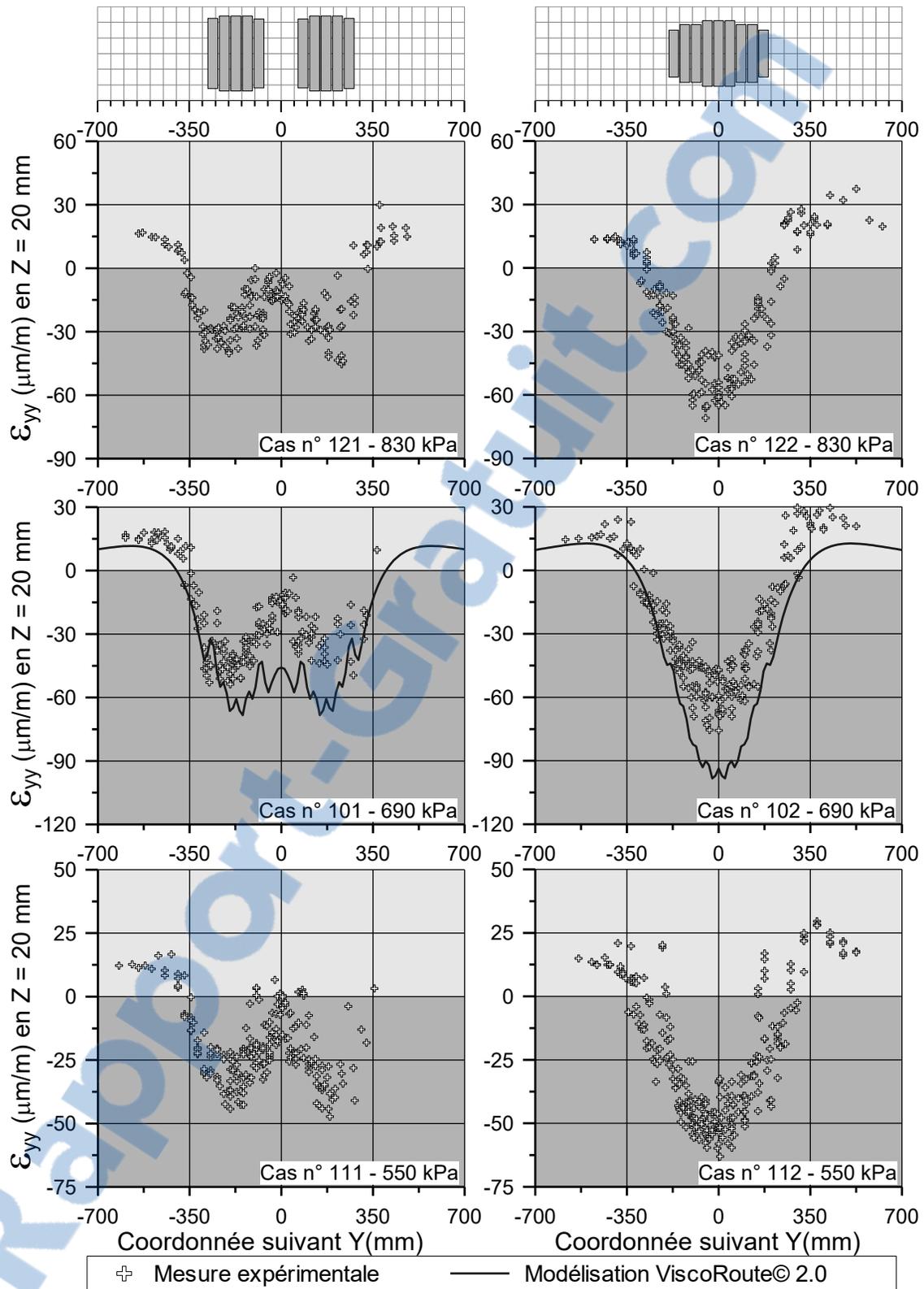


Figure 5.14 : Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 1 et pour trois pressions de gonflage (830 kPa, 690 kPa et 550 kPa)

Les mesures effectuées au niveau de la section 2 montrent un comportement de la couche différent comparativement des autres sections. La figure 5.15 montre que, pour le pneu jumelé, le maximum de contraction n'est plus localisé au centre de chaque pneu mais à quelques centimètres à l'extérieur des pneus. Ces maximums sont situés à environ $Y = -280$ mm, -70 mm, 70 mm et 280 mm. Les deux maximums situés au niveau de l'espacement interjumelage possèdent une amplitude plus élevée que ceux situés sur les extérieurs. Les modélisations confirment ces observations. La figure 5.16(a) présente les signaux obtenus en $Y = 20$ mm. La contraction augmente avec l'arrivée de la charge et atteint un maximum (point identifié 1) au passage de chaque essieu du tridem sur la jauge. Au niveau des bords des pneus, les bassins montrent une forte diminution de la contraction qui se traduit par un saut brutal de la mesure. Un exemple des signaux relevés au niveau de cette zone est présenté à la figure 5.16(b). La figure compare les signaux obtenus à partir des jauges installées sur la plaque de déformation avec celles installées sur les carottes instrumentées et avec les modélisations.

Pour le cas n° 201 (annexe 1), les bassins des déformations montrent que les mesures effectuées avec les carottes se superposent à celles des plaques. La forme des signaux ainsi que les amplitudes associées sont très proches pour les deux types de capteurs. Tel que présenté à la figure 5.16, le signal mesuré avec la carotte diffère légèrement de celui des plaques puisque les trois pneus de l'essieu tridem ne sont pas passés sur les capteurs avec la même distance de passage. Dans cet exemple la jauge est localisée directement sous les pneus des deux premiers essieux et à l'extérieur du pneu pour le troisième. Ce signal illustre bien la sensibilité de la mesure par rapport à la position du pneu puisque pour les deux premiers essieux, la jauge mesure de l'extension alors que le troisième le signal est uniquement en contraction. Pour le pneu à bande large, la localisation du maximum de contraction dépend de la pression de gonflage. À 690 kPa, les mesures expérimentales et les modélisations indiquent que la contraction maximale est située au centre du pneu. Lorsque la pression diminue, la contraction devient plus élevée au bord des pneus. Contrairement au pneu jumelé, aucune extension n'est mesurée directement sous le pneu à l'exception des mesures prises sous les nervures les plus à l'extérieur du pneu.

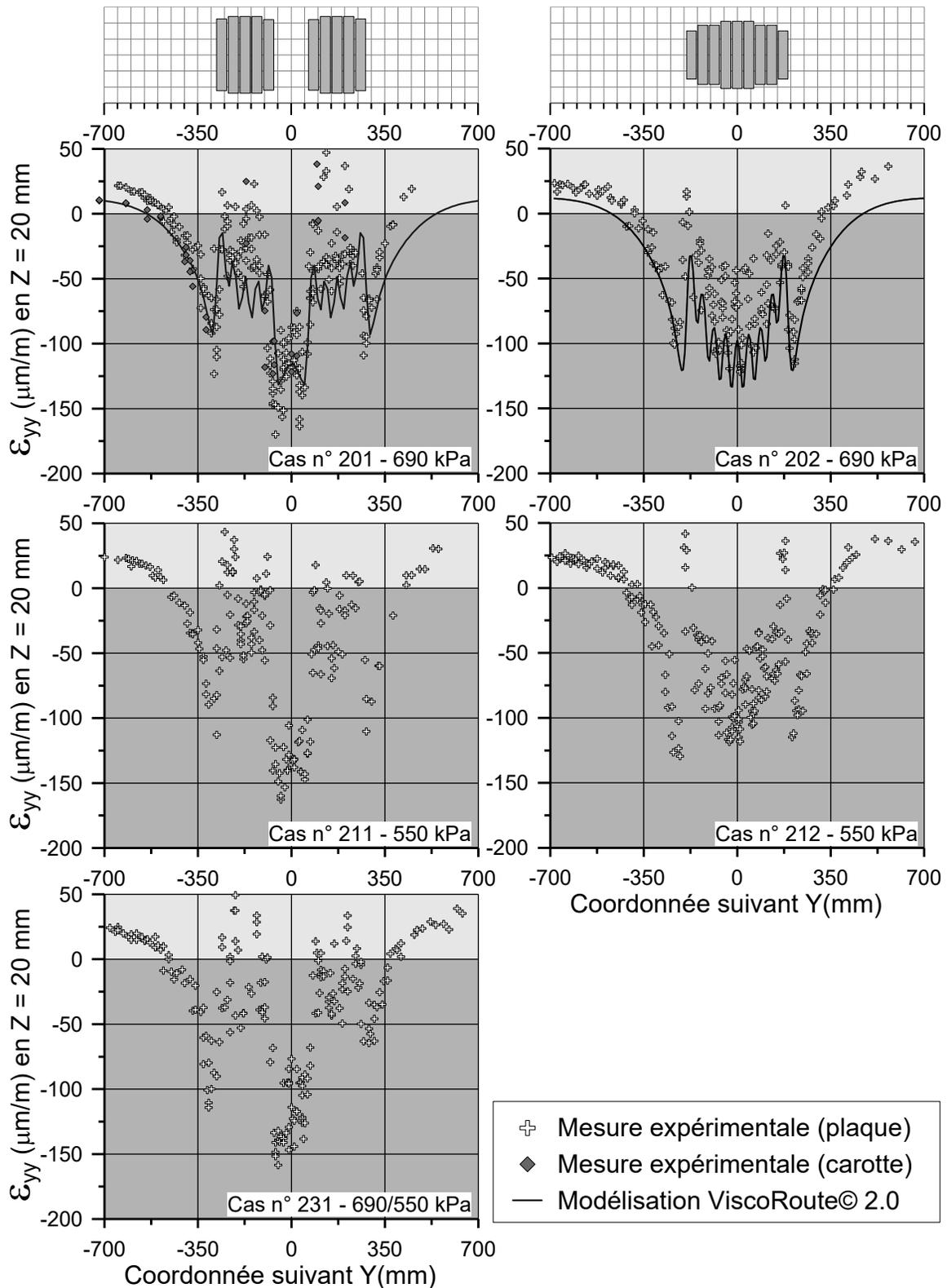


Figure 5.15 : Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 2 et pour deux pressions de gonflage (690 kPa et 550 kPa)



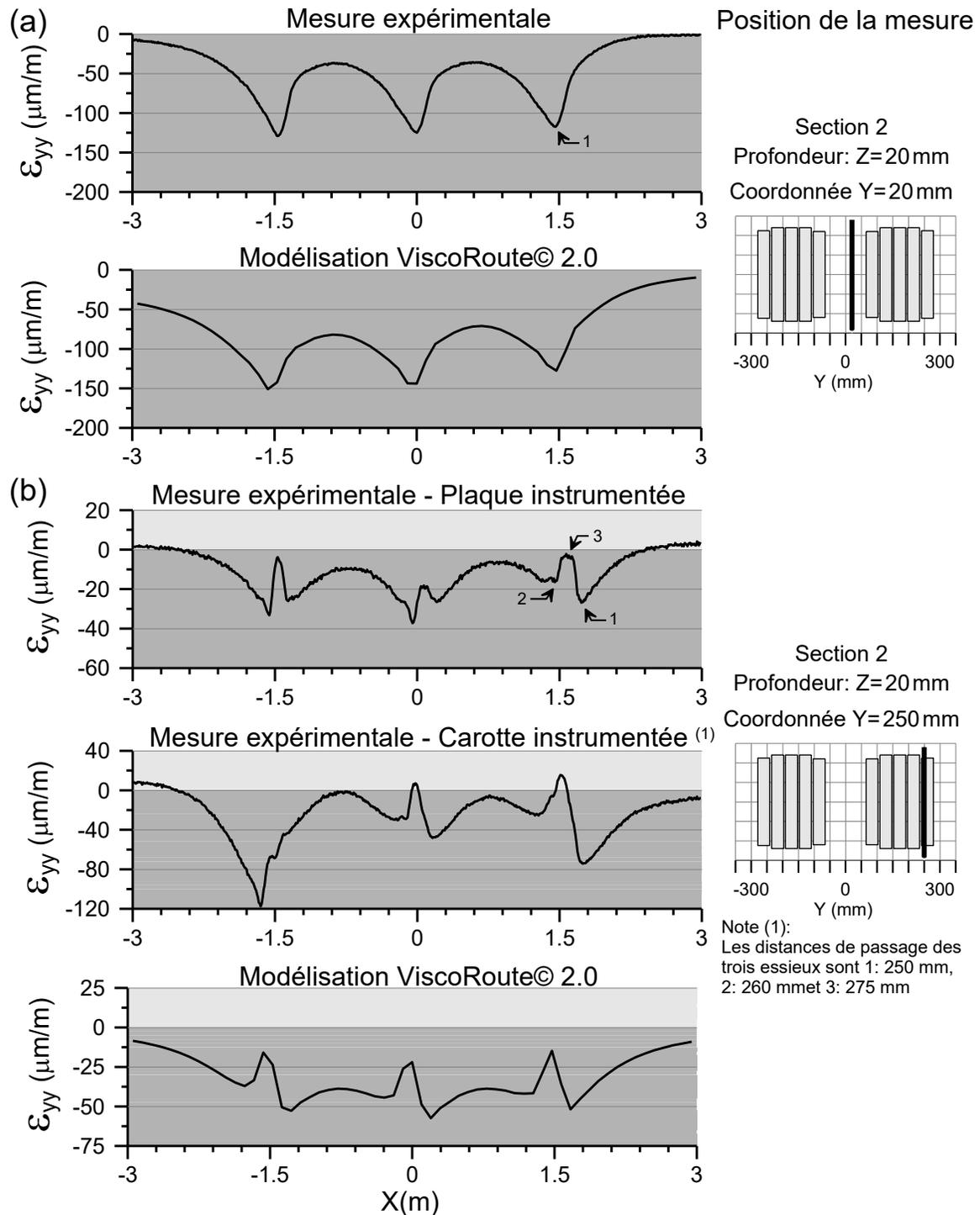


Figure 5.16 : Déformations transversales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus jumelés pour la section 2 (cas n° 201)

5.3.3 Effet des paramètres de charge sur les déformations transversales

Deux critères d'évaluation sont retenus afin d'évaluer l'effet des paramètres de charge sur les déformations transversales. Le premier critère est la contraction maximale mesurée à partir des bassins de déformation et le second est l'extension maximale. Compte tenu de la forme des bassins et de la dispersion des points de mesure engendrée par la sculpture des pneus, la contraction représentative de la condition expérimentale est définie comme la moyenne des six valeurs négatives les plus élevées. Pour les modélisations, la contraction représentative est définie comme la moyenne des valeurs situées au centre des rainures des pneus. Six valeurs, localisées sous six différentes rainures, sont retenues pour le calcul de la moyenne pour le pneu jumelé et pour le pneu à bande large. Une interpolation des mesures expérimentales situées à l'extérieur de la charge est utilisée afin d'extraire un maximum qui correspond au maximum d'extension. La contraction, notée $\varepsilon_{yy \min}$, et l'extension, notée $\varepsilon_{yy \max}$, sont représentées à la figure 5.17 pour la section A et à la figure 5.18 pour la section B. Ces graphiques détaillent l'effet du type de pneu, de la charge totale appliquée et de la température.

Pour les sections A et B, les mesures expérimentales ainsi que les modélisations montrent que la contraction et l'extension augmentent avec l'accroissement de l'intensité de la charge et avec la hausse des températures. Pour les deux sections, les modélisations sous-estiment les mesures expérimentales. Pour la contraction, ces écarts sont en moyenne de l'ordre de 15 % et de 25 % pour les températures modérées respectivement pour les sections A et B et diminuent à environ 10 % et 18 %, respectivement, pour les températures chaudes. En ce qui concerne l'extension, les écarts moyens sont de 16 % et 40 %, respectivement, pour les sections A et B pour les températures modérées et ils augmentent à 22 % et 50 %, respectivement, pour les températures chaudes. Transversalement, sous chaque nervure, des efforts tangentiels (contraintes F_y) sont présents au contact entre le pneu et la chaussée. Cela a pour effet d'augmenter l'amplitude des contractions sous les rainures des pneus. Les modélisations n'intègrent pas cet effet dans les calculs. Plus les mesures sont prises à faible profondeur par rapport à la surface, plus l'effet est significatif.

Section A Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

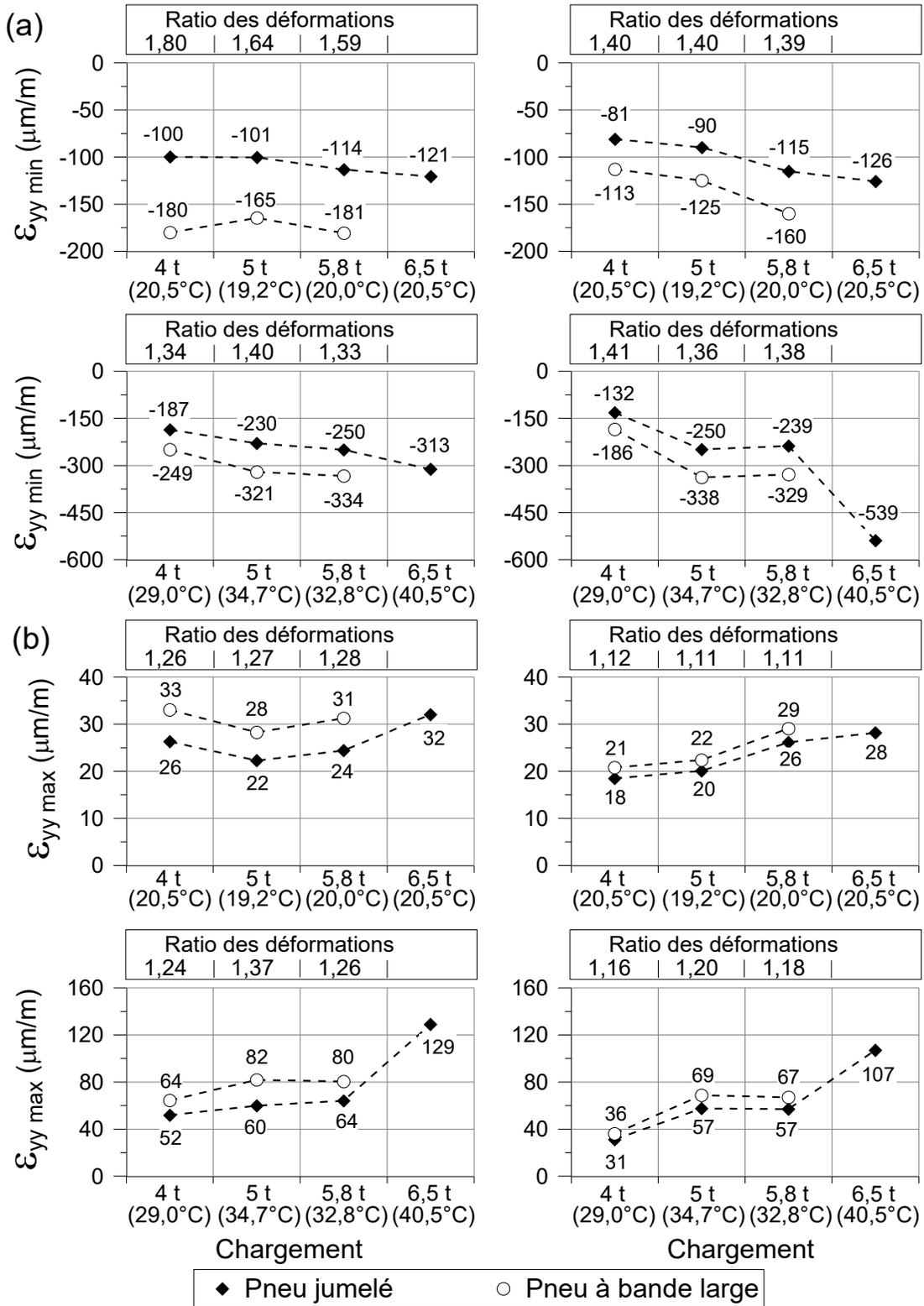


Figure 5.17 : Effet de la charge et de la température (section A, Z = 15 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus

Section B Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

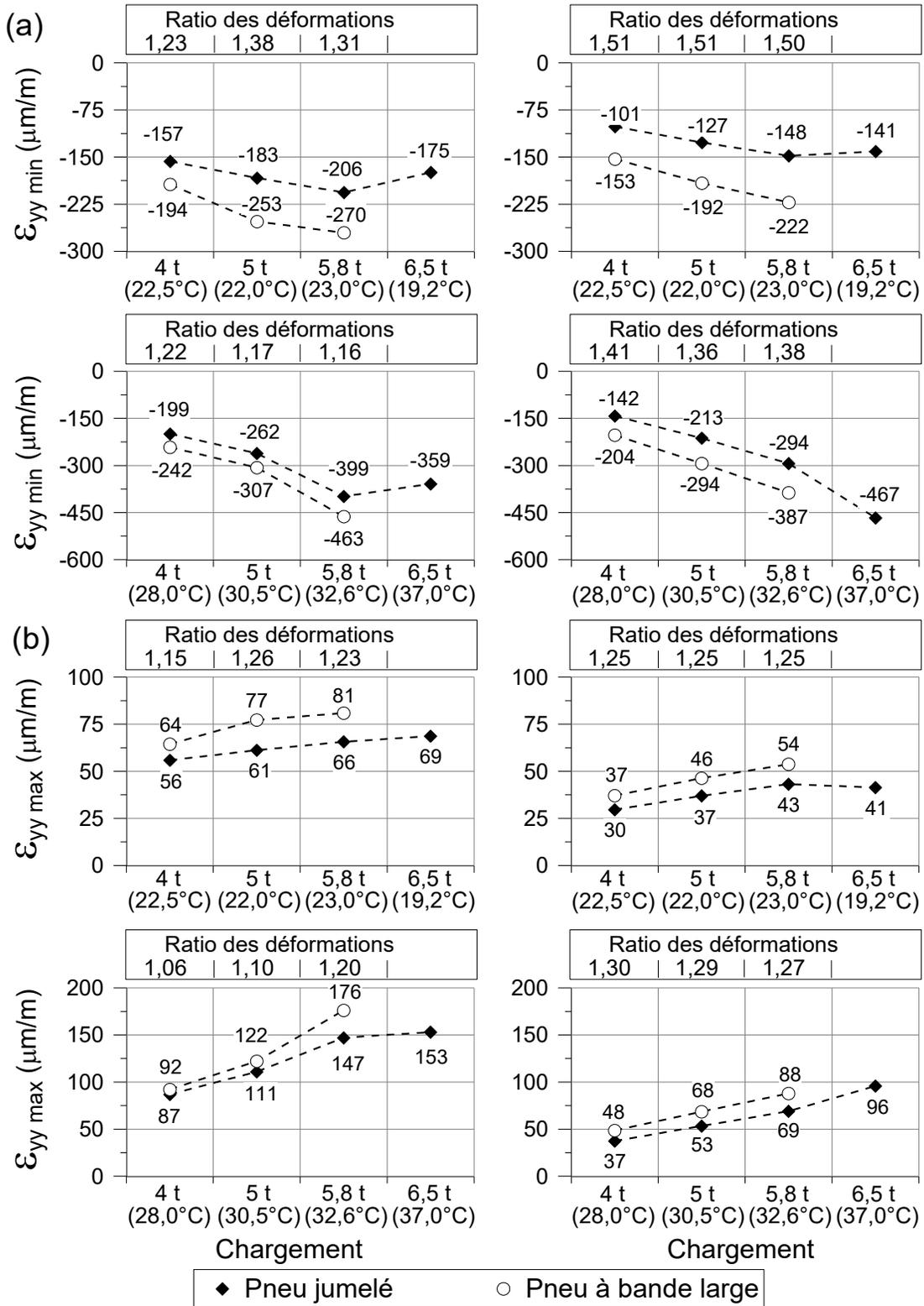


Figure 5.18 : Effet de la charge et de la température (section B, Z = 15 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus

Pour les deux sections, les contractions engendrées par le pneu jumelé sont inférieures à celles s'exerçant sous le pneu à bande large. Les ratios de déformation sont donc tous supérieurs à 1. Expérimentalement, pour la section A, le pneu à bande large génère en moyenne des contractions 1,68 fois supérieures au pneu jumelé pour les températures modérées. Ce ratio moyen diminue à 1,35 pour les températures chaudes. Les ratios sont moins élevés sur la section B (respectivement 1,30 et 1,18). Dans les deux cas, les ratios diminuent avec l'augmentation des charges et avec l'augmentation des températures. Contrairement aux mesures expérimentales, les ratios calculés à partir des modélisations sont peu sensibles à la charge. Ils dépendent principalement de la température de la couche bitumineuse. Les modélisations montrent que les ratios diminuent avec l'augmentation de la température. Le modèle suppose que l'augmentation de la charge se distribue proportionnellement sur l'ensemble du pneu. Cela explique en partie pourquoi les ratios ne sont pas sensibles à l'augmentation de la charge.

Pour les deux sections, l'extension engendrée par le pneu jumelé est inférieure à celle du pneu à bande large. Les ratios sont tous supérieurs à 1. Expérimentalement, pour la section A, le pneu à bande large génère une extension 1,27 fois supérieure au pneu jumelé pour les températures modérées et ce ratio reste sensiblement le même pour les températures élevées (1,29). Au niveau de la section B, les ratios moyens sont plus faibles et ils diminuent de 1,22 à 1,12 avec la hausse des températures. Les modélisations montrent que le ratio des déformations augmente avec la hausse de la température, respectivement de 1,11 à 1,18 pour la section A et de 1,25 à 1,29 pour la section B.

La figure 5.19 présente l'effet de la vitesse sur l'amplitude des contractions sous la charge. Les contractions présentées correspondent à celles obtenues par un seul capteur et ne sont pas calculées à partir des bassins de déformation. Ces données sont comparées aux modélisations pour les deux sections. Les conditions expérimentales sont les suivantes : les pneus sont chargés à 5 tonnes et la température du revêtement est d'environ 22,5 °C.

Section A Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

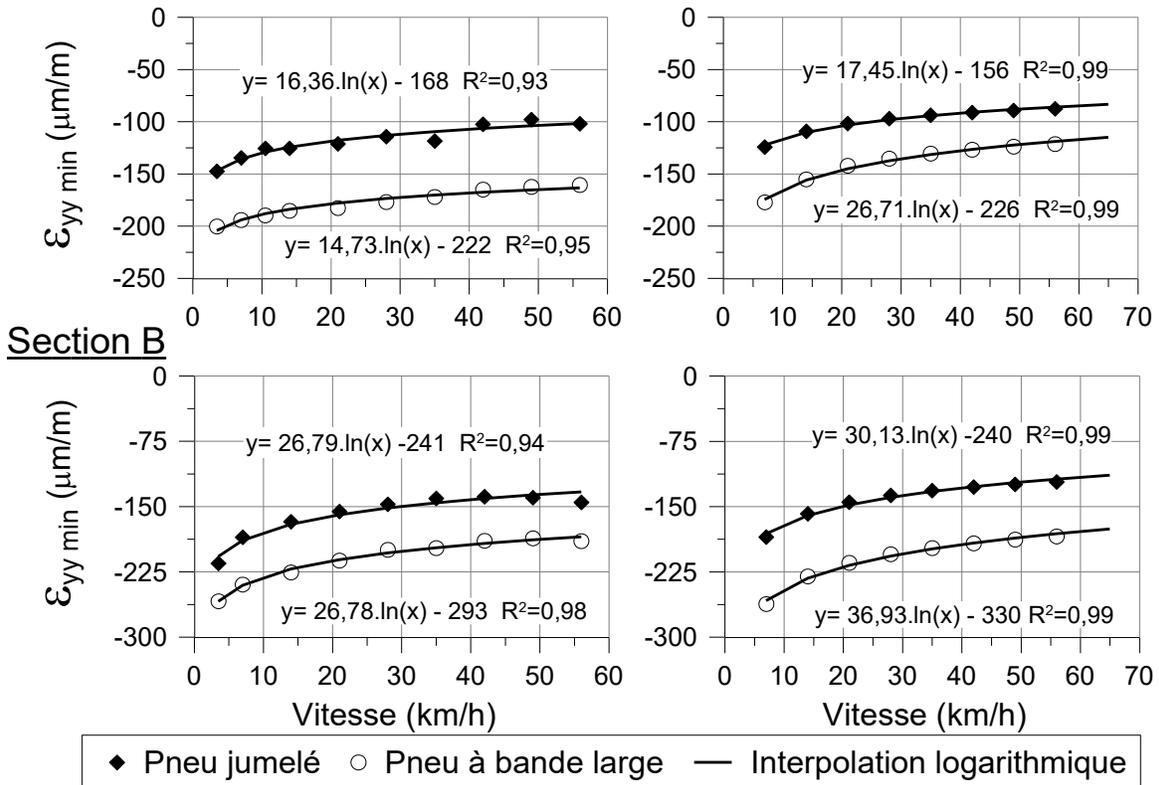


Figure 5.19 : Effet de la vitesse sur la contraction des déformations transversales (sections A et B, Z = 15 mm)

Plus la vitesse diminue, plus les déformations augmentent, ce qui est conforme aux observations faites précédemment. Les amplitudes de contraction peuvent être interpolées par des lois logarithmiques. Plus le coefficient situé devant le logarithme est élevé, plus les déformations sont sensibles à la vitesse. Au niveau de la section A, les données expérimentales montrent que le ratio des déformations augmente de 1,35 (3,5 km/h) à 1,60 (56 km/h). Sur la section B, il augmente de 1,25 à 1,39. Ces mesures confirment que plus les vitesses sont lentes, plus le ratio est faible. Sur l'ensemble, les ratios sont plus faibles sur la section B. Cela est conforme avec les observations effectuées précédemment.

La figure 5.20 montre l'effet de la pression de gonflage sur les déformations transversales à 20 mm de profondeur aux sections 1 et 2. Au niveau de la section 1, les mesures ont été effectuées pour des températures autour de 10 °C. Les contractions et les extensions mesurées sont donc de faibles amplitudes.

Section 1

Mesure expérimentale

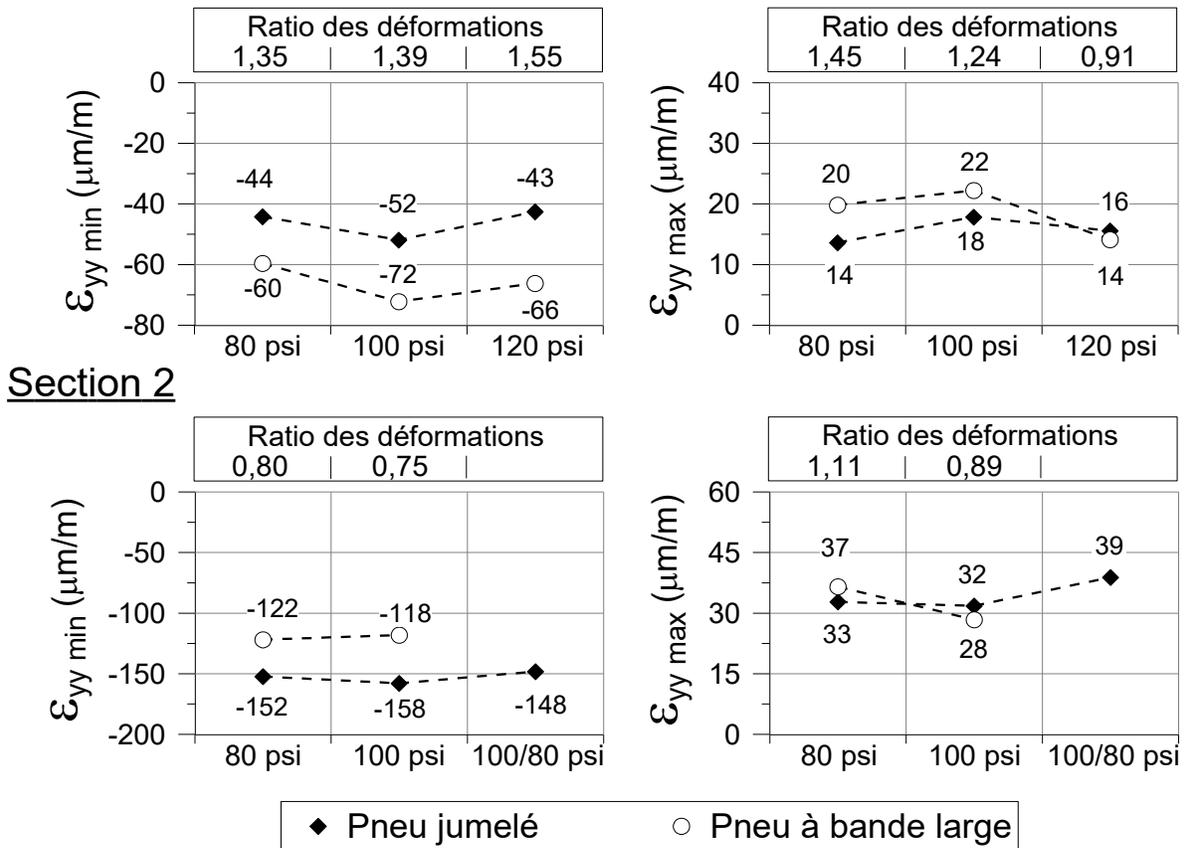


Figure 5.20 : Effet de la pression de gonflage sur l'extension au bord des pneus et la contraction sous la charge de la déformation transversale en $Z = 20$ mm (sections 1 et 2)

Pour les deux types de pneus, le fait de baisser la pression de gonflage ou de l'augmenter par rapport à la pression de référence de 690 kPa a pour effet de diminuer d'environ 10 % à 15 % les contractions mesurées sous la charge et de diminuer de 15 % à 35 % l'extension à l'extérieur de la charge. Sur la section 2, la baisse de pression diminue la contraction d'environ 3 % pour le pneu jumelé mais augmente celle du pneu à bande large de 3 %. Cette baisse a également pour effet d'augmenter l'extension d'environ 28 % pour le pneu large et de 3 % pour le pneu jumelé. Ces variations sont essentiellement observables sur les bords du pneu. Les pressions différentielles dans les deux pneus du jumelé ont pour conséquence d'augmenter de 20 % l'extension mesurée sous le pneu.

5.3.4 Synthèse et enseignements

Dans la direction transversale, en surface (10 - 20 mm) le passage d'une charge a pour effet d'engendrer de l'extension à l'extérieur du pneu. L'extension maximale dépend de la rigidité de la structure et de l'épaisseur totale des couches bitumineuses. Elle est située entre 150 mm et 300 mm à l'extérieur du pneu pour les cas étudiés dans ce projet. Sous la charge, les déformations en surface (10 - 20 mm) sont en contraction. L'amplitude du signal dépend de la position sous le pneu et des sculptures du pneu. Pour les structures moins épaisses, le maximum de contraction est localisé au centre du pneu sous une des rainures. L'influence de l'empreinte de pneu augmente lorsque les températures montent et la rigidité de la structure diminue. Pour les structures plus épaisses (section 2), le maximum d'extension est localisé au niveau de l'espacement entre les deux pneus du jumelé. Pour le pneu à bande large, la localisation dépend des pressions de gonflage. Le maximum peut être situé au centre de la charge ou au niveau des bords du pneu.

Les mesures expérimentales montrent que sous certaines conditions de température, d'intensité de charge et de pression de gonflage, de l'extension peut s'exercer directement sous la charge et au bord des pneus. Ce phénomène dépend également des propriétés mécaniques des matériaux et de l'épaisseur de la structure. Les déformations transversales sont très sensibles aux conditions environnementales ainsi qu'aux paramètres de charge. La localisation des maximums de déformation varie en fonction des propriétés des matériaux et de l'épaisseur des structures. Il est donc recommandé d'évaluer les déformations transversales sous l'ensemble du pneu. Le tableau 5.4 résume l'influence des conditions expérimentales sur les contractions et sur l'extension. Ces conclusions sont les mêmes que pour les déformations longitudinales. Les principales conclusions de l'analyse comparative entre les mesures expérimentales et les modélisations pour les sections A et B sont synthétisées dans le tableau 5.5. Les pourcentages indiqués dans le tableau sont des valeurs moyennées sur l'ensemble des conditions expérimentales. Le tableau 5.6 résume l'effet des conditions expérimentales sur le ratio des déformations entre les deux types de pneus.

Tableau 5.4 : Effet des conditions expérimentales sur les déformations transversales

Paramètres	Amplitude de la contraction	Extension maximale
Charge	Augmentation de l'amplitude avec l'augmentation de l'intensité de charge	Augmentation de l'extension avec l'augmentation de l'intensité de charge
Température	Augmentation de l'amplitude avec l'augmentation de la température	Augmentation de l'extension avec l'augmentation de la température
Vitesse	Diminution de l'amplitude avec l'augmentation de la vitesse	Diminution de l'extension avec l'augmentation de la vitesse
Structure de chaussée	Augmentation de l'amplitude pour les structures plus faibles	Augmentation de l'extension pour les structures plus faibles

Tableau 5.5 : Comparaison des mesures expérimentales et des modélisations

Paramètres	Amplitude de la contraction	Extension maximale
Température modérée	Modélisation sous-estime les mesures de 15 % et 25 % pour les sections A et B	Modélisation sous-estime les mesures de 16 % et 40 % pour les sections A et B
Température élevée	Modélisation sous-estime les mesures de 10 % et 18 % pour les sections A et B	Modélisation sous-estime les mesures de 22 % et 50 % pour les sections A et B
Charge	Les écarts diminuent avec l'augmentation de l'intensité de la charge	Les écarts diminuent avec l'augmentation de l'intensité de la charge
Type de pneu	Sous-estimation de 16 % pour le pneu à bande large et de 20 % pour le jumelé	Sous-estimation de 30 % pour les deux pneus

Tableau 5.6 : Effet des conditions environnementales sur les ratios de déformation

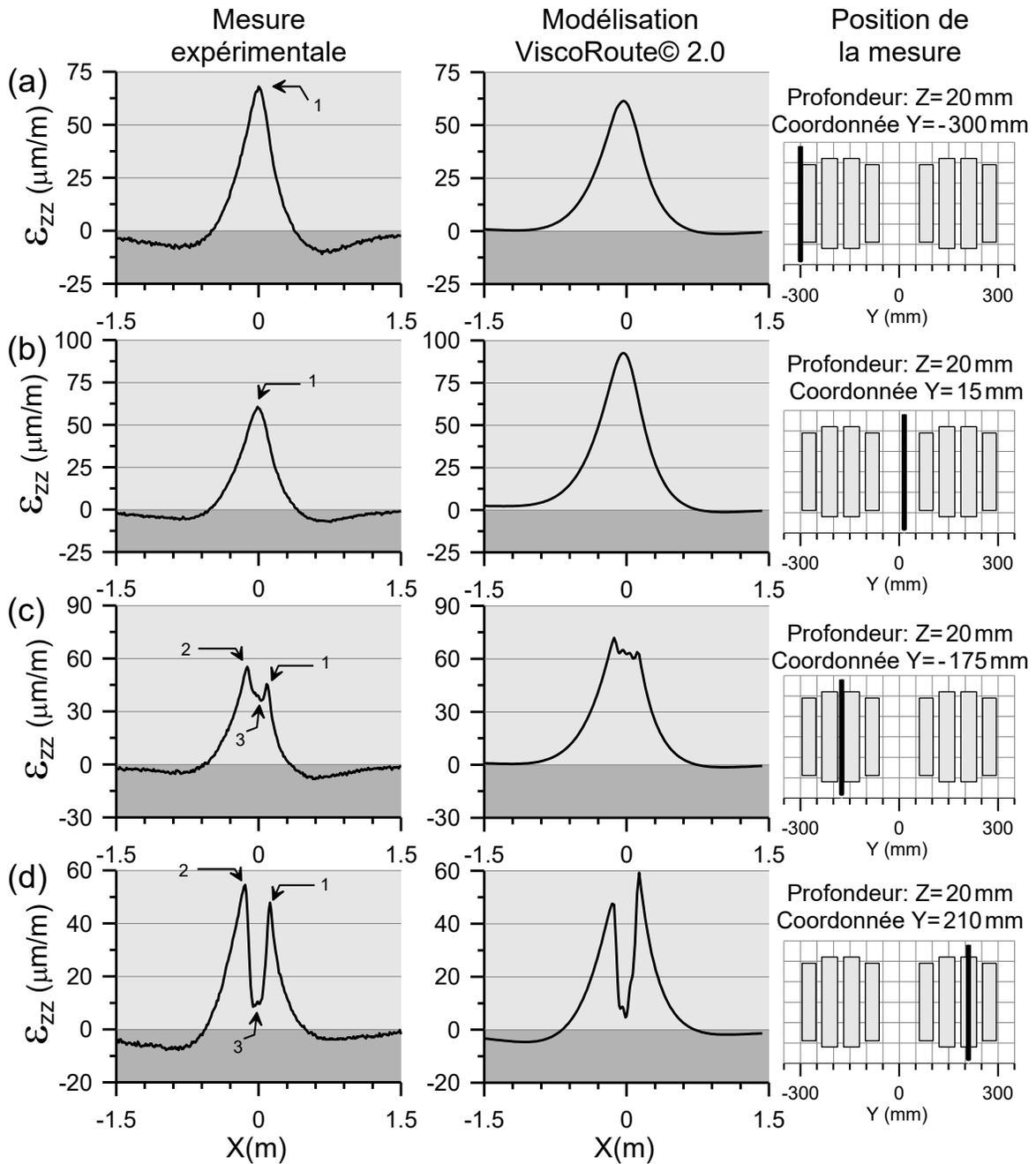
Paramètres	Ratio des déformations (contraction)		Ratio des déformations (extension)	
	Mesure expérimentale	Modélisation	Mesure expérimentale	Modélisation
Augmentation des températures	Diminue	Diminue	Augmente	Augmente
Augmentation de la charge	Diminue	Constant	Augmente	Diminue
Ratio moyen	Section B : 1,25 Section 1 : 1,43 Section A : 1,52 Section 2 : 0,78	Section B : 1,44 Section 1 : 1,44 Section A : 1,39 Section 2 : 1,01	Section B : 1,17 Section 1 : 1,20 Section A : 1,28 Section 2 : 1,00	Section B : 1,27 Section 1 : 1,08 Section A : 1,15 Section 2 : 1,05

5.4 Analyse des déformations verticales à faible profondeur (20 à 30 mm sous la surface)

5.4.1 Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu simple

Les déformations verticales dépendent principalement des propriétés viscoélastiques des matériaux et des conditions de température. Comme pour les déformations transversales, l'amplitude et la forme du signal vont également être fonction de la position sous la charge. Les signaux mesurés sur la section B possèdent des formes similaires à ceux de la section A. Uniquement ceux de la section A sont donc présentés. Les mesures sont effectuées à 20 mm de profondeur sous deux conditions de températures. La figure 5.21 présente les signaux obtenus pour un chargement de 5,8 tonnes et pour une température de 20 °C (cas n° 31). La figure 5.22 présente les déformations pour les mêmes conditions de charge mais la température est de 32,8 °C (cas n° 33). Sur ces figures, les déformations sont présentées suivant une représentation spatiale afin de les comparer aux modélisations ViscoRoute© 2.0.

Lorsque la jauge est située à l'extérieur de la charge (figure 5.21(a)) et au niveau de l'espacement entre les pneus (figure 5.21(b)), les déformations mesurées et modélisées sont uniquement positives (extension). La déformation augmente à l'arrivée de la charge jusqu'à atteindre son extension maximale aux environs de $X = 0$ m puis diminue progressivement. L'extension maximale est le point identifié 1. Étant donné que la jauge est située à l'extérieur de la charge, le pneu n'applique aucune contrainte verticale. La déformation mesurée est uniquement la conséquence des contraintes de compression longitudinales et transversales qui, par effet de Poisson, engendrent de l'extension. L'amplitude du signal dépend de celle des contraintes et du coefficient de Poisson de la couche bitumineuse. L'amplitude maximale est mesurée juste sous le bord des pneus. Celle-ci diminue en s'éloignant de la charge. À l'extérieur de la charge, la forme du signal est la même pour les deux températures. Seule l'amplitude du signal augmente pour les températures plus chaudes.

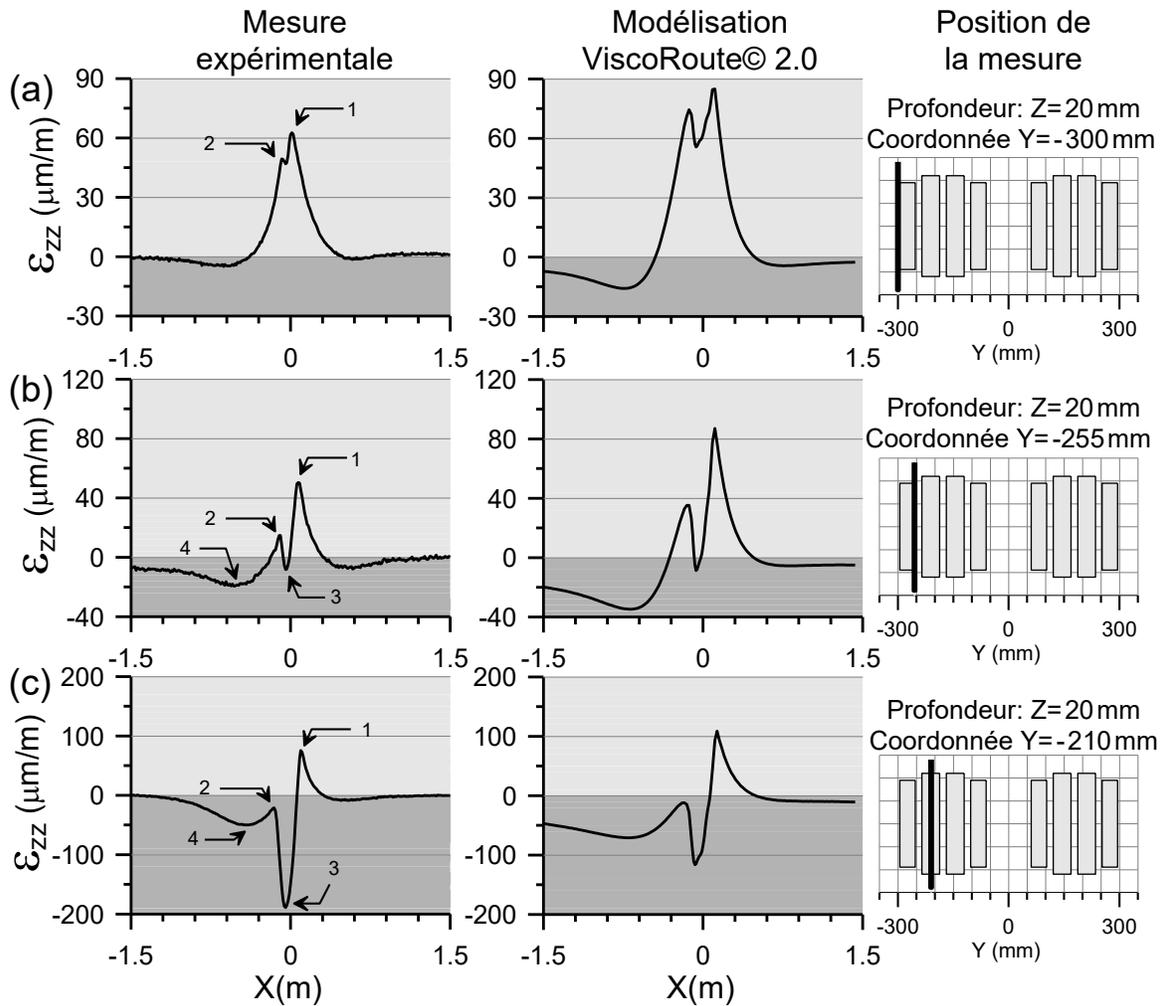


**Figure 5.21 : Déformations verticales mesurées et modélisées en $Z = 20$ mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 20 °C) pour la section A :
(a)-(b) extérieur à la charge, (c)-(d) sous la charge**

Sous la charge, le signal dépend de la position du capteur par rapport aux rainures et aux nervures du pneu. Le signal mesuré sous les rainures du pneu est constitué de trois points caractéristiques (figure 5.21(c)). La déformation augmente progressivement jusqu'à atteindre un premier maximum (point identifié 1). Spatialement, ce point correspond à la présence de

l'avant du pneu au niveau de la jauge. À partir de ce point, le pneu impose verticalement une compression qui s'ajoute aux contraintes horizontales déjà présentes. Cette compression a pour conséquence de diminuer l'extension ce qui génère un palier au niveau du signal (point identifié 3). La taille du palier correspond approximativement à la longueur de l'empreinte de pneu. Lorsque le pneu s'éloigne, l'amplitude augmente de nouveau pour atteindre un second maximum d'extension (point identifié 2) puis les déformations diminuent jusqu'à une valeur nulle loin de la charge. L'amplitude du palier dépend de la contrainte verticale imposée par la charge. Plus la contrainte appliquée est élevée, plus la diminution associée sera marquée. Ce phénomène est maximal directement sous le centre des nervures du pneu, où la compression verticale est la plus grande. La figure 5.21(d) présente les déformations sous une des nervures du pneu. Les mesures expérimentales montrent que pour plusieurs positions sous le pneu, le point 3 se situe dans le domaine négatif, c'est-à-dire que le passage du pneu impose de la contraction.

La figure 5.22 présente les déformations pour les températures élevées et pour trois positions sous le pneu : (a) au bord du pneu, (b) sous la rainure extérieure et (c) sous une des nervures centrales. Pour ces dernières positions, la charge engendre de la contraction (point identifié 3). Les modélisations montrent que la contraction est maximale au centre des nervures. Cet extremum est précédé et suivi de deux autres extremums (points identifiés 1 et 2) qui correspondent au début et à la fin de l'application de la contrainte verticale. Comme pour les cas présentés à la figure 5.21, l'extension qui se développe à l'approche de la charge atteint son amplitude maximale à l'avant du pneu. L'amplitude du point 2 est plus faible que celle du point 1 compte tenu de la viscoélasticité du matériau. Ce point peut être situé dans le domaine négatif ou positif. Avec l'éloignement de la charge, la déformation diminue de nouveau jusqu'au point 4 puis revient progressivement à une valeur nulle. L'amplitude respective des 4 points identifiés dépend de l'intensité de la charge, de la température, des propriétés viscoélastiques des matériaux et du coefficient de Poisson.



**Figure 5.22 : Déformations verticales mesurées et modélisées en $Z = 20$ mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 32,8 °C) pour la section A :
(a) bord de la charge, (b)-(c) sous la charge**

Les valeurs retenues pour tracer les bassins de déformation sont les points identifiés 3 sous la charge et les points identifiés 1 à l'extérieur. Toutes les mesures expérimentales et les résultats de modélisation sont donnés à l'annexe 6. La figure 5.23 présente 4 de ces résultats pour la section A. Les deux types de pneus sont chargés à 5 tonnes et circulent à 43 km/h. La couche bitumineuse est à une température modérée (19 °C) pour les cas n° 21 et 22 (annexe 1) et à une température élevée (34,5 °C) pour les cas n° 23 et 24 (annexe 1). La figure compare les mesures expérimentales avec les bassins obtenus à partir des modélisations. Quatre passages successifs de la charge ont été enregistrés lors des essais. Chaque valeur expérimentale présentée sur le bassin des déformations correspond à la moyenne de ces passages.

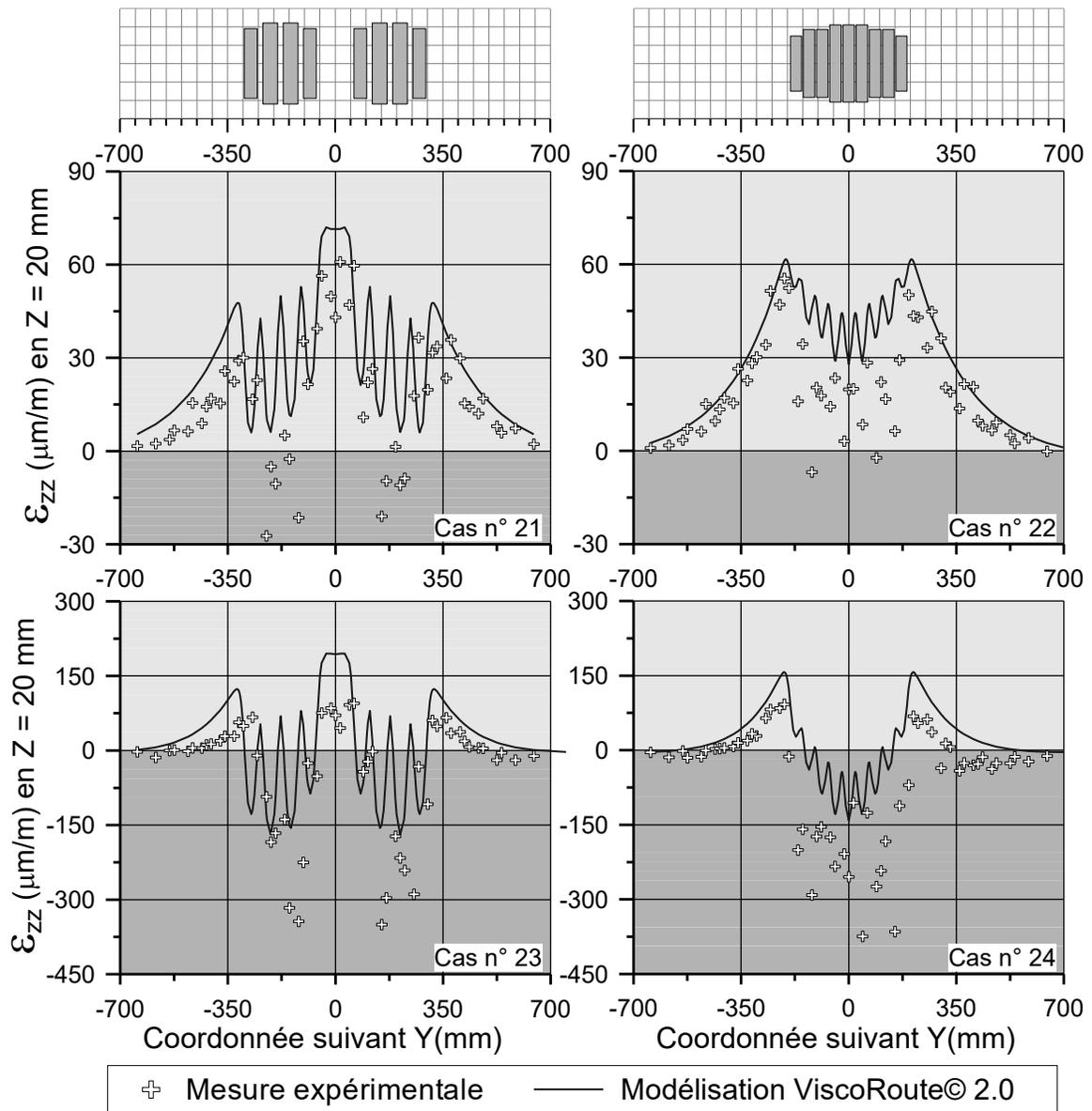


Figure 5.23 : Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 19 °C (cas n° 21 et 22) et de 34,5 °C (cas n° 23 et 24)

Tel que précédemment décrit, la figure montre une extension à l'extérieur des pneus dont l'amplitude est maximale au bord des pneus. Pour le pneu jumelé, l'extension au niveau de l'espacement entre les deux pneus est plus élevée que celle sur les bords extérieurs. Plus les températures sont élevées, plus l'extension augmente. Pour les deux types de pneus, la modélisation surestime l'amplitude de l'extension et les écarts sont plus importants pour les

températures élevées. Sous la charge, le maximum de contraction est mesuré au centre des nervures situées au milieu du pneu. Plus la température augmente, plus l'influence de l'empreinte de pneu est significative. À titre d'exemple pour le cas n° 24, l'amplitude sous la nervure centrale est de $-140 \mu\text{m/m}$ contre $-40 \mu\text{m/m}$ au droit des rainures adjacentes (valeurs obtenues à partir des modélisations). Les rainures du pneu jumelé sont plus larges que celles du pneu large et cela a pour effet d'accentuer le phénomène. La dispersion des points expérimentaux est en partie engendrée par la géométrie des empreintes des pneus. Plus la profondeur de mesure augmente, plus l'effet s'estompe. Il est ici recommandé d'en tenir compte puisque les mesures sont effectuées à 20 mm sous la surface. Les modélisations suivent correctement le comportement mis en évidence par les jauges, c'est-à-dire l'extension sous la charge pour les températures modérées et la contraction lorsque les températures sont élevées. Dans ces deux plages de température, les modélisations sous-estiment cependant l'amplitude mesurée par les jauges.

Deux principales raisons expliquent les écarts observés. Tout d'abord, les déformations verticales sont très sensibles aux deux paramètres de modélisation suivant : la température et le coefficient de Poisson. La figure 5.24 montre un exemple de l'effet de ces deux paramètres sur l'extension et la contraction. L'exemple correspond au cas expérimental n° 23 (annexe 1) pour lequel les déformations sont calculées pour des températures variant de $19 \text{ }^\circ\text{C}$ à $39 \text{ }^\circ\text{C}$ (coefficient de Poisson fixé à 0,32). Dans un second temps, la température est fixe ($35 \text{ }^\circ\text{C}$) et le coefficient de Poisson varie de 0,30 à 0,44. Cette figure montre qu'une hausse de température de $2 \text{ }^\circ\text{C}$ entraîne des augmentations de plus de 50 % pour la contraction et de 10 % pour l'extension. L'acquisition des mesures expérimentales durait environ 2 heures. Au cours de ces 2 heures, les températures pouvaient varier d'environ de $2 \text{ }^\circ\text{C}$ à $6 \text{ }^\circ\text{C}$ proche de la surface. Il est possible que certaines mesures soient plus élevées à cause de ces variations de température. La température utilisée pour les modélisations est considérée uniforme sur toute la profondeur de la couche et correspond à la température moyenne des 2 heures d'acquisition. Pour les modélisations, le coefficient de Poisson est maintenu constant pour toutes les conditions expérimentales bien que celui-ci soit fonction de la température et de la fréquence de sollicitation. En fonction des matériaux et des températures, le coefficient de Poisson de l'enrobé varie entre 0,3 et 0,45. Les modélisations montrent qu'une variation de 0,2 de ce coefficient entraîne des variations de l'ordre de 20 % de la contraction et de 10 %

de l'extension. La seconde raison qui explique les écarts entre la modélisation et les mesures vient des hypothèses considérées pour les conditions d'interface entre les deux couches bitumineuses. Cet élément est traité dans le prochain chapitre.

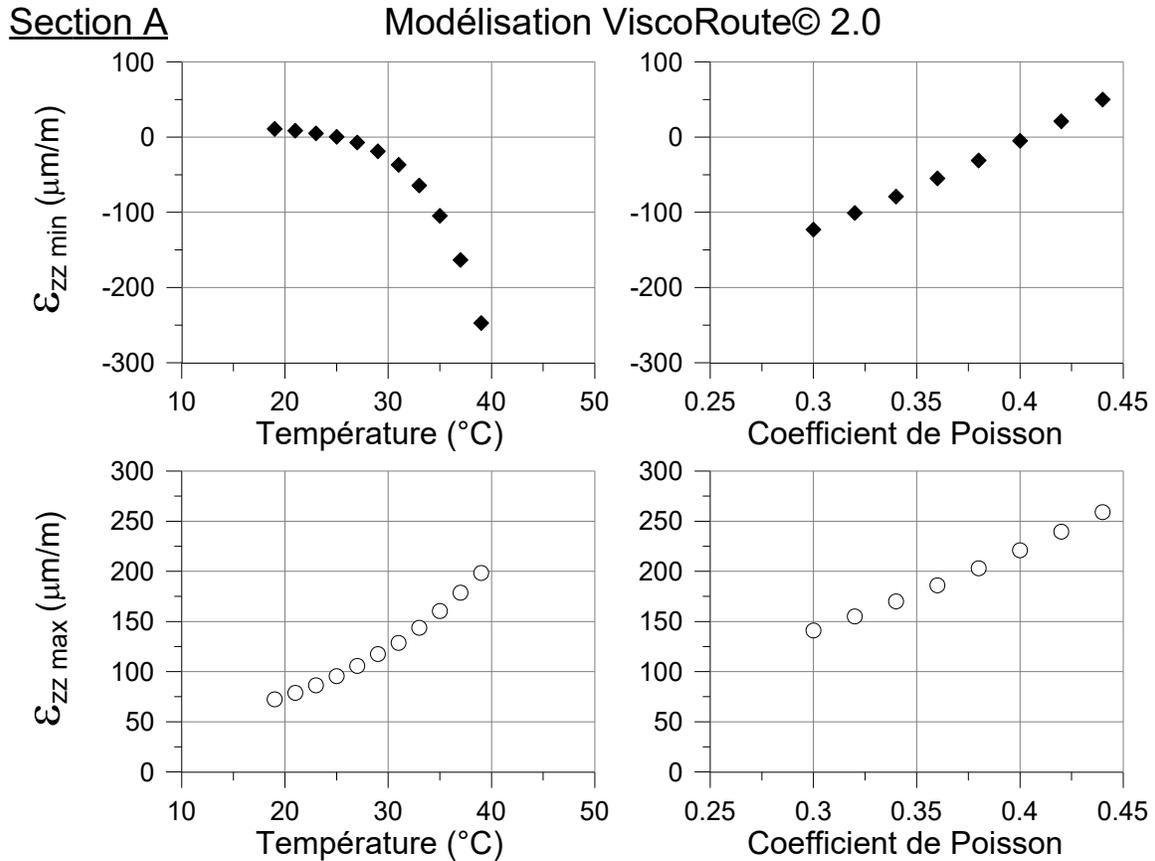


Figure 5.24 : Effet de la température et du coefficient de Poisson sur les déformations verticales (section A)

La figure 5.25 présente les bassins de déformation mesurés et calculés pour les cas expérimentaux n° 51, 52, 55 et 56 de la section B (annexe 1). Pour ces 4 cas, le chargement est de 4 tonnes et les températures sont respectivement de 22,5 °C et de 28 °C pour les cas n° 51 et 52 et les cas n° 55 et 56. Les mesures expérimentales montrent un comportement similaire à celui de la section A avec une extension maximale mesurée au bord des pneus et un maximum de contraction mesuré au milieu de la charge. Contrairement aux mesures expérimentales, toutes les déformations calculées à partir des modélisations sont positives.

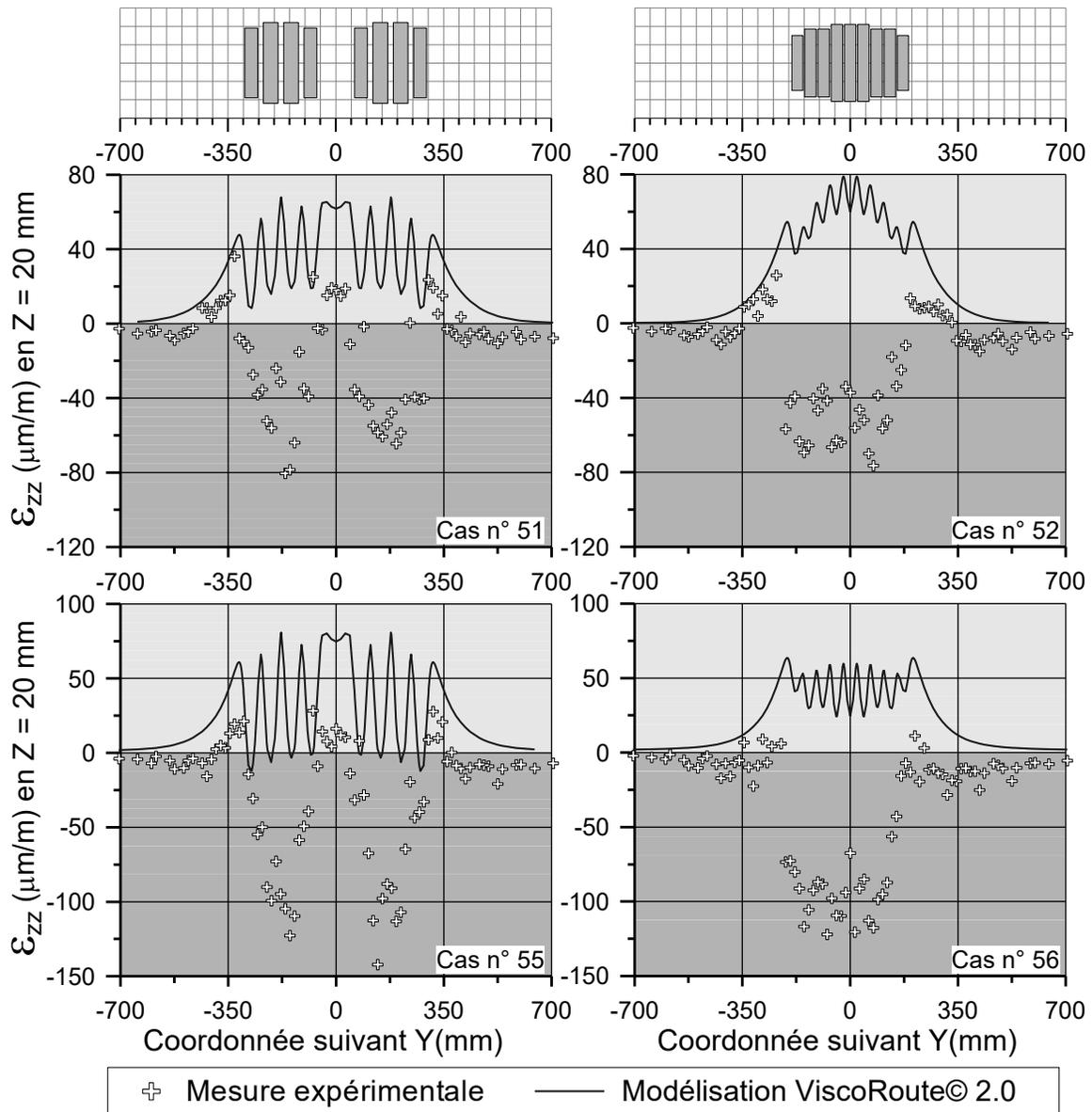


Figure 5.25 : Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 20 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (4 t, 43 km/h) pour la section B à une température de 22,5 °C (cas n° 51 et 52) et de 28,0 °C (cas n° 55 et 56)

Pour les deux températures, le pneu génère de l'extension sous la charge. Le revêtement bitumineux de la section B n'est que de 70 mm et cela a pour effet d'engendrer des contraintes longitudinales et transversales très importantes proche de la surface. À titre d'exemple, pour le cas expérimental n° 55, la contrainte longitudinale est de $-1,14$ MPa et la contrainte transversale de $-0,90$ MPa alors que la contrainte verticale sous une nervure est d'environ $-0,60$ MPa. Par effet de Poisson, compte tenu de ces amplitudes, la déformation calculée par le logiciel est positive sous le pneu. Plus les structures sont fines, plus la distribution des

contraintes au contact du pneu avec la chaussée a des répercussions sur la déformation proche de la surface. Pour la section C, l'hypothèse de ne considérer que des contraintes verticales uniformes n'est pas valide. Un ajustement de la distribution des pressions de contact devrait être fait afin de pouvoir exploiter les résultats de modélisation en ce qui concerne les déformations verticales proche de la surface. Les résultats issus des modélisations ne sont donc pas présentés. Seuls les résultats expérimentaux sont utilisés afin d'évaluer l'effet des paramètres de la charge sur les déformations.

5.4.2 Signaux caractéristiques et bassin des déformations pour un essieu tridem

La figure 5.26 présente les deux types de signaux mesurés lors du passage d'un essieu tridem équipé de pneus à bande large gonflés à 690 kPa au niveau de la section 2. La température du revêtement est de 23 °C et les jauges sont situées à 20 mm de profondeur. La figure présente un exemple de la déformation relevée à l'extérieur de la charge (figure 5.26(a)), directement sous le pneu (figure 5.26(b)) et au bord du pneu (figure 5.26(c)). Les signaux relevés au niveau de la section 1 et de la section 2 ayant la même forme, uniquement ceux de la section 2 sont présentés. Comme pour les sections A et B, la déformation est en extension à l'extérieur de la charge. Les trois essieux du tridem agissent comme trois essieux simples. Il y a cependant une légère interaction entre les essieux puisque la déformation ne décroît pas jusqu'à une valeur nulle entre chaque essieu. L'extension mesurée sous le troisième essieu est supérieure à celle du second qui est elle-même supérieure à celle du premier. Cet effet est engendré par la viscoélasticité des matériaux. Sous la charge, les trois essieux se comportent également comme trois essieux simples. Le signal de déformation comporte les mêmes 4 points caractéristiques que ceux définis au niveau de la section A pour les températures élevées. La contraction, mesurée sous la charge, augmente au passage successif de chaque essieu. Après le départ du tridem, la déformation revient à son état initial.

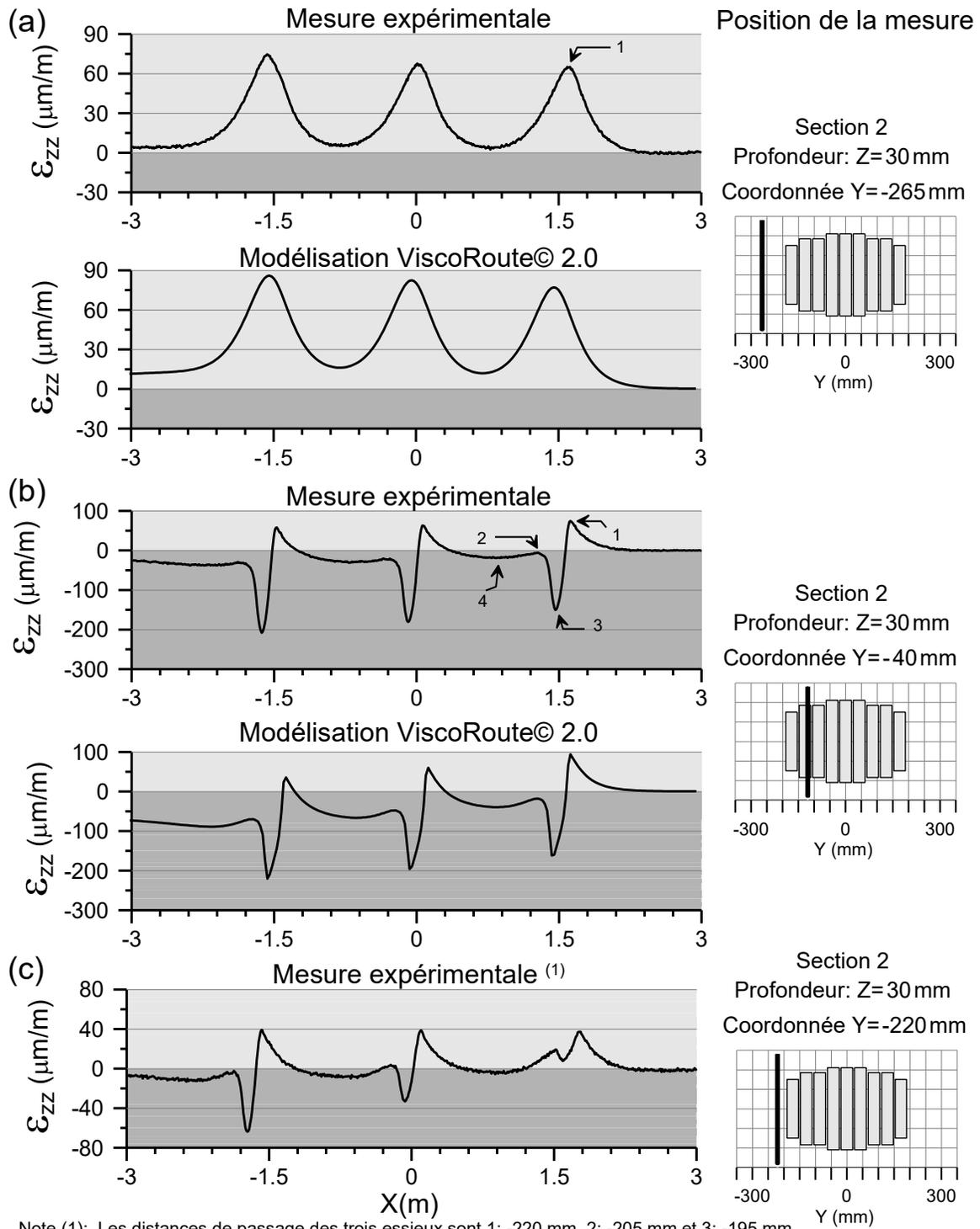


Figure 5.26 : Déformations verticales mesurées et modélisées à 30 mm de profondeur au passage d'un essieu tridem équipé de pneus à bande large pour la section 2 (cas n° 201) : (a) extérieur à la charge, (b) sous la charge et (c) bord de la charge

Au bord du pneu, le signal montre l'influence de la distance de passage sur l'amplitude et le signe des déformations. Les distances de passage de chaque pneu du tridem

sont respectivement de -220 mm, -205 mm et -195 mm. La jauge se situe donc à l'extérieur du pneu pour le premier essieu et directement sous le pneu pour le troisième. La déformation représentative du premier essieu est en extension alors que les deux suivantes sont en contraction. L'amplitude de la déformation associée au passage du premier essieu est utilisée afin de tracer le bassin des déformations pour les sections 1 et 2. Les résultats obtenus pour la section 1 sont présentés à la figure 5.27 et ceux de la section 2 sont détaillés à la figure 5.28.

À la lecture des bassins de déformation, l'extension maximale se situe au niveau de l'espacement entre les deux pneus du jumelé pour les deux sections. Ces observations sont confirmées par les modélisations effectuées dans les cas où la pression de gonflage est de 690 kPa. Pour le pneu à bande large, l'extension maximale se situe au niveau des bords du pneu. Pour les deux types de pneus et pour toutes les conditions expérimentales, la contraction maximale se situe au centre du pneu. La baisse ou l'augmentation des pressions de gonflage ne modifie pas la forme générale des bassins de déformations. Uniquement les amplitudes varient. Pour le cas n° 231, le pneu situé en Y négatif est gonflé à 690 kPa, alors que le pneu en Y positif est à 550 kPa. En imposant une pression différente dans chaque pneu les contraintes en surface se redistribuent. Le pneu avec la pression de gonflage la plus élevée impose une contraction plus élevée que le pneu moins gonflé. Il y a un écart d'amplitude de 30% entre les deux pneus pour les conditions expérimentales correspondantes.

Comme pour la section A, les modélisations de la section 1 surestiment l'extension à l'extérieur de la charge et sous-estiment les contractions sous la charge. Il y a une erreur de 25% sur la contraction et de 70% sur l'extension. Au niveau de la section 2, les modélisations donnent les mêmes valeurs pour l'extension mais des écarts d'environ 30% sont à noter pour la contraction.

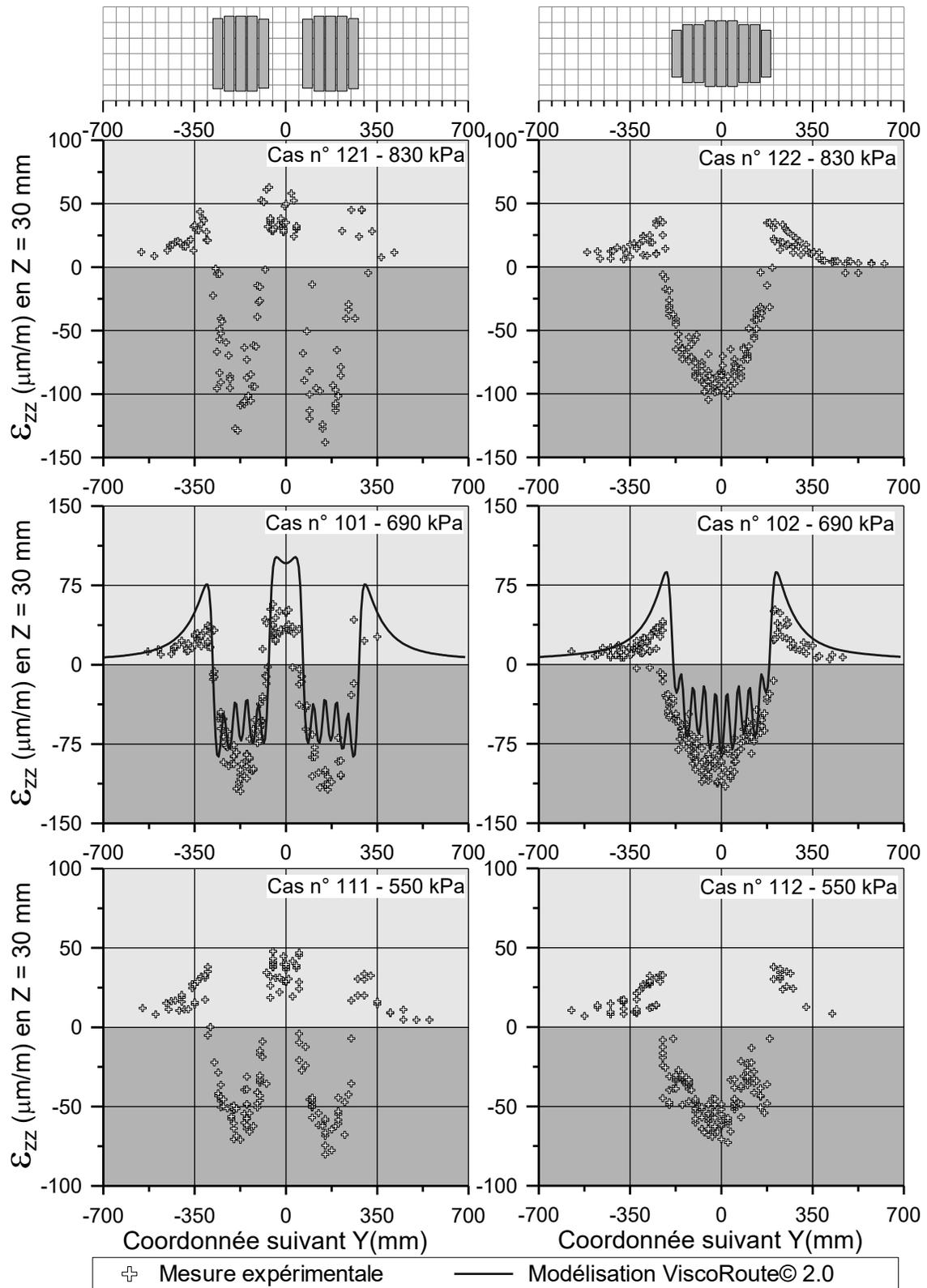


Figure 5.27 : Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 30 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 1 et pour trois pressions de gonflage (830 kPa, 690 kPa et 550 kPa)

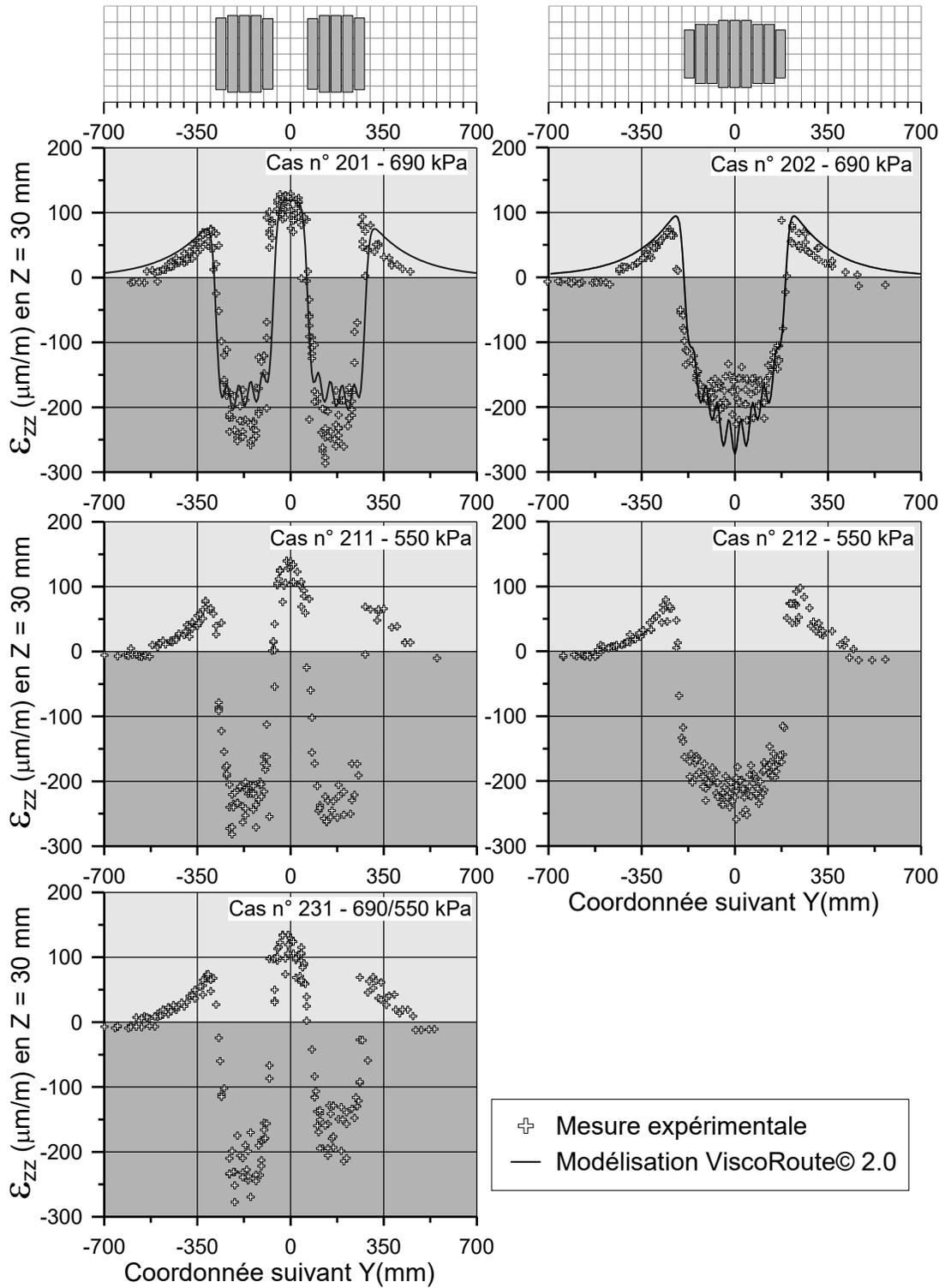


Figure 5.28 : Bassin des déformations verticales mesurées et modélisées à 30 mm de profondeur au passage du premier pneu d'un essieu tridem pour la section 2 et pour deux pressions de gonflage (690 kPa et 550 kPa)

5.4.3 Effet des paramètres de charge sur les amplitudes maximales

Deux critères d'évaluation sont retenus afin d'évaluer l'effet des paramètres de charge sur les déformations verticales. Le premier critère est la contraction maximale mesurée à partir des bassins de déformation et le second est l'extension maximale située au bord des pneus. Compte tenu de la forme des bassins et de l'effet de la sculpture des pneus, la contraction représentative des mesures expérimentales est définie comme la moyenne de six valeurs négatives les plus élevées. Au niveau des modélisations, la contraction est définie comme la moyenne des valeurs situées au centre des nervures des pneus. Six nervures sont retenues pour le pneu jumelé c'est-à-dire les deux nervures centrales et la nervure extérieure de chaque pneu. Pour le pneu à bande large, les valeurs retenues sont celles des cinq nervures les plus au centre. L'extension maximale est définie comme la valeur positive la plus élevée située à l'extérieur des pneus. Ces deux critères, noté $\varepsilon_{zz \text{ min}}$ pour la contraction et $\varepsilon_{zz \text{ max}}$ pour l'extension, sont représentés à la figure 5.29 (section A) et à la figure 5.30 (section B).

La figure 5.29 montre que, pour les températures autour de 20 °C, la contraction sous la charge diminue avec l'augmentation des charges ce qui peut sembler paradoxal puisque le fait d'augmenter la contrainte verticale diminue la déformation. Cet effet s'explique par le fait qu'à faible profondeur, l'augmentation de la charge augmente les contraintes verticales, mais augmente d'autant plus les contraintes horizontales (longitudinales et transversales). À titre d'exemple, pour le pneu jumelé chargé à 4 tonnes, les contraintes sont les suivantes : $\sigma_{xx} = -1,03$ MPa, $\sigma_{yy} = -0,80$ MPa et $\sigma_{zz} = -0,63$ MPa. En augmentant la charge à 5 tonnes, les contraintes deviennent : $\sigma_{xx} = -1,36$ MPa, $\sigma_{yy} = -1,07$ MPa et $\sigma_{zz} = -0,78$ MPa. Les compressions augmentent donc respectivement de 0,33 MPa, 0,27 MPa et 0,15 MPa. Pour ce cas précis, la contribution des contraintes horizontales sur la variation des déformations verticales est d'environ 0,20 MPa (32 % de la somme des variations des contraintes horizontales) alors que la contribution des contraintes verticales est de -0,15 MPa. Compte tenu de ces données, il est attendu que la contraction mesurée sous la charge diminue avec l'augmentation de la charge. Pour les températures élevées, l'augmentation de la charge a pour effet d'augmenter la contraction sous la charge. L'extension mesurée sur le bord des pneus augmente avec l'augmentation de la charge et cela pour toutes les conditions de température. Ces mesures expérimentales sont confirmées par les modélisations. Étant donné que la

contrainte est nulle à l'extérieur de la charge et que l'augmentation de la charge impose une hausse des contraintes horizontales, l'extension augmente par effet de Poisson. Pour une charge donnée, l'augmentation des températures a pour effet d'augmenter les contractions sous la charge et l'extension à l'extérieur des pneus. Ces mesures sont confirmées par les modélisations.

Pour l'ensemble des conditions expérimentales, la modélisation sous-estime la contraction sous la charge et surestime l'extension au bord du pneu. Au niveau de la contraction, les écarts sont en moyenne de 65 % pour les températures chaudes. La comparaison n'est pas effectuée pour les températures de 20 °C étant donné que les mesures expérimentales et les modélisations ne sont pas de même signe. Au niveau de l'extension, les écarts sont d'environ 13 % pour les températures modérées et de 60 % pour les températures chaudes.

L'analyse comparative des deux types de pneus montre qu'en moyenne lorsque l'on considère la contraction engendrée par les charges, l'utilisation des pneus à bande large génère une baisse de 20 % des déformations (ratio moyen de 0,8 avec les mesures expérimentales). La comparaison n'a pas été effectuée pour les températures modérées car les valeurs de $\varepsilon_{zz \min}$ sont très faibles et parfois de signe opposé. Au niveau de l'extension, la baisse est de 10 % (ratio moyen de 0,9) pour les températures froides et de 16 % (ratio moyen de 0,84) pour les températures élevées. Les modélisations donnent les mêmes valeurs pour l'extension.

Les résultats pour la section B sont présentés à la figure 5.30. Il est à noter que les données associées aux cas expérimentaux n° 61, 62, 71 et 72 ne sont pas prises en compte dans l'étude car les bassins de déformations présentent une dispersion très élevée. De plus, aucune extension n'est mesurée à l'extérieur de la charge pour ces cas expérimentaux. Comme pour la section A, l'augmentation de la charge impose une augmentation de la contraction sous le pneu et une augmentation de l'extension à l'extérieur du pneu pour les températures élevées. L'analyse comparative entre les types de pneus montre que le pneu à bande large engendre une baisse moyenne de 6 % de la contraction et une baisse moyenne de 10 % de l'extension.

Section A Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

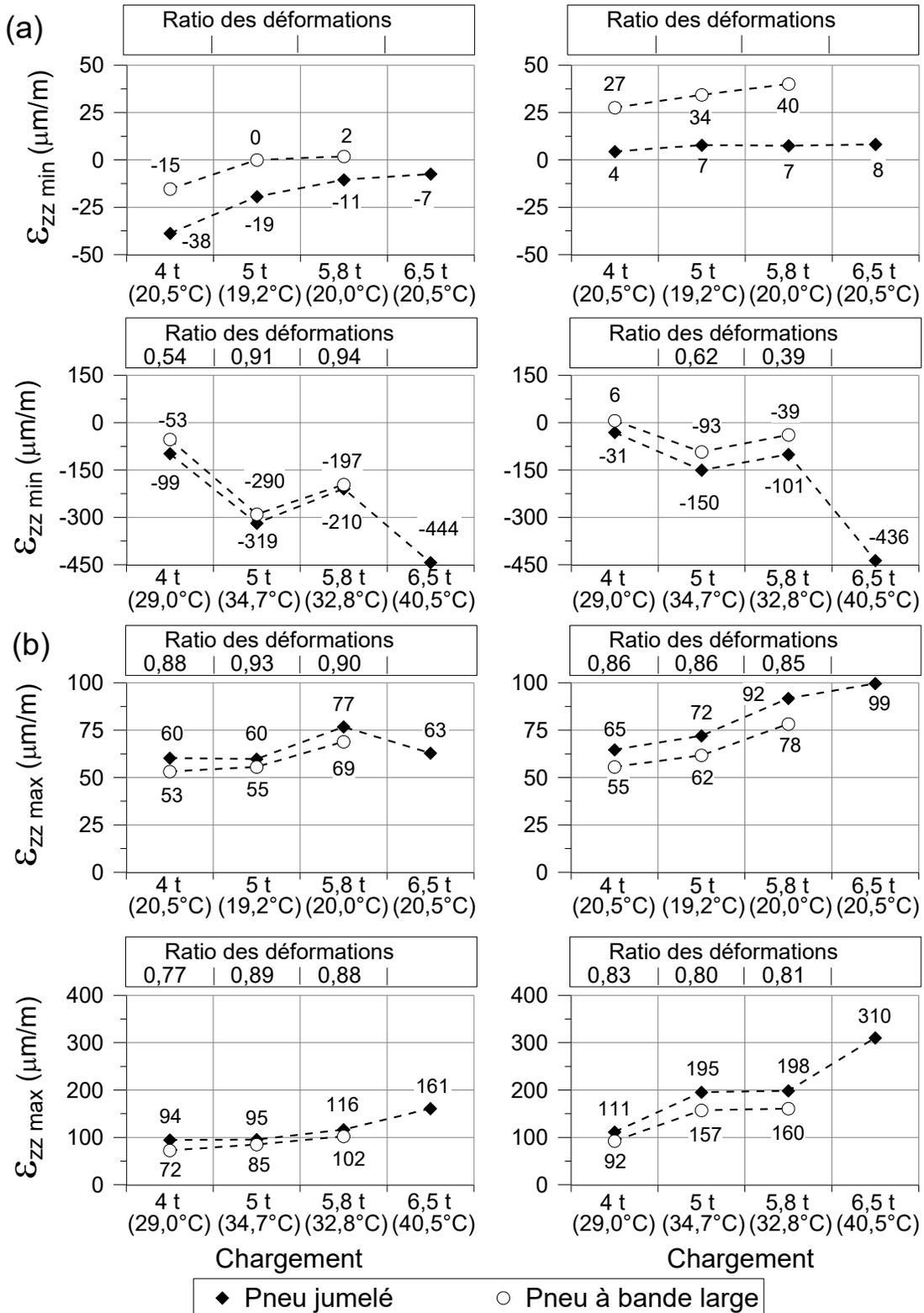
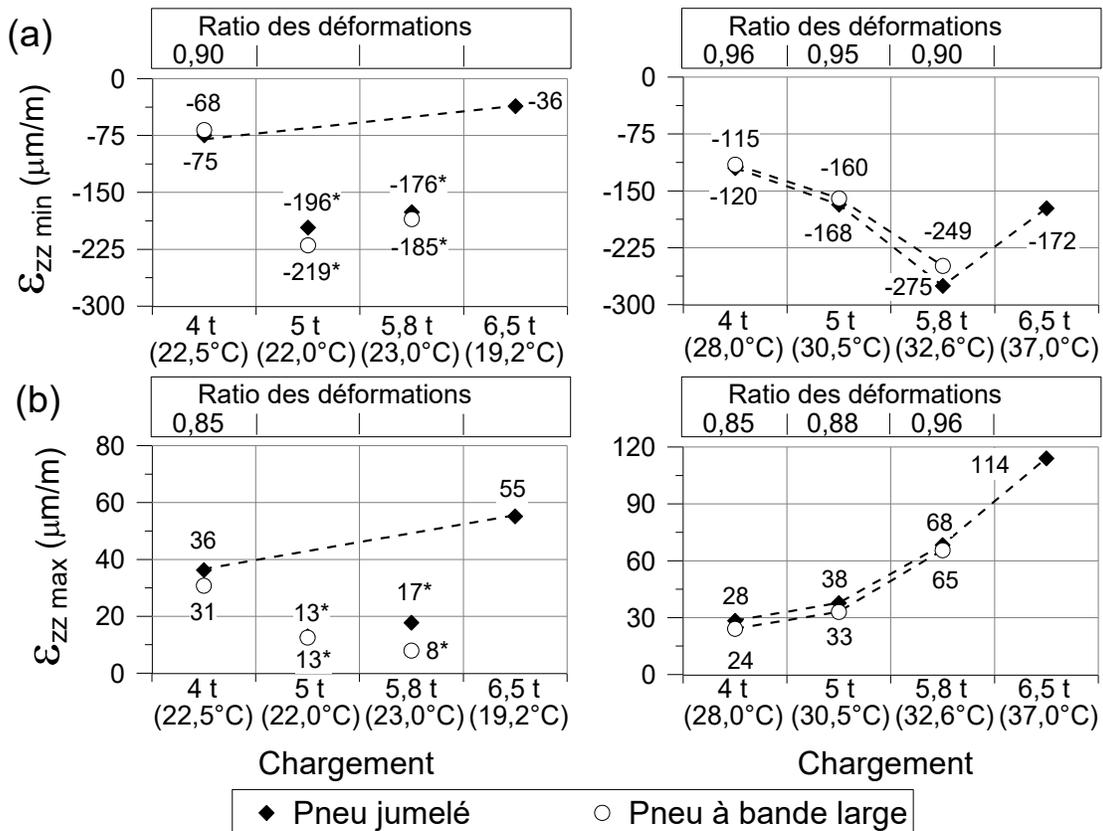


Figure 5.29 : Effet de la charge et de la température (section A, Z = 20 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus

Section B

Mesure expérimentale

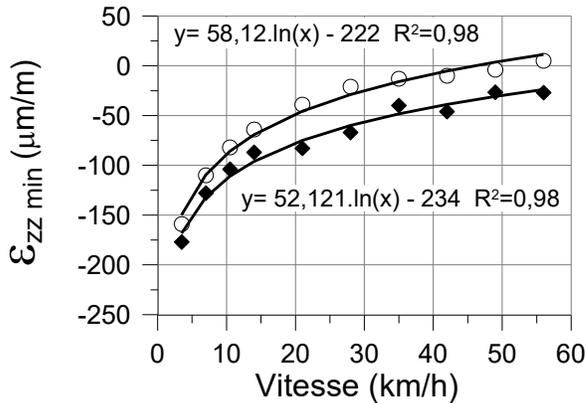


Note * : Dispersion des mesures importantes au tracé du bassin des déformations (résultat non retenu pour l'étude)

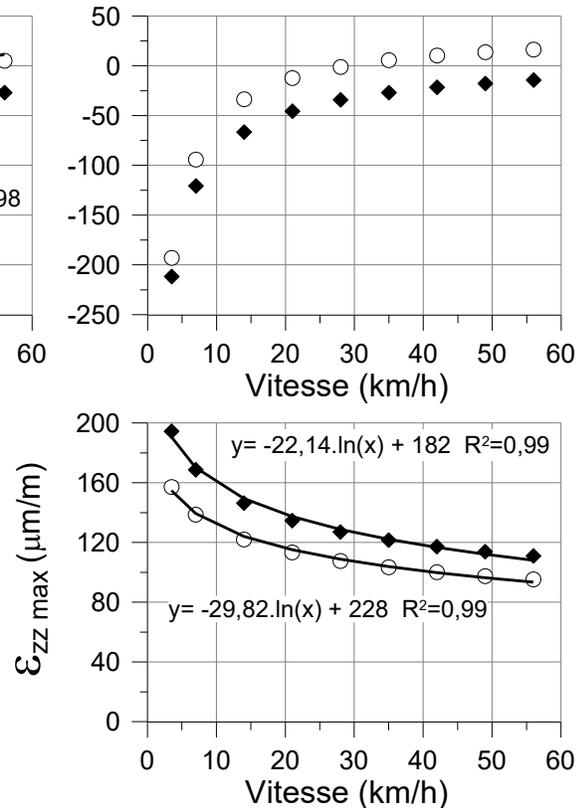
Figure 5.30 : Effet de la charge et de la température (section B, Z = 20 mm) sur : (a) la contraction sous la charge et (b) l'extension au bord des pneus

La figure 5.31 présente l'effet de la vitesse sur l'amplitude de la contraction et de l'extension. Les valeurs présentées correspondent à celles obtenues par un seul capteur et ne sont pas calculées à partir des bassins de déformation. Ces données sont comparées aux modélisations pour la section A. Les mesures sont déterminées avec des pneus chargés à 5 tonnes et une température du revêtement autour de 29 °C. La figure montre que lorsque la vitesse diminue, la contraction et l'extension augmentent. Ces observations sont conformes aux analyses précédemment effectuées sur l'effet de la température. Les valeurs sont très sensibles à la vitesse. Dès que les vitesses sont inférieures à 15 km/h, les déformations augmentent significativement. L'analyse comparative des types de pneus montre qu'indépendamment de la vitesse, les déformations engendrées par le pneu à bande large sont inférieures à celles engendrées par le pneu jumelé. Les mesures expérimentales et les modélisations montrent que plus la vitesse augmente, plus ces écarts s'accroissent.

Section A Mesure expérimentale



Modélisation ViscoRoute© 2.0



◆ Pneu jumelé ○ Pneu à bande large — Interpolation logarithmique

Figure 5.31 : Effet de la vitesse sur la contraction et l'extension des déformations verticales (section A, Z = 20 mm)

La figure 5.32 montre l'effet de la pression de gonflage sur les déformations verticales à 20 mm de profondeur au niveau des sections 1 et 2. La figure montre tout d'abord que les déformations imposées par le pneu à bande large sont plus faibles que celles du pneu jumelé. Au niveau de la contraction, les écarts sont d'environ 11 % et 12 %, respectivement, pour les sections 1 et 2. Les baisses sont plus significatives en ce qui concerne l'extension puisqu'elles sont de 24 % et 40 %, respectivement, pour les sections 1 et 2.

Il est à noter qu'au niveau de la section 1 plus la pression de gonflage du pneu jumelé augmente, plus les déformations sont élevées. Pour le pneu à bande large, le maximum est mesuré à la pression de 690 kPa. Au niveau de la section 2, les déformations pour le pneu à bande large augmentent avec la baisse des pressions de gonflage. Pour le pneu jumelé, le passage de 550 kPa à 690 kPa entraîne uniquement une baisse de l'extension. Il n'y a aucune variation notable de la contraction.

Section 1

Mesure expérimentale

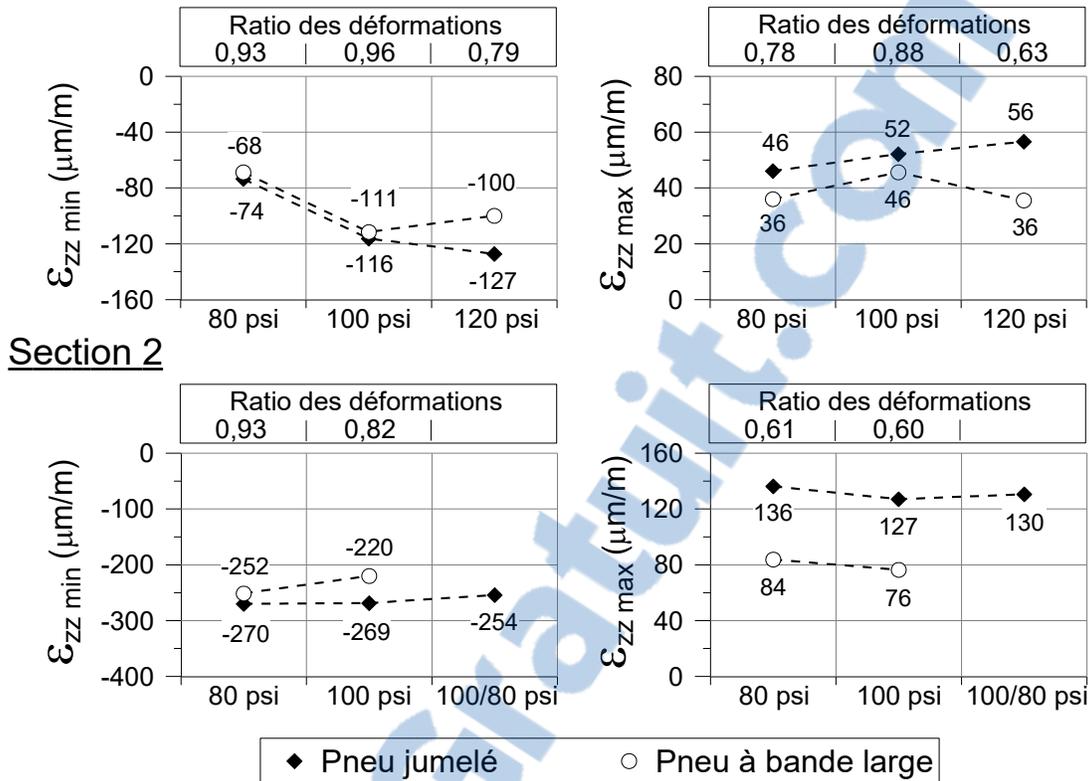


Figure 5.32 : Effet de la pression de gonflage sur la contraction sous la charge et l'extension au bord des pneus de la déformation verticale (sections 1 et 2)

5.4.4 Synthèse et enseignements

Dans la direction verticale en surface (20 - 30 mm), le passage d'une charge génère de l'extension à l'extérieur du pneu. L'extension maximale dépend des caractéristiques de la charge, de la température et de la rigidité de la structure. Elle est située juste à l'extérieur des bords des pneus. Pour le pneu jumelé, l'extension au niveau de l'espacement entre les deux pneus est supérieure à celle mesurée sur les extérieurs. Sous la charge, le signe et l'amplitude de la déformation dépendent des propriétés viscoélastiques du matériau. Pour les températures de 20 °C, les contraintes imposées par le pneu n'engendrent qu'une très faible compression voire dans certains cas de l'extension. Pour les températures plus chaudes, les déformations sont en compression sous la charge. Les amplitudes maximales sont localisées au centre du pneu et sous les nervures du pneu. La prise en compte de la viscoélasticité des matériaux est nécessaire afin de correctement modéliser les déformations verticales sous les charges.

Le tableau 5.7 résume l'influence des conditions expérimentales sur les contractions et sur l'extension. Les principales conclusions de la comparaison des mesures expérimentales et des modélisations pour la section A sont synthétisées dans le tableau 5.8. Les pourcentages sont des valeurs moyennes pour l'ensemble des conditions expérimentales. Sur l'ensemble des conditions expérimentales et pour les 4 structures de chaussées, les mesures montrent que la contraction et l'extension engendrées par les pneus jumelés sont supérieures à celles des pneus à bande large. Le tableau 5.9 résume l'effet des conditions expérimentales sur les ratios des déformations.

Tableau 5.7 : Effet des conditions expérimentales sur les déformations verticales

Paramètres	Amplitude de la contraction	Extension maximale
Charge	Diminution de l'amplitude avec l'augmentation de l'intensité de charge pour les températures de 20 °C. Augmentation de l'amplitude avec l'augmentation de l'intensité de charge pour les températures chaudes	Augmentation de l'extension avec l'augmentation de l'intensité de charge
Température	Augmentation de l'amplitude avec l'augmentation de la température	Augmentation de l'extension avec l'augmentation de la température
Vitesse	Diminution de l'amplitude avec l'augmentation de la vitesse	Diminution de l'extension avec l'augmentation de la vitesse

Tableau 5.8 : Comparaison des mesures expérimentales et des modélisations

Paramètres	Amplitude de la contraction	Extension maximale
Température modérée	Modélisation sous-estime les mesures	Modélisation surestime les mesures de 13 %
Température élevée	Modélisation sous-estime les mesures de 65 %	Modélisation surestime les mesures de 60 %
Charge	Les écarts diminuent avec l'augmentation de l'intensité de la charge	Les écarts augmentent avec l'augmentation de l'intensité de la charge
Type de pneu	Sous-estimation de 74 % pour le pneu à bande large et de 58 % pour le jumelé	Surestimation de 64 % pour le pneu à bande large et de 57 % pour le jumelé

Tableau 5.9 : Effet des conditions environnementales sur les ratios de déformation

Paramètres	Ratio des déformations (contraction)		Ratio des déformations (extension)	
	Mesure expérimentale	Modélisation	Mesure expérimentale	Modélisation
Augmentation des températures	Augmente	Augmente	Diminue	Diminue
Augmentation de la charge	ND	ND	Diminue	Diminue
Ratio moyen	Section B : 0,93	Section B : ND	Section B : 0,89	Section B : ND
	Section 1 : 0,89	Section 1 : 0,96	Section 1 : 0,76	Section 1 : 0,86
	Section A : 0,80	Section A : 0,50	Section A : 0,88	Section A : 0,84
	Section 2 : 0,88	Section 2 : 1,21	Section 2 : 0,60	Section 2 : 0,79

Note : ND = les valeurs ne sont pas disponibles

5.5 Analyse du cisaillement et de la contrainte de cisaillement à faible profondeur (20 mm sous la surface)

La déformation de cisaillement, notée ε_{yz} , et la contrainte de cisaillement, notée σ_{yz} , sont déterminés à partir des modélisations ViscoRoute© 2.0. Les calculs sont effectués en utilisant les mêmes paramètres que ceux utilisés pour la détermination des déformations. Compte tenu des écarts importants entre les mesures et les modélisations, relevés au niveau de la section B, seuls les résultats obtenus sur les sections 1, 2 et A sont présentés.

5.5.1 Distribution du cisaillement sous la charge

La figure 5.33 présente la distribution du cisaillement et de la contrainte de cisaillement pour les deux types de pneus. Les modélisations correspondent aux conditions expérimentales n° 23 et 24. Les pneus sont chargés à 5 tonnes et la température est de 34,7 °C.

Pour le pneu à bande large, le cisaillement est maximal au niveau des deux bords du pneu (en $Y = -190$ mm et $Y = 190$ mm). Compte tenu des hypothèses de modélisation, le cisaillement est symétrique et son amplitude est la même sous les deux bords. Pour le pneu jumelé, le cisaillement est maximal sous les deux bords de chaque pneu (en $Y = -295$ mm, $Y = -60$ mm, $Y = 60$ mm et $Y = 295$ mm). Le cisaillement est plus élevé à l'extérieur du pneu que par rapport au bord situé au niveau de l'espacement interjumelage. L'effet de la sculpture du pneu est très marqué pour le pneu jumelé étant donné que ses rainures ont des largeurs de 18 mm

soit presque deux fois la largeur de celles du pneu à bande large. Les éléments présentés pour le cisaillement sont également vérifiés en ce qui concerne la contrainte de cisaillement. Pour la suite de l'étude, seule la valeur maximale est conservée.

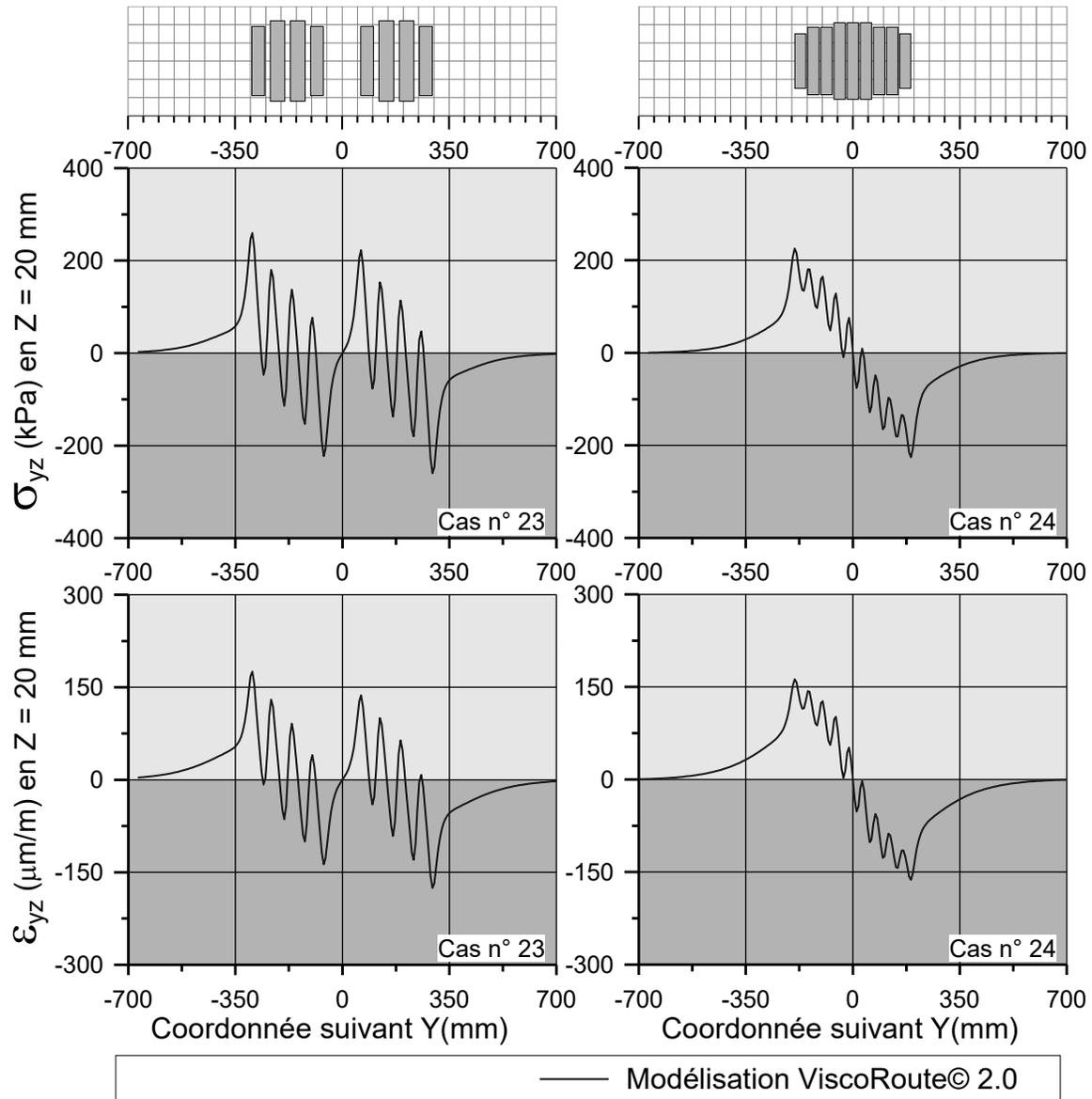


Figure 5.33 : Distribution du cisaillement et de la contrainte de cisaillement en $Z = 20$ mm sous les deux types de pneus chargés à 5 t (section A)

5.5.2 Effet des paramètres de charge et des conditions environnementales

La déformation et la contrainte de cisaillement sont calculées pour les conditions expérimentales de la section A. Les résultats sont détaillés à la figure 5.34.

Section A

Modélisation ViscoRoute© 2.0

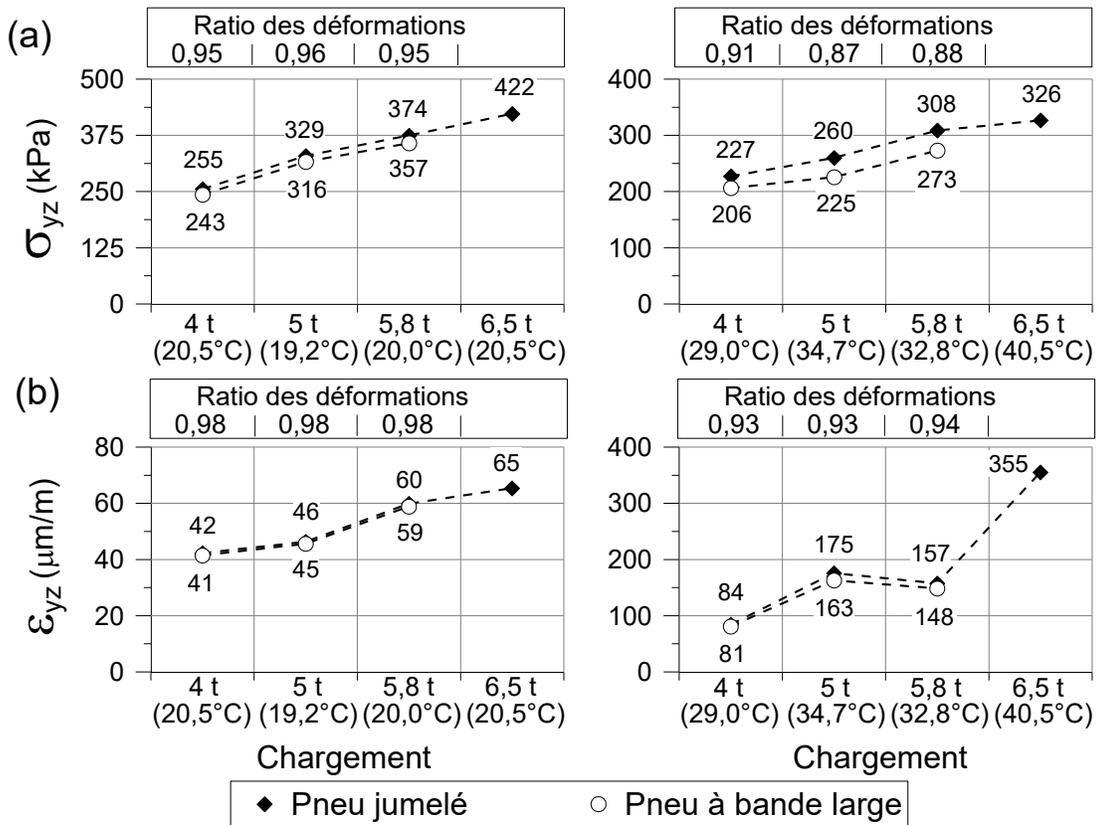


Figure 5.34 : Effet de la charge et de la température en Z = 20 mm pour la section A sur : (a) la contrainte et (b) la déformation de cisaillement

Pour les températures modérées et chaudes, l'augmentation de la charge a pour conséquence d'accroître la déformation et la contrainte de cisaillement. Les variations sont équivalentes pour les deux types de pneus. Les ratios sont constants pour les températures modérées. L'utilisation des pneus à bande large permet une réduction de l'ordre de 5 % de la contrainte de cisaillement et de 2 % du cisaillement pour des températures autour de 20 °C. Cette différence augmente pour les températures plus élevées et les écarts deviennent respectivement de 11 % et de 7 %. La déformation et la contrainte de cisaillement sont sensibles à la température. Une hausse des températures entraîne une augmentation de la déformation en cisaillement et une baisse de la contrainte associée. La figure 5.35 détaille plus spécifiquement cet effet. L'exemple ne présente que les résultats pour le chargement de 5 tonnes mais les conclusions sont également valides pour les autres intensités de charge. Plus les températures sont élevées, plus le ratio des contraintes diminue. Pour des températures supérieures à 40 °C, ce ratio devient inférieur à 0,8. Cela signifie que les contraintes de

cisaillement imposées par le pneu large sont 20 % plus faibles que celles du pneu jumelé. En ce qui concerne la déformation, l'écart entre les deux types de pneus devient supérieur à 15 % dès que les températures dépassent 40 °C.

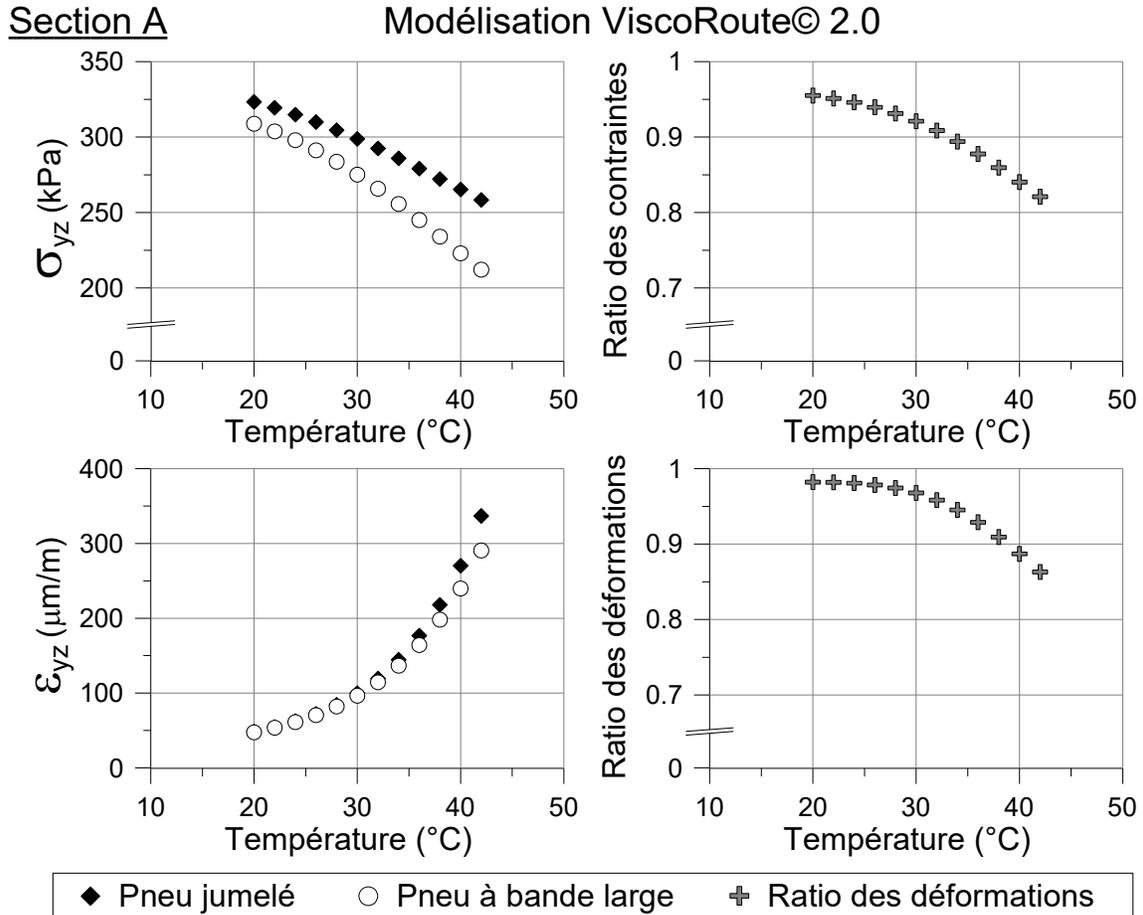


Figure 5.35 : Effet de la température sur le cisaillement et sur la contrainte de cisaillement en Z = 20 mm (section A, chargement de 5 t)

Sur la section 2, la déformation et la contrainte de cisaillement sont égales à 155 kPa et 168 μm/m pour le pneu jumelé et à 149 kPa et 152 μm/m pour le pneu à bande large. Cela représente des ratios d'environ 0,96 et 0,90 pour les conditions modélisées. Au niveau de la section 1, la température du revêtement n'est que de 10 °C et les différences entre les deux types de pneus sont faibles (écart inférieur à 2 %).

Pendant la saison estivale, l'enrobé bitumineux est régulièrement soumis à des températures supérieures à 30 °C et sous ces conditions de température, le passage répété des charges entraîne une augmentation de la profondeur des ornières de fluage. Pour ces températures, les

écarts entre les deux types de pneus sont supérieurs à 10 %. Considérant que le cisaillement est un des facteurs responsables de l'orniérage des couches bitumineuses, les pneus à bande large seraient moins agressifs et limiteraient l'apparition des ornières de fluage.

5.5.3 Synthèse

Le maximum de cisaillement est localisé sous les bords des pneus. Son amplitude est fonction de la température et de l'intensité de la charge. Elle augmente avec la hausse des températures et de l'intensité de la charge. De même, la contrainte de cisaillement est maximale sous les bords des pneus et son amplitude accroit avec l'augmentation de l'intensité de charge, mais diminue avec la hausse des températures.

Pour des températures de 20 °C, les modélisations ne mettent pas en évidence d'écarts importants entre les deux types de pneus. Ces écarts sont seulement de 2 % pour la déformation et de 5 % pour la contrainte de cisaillement. Plus les températures augmentent, plus ces écarts s'amplifient. Pour des températures supérieures à 40 °C, le ratio des contraintes devient inférieur à 0,85 et le ratio des déformations est inférieur à 0,88. Ces valeurs correspondent à une baisse des contraintes et de la déformation respectivement de 15 % et 12 %.

5.6 Conclusion

Les jauges installées sur les plaques multiniveaux et sur les carottes mesurent les déformations longitudinales, transversales et verticales à une profondeur comprise entre 10 et 20 mm. Les déformations sont analysées en fonction de la structure de chaussée, de l'intensité de la charge, de la température et du type de pneu. Ces données sont également comparées aux résultats des modélisations viscoélastiques obtenus avec le logiciel ViscoRoute© 2.0.

Dans la direction longitudinale, le passage d'une charge génère une contraction qui est maximale directement sous la charge. L'arrivée et le départ de la charge engendrent également deux pics d'extension. L'augmentation de l'intensité de la charge et la hausse des températures ont pour effet d'augmenter l'amplitude de la contraction et celle de l'extension. Plus le revêtement est mince, plus les déformations sont élevées. Sur l'ensemble des données, les modélisations surestiment d'environ 15 % les contractions mesurées sous la charge et sous-

estiment en moyenne de 60 % l'extension. En se basant sur les modélisations et les mesures expérimentales, le pneu à bande large génère une contraction et une extension plus élevées que le pneu jumelé.

Dans la direction transversale, le passage d'une charge génère une extension dont le maximum est situé entre 150 mm et 300 mm à l'extérieur du pneu. De l'extension est également identifiée sous le pneu pour certaines conditions expérimentales. La charge engendre de la contraction sous le pneu. La localisation de son maximum dépend de la structure de chaussée, de la sculpture et du type de pneu, des pressions de gonflages et de la température. Les déformations transversales sont très sensibles aux propriétés viscoélastiques des matériaux et à la distribution des contraintes sous les pneus. L'augmentation de l'intensité de la charge et la hausse des températures augmentent la contraction et l'extension. Plus le revêtement est mince, plus les déformations sont élevées. Sur l'ensemble des données, les modélisations sous-estiment les contractions d'environ 15 % et l'extension d'environ 30 %. En se basant sur les modélisations et les mesures expérimentales, le pneu à bande large génère une contraction et une extension plus élevées que le pneu jumelé.

Dans la direction verticale, le passage d'une charge génère une importante extension au bord des pneus. Sous le pneu, le signe et l'amplitude de la déformation sont très fortement dépendants de la température et des propriétés viscoélastiques du matériau. Plus les températures augmentent, plus la contraction mesurée sous la charge est élevée. Sur l'ensemble des données, les modélisations sous-estiment les contractions d'environ 65 % et surestiment l'extension d'environ 60 %. Pour les 4 structures de chaussées étudiées, les mesures montrent que la contraction et l'extension engendrées par les pneus jumelés sont supérieures à celles des pneus à bande large.

À 20 mm de profondeur, le cisaillement maximal est localisé sous les bords des pneus. Celui-ci augmente avec l'augmentation de l'intensité de la charge. À une température de 20 °C, les écarts entre les deux types de pneus sont de l'ordre de 5 %. Dès que la température de la couche bitumineuse augmente, ces écarts s'amplifient. Le cisaillement généré par le pneu à bande large est inférieur à celui du pneu jumelé et ces différences sont de plus de 15 % pour les températures supérieures à 40 °C.

L'acquisition des mesures suivant les trois directions permet d'identifier les zones sous le pneu les plus fortement sollicitées. Au bord du pneu, d'importantes extensions sont générées par le passage de la charge. Cette extension associée au cisaillement peut être un des facteurs responsables de la fissuration en haut de couche. À l'arrière du pneu, le passage de la charge impose à la fois une extension et une traction dans la direction longitudinale. Sous le pneu, le pneu impose une contraction suivant les trois directions qui est maximale au centre de la charge, mais dont l'amplitude dépend de la sculpture du pneu.

Chapitre 6

Modélisation, analyse et effet de la viscoélasticité de l'interface

6.1 Présentation et objectifs

Au cours de la construction de la chaussée, le revêtement bitumineux est mis en place puis compacté par couches successives. Pour assurer le collage entre ces couches, un liant d'accrochage est appliqué uniformément sur leur surface avant la mise en œuvre de la suivante. L'état et la qualité du collage conditionnent la transmission des contraintes et des déformations dans chaque couche. Pour le dimensionnement des chaussées neuves, les concepteurs admettent que l'interface est parfaitement collée. Ils intègrent aux outils de modélisation le collage des couches en définissant des conditions limites associées à l'état de celui-ci. La couche d'accrochage est alors modélisée comme le plan de contact entre les deux couches bitumineuses. Ces hypothèses de modélisation ne permettent pas de tenir compte du fait que la couche d'accrochage est un liant bitumineux et que par conséquent elle possède un comportement viscoélastique. Ce chapitre montre dans un premier temps que les hypothèses usuelles de modélisation ne permettent pas de décrire correctement les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface et propose une approche de modélisation qui intègre la viscoélasticité de l'interface. Dans un second temps, il détaille l'effet de ce comportement sur la distribution des contraintes et des déformations à plusieurs niveaux dans les couches bitumineuses. Les différentes modélisations étudiées sont tout d'abord présentées dans ce chapitre. Le profil des contraintes dans la structure est présenté pour des températures comprises entre 5 °C et 35 °C afin d'évaluer l'influence de la viscoélasticité de l'interface sur la répartition des contraintes au passage de la charge. Par la suite, ce chapitre détaille successivement les déformations longitudinales et transversales de part et d'autre de l'interface. Les signaux et les bassins de déformations sont comparés aux résultats obtenus à partir des modélisations ViscoRoute© 2.0. Finalement, l'influence des propriétés

viscoélastiques de la couche d'interface sur la distribution des déformations et des contraintes proche de la surface et au bas des couches bitumineuses est détaillée.

Les déformations sont mesurées à partir des plaques de déformations et des carottes instrumentées suivant deux directions : longitudinale et transversale. Les mesures sont effectuées pour la section A, aux profondeurs de 65 mm et 75 mm, c'est-à-dire 5 mm juste au-dessus et 5 mm juste en dessous de l'interface entre le BBSG 0/10 et la GB 0/14. Les déformations sont mesurées sous plusieurs conditions de charge, de température et de vitesse afin d'évaluer l'effet de ces paramètres sur la distribution des déformations.

6.2 Modélisation de l'interface entre deux couches bitumineuses

6.2.1 Interface collée et interface viscoélastique

L'hypothèse d'un collage parfait entre les différentes couches correspond au comportement optimal de la chaussée c'est-à-dire pour lequel sa durée de vie est la plus élevée. Mathématiquement, cela revient à considérer la couche d'accrochage comme le plan commun entre les deux couches bitumineuses au niveau duquel il y a une continuité des déplacements et du vecteur contrainte de normal e_z . Cette hypothèse de modélisation est celle qui a été utilisée pour les calculs ViscoRoute© 2.0 dans les chapitres précédents. Cette première modélisation est appelée pour la suite du chapitre : modélisation avec interface collée.

Lors de la mise en œuvre des couches bitumineuses, la couche d'accrochage appliquée est une émulsion bitumineuse constituée de deux produits non miscibles : le bitume et l'eau. La proportion de bitume dans une émulsion varie généralement entre 55 % et 65 %. Le cahier des charges et devis généraux (Québec, 2009) spécifie que le liant d'accrochage doit être appliqué uniformément à l'aide d'une rampe distributrice sous pression au taux de bitume résiduel de $0,20 \text{ l/m}^2$ pour les chaussées neuves. Cela signifie que la couche d'accrochage a une épaisseur moyenne d'environ 0,2 mm. La force de liaison entre les deux couches bitumineuses dépend du type de bitume utilisé, de la vitesse de sollicitation et de la température dans la structure (Québec, 2005). Le MTMDET recommande de mesurer cette force de liaison pour des températures comprises entre 10 °C et 25 °C. À ces températures, le liant et l'enrobé ne sont ni trop rigides ni trop visqueux. Pour les températures supérieures à 25 °C, la cohésion du liant

d'accrochage limite la liaison entre les deux couches. À ces températures, le collage entre les couches est maintenu, mais le liant d'accrochage possède un comportement viscoélastique plus marqué qui influence la distribution des contraintes et des déformations dans la structure de chaussée. Afin de tenir compte de cet effet, une seconde approche de modélisation est proposée dans ce chapitre. Cette modélisation consiste à ne plus considérer la couche d'accrochage comme un plan, mais comme une couche de faible épaisseur ayant un comportement viscoélastique. Cette approche assure la continuité des déplacements horizontaux et verticaux des couches situées de part et d'autre. Cette seconde modélisation est appelée pour la suite du chapitre : modélisation avec interface viscoélastique.

6.2.2 Paramètres de modélisation de l'interface viscoélastique

La couche d'accrochage est considérée incompressible et son coefficient de Poisson est fixé à 0,5. La température de la couche d'interface est définie comme la moyenne entre les températures de la couche supérieure et inférieure. Le comportement viscoélastique de la couche est caractérisé par le modèle de Huet. Les paramètres utilisés dans les modélisations sont détaillés au tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Paramètres du modèle de Huet de la couche d'accrochage

Manège de fatigue de l'IFSTTAR - Section A							
Matériau	δ	k	h	E_{∞}	A_0	A_1	A_2
Liant d'accrochage	3,787	0,247	0,779	1625	-2,79	-0.38	$2,31 \cdot 10^{-3}$

Trois épaisseurs de modélisation ont été analysées pour la couche d'accrochage : 2 mm, 1 mm et 0,5 mm. L'effet de cette épaisseur sur l'amplitude des déformations est plus spécifiquement étudié à la section 6.5. À l'exception de ce paragraphe, les résultats présentés dans la suite du chapitre sont ceux obtenus pour une épaisseur de 0,5 mm.

À partir de la surface, la structure de chaussée de la section A est constituée des couches suivantes : la couche de BBSG 0/10 (épaisseur 69,75 mm), la couche d'accrochage (épaisseur 0,5 mm), la couche de GB 0/14 (épaisseur 59,75 mm) puis la fondation granulaire et le sol d'infrastructure. Toutes les couches sont considérées comme collées. Il y a donc continuité des déformations et du vecteur contrainte suivant la normale à l'interface entre la couche de BBSG 0/10 et la couche d'accrochage et entre la couche d'accrochage et la couche de GB 0/14.

6.2.3 Analyse qualitative du comportement d'une interface viscoélastique

La réponse mécanique de la couche d'interface est sensible aux conditions de température, à la fréquence et à l'amplitude des sollicitations imposées par le passage de la charge. Les conséquences de ce comportement viscoélastique sur la réponse mécanique de l'ensemble de la structure sont expliquées qualitativement à la figure 6.1 au travers de l'analyse de deux cas extrêmes. Dans cet exemple, les couches bitumineuses soumises à une charge mobile sont assimilées à deux poutres soutenues à leurs extrémités et sollicitées par une force verticale $F(t)$. Tel que présenté à la figure 6.1(a), la force $F(t)$ est un signal créneau dont l'amplitude est nulle jusqu'à l'instant $t = 0^-$, puis $F(t) = F_{\text{plateau}}$ (avec $F_{\text{plateau}} > 0$) entre $t = 0^+$ et $t = t_{\text{fin}}^-$, puis de nouveau égale à zéro à partir de $t = t_{\text{fin}}^+$.

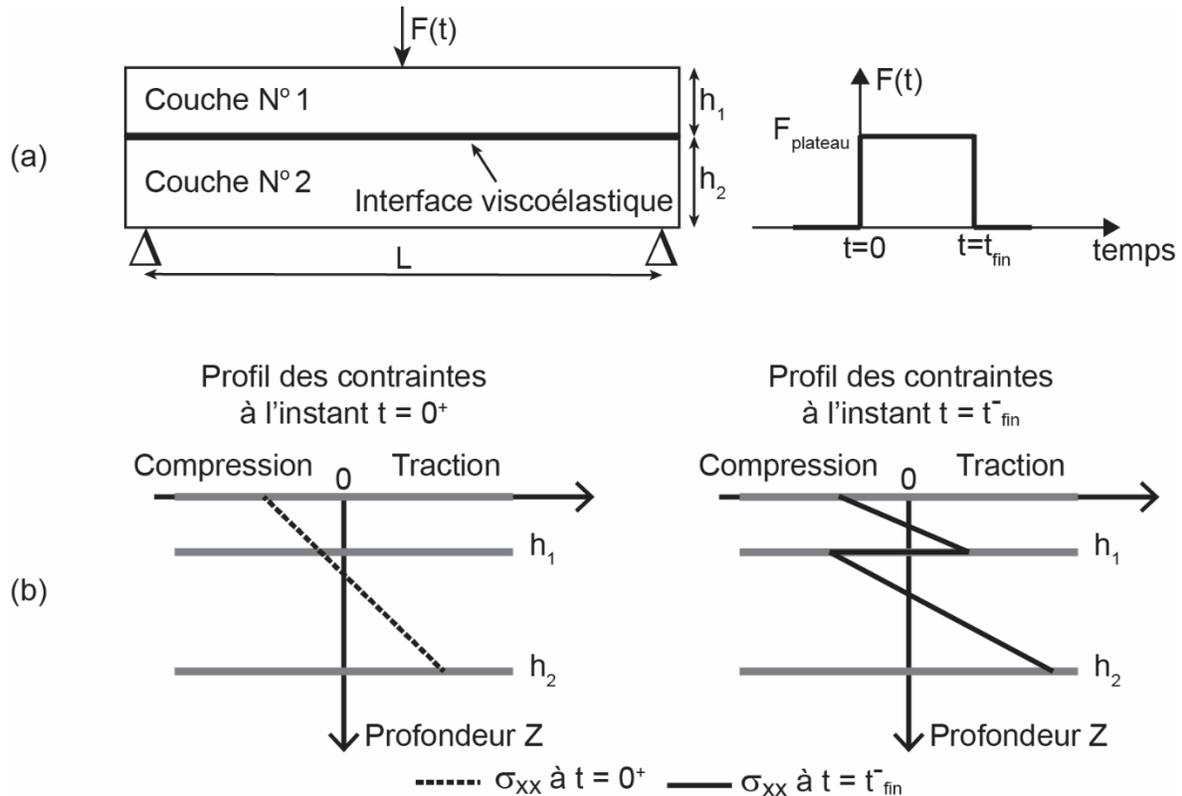


Figure 6.1 : Analyse qualitative du comportement d'une interface visqueuse

Le premier cas extrême correspond aux instants où la fréquence de sollicitation est infinie, c'est-à-dire entre les temps $t = 0^-$ et $t = 0^+$, puis entre $t = t_{\text{fin}}^-$ et $t = t_{\text{fin}}^+$. Sous une telle sollicitation, l'interface viscoélastique a un comportement identique à celui d'une interface parfaitement collée et les contraintes se distribuent suivant le profil présenté à la figure 6.1(b).



Les deux couches se comportent comme un bloc monolithique et la contrainte évolue linéairement entre le sommet de la couche 1 qui est en compression et le bas de la couche 2 qui est en traction.

Le second cas correspond au temps $t = t_{fin}^-$, c'est-à-dire à la fin du plateau de chargement. Dans ce cas extrême où la durée du plateau de chargement est très grande par rapport au temps de relaxation du liant d'accrochage, l'interface viscoélastique possède un comportement identique à celui d'une interface parfaitement glissante. Le profil de distribution des contraintes est celui présenté à la figure 6.1(b). Comme dans le cas précédent, la force impose de la compression au sommet de la couche 1 et de la traction à la base de la couche 2. Un saut de contrainte est généré au niveau de l'interface. Il est caractérisé par de la traction à la base de la couche 1 et de la compression au sommet de la couche 2. Pour une interface glissante, les déplacements relatifs entre les couches sont permis, seule la continuité du déplacement vertical et de la contrainte verticale est imposée. L'amplitude des contraintes est plus élevée dans ce cas comparativement au premier cas. Soumises à des conditions réelles de chargement, les couches bitumineuses ne rencontrent jamais ces deux conditions extrêmes. L'amplitude des contraintes est fonction de l'intensité de la charge, de la configuration du pneu, des températures, des épaisseurs h_1 et h_2 et de la profondeur de l'interface. La figure 6.2 présente les profils de distribution des contraintes dans les couches bitumineuses de la section A pour trois températures : 5 °C, 20 °C et 35 °C. Les profils de distribution sont tracés à partir de 5 points de calcul positionnés aux profondeurs $Z = 5$ mm, $Z = 15$ mm, $Z = 65$ mm, $Z = 75$ mm et $Z = 125$ mm. L'interface est représentée par une ligne blanche sur la figure et est située en $Z = 70$ mm. Les contraintes tracées sur la figure sont celles engendrées par le passage du pneu à bande large pour une vitesse de 43 km/h. Les profils sont représentés pour les deux approches de modélisation de l'interface et pour deux positions sous la charge. La première position, localisée en $X = 98$ mm, correspond au profil des contraintes calculé à l'avant de la charge. Pour cette position, les contraintes verticales sont nulles. Les contraintes longitudinales et transversales calculées pour les deux modélisations sont de mêmes amplitudes. Plus la température augmente, plus l'amplitude des contraintes diminue. Pour les trois températures, l'interface viscoélastique se comporte comme une interface collée.

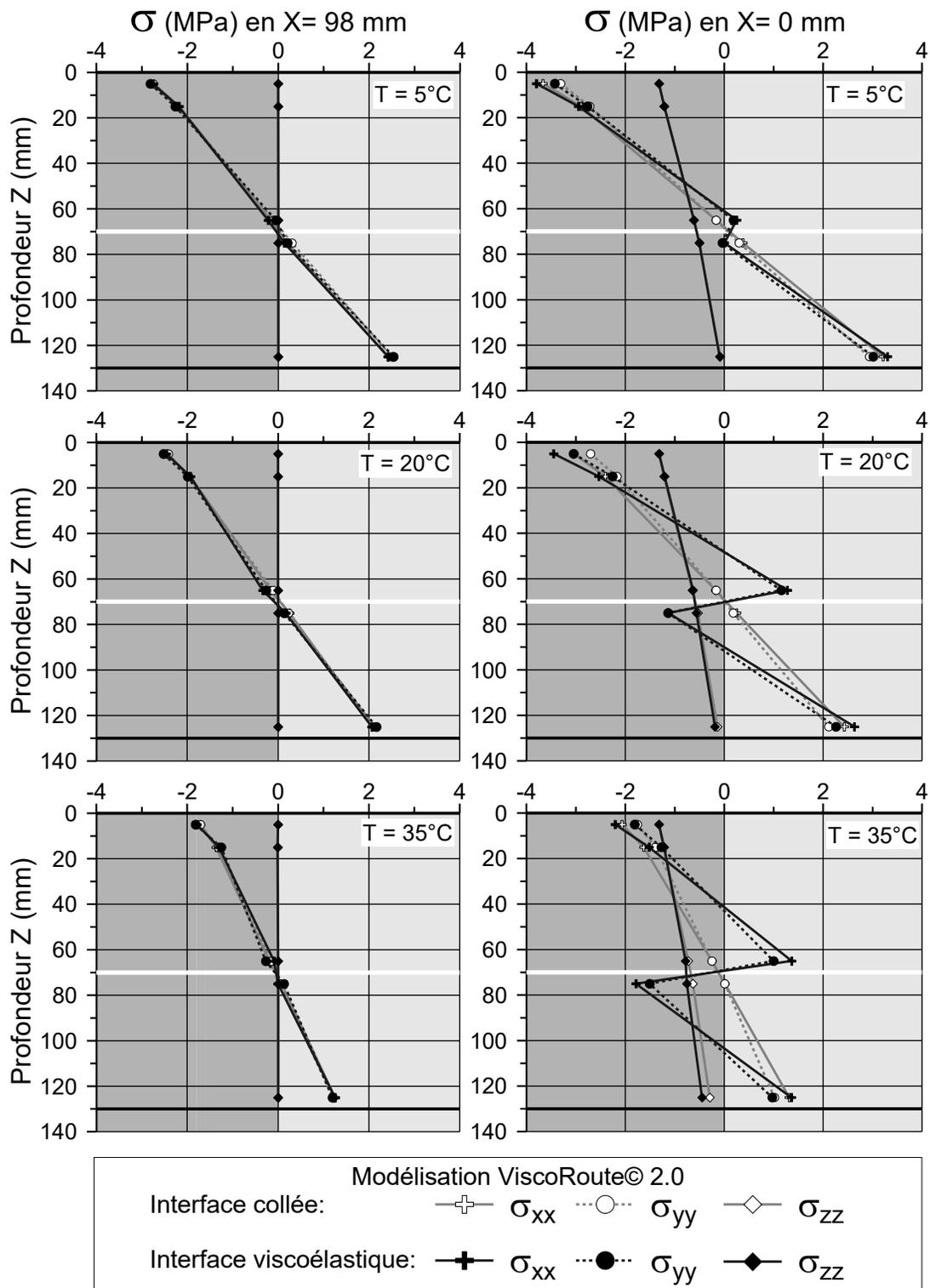


Figure 6.2 : Profil de distribution des contraintes dans les couches bitumineuses pour deux positions sous la charge et sous trois conditions de température

La seconde position, localisée en $X = 0$ mm, correspond au profil des contraintes sous le centre de la charge. L'amplitude des contraintes est maximale pour cette position. Proche de la surface, les contraintes verticales obtenues avec les deux modélisations ont une amplitude d'environ 1,32 MPa. Cette amplitude correspond à la contrainte en surface imposée par le pneu. La contrainte verticale diminue linéairement avec la profondeur pour les deux modélisations. Dans le cas de l'interface collée, les contraintes longitudinales et transversales varient également linéairement suivant la profondeur. Les contraintes sont en compression au sommet de la couche n° 1 et en traction au bas de la couche n° 2. L'interface est située aux environs du point d'inversion des contraintes. En $Z = 65$ mm, la couche n° 1 est en compression alors qu'en $Z = 75$ mm, la couche n° 2 est en traction. Ces contraintes ont des amplitudes inférieures à 0,3 MPa. Dans le cas de l'interface viscoélastique, un saut de contrainte apparaît pour les trois conditions de température. La couche n° 1 est en traction en $Z = 65$ mm et la couche n° 2 est en compression en $Z = 75$ mm. L'amplitude des contraintes de part et d'autre de l'interface est fonction de la température. À 5 °C, les contraintes longitudinales et transversales varient respectivement de 0,25 MPa à -0,01 MPa et de 0,19 MPa à -0,04 MPa. À 35 °C, elles varient respectivement de 1,36 MPa à -1,78 MPa et de 1,00 MPa à -1,51 MPa. L'amplitude du saut de contrainte augmente avec l'augmentation des températures.

Ces profils confirment que le comportement de l'interface viscoélastique se situe entre celui d'une interface collée et celui d'une interface glissante. Plus les températures sont élevées, plus le temps de relaxation du liant d'accrochage diminue. De même, plus les vitesses sont lentes, plus la composante visqueuse de la couche d'accrochage prédomine. Sous ces deux conditions, le comportement de l'interface viscoélastique tend alors vers celui d'une interface glissante et cela engendre un saut de contrainte très marqué de part et d'autre de l'interface. À l'inverse, lorsque les températures diminuent et lorsque les vitesses de chargement augmentent, la composante élastique prédomine et le comportement de l'interface viscoélastique tend vers celui d'une interface collée. Sous ces conditions, le saut de contrainte de part et d'autre de l'interface est moins marqué.

6.3 Analyse des déformations de part et d'autre de l'interface

Les déformations transversales et longitudinales obtenues expérimentalement avec les capteurs à fibre optique sont comparées aux résultats des modélisations de l'interface collée et de l'interface viscoélastique.

6.3.1 Analyse des déformations transversales

Les capteurs à fibre optique sont installés aux profondeurs $Z = 65$ mm et $Z = 75$ mm, c'est-à-dire à 5 mm au-dessus du bas de la couche n° 1 et à 5 mm du haut de la couche n° 2. Les mesures en $Z = 65$ mm sont obtenues à partir des 5 jauges installées sur la plaque multiniveau et à partir d'une jauge installée sur la carotte instrumentée. Les mesures en $Z = 75$ mm sont obtenues uniquement à partir des 5 jauges installées sur la plaque multiniveau. La figure 6.3 présente les mesures obtenues à ces deux profondeurs pour le cas expérimental n° 31 (annexe 1). Elle détaille les signaux mesurés directement sous la charge (en $Y = 195$ mm) et à l'extérieur de la charge (en $Y = 420$ mm). Pour cette condition expérimentale, les couches bitumineuses sont à une température d'environ 20 °C. La figure 6.4 présente ces mêmes déformations pour le cas expérimental n° 33, c'est-à-dire pour des températures plus élevées puisque la couche n° 1 est à environ $32,8$ °C et la couche n° 2 à 27 °C. Pour cette figure, les mesures sous la charge sont situées en $Y = -165$ mm et celles à l'extérieur de la charge en $Y = 435$ mm.

En $Z = 65$ mm, la déformation mesurée sous la charge augmente avec l'arrivée de la charge jusqu'à atteindre un maximum d'extension en $X = 0$ mm puis diminue progressivement avec le départ de la charge. À l'extérieur de la charge, la déformation diminue jusqu'à un maximum de contraction qui est atteint en $X = 0$ mm, puis augmente progressivement vers une valeur nulle avec le départ de la charge. Les déformations ont une forme identique pour les deux températures, seules les amplitudes augmentent avec l'augmentation de la température. L'extension et la contraction sont respectivement à 77 $\mu\text{m}/\text{m}$ et -32 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 20 °C et à 234 $\mu\text{m}/\text{m}$ et -84 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les températures chaudes. Les signaux mesurés au bas de la couche n° 1 sont de la même forme que ceux mesurés au bas de la couche n° 2 en $Z = 125$ mm.

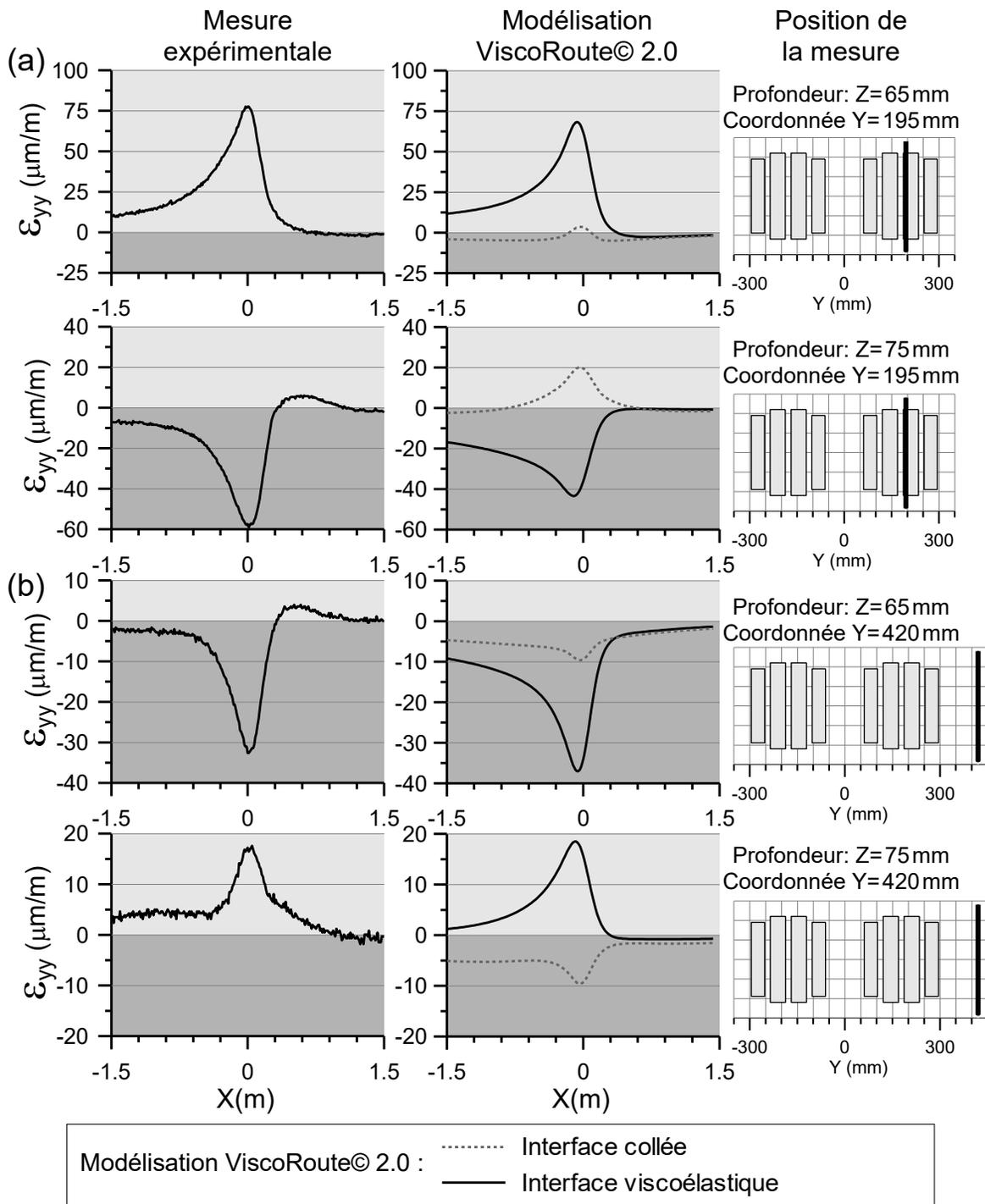


Figure 6.3 : Déformations transversales mesurées et modélisées en $Z = 65 \text{ mm}$ et en $Z = 75 \text{ mm}$ au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 20 °C) pour la section A: (a) sous la charge, (b) extérieur à la charge

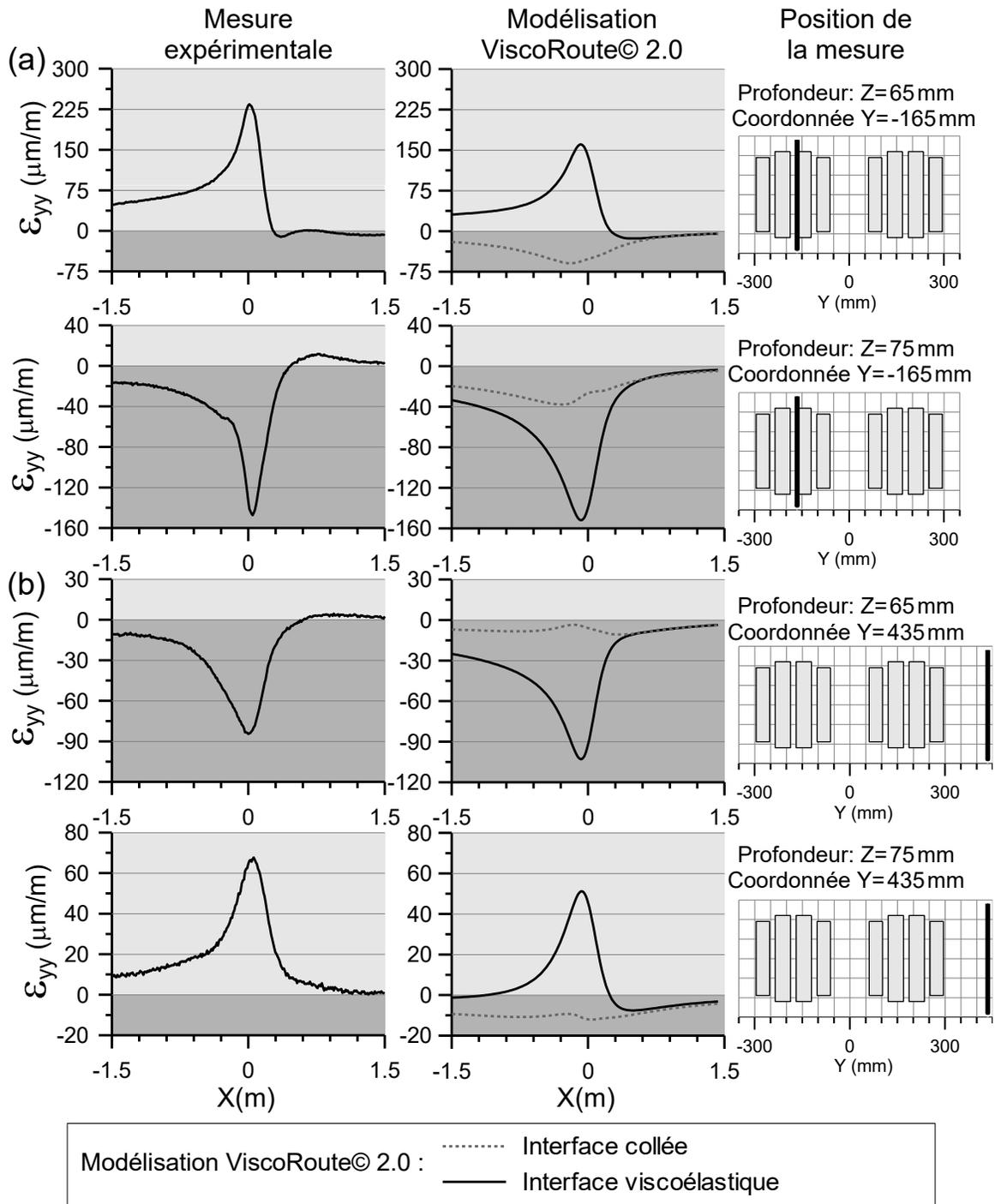


Figure 6.4 : Déformations transversales mesurées et modélisées en $Z = 65$ mm et en $Z = 75$ mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h, 33 °C) pour la section A: (a) sous la charge, (b) extérieur à la charge

En $Z = 75$ mm, la déformation transversale est en contraction sous la charge et en extension à l'extérieur de la charge. Ces deux maximums sont situés sous le centre de la charge (en $X = 0$ mm). À 20 °C, leurs amplitudes sont respectivement égales à $-57 \mu\text{m/m}$ et à $17 \mu\text{m/m}$.

Ces amplitudes augmentent pour les températures élevées et atteignent $-147 \mu\text{m/m}$ et $64 \mu\text{m/m}$. Les déformations de part et d'autre de l'interface sont donc de signe opposé ce qui signifie qu'un saut de déformation est mesuré au niveau de cette interface. En $Z = 65 \text{ mm}$, les déformations obtenues à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ avec les deux modélisations sont en extension sous la charge et en contraction à l'extérieur. Dans le cas de l'interface collée, l'extension est de $5 \mu\text{m/m}$ et la contraction est de $-9 \mu\text{m/m}$. Ces amplitudes sont très faibles comparativement à celles obtenues expérimentalement. Dans le cas de l'interface viscoélastique, ces écarts sont respectivement de $15 \mu\text{m/m}$ et de $2 \mu\text{m/m}$ pour l'extension et la contraction. Les déformations calculées avec l'interface collée en $Z = 75 \text{ mm}$ ont la même forme et sont du même signe que celles calculées en $Z = 65 \text{ mm}$, mais les amplitudes sont plus élevées, ce qui confirme la continuité des déformations de part et d'autre de l'interface collée. Ces calculs ne concordent pas avec les mesures expérimentales, contrairement à ceux obtenus avec l'interface viscoélastique. Ces derniers ont des écarts de $14 \mu\text{m/m}$ pour la contraction calculée sous la charge et de $2 \mu\text{m/m}$ pour l'extension à l'extérieur de la charge. Pour le cas n° 33, le point d'inversion des contraintes calculées avec l'interface collée est localisé à la profondeur $Z = 80 \text{ mm}$. Les déformations calculées de part et d'autre de l'interface sont donc négatives et de faibles amplitudes pour les deux positions sous la charge. Ces mesures diffèrent significativement des valeurs expérimentales. Dans le cas de l'interface viscoélastique, les déformations calculées sont du même signe et ont une forme similaire aux mesures expérimentales.

Pour les 11 positions de la charge, la déformation maximale mesurée par chacune des cinq jauges de la plaque multiniveau est retenue afin de tracer les bassins de déformation. Les bassins sont donc constitués de 55 points de mesure auxquels s'ajoutent les 11 valeurs obtenues avec la carotte instrumentée. La figure 6.5 présente les bassins de déformations de part et d'autre de l'interface pour les cas expérimentaux n° 31 et 33 (annexe 1). Les bassins calculés avec les deux modélisations sont également représentés sur la figure. En $Z = 65 \text{ mm}$, les 5 jauges de la plaque et celle sur la carotte instrumentée confirment que les déformations mesurées sous la charge sont en extension et que celles mesurées à l'extérieur du pneu et au niveau de l'espacement interjumelage sont en compression.

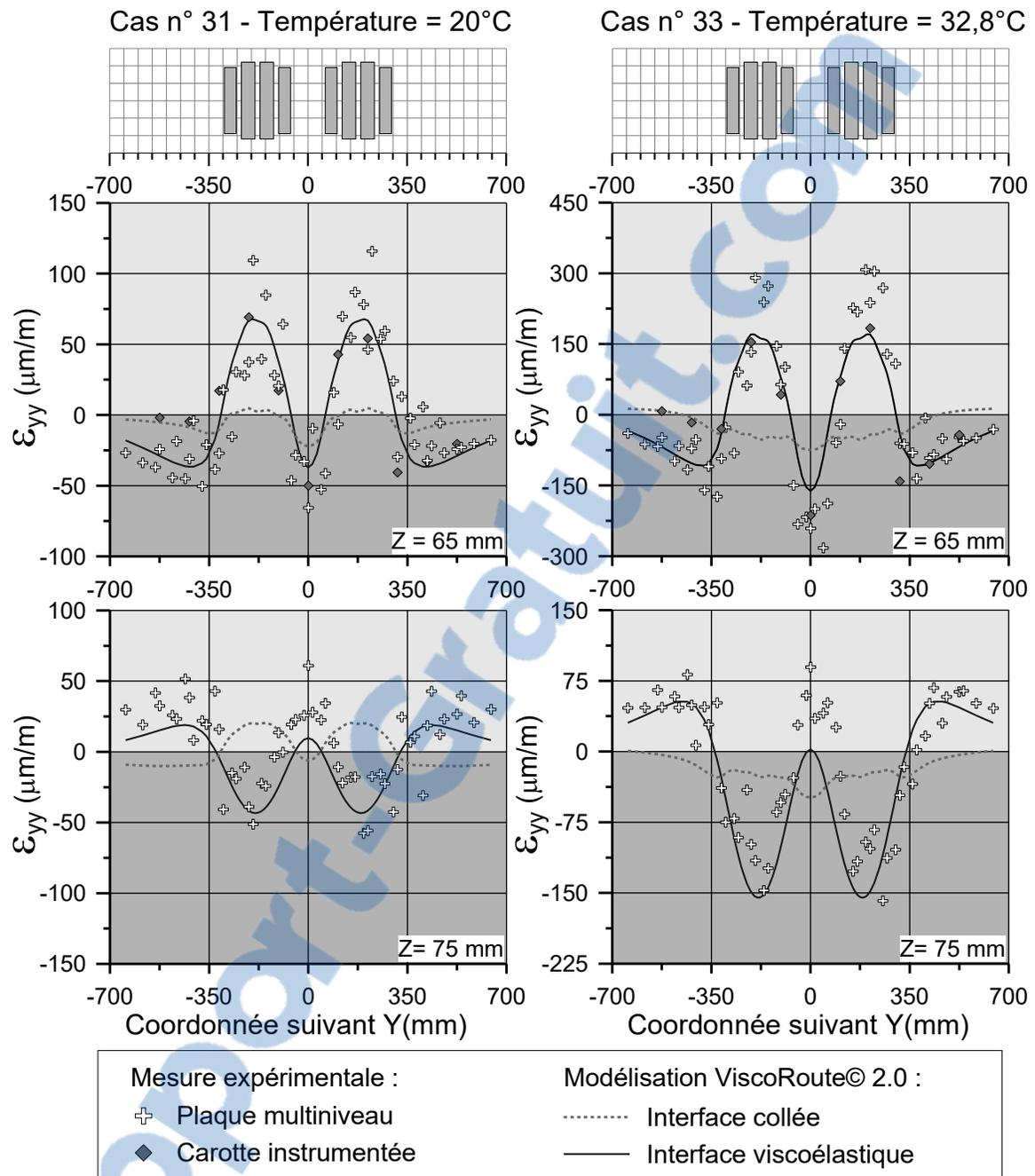


Figure 6.5 : Bassin des déformations transversales mesurées et modélisées à 65 mm et à 75 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5,8 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 20 °C (cas n° 31) et de 32,8 °C (cas n° 33)

Pour l'ensemble des mesures, l'augmentation des températures engendre une augmentation des amplitudes mesurées. Pour les deux conditions expérimentales, les mesures obtenues avec la carotte instrumentée se situent dans le nuage de points formé par les données de la plaque. L'extension maximale est mesurée au milieu de chaque pneu et la contraction maximale est

localisée au niveau de l'espacement interjumelage. En $Z = 75$ mm, les 5 jauges de la plaque mesurent de la contraction sous la charge et de l'extension hors de la charge. La hausse des températures entraîne également une augmentation des déformations. La contraction maximale est mesurée au centre de chaque pneu.

La comparaison des mesures expérimentales avec les résultats ViscoRoute© 2.0 montre que l'intégration d'une couche viscoélastique permet de reproduire la distribution des déformations transversales observées de part et d'autre de l'interface. Les bassins de déformations pour l'ensemble des conditions expérimentales sont détaillés à l'annexe 6. Ces bassins montrent que le saut de déformation est présent pour les deux types de pneus et pour toutes les conditions de température et de chargement.

6.3.2 Analyse des déformations longitudinales

La déformation longitudinale est mesurée en $Z = 65$ mm à partir de la jauge installée sur la carotte instrumentée. La figure 6.6 présente les mesures obtenues sous le pneu (en $Y = 210$ mm) pour les conditions expérimentales n° 31 et 33 (annexe 1). Ces signaux ont une forme similaire à celle mesurée en $Z = 125$ mm. Le signal est caractérisé par une phase d'extension qui est précédée et suivie d'une phase de contraction. L'extension maximale correspond au passage de la charge au droit du capteur. Les phases de contraction sont associées au départ et à l'arrivée de la charge. L'augmentation des températures a pour effet d'augmenter l'extension sous la charge et l'amplitude des pics de contraction.

La figure 6.6 présente les déformations calculées à partir des deux modélisations ViscoRoute© 2.0. Les déformations calculées avec l'interface collée sont de très faibles amplitudes. À 20 °C, l'extension sous la charge est seulement de 10 $\mu\text{m}/\text{m}$. À $32,8$ °C, la déformation est négative et égale à -53 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ni l'amplitude ni la forme des signaux calculés avec cette approche de modélisation ne correspondent aux mesures expérimentales. Dans le cas de l'interface viscoélastique, les déformations calculées pour les deux températures ont un comportement similaire aux déformations mesurées puisque les deux pics de contraction et le pic d'extension sont identifiables sur les deux courbes. La modélisation sous-estime cependant l'extension maximale d'environ 20 % à 20 °C et la surestime de 8 % à $32,8$ °C.

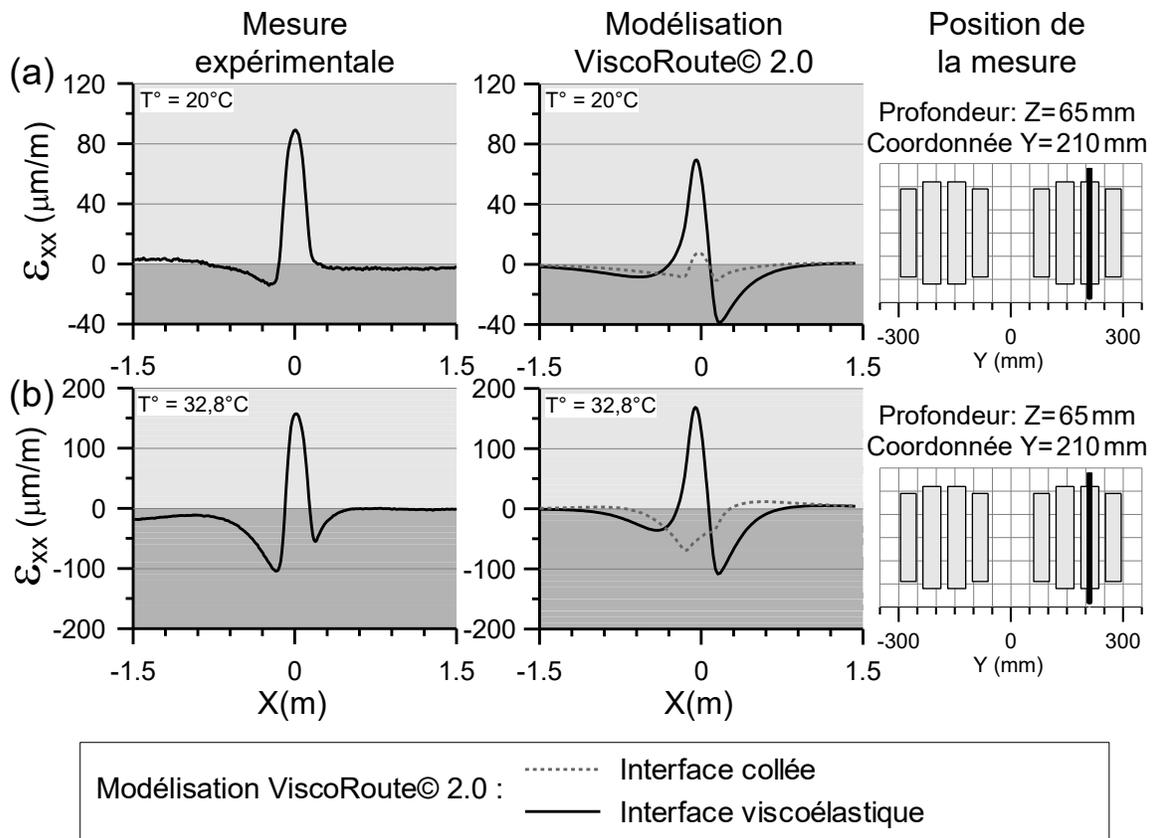


Figure 6.6 : Déformations longitudinales mesurées et modélisées en $Z = 65$ mm au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h) pour la section A à une température de : (a) 20 °C (cas n° 31) et (b) $32,8$ °C (cas n° 33)

L'amplitude entre la contraction maximale et l'extension maximale est calculée pour les 11 positions de la charge. Ces valeurs sont utilisées pour tracer les bassins des déformations. Les bassins de l'ensemble des conditions expérimentales sont disponibles à l'annexe 6. La figure 6.7 présente ceux associés aux conditions expérimentales n° 31 et 33. Les déformations sont en extension en tout point sous la charge. Les bassins présentent deux maximums qui sont situés au centre de chaque pneu.

Le tracé des bassins obtenus à partir des modélisations confirme les observations précédemment faites. L'hypothèse d'une interface collée ne permet pas de retrouver les déformations obtenues expérimentalement. À l'inverse, l'intégration dans les modélisations d'une couche d'interface viscoélastique permet d'obtenir un comportement mécanique similaire aux mesures expérimentales.



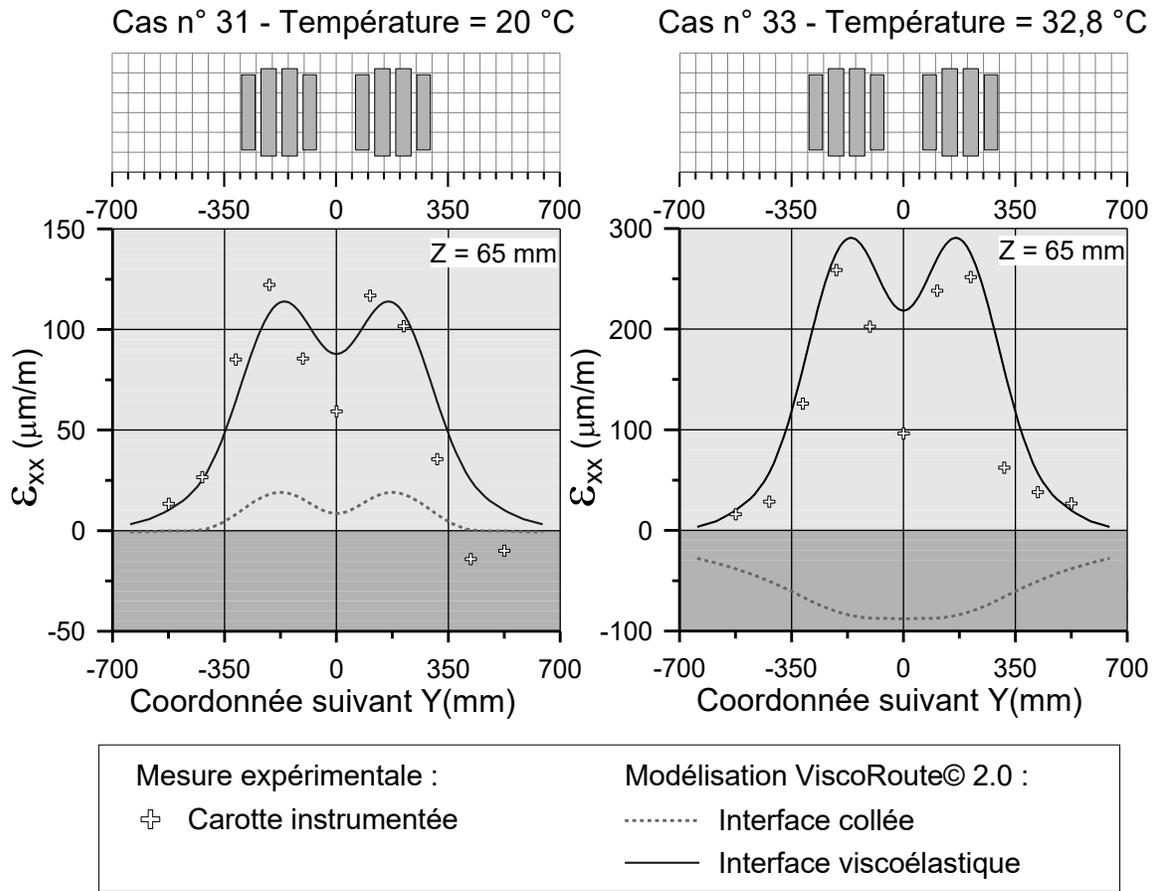


Figure 6.7 : Bassin des déformations longitudinales mesurées et modélisées à 65 mm de profondeur au passage d'un essieu simple (5,8 t, 43 km/h) pour la section A à une température de 20 °C (cas n° 31) et de 32,8 °C (cas n° 33)

6.3.3 Effet des paramètres de charge sur les déformations

L'effet des paramètres de charge sur l'extension en $Z = 65$ mm et sur la contraction en $Z = 75$ mm est évalué en déterminant l'amplitude maximale de la courbe d'interpolation associée à chaque bassin de déformation. Comme pour les déformations en $Z = 125$ mm, la courbe d'interpolation est une série de Fourier d'ordre 4. L'effet de l'intensité de charge, du type de pneu et de la température sont présentés à la figure 6.8 pour les déformations transversales et à la figure 6.9 pour les déformations longitudinales

Section A Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

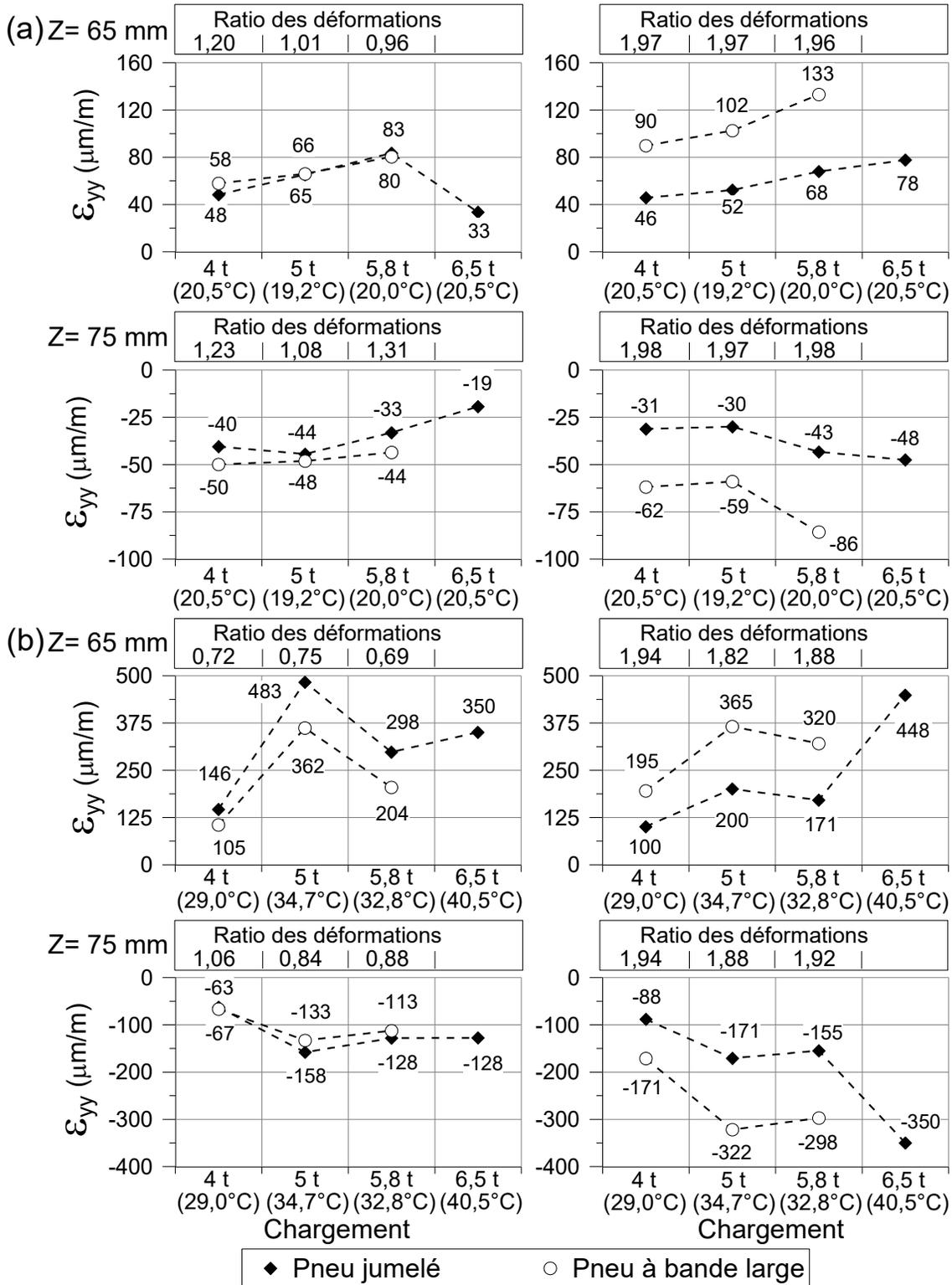


Figure 6.8 : Effet des paramètres de charge sur les déformations transversales en Z = 65 mm et Z = 75 mm à des températures (a) autour de 20 °C et (b) élevées (> 28 °C)

Section A Mesure expérimentale

Modélisation ViscoRoute© 2.0

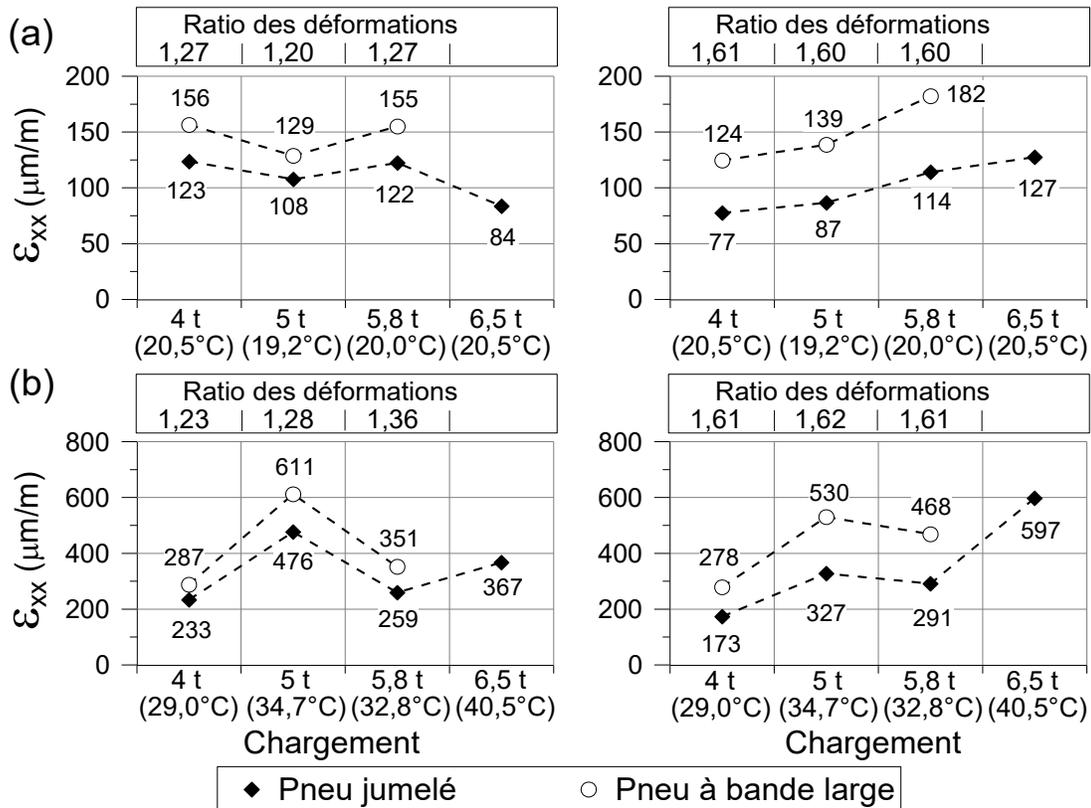


Figure 6.9 : Effet des paramètres de charge sur les déformations longitudinales en $Z = 65 \text{ mm}$ à des températures (a) autour de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et (b) élevées ($> 28 \text{ }^\circ\text{C}$)

Les figures 6.8 et 6.9 présentent uniquement les résultats de modélisation obtenus avec l'interface viscoélastique étant donné que ceux avec l'interface collée ne concordent pas avec les mesures expérimentales. Les mesures expérimentales et les modélisations montrent des comportements similaires :

- Indépendamment du type de pneu et de l'intensité de la charge, une hausse des températures a pour effet d'augmenter l'extension longitudinale et transversale et également la contraction transversale.
- La hausse de l'intensité de charge engendre une augmentation de l'extension transversale pour les températures proches de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Pour les températures chaudes, les pneus chargés à 5 tonnes engendrent une extension longitudinale et transversale ainsi qu'une contraction transversale plus élevées que celles générées par les pneus chargés à 5,8 tonnes qui sont elles-mêmes plus élevées que celles à 4 tonnes. Ce comportement s'explique par le fait que les mesures à 5 tonnes ont été

effectuées à 34,7 °C ce qui est 1,9 °C et 5,7 °C plus chaud que lors des mesures à 5,8 tonnes et à 4 tonnes.

- Les déformations longitudinales engendrées par le pneu à bande large sont plus élevées que celles du pneu jumelé à 20 °C et aux températures élevées. Cet effet est également vérifié à 20 °C pour les déformations transversales.

Les mesures expérimentales et les modélisations présentent également des éléments non concordants :

- À 20 °C, la contraction transversale mesurée en $Z = 75$ mm et l'extension longitudinale mesurée en $Z = 65$ mm restent sensiblement constantes pour les trois tonnages (4 tonnes, 5 tonnes et 5,8 tonnes) alors que l'amplitude des déformations modélisées augmente avec l'augmentation de l'intensité de charge.
- Les ratios des déformations déterminés à partir des mesures expérimentales sont très inférieurs aux ratios obtenus à partir des modélisations. À 20 °C, le ratio moyen des déformations est égal à 1,06, 1,20 et 1,25 pour les déformations transversales en $Z = 65$ mm, en $Z = 75$ mm et pour les déformations longitudinales en $Z = 65$ mm. Ces valeurs sont très inférieures aux ratios obtenus à partir des modélisations puisque ceux-ci valent 1,97, 1,98 et 1,60. Pour les températures chaudes, ces ratios sont respectivement égaux à 0,72, 0,93 et 1,29 pour les mesures expérimentales et 1,88, 1,91 et 1,61 pour les modélisations. Ces différences s'expliquent par le fait que les modélisations surestiment les déformations imposées par le pneu à bande large et sous-estiment celles engendrées par le pneu jumelé. En moyenne, à 20 °C, pour le pneu à bande large, les écarts sont d'environ 58 %, 48 % et 2 % pour les déformations transversales en $Z = 65$ mm, en $Z = 75$ mm et pour les déformations longitudinales en $Z = 65$ mm. Pour les températures chaudes, ces mêmes écarts sont de 48 %, 150 % et 6 %. À l'inverse, pour le pneu jumelé, ces 6 écarts sont respectivement égaux à -14 %, -8 %, -21 %, -44 %, 23 % et -15 %.

La figure 6.10 présente l'effet de la vitesse sur l'amplitude des déformations mesurées sous la charge.

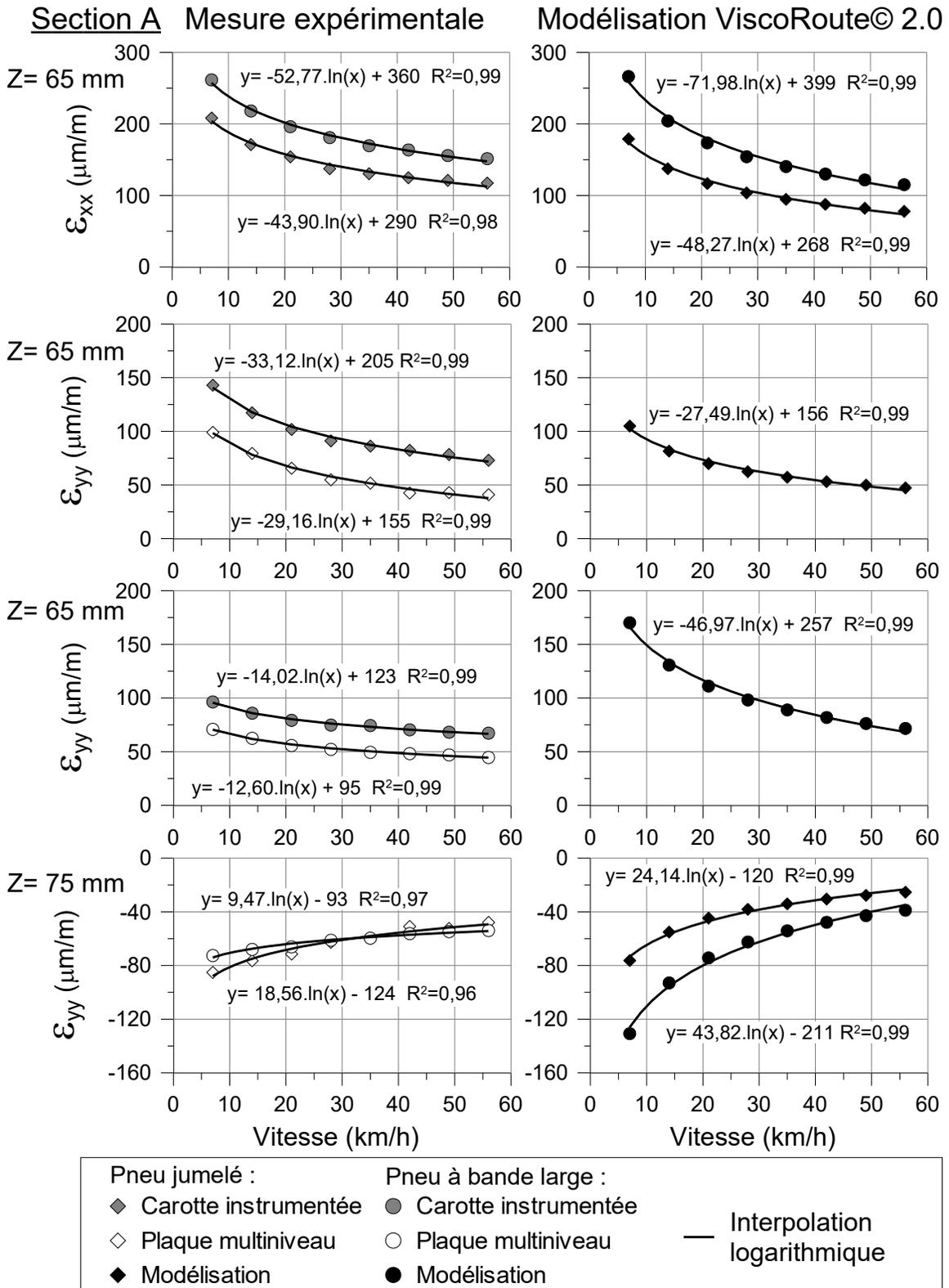


Figure 6.10 : Effet de la vitesse sur les déformations longitudinales et transversales mesurées et modélisées à 65 mm et à 75 mm de profondeur au passage d'un essieu simple chargé à 5 t pour la section A et à une température de 22,5 °C.

Les valeurs présentées à la figure 6.10 sont celles obtenues avec la carotte instrumentée et avec une des jauges de la plaque multiniveau et n'ont pas été déterminées à partir des bassins de déformations. Les déformations imposées par les deux types de pneus sont comparées aux résultats de la modélisation viscoélastique. Les conditions expérimentales sont les suivantes : les pneus sont chargés à 5 tonnes et la température du revêtement est d'environ 22,5 °C. Les mesures et les modélisations suivent des lois logarithmiques. Plus la vitesse diminue, plus les déformations augmentent, ce qui est en accord avec l'augmentation des déformations précédemment observées lorsque les températures augmentaient. En $Z = 65$ mm, dans la direction longitudinale, l'influence de la vitesse est plus prononcée pour les déformations engendrées par le pneu à bande large que pour le pneu jumelé. Les coefficients pour chaque type de pneu sont respectivement de $-52,7 \mu\text{m/m}$ et $-43,9 \mu\text{m/m}$ pour les mesures expérimentales et $-71,9 \mu\text{m/m}$ et $-48,2 \mu\text{m/m}$ pour les modélisations. Les modélisations surestiment donc l'effet de la vitesse sur les déformations et cela s'applique également pour les déformations transversales en $Z = 75$ mm. En $Z = 65$ mm, dans la direction transversale, les deux types d'instrumentation mesurent la même influence de la vitesse sur les déformations. Les coefficients sont respectivement de $-33,1 \mu\text{m/m}$ et $-29,1 \mu\text{m/m}$ pour la carotte instrumentée et pour la plaque multiniveau dans le cas du pneu jumelé et de $-14,0 \mu\text{m/m}$ et de $-12,6 \mu\text{m/m}$ dans le cas du pneu à bande large.

6.3.4 Synthèse et enseignements

Les mesures expérimentales montrent un saut des déformations de part et d'autre de l'interface dont la magnitude augmente avec l'augmentation des températures. Ce saut se traduit par une extension sous le pneu au bas de la couche n° 1 et de la contraction au sommet de la couche n° 2. L'amplitude de ces déformations est principalement fonction de la température, de la vitesse et de l'intensité de la charge. Modéliser la couche d'accrochage comme une couche de faible épaisseur dont le comportement viscoélastique est caractérisé par le modèle de Huet permet de reproduire le saut de déformation mesuré de part et d'autre de l'interface.

Les mesures expérimentales et les modélisations montrent une bonne concordance malgré quelques écarts relevés au niveau de l'amplitude des déformations et au niveau de l'influence du type de pneu. Ces écarts peuvent s'expliquer en partie par les hypothèses de modélisation considérées au niveau de la température des matériaux et au niveau de la distribution des

contraintes au contact du pneu avec la chaussée. La modélisation ne tient également pas compte du comportement à long terme de l'interface. Le passage répété des charges sollicite l'interface, ce qui modifie les propriétés du collage et donc sa capacité à transmettre les contraintes d'une couche à la suivante.

6.4 Effet de la viscoélasticité de l'interface sur la distribution des contraintes et des déformations

6.4.1 Distribution des contraintes dans la structure en fonction de la température et des conditions d'interface

La viscoélasticité de l'interface modifie le profil de distribution des contraintes dans les couches bitumineuses. La figure 6.11 détaille le profil des contraintes associé aux conditions expérimentales n° 31 à 34 (annexe 1). Dans les cas n° 31 et 32, les deux couches bitumineuses ont sensiblement la même température puisque la couche supérieure est à 20 °C, et la couche inférieure à 19,8 °C. Dans les cas n° 33 et 34, un gradient de température est présent dans les couches bitumineuses avec une température d'environ 32,8 °C à 30 mm de profondeur et de 28,7 °C à 90 mm de profondeur. Ce gradient est négatif puisque la température diminue avec la profondeur. La figure 6.11 montre que les contraintes sont fonction du type de pneu, de la température des couches bitumineuses et des conditions d'interface. Ces différents paramètres sont détaillés par la suite.

6.4.1.1 Influence des conditions d'interface et de la température sur l'amplitude des contraintes

Tel que montré à la figure 6.11, les contraintes en $Z = 5$ mm et en $Z = 15$ mm diminuent avec l'augmentation des températures. De même, la traction en $Z = 125$ mm diminue lorsque les températures augmentent. Ces observations sont valides à la fois pour l'interface collée et pour l'interface viscoélastique. La figure 6.12 détaille plus spécifiquement l'influence de la température sur l'amplitude des contraintes à ces trois profondeurs.

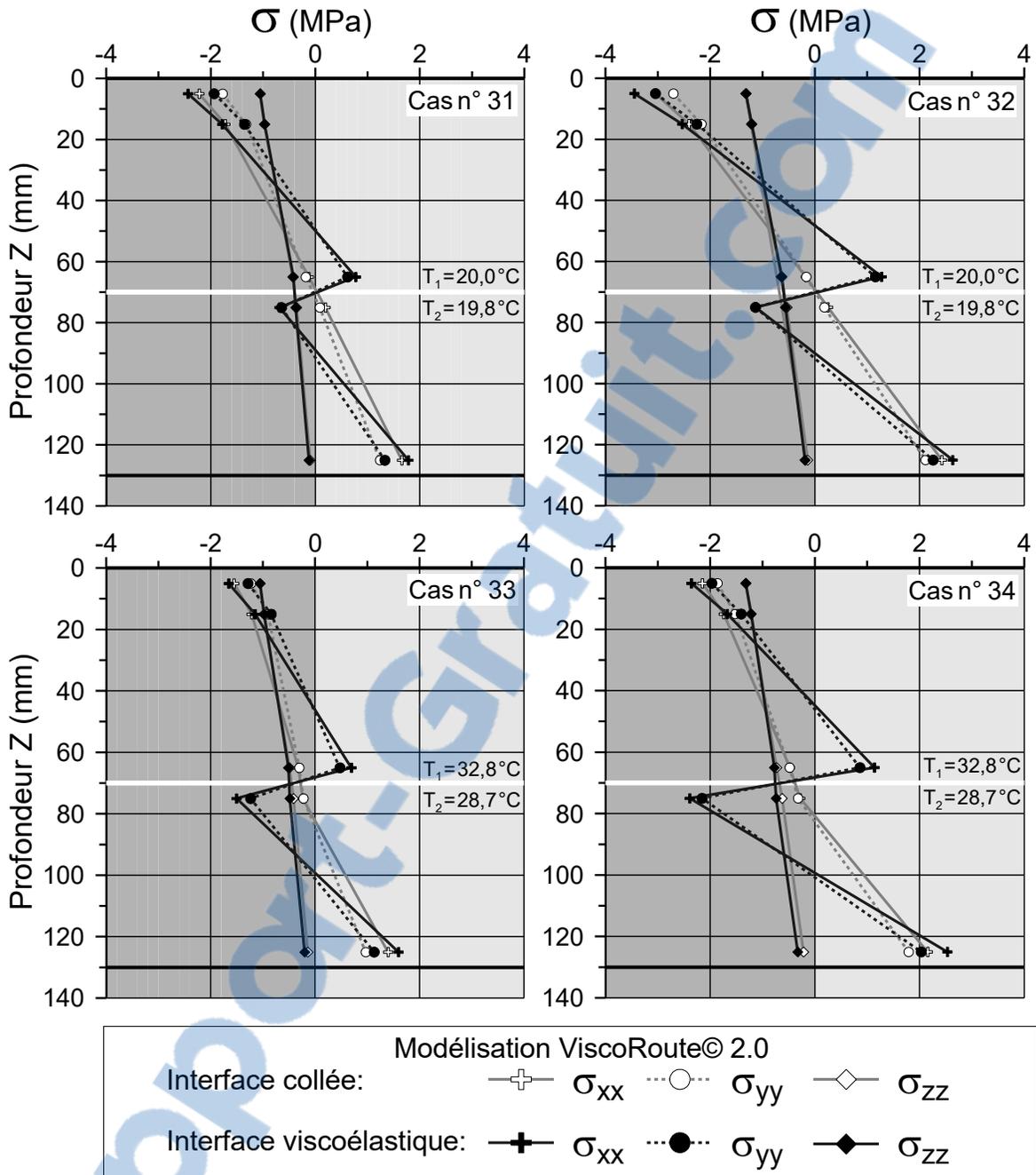


Figure 6.11 : Profil de distribution des contraintes sous un pneu jumelé (cas n° 31 et 33) et sous un pneu à bande large (cas n° 32 et 34) chargés à 5,8 t et circulant à 43 km/h en fonction des conditions d'interface entre les couches bitumineuses de la section A

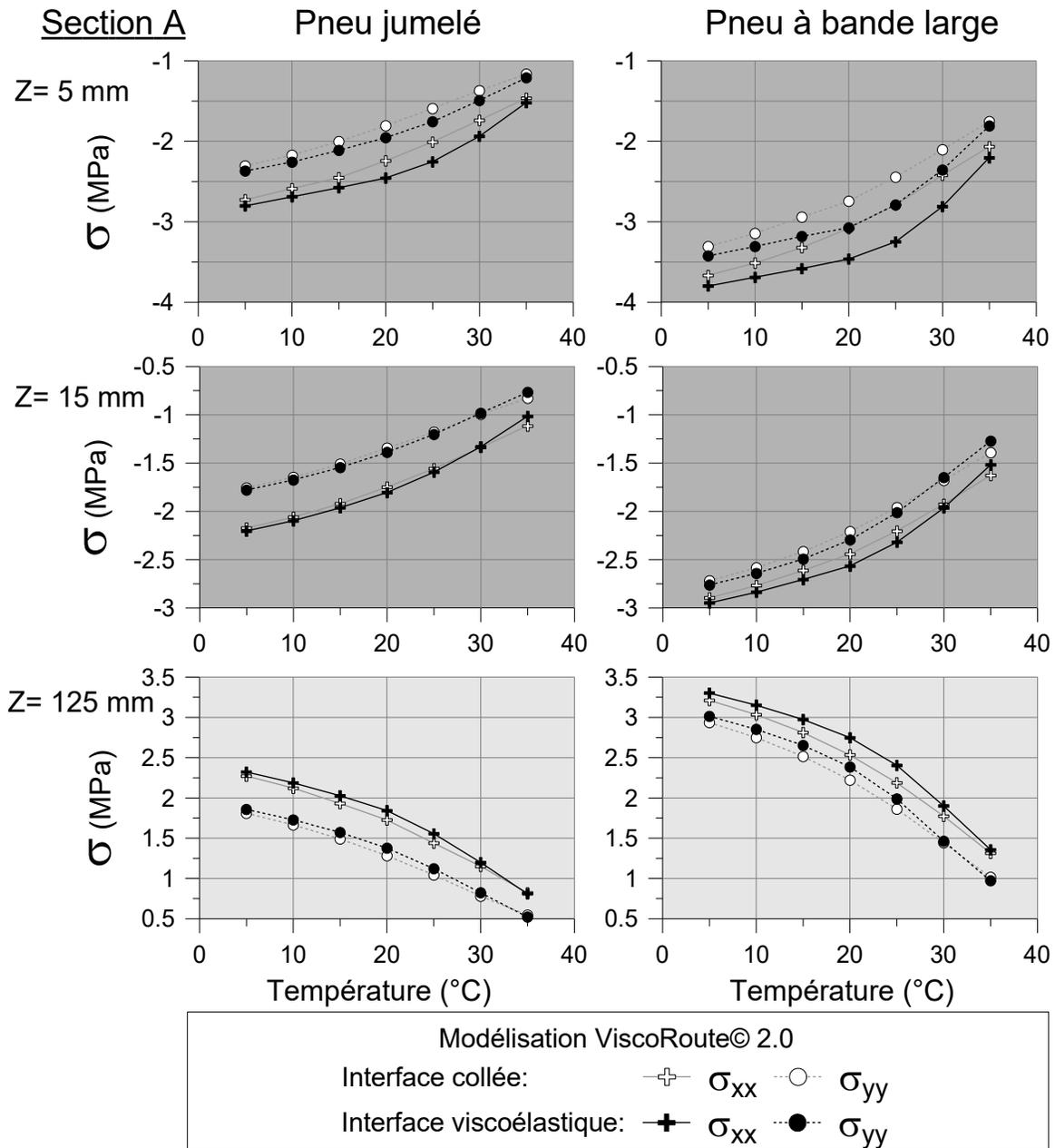


Figure 6.12 : Évolution des contraintes en fonction de la température et des conditions d'interface sous un essieu simple (pneu jumelé ou pneu à bande large, 5,8 t, 43 km/h) pour la section A

Les valeurs présentées pour des températures variant entre 5 °C et 35 °C sont obtenues pour un chargement à 5,8 tonnes et une vitesse de la charge de 43 km/h. Les contraintes sont calculées à la fois pour l'interface collée et pour l'interface viscoélastique afin d'analyser l'influence de celle-ci sur l'amplitude des contraintes. Pour ces calculs, la température de la couche supérieure est égale à celle de la couche inférieure. La prise en compte de la

viscoélasticité de l'interface entraîne une augmentation de la compression proche de la surface et une augmentation de la traction au bas de la couche inférieure. Cette augmentation est cependant fonction de la température et du type de pneu. La figure 6.13 présente l'écart, exprimé en pourcentage, entre les contraintes calculées avec l'interface viscoélastique et celles avec l'interface collée.

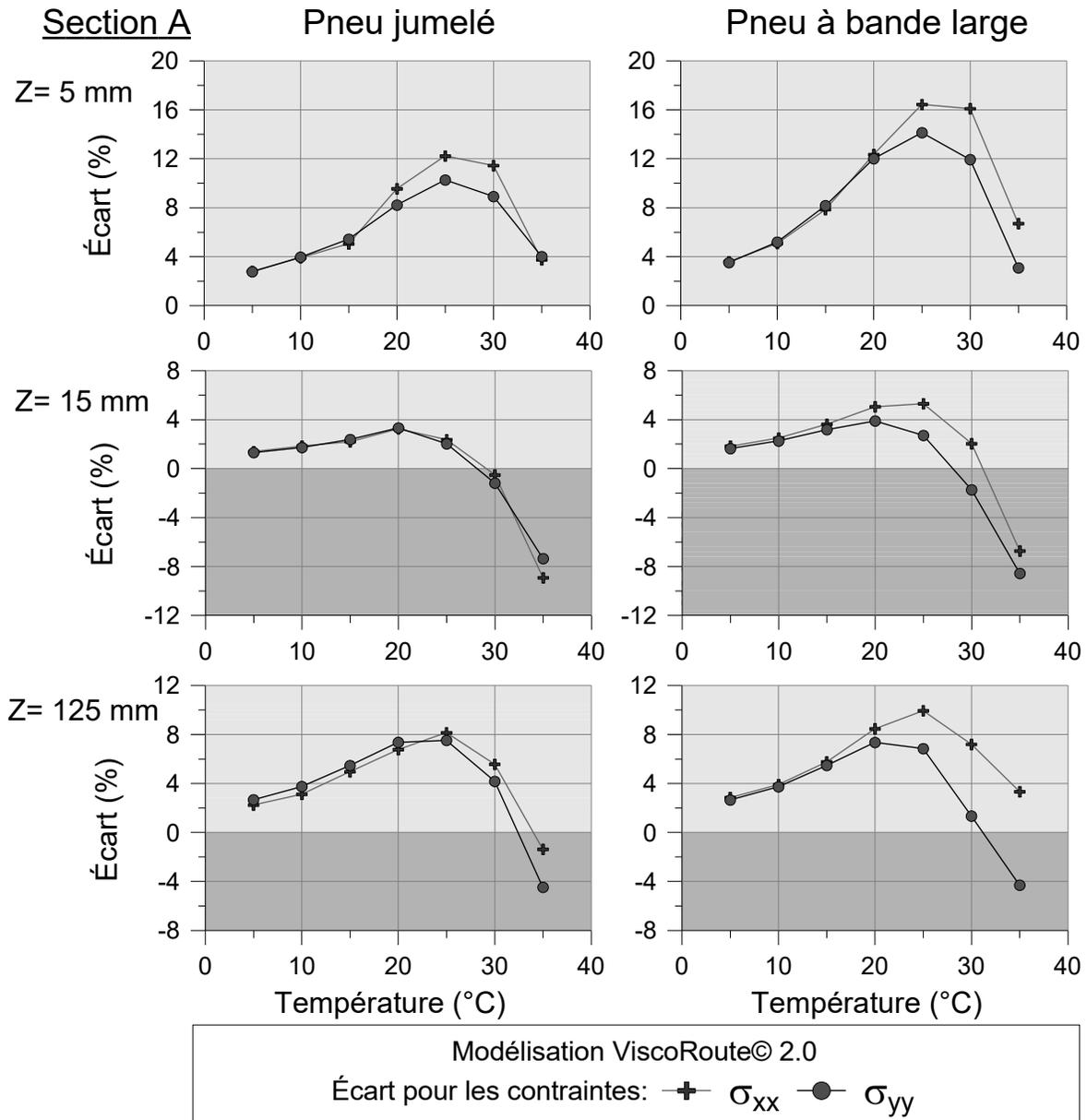


Figure 6.13 : Évaluation de l'écart d'amplitude des contraintes engendré par la viscoélasticité de l'interface en fonction de la température et du type de pneu (section A, 5,8 t et 43 km/h)

Un pourcentage positif signifie que les contraintes calculées avec l'interface viscoélasticité ont une amplitude supérieure à celle calculée avec l'interface collée. À 5 °C, la viscoélasticité de l'interface a pour effet d'augmenter les contraintes de 2 % à 4 %. L'augmentation est effective à la fois dans la direction longitudinale et transversale. Les écarts augmentent avec l'augmentation de la température jusqu'à atteindre un maximum à une température seuil comprise entre 25 °C et 30 °C. À cette température, les écarts en $Z = 125$ mm sont compris entre 8 % et 10 %. En fonction de la contrainte considérée, les écarts atteignent entre 10 % à 16 % proche de la surface. Pour des températures supérieures à la température seuil, les écarts diminuent progressivement. En $Z = 125$ mm, les écarts deviennent négatifs pour des températures supérieures à 32 °C, à l'exception de la contrainte longitudinale engendrée par le pneu jumelé pour laquelle la température dépasse 35 °C. En $Z = 15$ mm, les écarts sont négatifs dès que les températures sont plus élevées que 30 °C. Enfin en $Z = 5$ mm, les écarts restent positifs pour la plage de température analysée.

La figure 6.14 détaille les contraintes en $Z = 65$ mm et en $Z = 75$ mm pour les mêmes conditions de modélisation que celles de la figure 6.12. Dans le cas de l'interface viscoélastique, l'intensité des contraintes situées de part et d'autre de l'interface augmente avec la hausse des températures. Les contraintes augmentent continuellement à partir de 5 °C jusqu'à atteindre un maximum situé à 30 °C. Au-dessus de cette température, dite température critique, l'amplitude des contraintes diminue progressivement. Cette température critique est sensiblement la même pour les deux types de pneus et est fonction de la vitesse de la charge et des paramètres viscoélastiques de l'interface. Cette température se situe dans la plage de valeurs pour lesquelles les écarts d'amplitude identifiés précédemment deviennent négatifs.

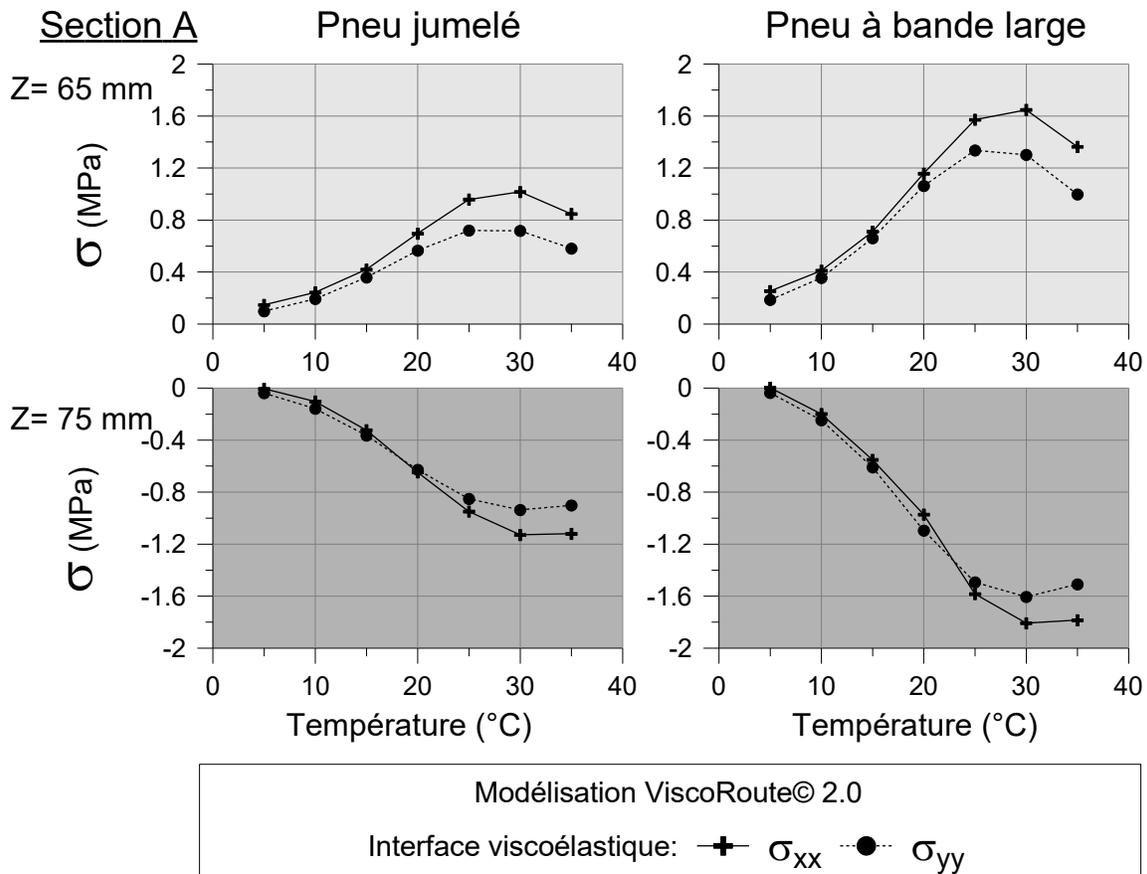


Figure 6.14 : Évolution des contraintes de part et d'autre de l'interface en fonction de la température dans le cas de l'interface viscoélastique

6.4.1.2 Influence des conditions d'interface sur la traction proche de la surface

Au passage d'une charge roulante (figure 6.15), les contraintes longitudinales se divisent en deux phases. Au cours de la première phase, les contraintes sont en compression et atteignent un maximum directement sous le centre de la charge. Au cours de la deuxième phase, qui est associée au départ de la charge, la contrainte devient positive. Elle atteint un maximum situé de 30 cm à 40 cm à l'arrière du centre de la charge. La figure 6.15 présente la contrainte longitudinale engendrée par le pneu à bande large chargé à 5,8 tonnes. Selon Tamagny et coll. (2004), cette traction serait à l'origine de la fissuration s'initiant proche de la surface. La figure 6.15 détaille l'effet de la viscoélasticité de l'interface sur la distribution de la contrainte au passage de la charge et présente également la traction maximale pour des températures variant de 5 °C à 35 °C.

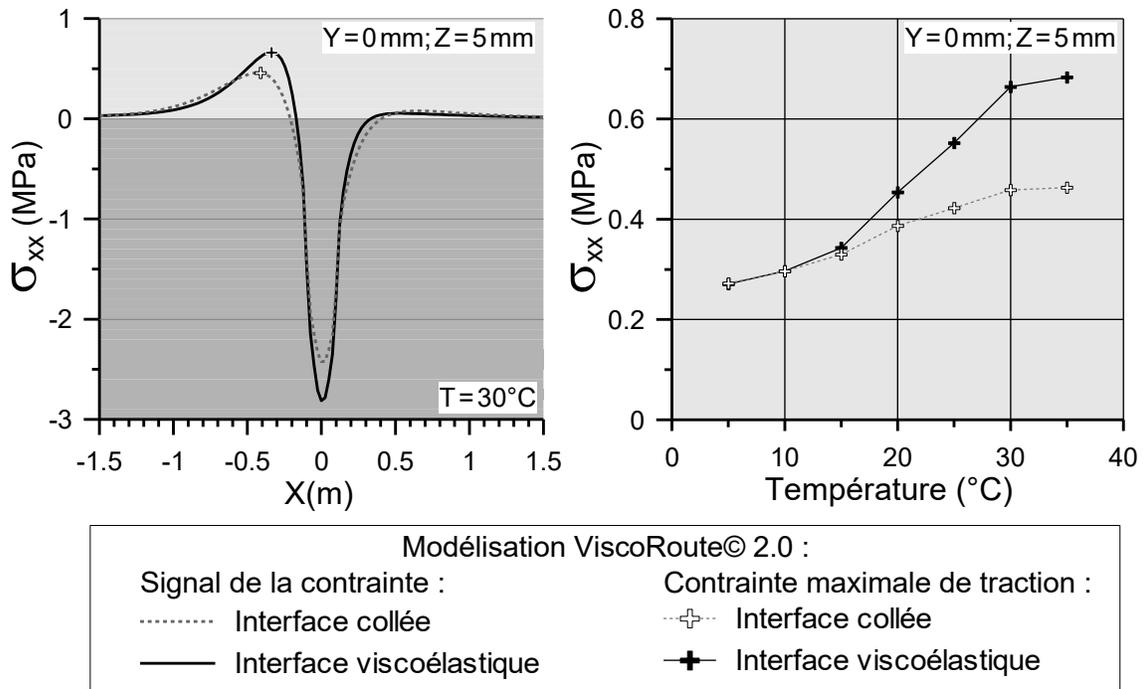


Figure 6.15 : Évolution de la contrainte à 5 mm de profondeur en fonction de la température et des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu à bande large, 5,8 t, 43 km/h) pour la section A

La présence d'une interface viscoélastique entre les deux couches bitumineuses a pour conséquence d'augmenter à la fois la compression sous la charge et la traction à l'arrière du pneu. Pour les températures inférieures à 10 °C, les écarts entre les deux modélisations sont nuls. Dès que la température augmente et que la composante visqueuse de l'interface prédomine, les écarts atteignent 40 % à 50 %. Ces écarts sont les plus élevés mesurés pour les contraintes dans la structure. Pour la structure de chaussée analysée, la traction proche de la surface reste de faible amplitude comparativement à la traction calculée au niveau de l'interface ou encore à celle située au bas de la couche inférieure.

6.4.1.3 Influence du gradient de température sur l'amplitude des contraintes

Les couches bitumineuses sont soumises à des cycles de température journaliers. Au cours de la journée, la température de la couche supérieure augmente puis décroît en fonction de l'irradiation solaire. La chaleur se transfère par conduction dans les couches bitumineuses. La figure 6.16 détaille les températures à 3 cm et à 9 cm de profondeur dans les couches bitumineuses de la section A entre le 13 mai et le 27 mai. La figure présente également l'écart entre ces deux températures qui correspond au gradient thermique simplifié s'exerçant dans

la structure entre la couche supérieure et la couche inférieure. Dans cet exemple, au cours de la nuit, le gradient thermique est positif et sa valeur est comprise entre 2,5 °C et 2,9 °C. Lorsque la couche supérieure est soumise aux radiations solaires, le gradient thermique devient négatif. Lorsque le soleil atteint son point culminant, le gradient thermique est compris entre - 5 °C et - 9 °C. La température des couches et les gradients thermiques associés sont fonction de la zone climatique et de la période à laquelle les mesures sont effectuées.

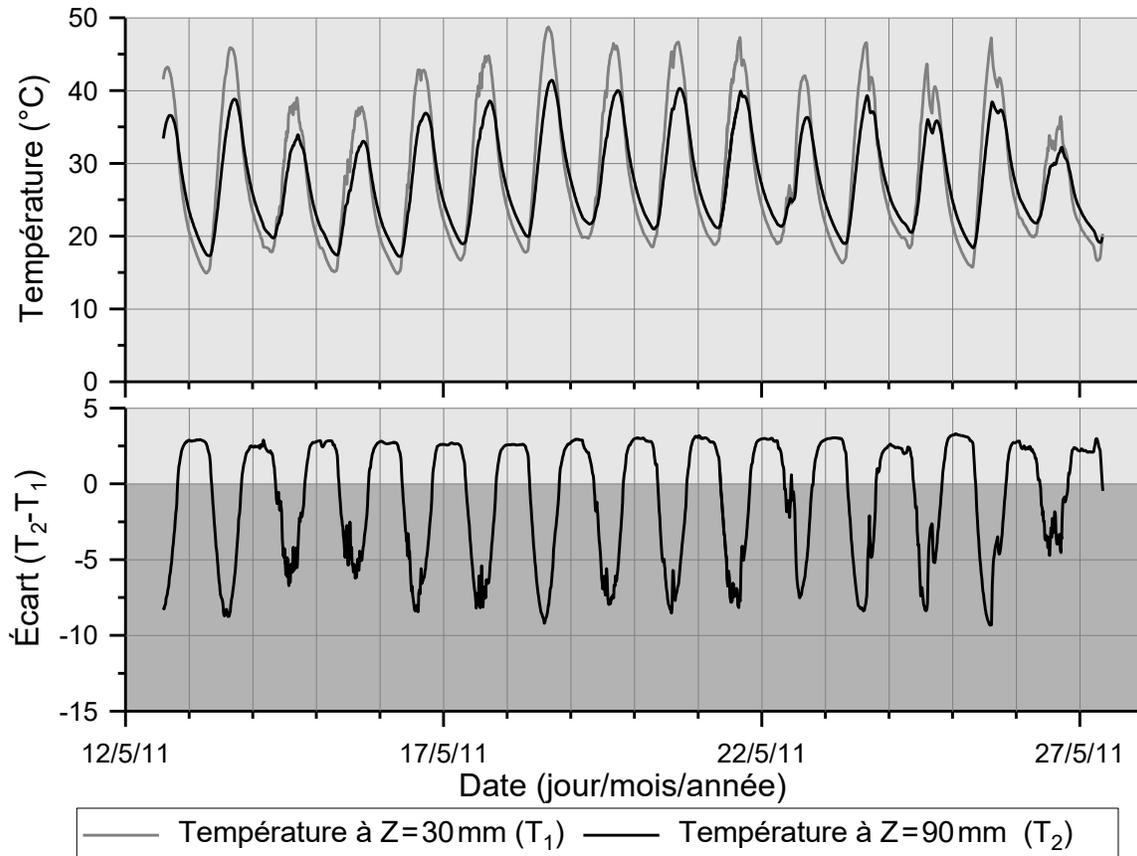


Figure 6.16 : Exemple des cycles de température et du gradient thermique associé à deux profondeurs (30 mm et 90 mm) dans les couches bitumineuses de la section A

L'effet du gradient thermique sur l'amplitude des contraintes dans les couches bitumineuses est présenté à la figure 6.17. Cette figure détaille les contraintes calculées dans le cas d'un gradient thermique positif et d'un gradient thermique négatif. L'écart de température entre les couches est fixé à 5 °C. Ces deux cas sont comparés au cas où les températures des deux couches sont uniformes. La figure 6.17 représente l'amplitude des contraintes en fonction de la température de la couche dans laquelle sont calculées les contraintes. Les contraintes sont uniquement calculées dans le cas du pneu à bande large chargé à 5,8 tonnes.

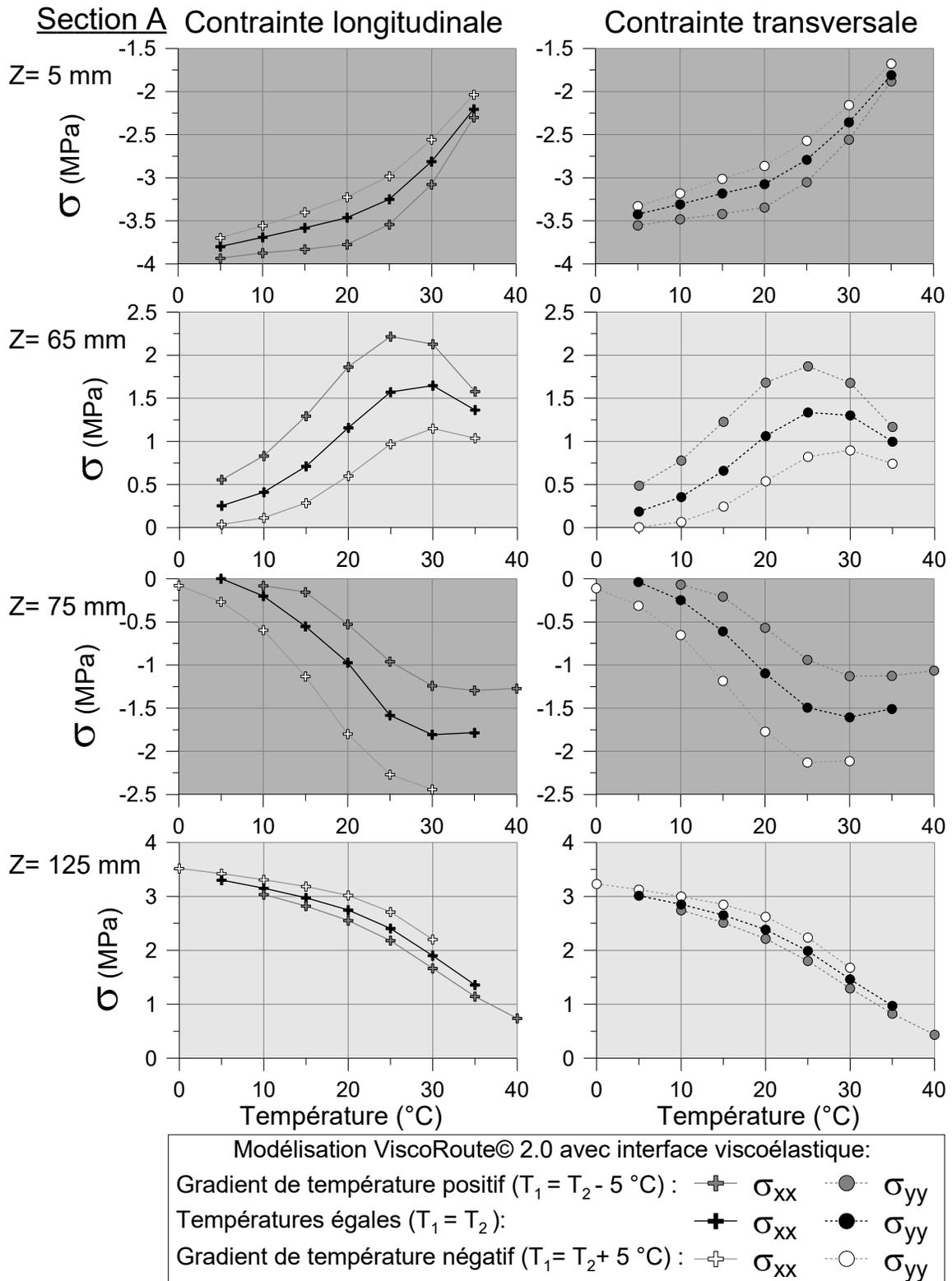


Figure 6.17 : Effet d'un gradient thermique sur la distribution des contraintes dans les couches bitumineuses de la section A pour le pneu à bande large (5,8 t, 43 km/h) dans le cas d'une interface viscoélastique

Pour une température donnée, la présence d'un gradient thermique négatif a pour effet de diminuer la compression en $Z = 5$ mm et la traction en $Z = 65$ mm mais d'augmenter la compression en $Z = 75$ mm et la traction en $Z = 125$ mm. Ces différences s'expliquent par les variations de la rigidité des couches en fonction de la température. Pour une température fixée de la couche n° 1, par exemple 25 °C , la température de la couche n° 2 est de 25 °C dans le cas de référence, mais seulement de 20 °C dans le cas du gradient thermique. La rigidité de la couche n° 2 est donc plus élevée dans le second cas. La couche de surface reposant sur une couche plus rigide, les contraintes sont de plus faibles amplitudes. De même, à une température fixée de la couche n° 2, la couche n° 1 possède dans le cas du gradient thermique négatif, une rigidité plus faible ce qui a pour conséquence d'augmenter les contraintes dans la couche n° 2. L'effet est inversé dans le cas du gradient thermique positif. La figure 6.17 montre une augmentation de la compression en $Z = 5$ mm et de la traction en $Z = 65$ mm ainsi qu'une diminution de la compression en $Z = 75$ mm et de la traction en $Z = 125$ mm.

La même étude effectuée avec l'interface collée montre un effet similaire. La présence de l'interface viscoélastique a cependant pour conséquence d'amplifier les écarts d'amplitude. Ces écarts sont particulièrement élevés de part et d'autre de l'interface puisque la présence d'un gradient thermique augmente ou réduit de 20 % à 70 % l'amplitude des contraintes. Les écarts dépendent du gradient de température imposé entre les deux couches. Plus le gradient est élevé, plus les écarts sont importants. La température critique à laquelle la traction en $Z = 65$ mm est maximale est respectivement plus basse ou plus élevée en présence d'un gradient thermique positif ou négatif. L'effet est inversé au niveau de la compression maximale en $Z = 75$ mm.

6.4.2 Distribution des déformations en fonction des conditions d'interface

6.4.2.1 Influence des conditions d'interface sur les déformations au bas de la couche de base

La viscoélasticité de l'interface entraîne une augmentation des contraintes au bas de la couche de base ce qui amène une redistribution des déformations sous la charge. La figure 6.18 illustre la réponse spatiale et le bassin des déformations longitudinales et transversales. Les modélisations et les mesures expérimentales correspondent au cas expérimental n° 33.

Cas n° 33 - Température = 32,8°C

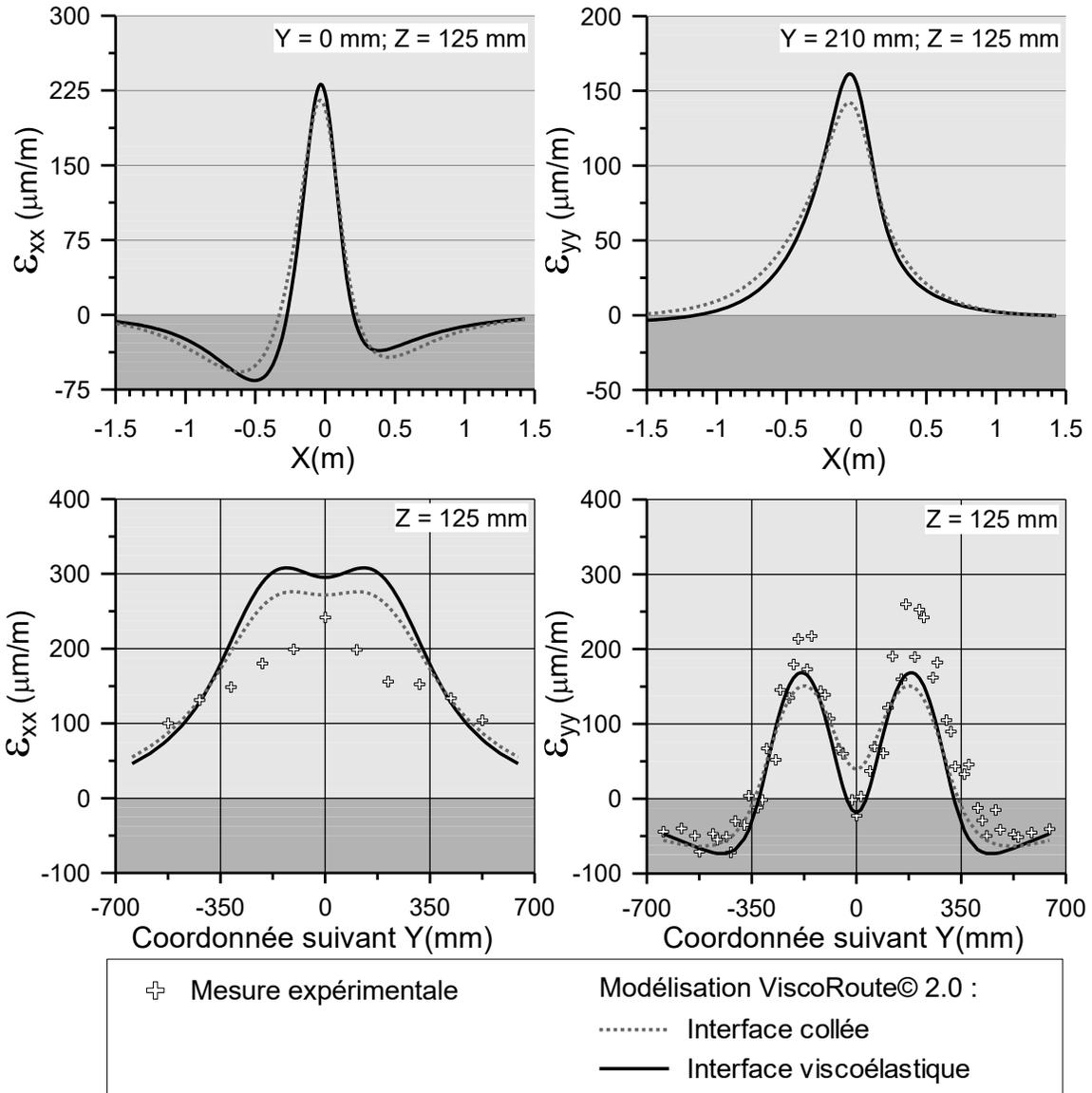


Figure 6.18 : Distribution des déformations longitudinales et transversales au bas de la couche de base de la section A (Z = 125 mm) en fonction des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)

La viscoélasticité de l'interface occasionne une extension plus élevée sous la charge. Cette augmentation est de 11 % dans la direction longitudinale et de 12 % dans la direction transversale. Les contractions calculées de part et d'autre de la charge et à l'arrière du pneu augmentent pour leur part de 15 %. La viscoélasticité de l'interface modifie l'interaction entre les deux pneus jumelés. La contrainte transversale au centre de l'espace entre les deux pneus est de 0,4 MPa dans le cas de l'interface collée et seulement de 0,2 MPa pour l'interface

viscoélastique. Les déformations associées sont de $40 \mu\text{m/m}$ pour le premier cas et de $-18 \mu\text{m/m}$ pour le second. Expérimentalement, la déformation en $Y = 0 \text{ m}$ est de l'ordre de $-20 \mu\text{m/m}$ ce qui correspond aux valeurs calculées. Dans la direction transversale, la prise en compte de la viscoélasticité de l'interface permet une meilleure évaluation des déformations s'exerçant au centre des pneus et au niveau de l'espacement entre les deux. À l'inverse, dans la direction longitudinale, les écarts entre les déformations mesurées et modélisées sont plus élevés.

La viscoélasticité de l'interface modifie également la réponse spatiale (et temporelle) de la déformation. La figure montre que le temps de chargement et le temps de sollicitation sont plus courts dans le cas de l'interface viscoélastique comparativement à celui de l'interface collée. Cet effet est observé dans la direction longitudinale et transversale.

6.4.2.2 Influence des conditions d'interface sur les déformations proche de la surface

À 15 mm de profondeur, la viscoélasticité de l'interface a pour effet d'augmenter l'amplitude des contraintes longitudinale et transversale pour une température inférieure à $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette augmentation se traduit par une augmentation des contractions transversale et longitudinale mesurées sous le pneu. Pour des températures supérieures à $30 \text{ }^\circ\text{C}$, l'effet est inversé, les modélisations montrent une diminution des contraintes. La figure 6.19 illustre l'effet de cette baisse sur les déformations transversales et longitudinales calculées à 15 mm de profondeur. Dans le cas expérimental n° 33, la couche de base étant à $28,7 \text{ }^\circ\text{C}$, la baisse des contraintes est amplifiée par la présence du gradient thermique entre les deux couches. Le bassin de déformation et la représentation spatiale de la déformation transversale montrent une baisse de la contraction calculée sous les rainures et les nervures du pneu. La baisse est comprise entre 10% et 25% sous les pneus et 30% et 45% au droit de l'espacement entre les deux pneus du jumelé et à l'extérieur des pneus. Dans la direction longitudinale, la baisse est de 9% sous les pneus et de 10% à 15% à l'extérieur des pneus. Contrairement au cas de l'interface collée, les calculs effectués avec l'interface viscoélastique montrent que le pic d'extension situé à l'avant de la charge possède une amplitude inférieure à celle du pic situé à l'arrière de la charge. Les mesures expérimentales détaillées à la section 5.2 possèdent également cette caractéristique. Pour les deux directions, les temps de chargement et les temps de retour à une déformation nulle sont plus courts dans le cas de l'interface viscoélastique.

Cas n° 33 - Température = 32,8°C

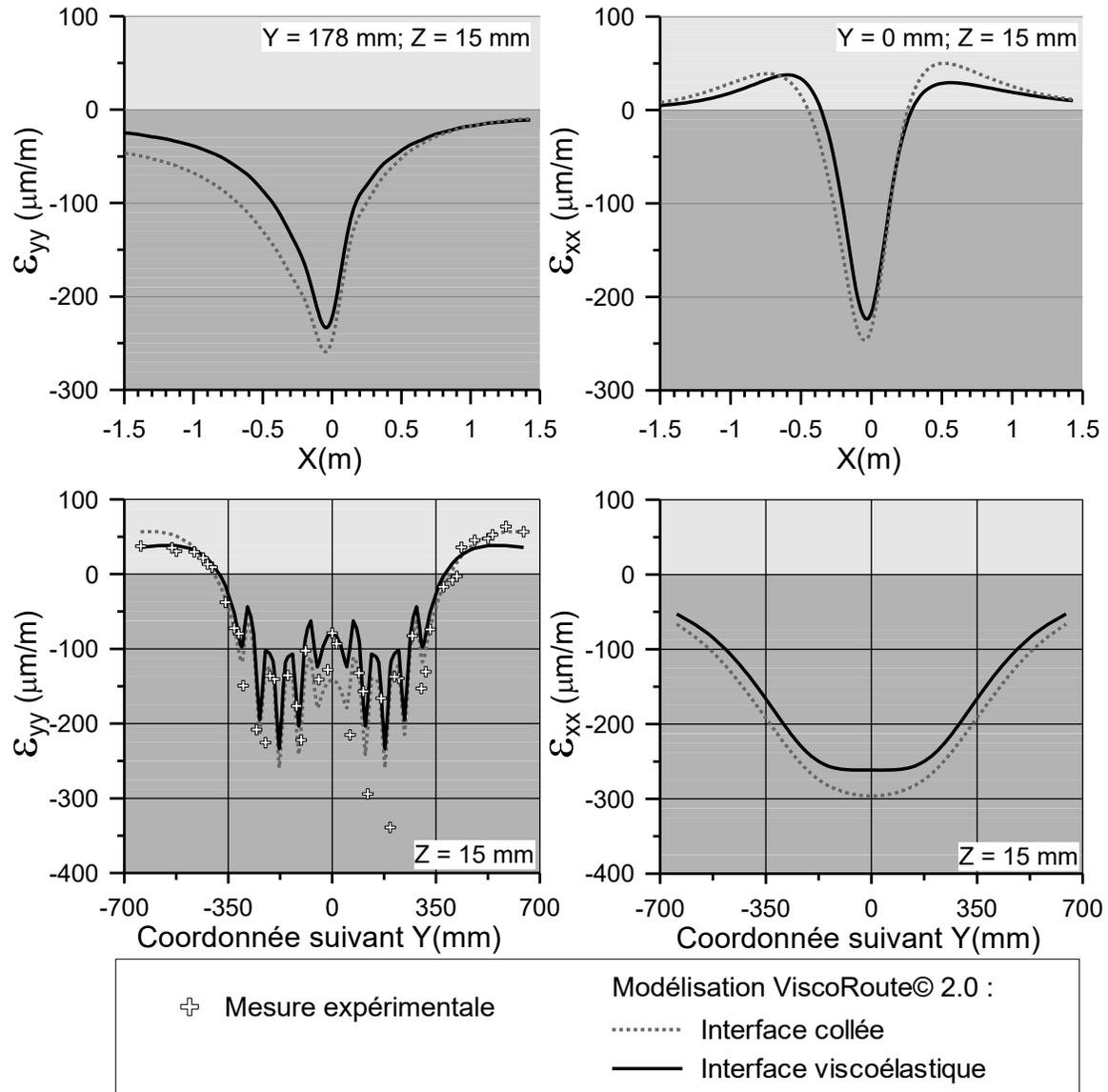


Figure 6.19 : Distribution des déformations longitudinales et transversales à faible profondeur dans la couche de surface de la section A (Z = 15 mm) en fonction des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)

Dans la couche de surface, la contrainte verticale n'est pas influencée par les conditions de modélisation de l'interface. Les écarts d'amplitude, obtenus à partir des calculs ViscoRoute© 2.0, sont inférieurs à 0,5 %. La distribution des déformations verticales associée à chaque condition d'interface est uniquement influencée, par effet de Poisson, par les variations des contraintes transversales et longitudinales. La figure 6.20 illustre l'effet des conditions d'interface sur les déformations verticales à 20 mm de profondeur. La baisse

d'amplitude des contraintes horizontales a comme conséquence d'augmenter la contraction calculée sous les nervures et de diminuer l'extension au droit des rainures du pneu et de l'espacement entre les deux pneus du jumelé. Les écarts d'amplitude entre les mesures expérimentales et les valeurs modélisées sont donc plus faibles dans le cas de l'interface viscoélastique.

À l'avant de la charge, les déformations calculées pour les deux conditions d'interface se superposent. À l'arrière de la charge, l'augmentation de la traction longitudinale et transversale engendrée par la viscoélasticité de l'interface a pour conséquence de maintenir la contraction à une amplitude plus élevée. Par la suite, en s'éloignant du centre de la charge, les deux signaux tendent à se superposer à nouveau.

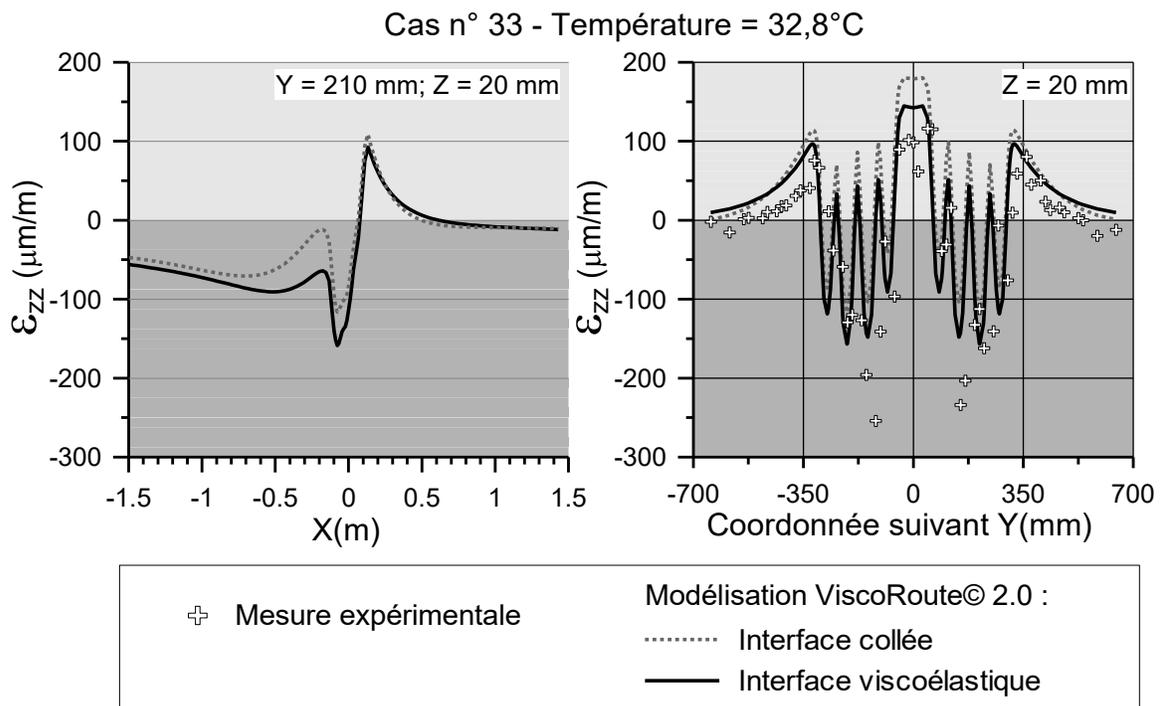


Figure 6.20 : Distribution des déformations verticales à faible profondeur dans la couche de surface de la section A (Z = 20 mm) en fonction des conditions d'interface au passage d'un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)

L'analyse des conditions d'interface a été effectuée pour l'ensemble des conditions expérimentales et les bassins de déformations associés sont détaillés à l'annexe 6.

6.4.3 Synthèse et enseignements

L'amplitude de la traction au bas de la couche de surface et celle de la compression au sommet de la couche de base sont fonction de la température. Pour des températures inférieures à 10 °C, ces contraintes sont inférieures à 0,4 MPa et elles sont du même ordre de grandeur que celles calculées avec l'interface collée. Contrairement aux contraintes calculées au sommet de la couche de surface et au bas de la couche de base où l'augmentation de la température entraîne une baisse de l'amplitude des contraintes, la hausse des températures a pour effet d'accroître l'amplitude des contraintes mesurées de part et d'autre de l'interface. Les contraintes augmentent jusqu'à atteindre un maximum pour une température critique d'environ 30 °C. L'intégration d'un comportement viscoélastique de l'interface entraîne également une augmentation de la compression au sommet de la couche de surface ainsi qu'une augmentation de la traction au bas de la couche de base. Les écarts sont maximaux pour une température comprise entre 25 °C et 30 °C, puis diminuent jusqu'à devenir négatifs. La température à laquelle ces écarts deviennent négatifs est fonction de la profondeur dans la structure et de l'orientation de la contrainte. La variation de ces contraintes se répercute au niveau des déformations par une modification de la réponse spatiale et par une redistribution des déformations sous la charge. L'analyse comparative avec les mesures expérimentales montre une meilleure corrélation avec la prise en compte du comportement viscoélastique.

La température critique à laquelle l'intégration d'un comportement viscoélastique de l'interface a le plus d'incidence sur la distribution des contraintes dépend du gradient thermique présent entre les couches bitumineuses, des propriétés viscoélastiques des couches bitumineuses et des paramètres de charge tels que la vitesse de chargement et le type de pneu.

6.5 Détermination de l'épaisseur de modélisation de la couche d'interface

La réponse mécanique de la structure de chaussée dépend de la rigidité et de l'épaisseur respective de chacune des couches qui la compose. Les paramètres utilisés afin de modéliser le comportement de la couche d'interface sont ceux d'un bitume. Cela signifie que son module est beaucoup plus faible que celui des couches bitumineuses situées de part et d'autre. L'épaisseur de l'interface est donc un des paramètres de modélisation qui influence la

distribution des contraintes et des déformations dans la structure. Afin de quantifier cet effet, les déformations ont été calculées pour chacune des quatorze conditions expérimentales en faisant varier l'épaisseur de l'interface. Ces résultats sont comparés aux mesures expérimentales afin de déterminer l'épaisseur optimale pour laquelle les écarts sont les plus faibles. Les trois épaisseurs testées sont 0,5 mm, 1 mm et 2 mm.

La figure 6.21 illustre les bassins de déformations calculés pour ces trois épaisseurs pour le cas expérimental n° 33. Les résultats obtenus avec l'interface collée sont également ajoutés aux graphiques. Les déformations présentées sur la figure correspondent à celles où les mesures expérimentales ont été effectuées. Une valeur représentative de la déformation pour chaque bassin est déterminée en suivant les méthodes d'analyse présentées dans ce chapitre et dans les chapitres précédents. Les résultats de l'étude sont compilés à l'annexe 7. La figure 6.21 et les résultats présentés à cette annexe montrent que l'augmentation d'une épaisseur de 0,5 mm à une épaisseur de 1 mm et de 2 mm se répercute au niveau des déformations par :

- Une diminution de la contraction transversale calculée en $Z = 15$ mm. La baisse moyenne est respectivement de 2 % et de 7 %.
- Une augmentation de la contraction verticale calculée en $Z = 20$ mm sous les nervures du pneu. La hausse moyenne est respectivement de 13 % et de 25 %.
- Une diminution de l'extension calculée en $Z = 20$ mm à l'extérieur des pneus ainsi qu'entre les deux pneus du jumelé. La baisse est respectivement de 13 % et 27 %.
- Une augmentation de l'extension transversale et longitudinale calculée en $Z = 65$ mm. La hausse est respectivement de 30 % et de 60 %.
- Une augmentation de la contraction transversale calculée en $Z = 75$ mm. La hausse est respectivement de 40 % et de 80 %.
- Une légère augmentation de l'extension longitudinale et une légère diminution de l'extension transversale calculées en $Z = 125$ mm. Les variations sont inférieures à 4 %.

L'influence de l'épaisseur est donc particulièrement perceptible au niveau des déformations calculées de part et d'autre de l'interface puis dans un second temps au niveau des déformations proche de la surface.

Cas n° 33 - Température = 32,8 °C

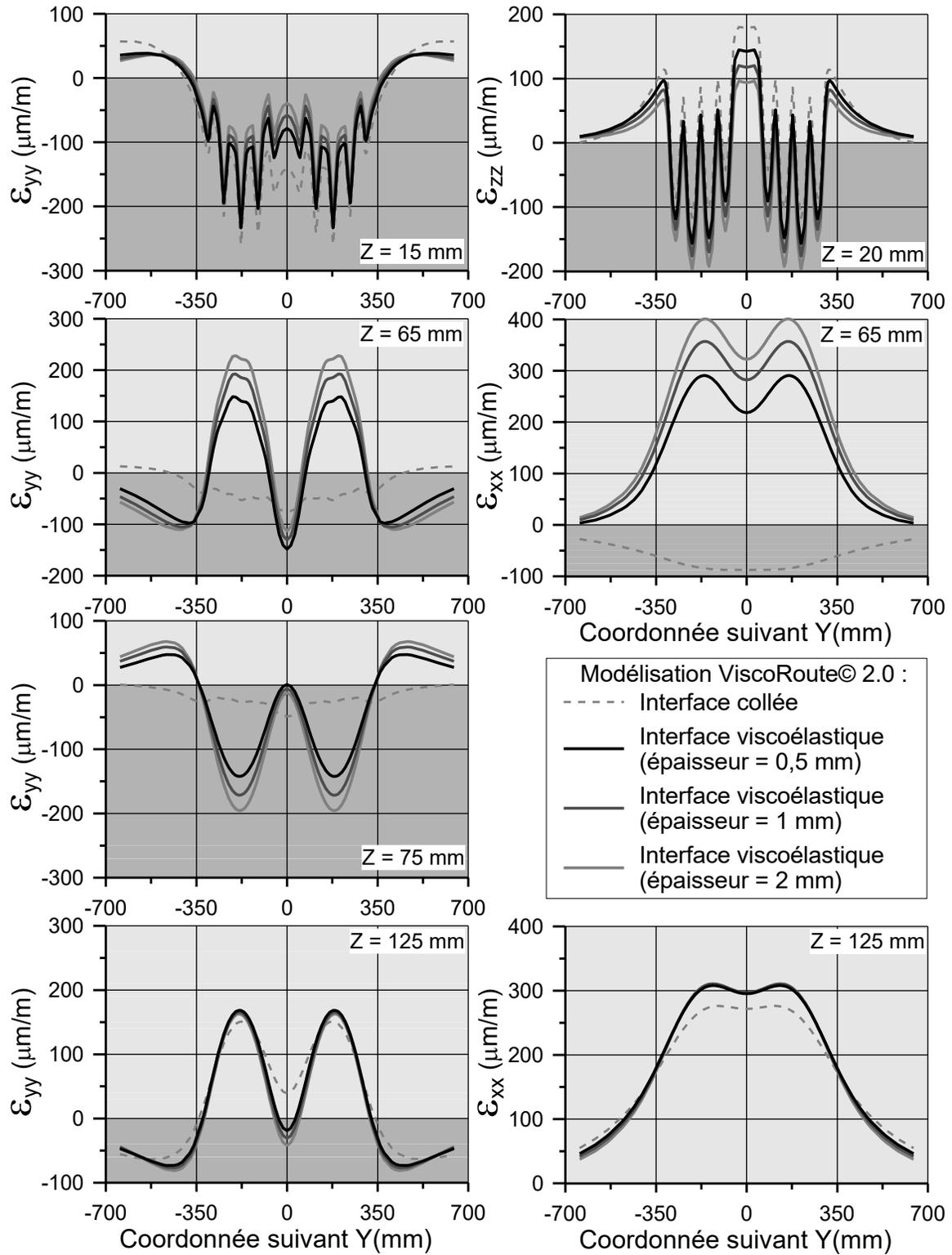


Figure 6.21 : Influence de l'épaisseur de la couche d'interface sur les bassins des déformations longitudinales, transversales et verticales dans les couches bitumeuses de la section A pour un essieu simple (pneu jumelé, 5,8 t, 43 km/h)

L'écart entre les modélisations et les valeurs expérimentales est calculé à partir des valeurs représentatives extraites des bassins de déformation. Ces écarts sont exprimés en pourcentage de la mesure expérimentale. Un écart positif signifie que la modélisation surestime les valeurs expérimentales. Les écarts sont calculés pour les sept déformations et pour les quatorze cas expérimentaux. Ces valeurs sont par la suite moyennées suivant 9 critères. Ces critères sont les 4 intensités de charge évaluées, les deux types de pneus, les deux plages de températures et finalement le critère noté global inclut l'ensemble des conditions expérimentales. Les résultats pour chaque critère sont détaillés à la figure 6.22. À titre d'exemple, les moyennes présentées pour le chargement de 5 tonnes incluent les valeurs calculées à ce tonnage pour les deux types de pneus, pour les deux températures et pour les sept déformations. La moyenne est donc calculée à partir de 28 valeurs. Les critères notés pneu jumelé et pneu large incluent respectivement 56 et 42 valeurs. Les écarts pour toutes les conditions expérimentales sont détaillés à l'annexe 7. La figure 6.22 présente également l'intervalle de confiance à 95 % associé aux écarts moyens. Pour l'ensemble de ces 9 critères, les écarts moyens les plus faibles sont obtenus avec l'épaisseur de 0,5 mm. L'écart moyen global est de 1 %. La figure montre que les modélisations sont meilleures lorsque les calculs sont effectués avec le pneu jumelé et pour les températures chaudes. Il est à noter que les meilleurs résultats sont obtenus pour le chargement de 5 tonnes.

La figure 6.22 présente également les écarts mesurés pour chaque déformation. Pour ces critères, la moyenne inclut toutes les conditions expérimentales, soit 14 valeurs. Indépendamment du modèle considéré, les modélisations sous-estiment les déformations transversales mesurées à 15 mm et à 125 mm de profondeur et également les déformations verticales à 20 mm de profondeur. À l'inverse, tous les modèles surestiment les déformations longitudinales au bas de la couche de base. Au niveau de l'interface, les déformations calculées sont surestimées indépendamment de l'épaisseur considérée. Les écarts les plus faibles sont cependant obtenus avec l'épaisseur évaluée la plus fine.

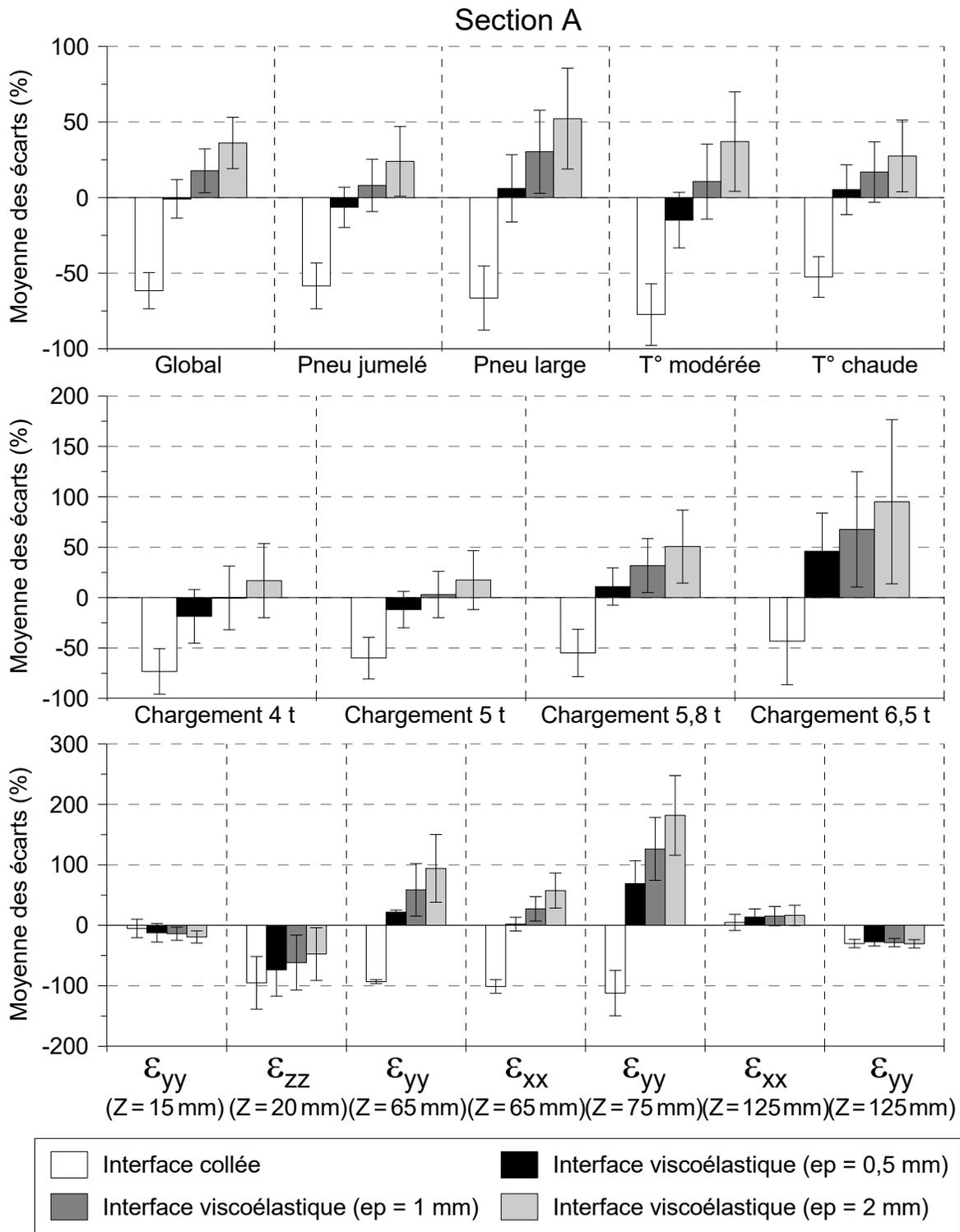


Figure 6.22 : Écart moyen entre les modélisations et les mesures expérimentales de la section A en fonction des critères d'évaluation suivant : type de pneu, température, intensité de la charge, déformations mesurées, profondeur de la mesure

6.6 Conclusion

Au passage d'une charge, les déformations mesurées de part et d'autre de l'interface par les plaques de déformations et par la carotte instrumentée montrent que de l'extension et de la contraction se développent respectivement au bas de la couche de surface et au sommet de la couche de base. L'hypothèse de modélisation selon laquelle l'interface entre deux couches bitumineuses peut être considérée comme parfaitement collée indépendamment des conditions de température ou de vitesse de chargement ne permet pas de reproduire le signe ni l'amplitude des déformations mesurées expérimentalement. La liaison physique entre les deux couches bitumineuses est assurée par le liant d'accrochage de type émulsion de bitume mis en place lors de la construction de la chaussée. Les propriétés physiques et mécaniques de ce liant varient en fonction de la durée de vie de la chaussée et des conditions environnementales. Afin d'intégrer les propriétés du liant d'accrochage dans l'analyse structurale de la chaussée, l'interface est modélisée comme une couche de faible épaisseur dont le comportement viscoélastique est caractérisé par le modèle de Huet. L'ajout de cette couche permet de reproduire le saut de déformation identifiée de part et d'autre de l'interface et réduit les écarts entre les valeurs calculées et les données expérimentales. En considérant comme paramètre d'optimisation du modèle ces écarts et en les moyennant pour les sept déformations et pour les quatorze conditions expérimentales, les meilleurs résultats sont obtenus en définissant l'épaisseur de la couche d'interface à 0,5 mm.

L'analyse comparative entre le modèle qui considère l'interface comme parfaitement collée et celui qui considère l'interface comme viscoélastique permet de quantifier l'influence de cette propriété mécanique sur la distribution des contraintes et des déformations à travers les deux couches bitumineuses. Les principales conclusions de cette analyse se résument comme suit. Premièrement, la viscoélasticité de l'interface entraîne une augmentation des contraintes transversales et longitudinales de part et d'autre de l'interface. Ces contraintes augmentent avec la hausse des températures jusqu'à une température critique pour laquelle elles atteignent un maximum. Au-dessus de cette température, les contraintes diminuent progressivement. Pour une structure de chaussée donnée, la température critique dépend non seulement des paramètres viscoélastiques des enrobés bitumineux et de l'interface, mais également des paramètres de charge et de la non-homogénéité des températures à travers la structure.

Deuxièmement, la viscoélasticité de l'interface engendre une hausse des contraintes au bas de la couche de base pour des températures inférieures à 30 °C. Pour des températures supérieures à cette température seuil, la viscoélasticité de l'interface entraîne une baisse des contraintes, qui se répercute par une baisse de l'amplitude des déformations calculées à cette profondeur. Comme pour la température critique, cette température seuil est fonction des paramètres de modélisation et de la contrainte considérée. Troisièmement, dans les premiers centimètres de la couche de surface, la viscoélasticité engendre soit une hausse soit une baisse des contraintes en fonction de la température de la couche mais également en fonction de la profondeur de calcul. Plus les contraintes sont calculées proche de la surface, plus la hausse est importante. Il est à noter que la prise en compte de la viscoélasticité de l'interface augmente de plus de 40 % la contrainte en traction identifiée à l'arrière du pneu. Les variations de contrainte se répercutent sur l'amplitude des déformations longitudinales et transversales mais également par effet de Poisson sur les déformations verticales.

Chapitre 7

Mise en application du modèle de comportement viscoélastique de l'interface et discussion

7.1 Présentation et objectifs

Il a été montré dans les chapitres précédents que la distribution des déformations et des contraintes dans les couches bitumineuses est fonction des paramètres de charge, des conditions environnementales et des propriétés de la couche d'accrochage située entre les couches bitumineuses. Les mesures montrent un saut des déformations de part et d'autre de l'interface qui se traduit expérimentalement par de l'extension au bas de la couche de surface et de la contraction au sommet de la couche de base. Les approches classiques de modélisation qui considèrent l'ensemble des couches de la chaussée comme parfaitement collées ne permettent pas d'expliquer ce phénomène. Il a été proposé d'intégrer la couche d'accrochage aux modèles de calcul en insérant une couche d'interface de faible épaisseur au comportement thermoviscoélastique. Cette approche a permis d'interpréter et de quantifier le phénomène observé et a également permis d'évaluer son effet sur la réponse mécanique d'un revêtement constitué de deux couches bitumineuses. Le premier objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement mécanique d'un revêtement bitumineux constitué de trois couches bitumineuses en intégrant l'approche de modélisation viscoélastique à chacune des interfaces du système. Ce chapitre ne vise pas à valider le modèle, mais à le mettre en application afin d'identifier et de discuter des modes d'endommagement auxquels les couches bitumineuses pourraient être soumises en fonction des conditions environnementales. Les déformations et les contraintes associées au passage d'un essieu tridem sont donc évaluées pour plusieurs conditions de vitesses et de températures au niveau de chaque interface bitumineuse d'une chaussée constituée de trois couches bitumineuses.

Le modèle présenté au précédent chapitre et mis en application dans celui-ci repose uniquement sur l'analyse des déformations mesurées dans une structure de chaussée constituée de deux couches bitumineuses et sollicitée par les passages successifs d'un essieu simple. Le second objectif de ce chapitre est de discuter et de proposer une critique objective du projet ainsi que de la méthodologie et de l'approche expérimentale qui ont été suivies. La discussion est composée de quatre principales parties et porte dans un premier temps sur les principales avancées dans le domaine de l'instrumentation, dans les méthodes d'analyse des déformations et dans la modélisation du comportement viscoélastique des couches bitumineuses. La seconde partie de la discussion présente des exemples d'application pratique des techniques d'instrumentation utilisées au cours du projet ainsi que des exemples d'application liés à l'approche de modélisation présentée. La troisième partie de la discussion inclut une critique du projet, présente la limite des travaux et propose des améliorations pouvant être mises en œuvre pour de futures recherches. Plusieurs axes de recherche sont proposés en quatrième partie de la discussion afin de poursuivre les études sur le comportement mécanique des interfaces bitumineuses et de leurs effets sur le comportement à long terme des structures de chaussées.

7.2 Mise en application du modèle de comportement viscoélastique de l'interface

7.2.1 Présentation des cas simulés

La mise en application du modèle consiste à simuler le passage d'un essieu tridem circulant sur une structure de chaussée constituée de trois couches bitumineuses. La structure de chaussée étudiée possède une fondation granulaire de 300 mm d'épaisseur en MG-31.5 et repose sur un sol d'infrastructure de type sable argileux. Les propriétés physiques et mécaniques des matériaux granulaires et des sols sont les mêmes que celles des structures A et B du manège de fatigue et sont détaillées à la section 3.3. Le revêtement bitumineux est constitué d'une couche de base en GB 0/14 de 90 mm d'épaisseur, surmontée d'une seconde couche de GB 0/14 également de 90 mm d'épaisseur et d'une couche de roulement en BBSG 0/10 de 70 mm d'épaisseur. Les paramètres du modèle de Huet-Sayegh de ces deux types d'enrobés sont ceux des sections A et B et sont détaillés au tableau 3.6. Une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur est modélisée entre la couche de BBSG 0/10 et la

couche de GB 0/14 ainsi qu'entre les deux couches de GB 0/14. Les déformations et les contraintes sont calculées à 5 mm de la base des couches soit aux profondeurs $Z = 65$ mm, $Z = 155$ mm et $Z = 245$ mm. Ces calculs sont effectués pour des températures du revêtement variant de 10 °C à 35 °C, par pas de 5 °C. Les températures sont considérées uniformes au travers la structure de chaussée à l'exception d'un cas où un gradient thermique négatif est imposé dans la structure. Pour ce cas précis, la température de la couche n° 1 est supérieure de 3 °C par rapport à celle de la couche n° 2 qui est elle-même 3 °C plus chaude que la couche n° 3.

L'essieu tridem est équipé avec des pneus à bande large 455/55R22.5 et la charge par pneu est fixée à 5 tonnes. L'espacement entre les centres des pneus est de 1,5 m et le milieu des pneus sont donc respectivement aux coordonnées $X = 1,5$ m pour l'essieu avant, $X = 0$ m pour l'essieu central et $X = -1,5$ m pour l'essieu arrière du tridem. Deux vitesses de roulement sont considérées, soit 43 km/h et 90 km/h. La vitesse de 43 km/h a été choisie afin d'être représentative de la vitesse des véhicules en milieu urbain, mais également comme valeur de comparaison avec les vitesses évaluées au manège de fatigue. La vitesse de 90 km/h correspond approximativement à la vitesse des véhicules lourds qui circulent sur les réseaux autoroutiers et pour lesquels la structure de chaussée est habituellement constituée d'au moins trois couches bitumineuses.

L'identification des modes d'endommagement potentiel de la structure est effectuée suivant trois approches. La première consiste à relever la déformation maximale dans les directions longitudinale et transversale au passage de l'essieu tridem puisque celles-ci sont associées à la durée de vie en fatigue de la couche bitumineuse à partir des fonctions de transfert présentées à la section 2.4.1. La seconde approche évalue l'énergie totale développée dans les couches bitumineuses par le passage d'un essieu tridem. Des modèles de fatigue multilinéaires permettent d'associer ce paramètre à la durée de vie des couches bitumineuses. Enfin, la dernière approche analyse le chemin de contrainte imposé par le tridem à la base de chacune des couches.

7.2.2 Analyse des déformations à la base des couches bitumineuses

7.2.2.1 Signaux de déformation au passage d'un essieu tridem

La figure 7.1 donne les signaux de déformation dans la direction longitudinale et transversale obtenus à partir des simulations ViscoRoute© 2.0 pour un essieu tridem avec une charge à la roue de 5 tonnes et roulant à 43 km/h. Les résultats sont présentés pour deux températures homogènes des couches bitumineuses soit 20 °C et 30 °C. La figure représente les signaux calculés à 5 mm de la base de chacune des couches bitumineuses et compare également les signaux calculés à la base du revêtement du cas simulé pour lequel les interfaces entre les couches bitumineuses sont considérées comme collées. Seule la profondeur de 245 mm est représentée pour ce dernier cas, puisque c'est à cette profondeur que l'extension est la plus élevée.

Dans la direction longitudinale, l'essieu tridem impose trois pics d'extension localisés sous le centre de chaque essieu et cela à toutes les profondeurs. En $Z = 245$ mm et en $Z = 155$ mm, l'amplitude de l'essieu avant est la plus élevée des trois suivie de l'essieu arrière puis de l'essieu central. En $Z = 65$ mm, l'amplitude maximale est mesurée sous l'essieu central. Les écarts d'amplitude sont de l'ordre de 5 % entre l'essieu arrière et avant et de 10 % entre l'essieu central et avant. À 20 °C, pour les cas avec l'interface viscoélastique, l'extension la plus élevée est identifiée en $Z = 245$ mm et son amplitude est 1,28 fois plus élevée que le cas avec l'interface collée. Les déformations mesurées à la base de la couche de roulement sont les plus faibles. Elles sont deux fois plus faibles que celles à la base de la couche de base. Les observations sont les mêmes à 30 °C mis à part que l'augmentation de la température a pour effet de réduire les écarts d'amplitude entre les déformations à la base de chaque couche et d'augmenter celui par rapport au cas collé. Les déformations en $Z = 245$ mm du cas viscoélastique sont 1,45 fois plus élevées que le cas de l'interface collée.

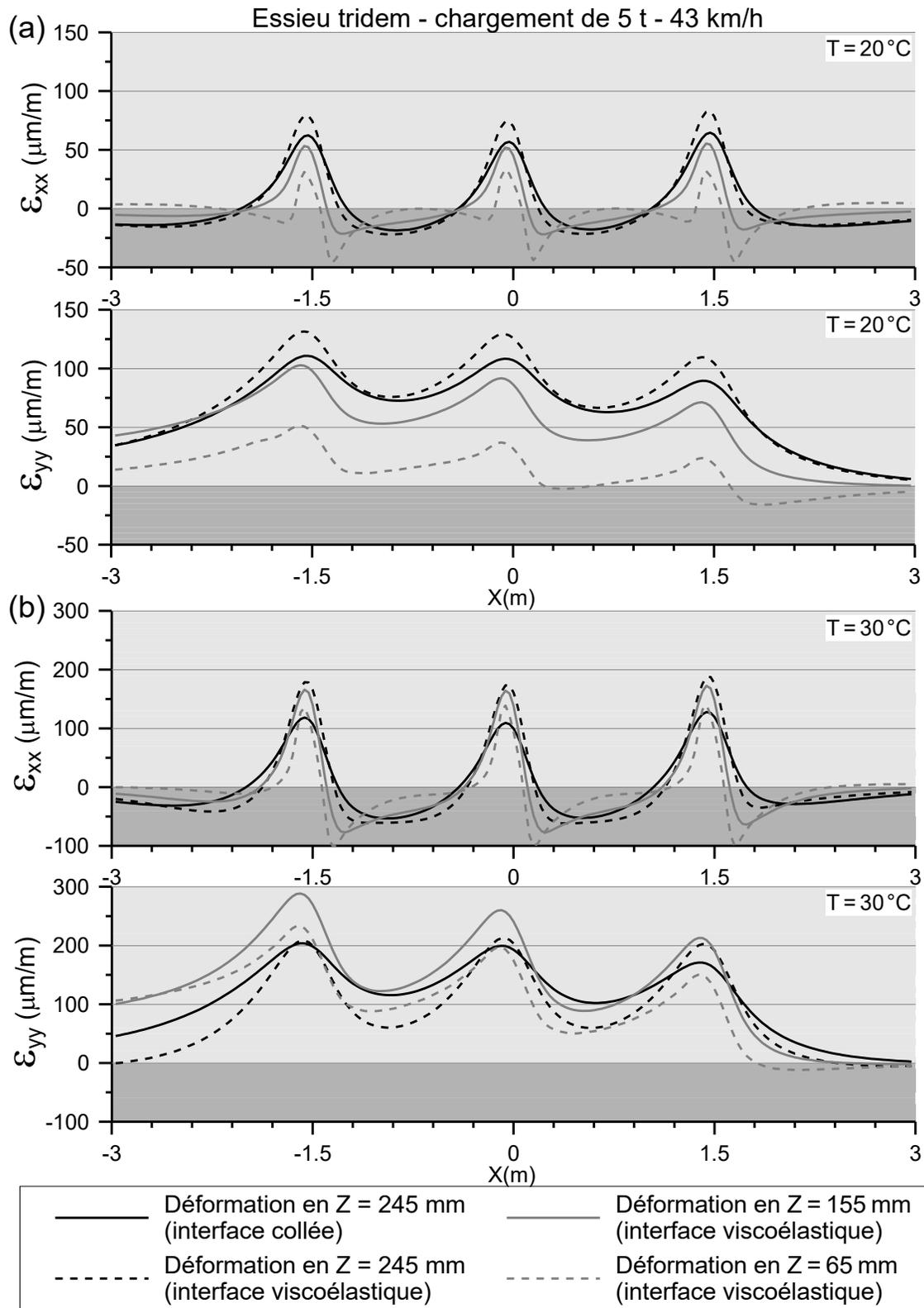


Figure 7.1 : Déformations longitudinales et transversales à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm, $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 255$ mm) au passage d'un essieu tridem (pneu à bande large, 5 t, 43 km/h) pour deux températures : (a) 20°C et (b) 30°C

Dans la direction transversale, l'essieu tridem impose également trois pics d'extension localisés sous le centre de chaque essieu. L'interaction entre les essieux entraîne une augmentation progressive de l'amplitude maximale engendrée par les passages successifs de chaque essieu. La déformation maximale imposée par l'essieu tridem est donc celle calculée au niveau de l'essieu arrière. Cet effet est observé aux trois profondeurs du cas viscoélastique et également pour le cas collé. L'écart d'amplitude entre le premier et le troisième essieu est d'environ 20 % en $Z = 245$ mm et de 40 % en $Z = 155$ mm. À 20 °C, pour les cas viscoélastiques, l'extension maximale est relevée en $Z = 245$ mm et son amplitude est 1,28 fois plus élevée qu'à la profondeur $Z = 155$ mm. Celle-ci est également 1,18 fois plus élevée que les déformations calculées pour le cas avec les interfaces collées. À 30 °C, les déformations calculées en $Z = 65$ mm et en $Z = 155$ mm deviennent plus grandes que celles mesurées en $Z = 245$ mm. Celles-ci sont respectivement 1,12 et 1,38 fois plus élevées. L'amplitude des déformations mesurées en $Z = 245$ mm sont du même ordre de grandeur pour le cas avec les interfaces viscoélastiques et collées.

Comme pour les cas présentés au chapitre précédent, l'intégration de la viscoélasticité des interfaces a pour conséquence d'augmenter les déformations mesurées à la base du revêtement et cela pour la direction longitudinale et transversale. Indépendamment de la température et de la profondeur de calcul, les déformations transversales sont supérieures aux déformations longitudinales. À 20 °C, l'extension maximale est relevée dans la direction transversale à la profondeur de $Z = 245$ mm. À 30 °C, les modélisations montrent que l'extension maximale qui se développe au passage de l'essieu tridem est localisée à la base de la couche n° 2, c'est-à-dire à $Z = 155$ mm. La température à laquelle s'effectue cette inversion est fonction des conditions environnementales et des propriétés des matériaux.

7.2.2.2 Effet des conditions environnementales sur le mode d'endommagement

La figure 7.2 illustre l'amplitude maximale relevée à la base des trois couches bitumineuses en fonction de la température et pour une vitesse de la charge de 43 km/h. Dans la direction longitudinale, la déformation mesurée à la base du revêtement est la plus élevée des trois pour la plage de température analysée. Dans la direction transversale, l'extension mesurée en $Z = 155$ mm devient plus élevée que celle en $Z = 245$ mm pour des températures supérieures à 25 °C. Pour des températures plus élevées, la déformation critique n'est donc plus localisée

à la base du revêtement, mais plutôt au niveau de la seconde interface. L'accumulation des microfissurations y est donc plus importante et par conséquent, la fissuration pourrait s'initier au niveau de l'interface et non pas à la base du revêtement. Cette conclusion n'est valide qu'en prenant comme hypothèse que les lois de fatigue qui associent le nombre d'applications de charges admissibles à l'extension maximale et qui s'appliquent à la base du revêtement s'appliquent aux couches intermédiaires.

La figure 7.2 présente également l'amplitude des déformations en $Z = 245$ mm des calculs effectués avec les interfaces collées. Ces mesures sont considérées comme les valeurs de référence puisqu'elles sont obtenues en suivant l'approche classique de modélisation. La déformation relative est alors définie comme le ratio entre la déformation calculée à la profondeur Z des cas viscoélastiques et la déformation de référence. Un ratio supérieur à 1 en $Z = 245$ mm signifie que la viscoélasticité des interfaces a pour effet d'augmenter la déformation à la base du revêtement et indirectement l'endommagement par fatigue des couches. La déformation relative est calculée à la base des trois couches afin de déterminer la profondeur pour laquelle le ratio est le plus élevé et donc pour laquelle la répétition des déformations est la plus dommageable en ce qui concerne la fissuration par fatigue.

Dans la direction longitudinale, la déformation relative en $Z = 245$ mm est comprise entre 1,1 et 1,5, augmente avec la température et est la plus élevée des trois profondeurs. Dans la direction transversale, la déformation relative en $Z = 245$ mm augmente de 1,10 à 1,18 entre 10 °C et 20 °C puis diminue progressivement vers une valeur d'environ 1,10. Cette déformation est la plus élevée des trois profondeurs jusqu'à 25 °C . Au-dessus de cette température, la déformation relative en $Z = 155$ mm devient la plus élevée ce qui confirme les précédentes observations. Plus la température augmente, plus la déformation relative en $Z = 155$ mm augmente. Cette déformation varie de 0,5 à 1,9 dans la plage de température étudiée.

Dans les conditions réelles d'utilisation, la température des couches bitumineuses évolue au cours de la journée en fonction de l'ensoleillement et de la période de l'année. À titre d'exemple, à Nantes, la température moyenne hivernale est comprise entre 5 °C et 10 °C . Celle-ci augmente au cours des mois printaniers et automnaux pour atteindre des températures comprises entre 10 °C et 20 °C . Finalement, en été, les températures moyennes oscillent entre

20 °C et 30 °C. En hiver, l'endommagement a donc principalement lieu à la base du revêtement et très peu à la base de la couche n° 2. À l'inverse en condition estivale, les déformations au niveau de l'interface sont jusqu'à 50 % plus élevées à la base de la couche n° 2 ce qui se traduit par un endommagement plus marqué. Il est possible, en utilisant la loi d'additivité des dommages de Miner (Miner, 1945), de déterminer les conditions climatiques pour lesquelles la fissuration s'initierait à la base de la couche n° 2 et non pas à la base du revêtement tel qu'anticipé par les approches traditionnelles de dimensionnement.

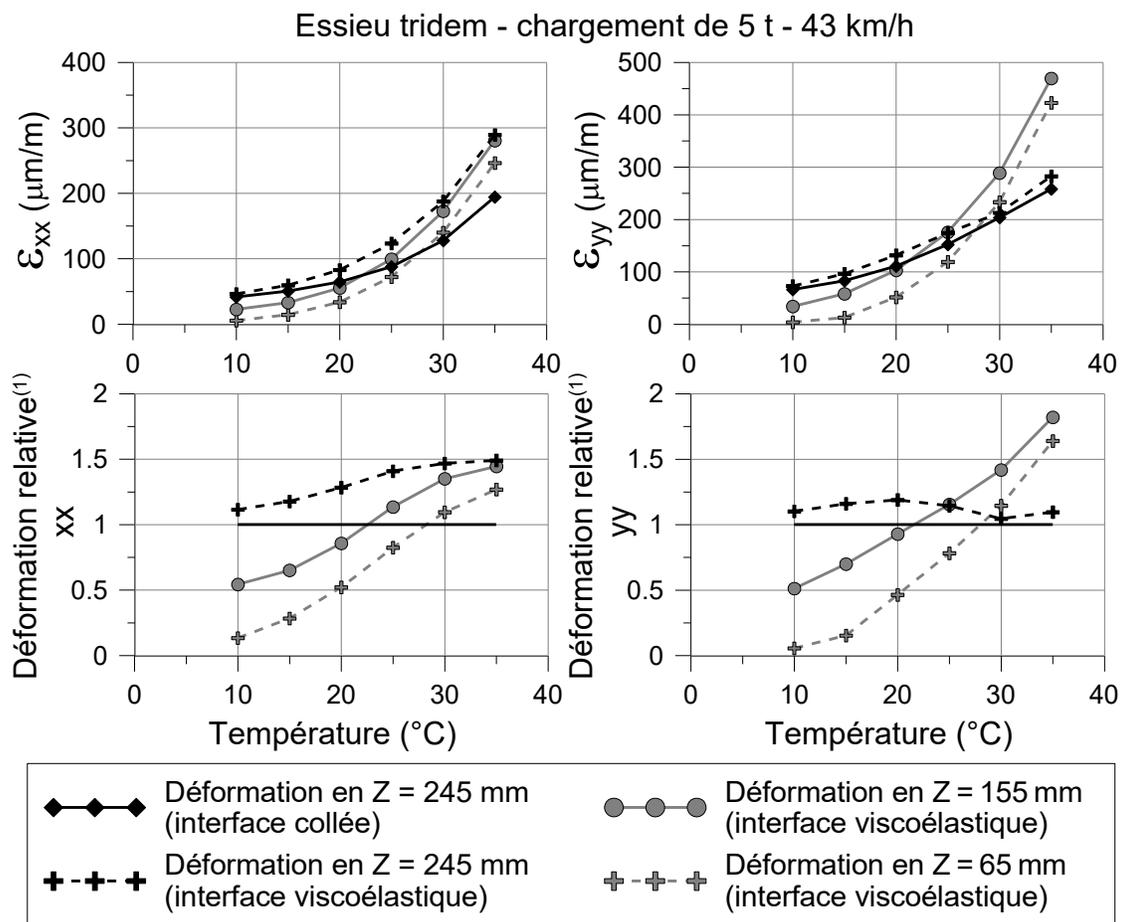


Figure 7.2 : Amplitude maximale des déformations longitudinales et transversales calculées à la base des couches de BBSG (Z = 65 mm et Z = 155 mm) et de GB (Z = 245 mm) et déformation relative associée en fonction de la température

La figure 7.3 présente les déformations relatives pour une vitesse de 90 km/h. Comme pour la vitesse de 43 km/h, les déformations relatives augmentent avec la température. L'augmentation de la vitesse a cependant pour effet de diminuer l'amplitude des déformations

relatives en $Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm. À titre d'exemple, à 30 °C, dans la direction transversale, ces déformations sont respectivement égales à 1,14 et 1,42 à 43 km/h contre 0,90 et 1,24 à 90 km/h. Dans la direction transversale, les déformations relatives en $Z = 155$ mm deviennent plus élevées que celles en $Z = 245$ mm à partir de 28 °C, c'est-à-dire pour 3 °C de plus qu'à 43 km/h. Pour une température donnée, plus la vitesse augmente, plus le risque que la fissuration s'initie en premier à la base de la couche n° 2 diminue.

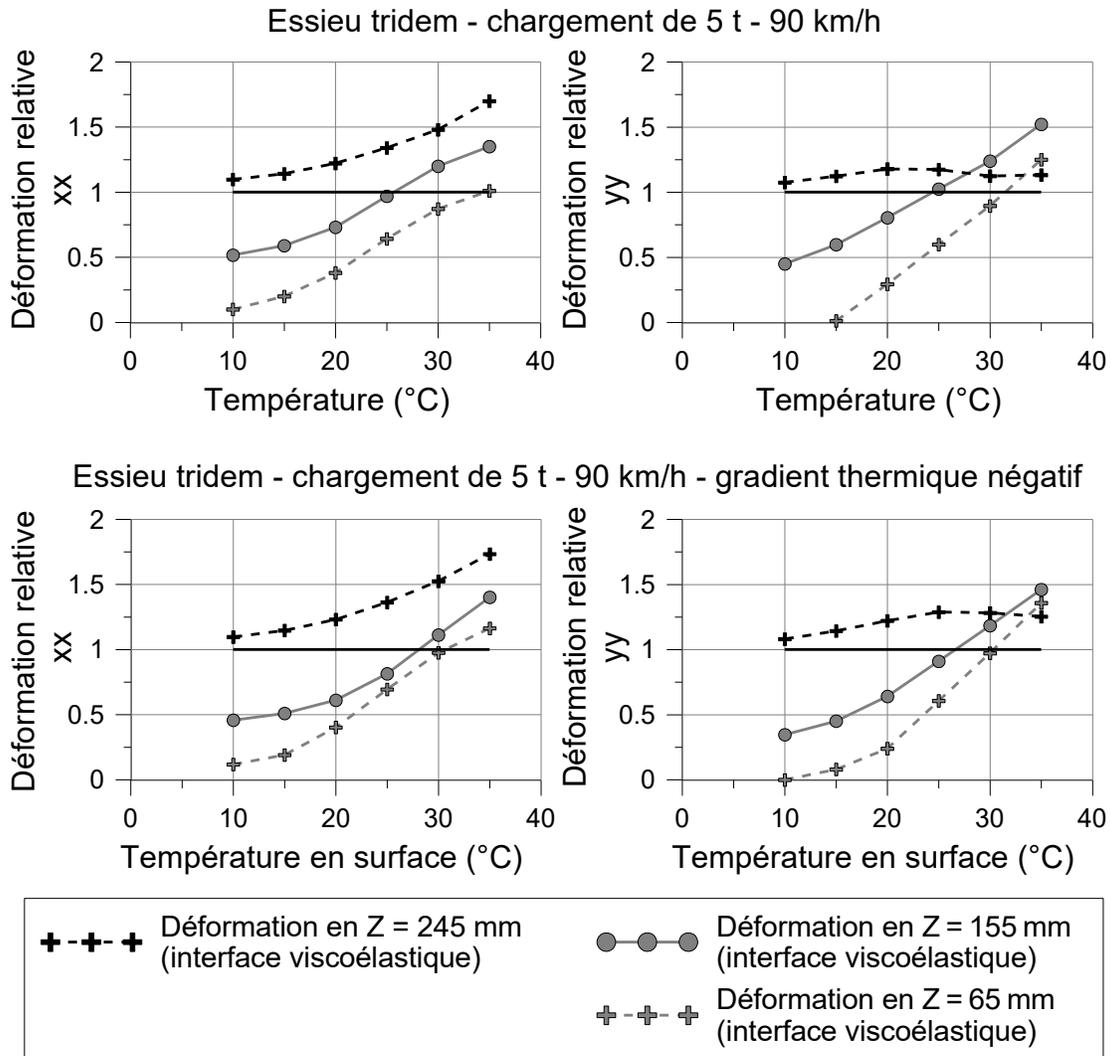


Figure 7.3 : Déformations longitudinales et transversales relatives calculées à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) avec et sans gradient thermique dans les couches bitumineuses en fonction de la température

La température des couches bitumineuses n'est pas uniforme suivant la profondeur comme présentée à la figure 6.16. Un gradient thermique négatif apparait dès que le rayonnement

solaire chauffe la surface de la chaussée. Celui-ci s'inverse et devient positif en fin d'après-midi lorsque la température en surface commence à diminuer. La figure 7.3 présente les déformations relatives pour une vitesse de la charge de 90 km/h avec et sans la présence d'un gradient thermique dans les couches bitumineuses. Le gradient thermique est négatif et l'écart de température entre les couches est choisi égal à 3 °C. Pour une température de la couche de base donnée, les couches supérieures ont une température plus élevée dans le cas avec gradient thermique comparativement au cas homogène. Leurs modules sont donc plus faibles et les contraintes transmises au bas du revêtement sont plus élevées. La présence d'un gradient thermique négatif impose donc une augmentation des contraintes et des déformations en $Z = 245$ mm et cela indépendamment de la modélisation utilisée pour l'interface. Cette augmentation est cependant plus importante dans le cas des interfaces viscoélastiques. Le gradient thermique impose également une baisse de déformations en $Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm. L'association de ces deux effets explique à la fois la baisse observée au niveau des déformations relatives en $Z = 65$ mm et en $Z = 155$ mm et la hausse en $Z = 245$ mm. Dans la direction transversale, les déformations relatives en $Z = 155$ mm deviennent cependant plus élevées que celles en $Z = 245$ mm à partir de 32 °C, c'est-à-dire pour 4 °C de plus que pour le cas d'une température homogène. La présence d'un gradient négatif diminue le risque que la fissuration s'initie en premier à la base de la couche n° 2. À l'inverse, un gradient thermique positif augmente le potentiel de rupture au niveau de l'interface.

7.2.3 Approche énergétique

L'approche énergétique est une méthode d'analyse continue du signal des contraintes et des déformations associées au passage d'une charge. Ghuzlan et Carpenter (2000) ont montré que les variations énergétiques associées à chaque cycle de chargement peuvent être associées à l'endommagement des matériaux par des lois de comportement qui intègrent ces paramètres énergétiques. Le principal avantage du calcul énergétique est d'associer la contrainte et la déformation en tenant compte de leur variation dans le temps. Comme présenté précédemment, l'augmentation des températures a pour effet d'augmenter l'amplitude de l'extension à la base des couches. La figure 7.4 montre cependant que ces observations ne s'appliquent pas aux contraintes. Alors que la contrainte en $Z = 245$ mm diminue avec la hausse de température, les contraintes en $Z = 65$ mm et en $Z = 155$ mm augmentent

progressivement jusqu'à un maximum qui est atteint pour une température d'environ 25 °C. Au-dessus de cette température, l'amplitude des contraintes baisse légèrement. Bien qu'à partir de 25 °C, les déformations en Z = 155 mm sont supérieures à celles en Z = 245 mm, les contraintes en Z = 245 mm restent les plus élevées des trois profondeurs. Étant donné que la viscoélasticité des interfaces modifie à la fois l'amplitude des contraintes et des déformations, il apparaît pertinent d'associer ces deux paramètres par une approche énergétique.

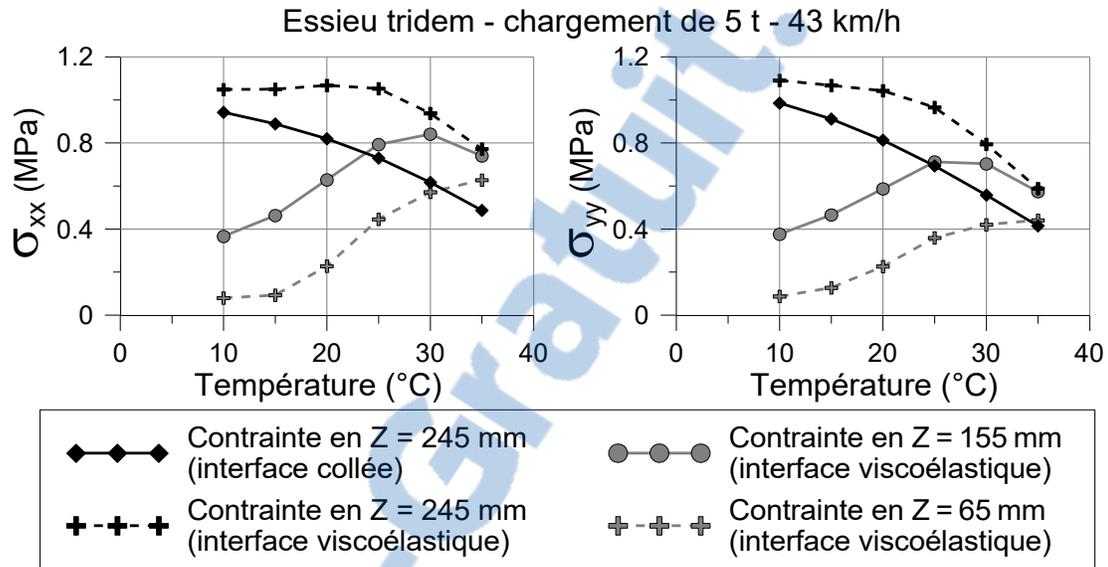


Figure 7.4 : Amplitude maximale des contraintes longitudinales et transversales à la base des couches de BBSG (Z = 65 mm et Z = 155 mm) et de GB (Z = 245 mm) en fonction de la température et des conditions d'interface

L'énergie dissipée correspond à l'aire de la courbe de charge et de décharge dans le plan contrainte-déformation. Cette énergie est définie comme l'intégrale du taux d'absorption de l'énergie de déformation par unité de volume. Cette densité d'énergie est définie à l'instant t par l'équation 7-1.

$$W_{ii}(t) = \int_0^t \dot{W}_u(u) du = \int_0^t \sigma_{ii}(u) \dot{\varepsilon}_{ii}(u) du \quad \text{Équation 7-1}$$

Où : W_{ii} = énergie par unité de volume durant un temps t dans la direction ii,
 σ_{ii} = contrainte dans la direction ii,
 ε_{ii} = déformation dans la direction ii.

La figure 7.5 montre les courbes de charge et de décharge dans le plan contrainte-déformation dans les directions longitudinales et transversales pour l'essieu tridem à une vitesse de

43 km/h et aux températures de 20 °C et 30 °C. La figure présente les courbes aux profondeurs $Z = 155$ mm et $Z = 245$ mm, c'est-à-dire à la base des couches de GB. Les courbes en $Z = 245$ mm dans le cas où les interfaces sont collées sont également présentées sur la figure. La densité d'énergie dissipée est fonction de la viscosité des matériaux et dépend de la température des couches bitumineuses.

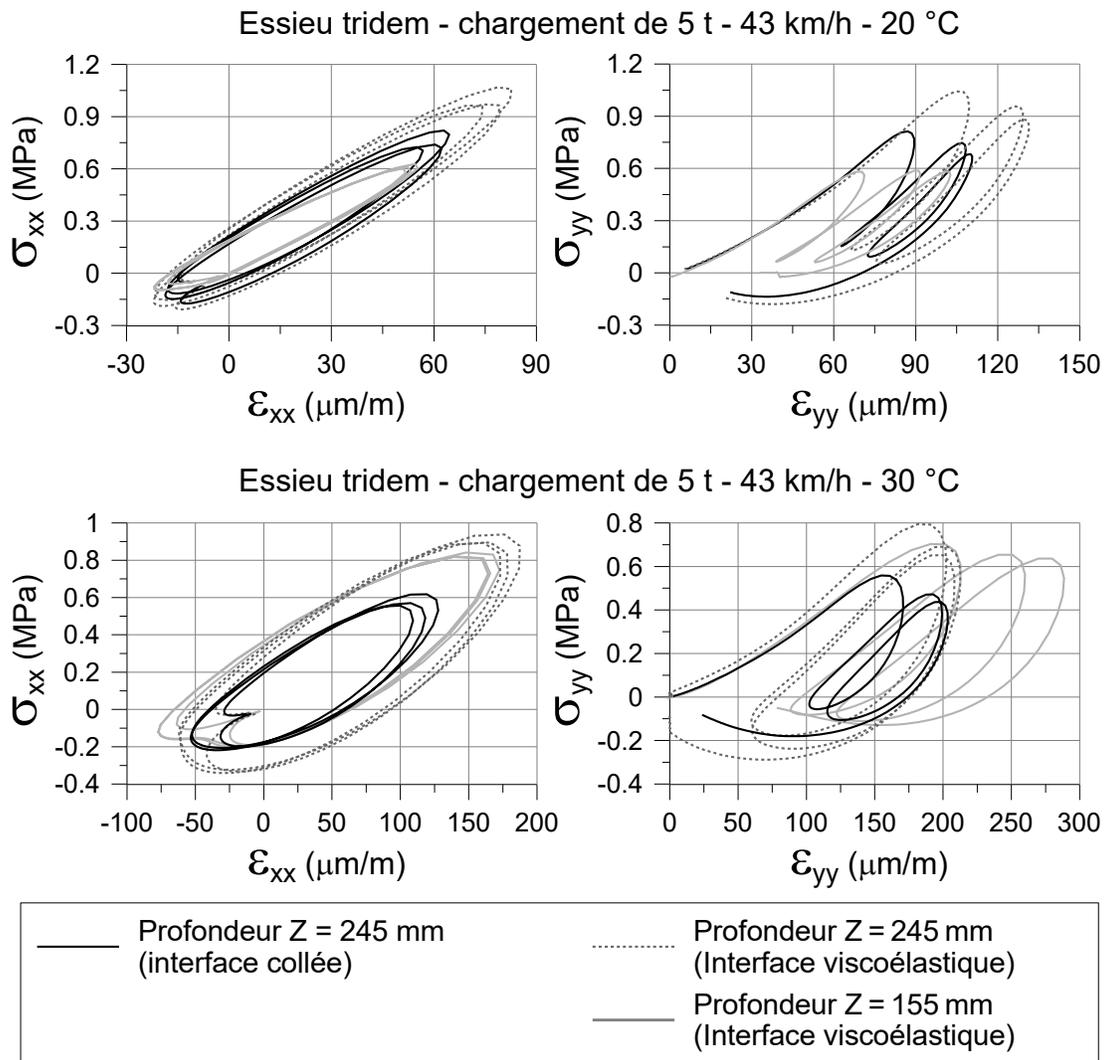


Figure 7.5 : Courbes de charge et de décharge à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) pour deux températures (20 °C et 30 °C) dans la direction longitudinale et transversale

La figure 7.6 présente la densité d'énergie dissipée dans la direction longitudinale et transversale à la base des couches de BBSG et de GB pour des températures comprises entre 10 °C et 35 °C. Le calcul a été effectué pour un essieu tridem à une vitesse de 43 km/h et de

90 km/h. Cette figure montre qu'indépendamment de la température et de la vitesse, l'énergie dissipée dans la direction longitudinale est plus élevée que celle dissipée dans la direction transversale. L'écart est d'environ 20 % pour les températures autour de 15 °C et il atteint 60 % pour les températures les plus élevées. Plus la vitesse est faible, plus la composante visqueuse du matériau prédomine sur la composante élastique. L'énergie dissipée à 43 km/h est donc plus élevée que celle à 90 km/h.

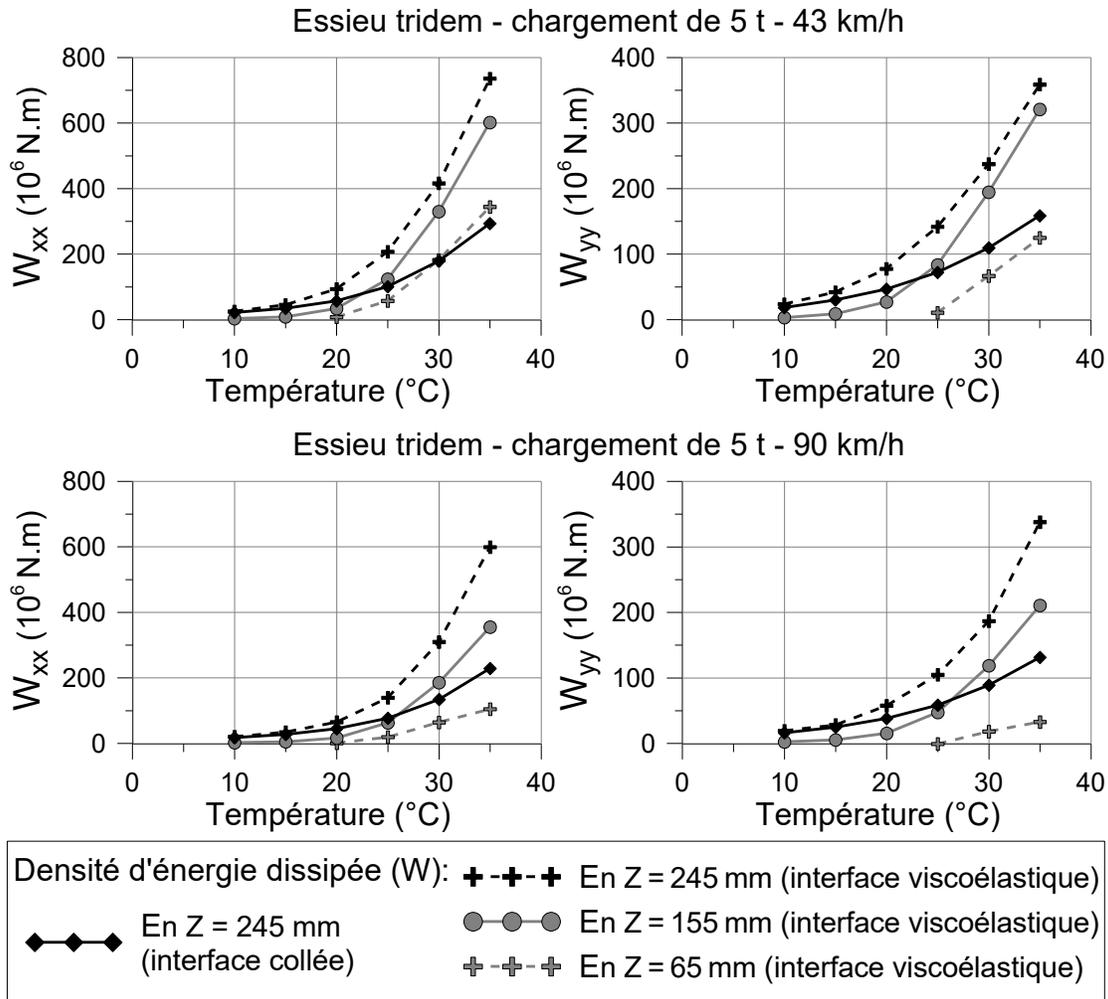


Figure 7.6 : Densité d'énergie dissipée à la base des couches de BBSG (Z = 65 mm et Z = 155 mm) et de GB (Z = 245 mm) en fonction de la température pour deux vitesses de la charge (43 km/h et 90 km/h)

Pour l'ensemble des cas analysés, les courbes montrent que la densité d'énergie dissipée à la profondeur Z = 245 mm est plus importante que l'énergie en Z = 155 mm et en Z = 65 mm. Cependant, plus la température augmente, plus les écarts entre la profondeur Z = 245 mm et

$Z = 155$ mm diminuent. Ils restent cependant très importants puisqu'à $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, ils sont respectivement de 22 % et 60 % à 43 km/h et 60 km/h. Il est à noter que la présence d'un gradient thermique négatif dans les couches bitumineuses a également pour effet d'amplifier les écarts entre les différentes profondeurs.

La densité d'énergie dissipée à la base du revêtement est beaucoup plus élevée dans le cas où les interfaces sont viscoélastiques comparativement au cas où elles sont supposées collées. Les écarts augmentent avec la température. L'énergie dissipée dans le cas viscoélastique est respectivement 1,20 fois et 2,49 fois plus importante à $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces valeurs sont des moyennes calculées pour les deux directions et pour les deux vitesses.

Pour l'ensemble des cas modélisés, l'approche énergétique montre que l'endommagement a principalement lieu à la base du revêtement et que la direction longitudinale est la plus critique.

7.2.4 Analyse du chemin des contraintes au passage d'un essieu tridem

L'état de contrainte dans les couches bitumineuses dépend du type de charge, des propriétés des matériaux, de la profondeur dans la structure de chaussée, mais également de la position relative de la charge. Le mouvement de celle-ci impose en effet une rotation des contraintes principales. Les sollicitations imposées par les charges sont tridimensionnelles. L'évaluation de l'état de contrainte permet donc de tenir compte simultanément de l'ensemble des sollicitations appliquées à un élément de la chaussée au lieu de les considérer individuellement dans chaque direction. Plusieurs études (Ameri-Gaznon et Little, 1990 ; Carpenter et Freeman, 1986 ; Wang, H. et Al-Qadi, 2010) ont ainsi analysé l'état de contrainte à plusieurs profondeurs dans les couches bitumineuses afin d'identifier les modes de rupture de celles-ci. Ces analyses appliquent la théorie de la rupture et utilisent des critères tels que celui de Tresca (contrainte de cisaillement maximale), de Mohr-Coulomb ou encore de Von-Mises. Wang, H. (2011) a évalué le potentiel de rupture à faible profondeur dans les couches bitumineuses à partir du critère de Mohr-Coulomb et du modèle de Drucker-Prager. Ce dernier est une version généralisée du critère de Von-Mises et tient compte du premier invariant du tenseur des contraintes et du second invariant du tenseur des contraintes déviatorique. Il intègre donc l'influence de la contrainte intermédiaire. Ce paragraphe présente uniquement les cheminements de contrainte et n'évalue pas le potentiel de rupture des matériaux

puisque aucun essai de caractérisation de la cohésion du matériau ni de son angle de rupture n'a été effectué dans le cadre de ce projet. Il est à noter cependant que ces derniers peuvent être déterminés à partir d'essais triaxiaux.

La figure 7.7 présente le chemin des contraintes au passage de l'essieu tridem sous le centre de la charge à trois profondeurs dans les couches bitumineuses et pour trois températures. Sur cette figure, la convention des signes est inversée comparativement au reste du document. Une contrainte négative correspond à de la traction alors qu'une contrainte positive est associée à de la compression. La contrainte normale moyenne est calculée à partir de l'équation 7-2 tandis que la contrainte de cisaillement est définie par l'équation 7-3.

$$p = \frac{1}{3} I_1 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Équation 7-2}$$

$$q = \sqrt{3} J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad \text{Équation 7-3}$$

Où : p = contrainte normale moyenne,

q = contrainte de cisaillement,

I_1 = premier invariant du tenseur des contraintes,

J_2 = second invariant du déviateur des contraintes,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = contrainte principale majeure, mineure et intermédiaire.

La figure 7.7 présente le chemin des contraintes en $Z = 245$ mm pour le cas avec les interfaces viscoélastiques, mais également avec les interfaces collées. Le chemin suivi est le même pour les deux cas et seules leurs amplitudes p et q varient. La contrainte moyenne et la contrainte de cisaillement sont significativement plus élevées pour le cas viscoélastique. Cela signifie que la viscoélasticité de l'interface a comme effet d'augmenter le potentiel de rupture par fatigue des matériaux.

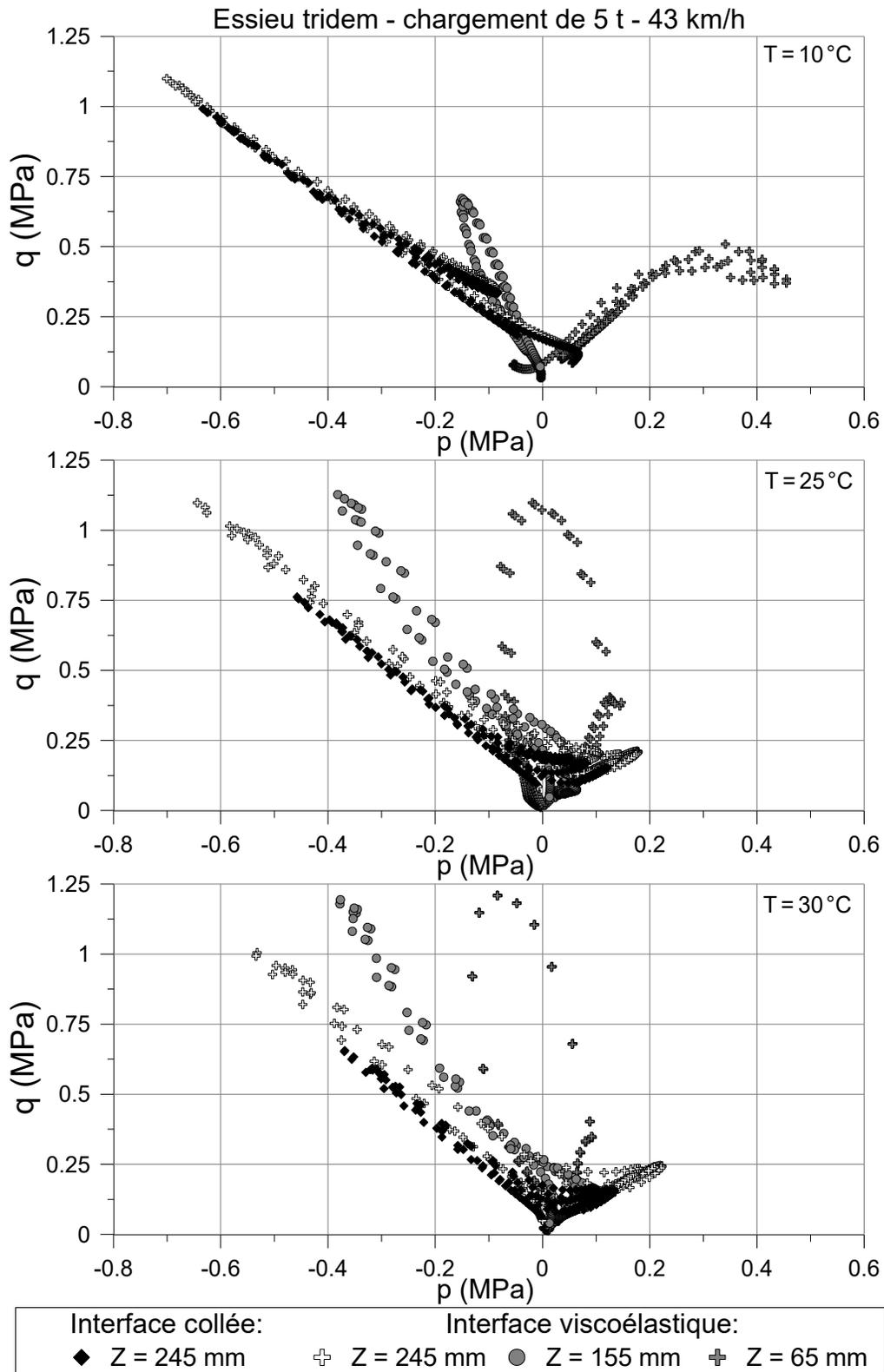


Figure 7.7 : Chemin des contraintes (représentation de Drucker-Prager) à la base des couches de BBSG ($Z = 65$ mm et $Z = 155$ mm) et de GB ($Z = 245$ mm) pour trois températures (10 °C, 25 °C et 30 °C)

En $Z = 155$ mm, les contraintes p et q sont négatives pour l'ensemble des conditions évaluées. Cela signifie que le mode de rupture préférentiel à cette profondeur est la fissuration par fatigue des matériaux. Plus les températures augmentent, plus les contraintes p et q augmentent, ce qui est cohérent avec les précédents résultats. À 25 °C, la contrainte q calculée à la profondeur $Z = 155$ mm et celle en $Z = 245$ mm possèdent sensiblement les mêmes amplitudes. La contrainte p étant cependant plus élevée en $Z = 245$ mm, le potentiel de rupture reste plus important à la base du revêtement. La température de 25 °C correspond au point d'inversion pour lequel le potentiel de rupture devient plus élevé à la profondeur $Z = 155$ mm comparativement à la profondeur $Z = 245$ mm. Il apparait en effet que pour des températures supérieures à 25 °C, les contraintes p et q continuent d'augmenter en $Z = 155$ mm tandis que celles à la base du revêtement diminuent.

En $Z = 65$ mm, la forme et l'amplitude du chemin de contraintes sont fonction des conditions de température. À 10 °C, le chemin de contraintes possède une forme de *cloche* (Di Benedetto et Corté, 2005). Le maximum de la contrainte de cisaillement n'est pas atteint sous le centre de la charge, mais juste à l'avant du passage de la charge. Plus la température augmente, plus la contrainte normale diminue jusqu'à atteindre une valeur proche de zéro aux environs de 25 °C. Le bas de la couche de roulement se retrouve dans un état de contrainte pour lequel la contrainte normale est quasi nulle puisque la contrainte verticale est égale à $0,8$ MPa et que les contraintes horizontales sont égales à $-0,35$ MPa et $-0,45$ MPa. Selon Di Benedetto et Corté (2005), il existe peu de résultats publiés pour ce mode de sollicitation, mais l'extension de cette situation au cas uniaxial laisse penser qu'elle peut être particulièrement déstabilisante pour les matériaux et qu'elle peut engendrer des vitesses de déformations permanentes relativement importantes. Il est également à noter que la contrainte de cisaillement augmente continuellement avec la hausse des températures et que son amplitude devient plus élevée que celle calculée en $Z = 155$ mm. Le bas de la couche de roulement est donc soumis à une contrainte de cisaillement important tout en ayant une faible contrainte normale moyenne.

7.2.5 Synthèse et enseignements

Les trois approches s'accordent sur le fait que l'intégration de la viscoélasticité des interfaces dans les modélisations a pour effet de diminuer la durée de vie estimée de la structure de la chaussée. L'analyse des déformations montre que l'extension à la base du revêtement

augmente de 10 % à 15 % sur la plage de température étudiée. Cette hausse se traduit en termes de durée de vie par une baisse de 25 % à 30 %. Les signaux de déformation montrent également que dans le cas d'un essieu tridem circulant à 43 km/h, la déformation critique est localisée à la base du revêtement et dans la direction transversale tant que la température est inférieure à 25 °C. Au-dessus de cette température, la déformation critique est localisée à la base de la couche n° 2 dans la direction transversale. Cette température de transition est plus élevée lorsque la vitesse de la charge augmente ou lorsqu'un gradient thermique est présent dans la structure. L'analyse des chemins de contraintes indique également que pour les températures chaudes, le potentiel de rupture par fissuration peut être plus important à la base de la couche n° 2. L'analyse montre aussi que pour des températures supérieures à 25 °C, la contrainte de cisaillement à la base de la couche de roulement est très élevée alors que la contrainte normale moyenne est très faible. Étant donné que l'intégration de la viscoélasticité de l'interface augmente l'amplitude des contraintes et des déformations à la base du revêtement, la densité d'énergie dissipée au passage de la charge est également plus importante. Pour l'ensemble des cas simulés, la densité d'énergie dissipée la plus élevée est localisée à la base du revêtement et dans la direction longitudinale. Selon cette approche, la fissuration devrait donc s'initier préférentiellement à la base du revêtement et cela indépendamment des conditions de vitesses ou de températures.

7.3 Discussion

Le projet de recherche décrit dans ce document avait pour objectif principal la caractérisation des déformations à plusieurs niveaux dans la structure de chaussée. Plus précisément, il était question de quantifier l'effet des paramètres de charges et des conditions environnementales sur le comportement mécanique des couches et interfaces bitumineuses. L'approche méthodologique a été construite dans le but d'évaluer cet effet à partir d'essais en vraie grandeur puis dans le but d'interpréter et de valider ces relevés à l'aide des outils de calculs disponibles. Ce travail a été effectué pour des structures de chaussée, des matériaux et des conditions de charges représentatives du réseau routier québécois et français. La revue de littérature a, entre autres, permis d'identifier que le type de pneu, l'intensité de charge et le type d'essieu sont les paramètres qui ont une influence marquée sur la réponse mécanique des couches bitumineuses. Il a également été constaté que les outils de mesure usuels, tels que les

capteurs de déformation résistifs ne peuvent pas ou bien difficilement être utilisés pour l'instrumentation à faible profondeur dans les couches bitumineuses. La revue de littérature a mis en avant la nécessité de tenir compte de la viscoélasticité des matériaux dans l'évaluation de leur réponse mécanique et d'avoir des outils de mesure adaptés à l'étude de cette propriété mécanique. Le comportement des interfaces entre les couches bitumineuses reste expérimentalement peu étudié alors que leur influence sur la durée de vie des chaussées est reconnue. Ces études portent principalement sur des essais de laboratoire et non sur des essais en vraie grandeur.

7.3.1 Principales avancées dans le domaine

La réalisation de ce projet de recherche a permis de mettre en lumière plusieurs avancées dans le domaine de l'instrumentation des enrobés bitumineux ainsi que dans l'analyse et la modélisation des comportements mécaniques mesurés.

Tout d'abord, dans la continuité des travaux de Doré et Duplain (2002), il a été montré que la fibre optique est une technologie applicable au domaine routier pour l'instrumentation des couches bitumineuses. Les jauges à fibre optique permettent une caractérisation très fine et précise des déformations qui s'exercent à la base et au sommet des couches. L'analyse statistique effectuée sur les mesures des jauges installées sur les carottes d'enrobé et sur les plaques multiniveaux montre que leur répétabilité est bonne avec des COV qui restent inférieurs à 3 %. Cette répétabilité dépend principalement de l'orientation et de la profondeur du capteur dans la chaussée et peu des conditions de températures et des paramètres de la charge. Le niveau de fiabilité des capteurs est resté constant sur l'ensemble de la campagne expérimentale, à l'exception d'une jauge qui a présenté une défaillance après 100 000 chargements. Sur la section la plus épaisse à l'IFSTTAR, les capteurs ont été sollicités plus de 600 000 fois par un essieu simple sans présenter aucune irrégularité au niveau de leurs signaux. La défaillance des jauges est essentiellement liée à l'endommagement du milieu environnant au capteur. Les capteurs à fibre optique sont également aptes à subir des cycles de gel et de dégel.

En ce qui concerne l'analyse comparative entre les capteurs, il a été montré, en suivant la méthodologie du projet COST 347 (Golkowski, 2003), que les déformations mesurées

peuvent être très disparates entre les technologies et également entre des capteurs d'un même type. En fonction des conditions de température, de charge et de vitesse, les amplitudes mesurées varient parfois du simple au triple. Cet aspect de l'étude met en perspective les résultats obtenus avec les capteurs à fibre optique comparativement à ceux usuellement utilisés. Il a été montré que les carottes instrumentées et les plaques de déformations mesurent des déformations plus élevées que les capteurs aluminium et plexiglas®, mais du même ordre de grandeur que celles obtenues par les capteurs TML. Ces mesures doivent cependant être analysées et interprétées en tenant compte de l'intervalle de confiance accordé au capteur. Cet intervalle est défini en fonction des techniques de mise en place, des conditions expérimentales et de la structure de chaussée. Dans le cas des jauges résistives, l'incertitude sur la position et sur l'orientation du capteur peut entraîner des hausses ou des baisses de la déformation de l'ordre de 50 %. Ces écarts sont fortement atténués lorsque l'installation des capteurs est effectuée après la mise en œuvre des couches bitumineuses comme dans le cas des jauges à fibre optique. Des écarts de 10 % à 30 % sont cependant mesurés entre les jauges installées sur une même plaque de déformation et qui s'expliquent en partie par l'hétérogénéité des matériaux bitumineux. L'approche statistique suivie dans ce projet permet cependant de réduire ces incertitudes. Finalement, en se basant uniquement sur l'analyse comparative avec les modélisations ViscoRoute© 2.0, il n'a pas été possible de déterminer un type de capteur meilleur qu'un autre puisque les conclusions dépendent des conditions expérimentales, de la structure de chaussée et également des paramètres de modélisation.

La comparaison entre les modélisations et les mesures expérimentales a montré que les capteurs à fibre optique sont des outils de mesure adaptés à l'instrumentation des couches bitumineuses à faible profondeur puisqu'ils permettent d'évaluer la réponse mécanique des matériaux sous plusieurs niveaux de charge, de vitesse et de température tout en résistant aux contraintes imposées par la charge. Les mesures expérimentales à 10-20 mm de profondeur confirment que dans la direction longitudinale, le passage de la charge génère une contraction sous la charge et deux pics d'extension à l'avant et à l'arrière de la charge. L'amplitude de ces maximums est fonction de la température, de l'intensité de la charge et la structure de chaussée. Dans la direction transversale, à 10-20 mm de profondeur, la charge impose de la contraction sous le pneu et de l'extension à l'extérieur de la charge. Pour les températures chaudes, de l'extension est également mesurée au niveau de l'espacement interjumelage. La

localisation précise de ces maximums est fonction de la température, de la structure de chaussée, mais surtout des caractéristiques de la charge comme la sculpture du pneu, le type de pneu, sa pression de gonflage et son intensité. Dans la direction verticale, à 20-30 mm de profondeur, la charge engendre par effet de Poisson une importante extension à l'extérieur de la charge. Sous celle-ci, l'amplitude et le signe de la déformation dépendent des conditions de température, des caractéristiques de la charge et des propriétés des matériaux. Bien que le pneu impose une compression verticale, les mesures montrent de l'extension sous la charge pour les températures modérées et de la compression pour les températures élevées.

Pour l'ensemble des conditions expérimentales, les mesures ont été comparées aux résultats obtenus avec les modélisations ViscoRoute© 2.0. Cette analyse a montré qu'à la base du revêtement les capteurs à fibre optique mesurent en moyenne des déformations entre 20 % et 30 % plus élevées que les valeurs modélisées. Ces écarts ont été obtenus pour les températures modérées et sont plus importants pour les températures chaudes (40 % à 50 %). En haut des couches, les modélisations surestiment d'environ 15 % les contractions longitudinales, mais les sous-estiment respectivement de 15 % et 65 % dans les directions transversale et verticale. À l'inverse, les modélisations sous-estiment de 60 % et de 30 % l'extension mesurée longitudinalement et transversalement, mais surestiment de 60 % celle dans la direction verticale. Ces écarts s'expliquent par les erreurs intrinsèques aux capteurs et identifiées précédemment, mais également par les hypothèses de modélisations choisies. La distribution des charges sur l'empreinte de pneu, la discrétisation de la charge et les propriétés mécaniques (coefficient de Poisson, coefficient de Huet-Sayegh) des matériaux ont un impact direct sur l'amplitude calculée au sommet des couches. L'analyse des déformations au niveau de l'interface bitumineuse a également montré que le comportement mécanique de l'interface a une influence directe sur l'amplitude des déformations au sommet et à la base du revêtement.

Les mesures effectuées de part et d'autre de l'interface par les carottes instrumentées et les plaques de déformations ont mis en évidence un saut des déformations qui se traduit par une extension à la base de la couche supérieure et de la contraction au sommet de la couche inférieure. Ces mesures confirment les premières observations effectuées avec des capteurs résistifs par Vulcano Greullet et coll. (2010) et Piau et Balay (2012) et permettent également de proposer une approche de modélisation de l'interface qui intègre les propriétés

viscoélastiques de celle-ci. En effet, il a été montré que les approches usuelles de modélisation pour lesquelles les couches bitumineuses sont parfaitement collées ne permettent pas d'expliquer l'amplitude ni le signe des déformations mesurées. Il a été proposé dans ce projet d'intégrer l'interface à la structure de chaussée en la modélisant par une couche de 0,5 mm dont le comportement viscoélastique est caractérisé par le modèle de Huet. L'intégration de cette couche permet de reproduire le saut de déformation identifié tout en réduisant les écarts entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales pour l'ensemble des conditions expérimentales évaluées.

Les conséquences de l'intégration de cette couche ont été évaluées pour plusieurs conditions de températures et de vitesses de la charge. Il en ressort tout d'abord que la viscoélasticité de l'interface entraîne une augmentation des contraintes transversales et longitudinales de part et d'autre de l'interface. Plus les températures augmentent, plus l'amplitude des contraintes augmente, et cela jusqu'à une température critique pour laquelle elles atteignent un maximum avant de progressivement diminuer. Pour les cas étudiés, elle se situe entre 25 °C et 30 °C et dépend des paramètres viscoélastiques de l'interface, de la structure de chaussée, de la vitesse de la charge et de la distribution des températures suivant la profondeur. Il en ressort deuxièmement que la viscoélasticité de l'interface augmente les contraintes calculées à la base du revêtement et proche de la surface ce qui entraîne une hausse des déformations. Pour les cas étudiés au manège de fatigue, cette hausse est identifiable uniquement pour des températures inférieures à 30 °C. Pour des températures supérieures, la viscoélasticité de l'interface engendre une baisse des contraintes et des déformations. Cette température limite dépend des paramètres de charge, mais également de la profondeur de calcul dans la structure.

Finalement, les mesures expérimentales et les modélisations ont montré que pour des températures élevées et sous certaines conditions de vitesse, la déformation critique dans la structure de chaussée n'est plus localisée à la base du revêtement. En effet, dans le cas de la section A, celle-ci a été identifiée à la base de la couche de surface et à la base de la couche n° 2 dans le cas de la structure détaillée au paragraphe 7.2.1. Les cas évalués sur l'ensemble du projet ont montré la nécessité d'analyser à la fois les contraintes et les déformations à plusieurs niveaux, soit à la base et au sommet du revêtement et à chaque interface afin d'identifier les modes de sollicitation critiques des couches bitumineuses.

7.3.2 Applicabilité

Les capteurs à fibre optique utilisés dans ce projet ont été très performants en ce qui concerne leur taux de survie à la pose, la qualité des signaux et leur durée de vie. La méthodologie suivie pour la pose des capteurs et les méthodes d'analyses des signaux peuvent donc servir de guide pour les prochaines études qui feront intervenir ces types de capteurs. Les campagnes expérimentales ont montré que les capteurs à fibre optique peuvent être utilisés pour une plage de températures de 10 °C à 45 °C ainsi que pour des structures de chaussée dont les épaisseurs varient entre 70 mm et 200 mm. Les capteurs peuvent aussi être utilisés pour des températures proche de zéro et permettre d'évaluer l'effet des charges en période de dégel comme dans les travaux de Badiane (2016). La plage d'utilisation des capteurs dépend principalement des types de jauges choisis (tableau 4.1) et des niveaux de charge qui seront appliqués. Il a été observé au SERUL une perte du signal dû au niveau de contraction thermique imposée par la baisse des températures en hiver. Bien que des pics de saturation aient été observés pour des niveaux élevés de charge, les capteurs à fibre optique peuvent être conçus et adaptés aux objectifs du projet. Ils ont en outre été utilisés pour l'instrumentation de structures de chaussée aéroportuaires pouvant atteindre 380 mm d'enrobé bitumineux et sollicités par des charges représentatives des trains d'atterrissage des avions (Garg et coll., 2014).

L'analyse des signaux de déformation a montré que les capteurs à fibre optique peuvent être utilisés afin d'évaluer les paramètres et les caractéristiques de charge. La méthodologie suivie au cours du projet a permis de quantifier l'effet de plusieurs paramètres tels que la sculpture du pneu, son empreinte et la répartition des contraintes en fonction des pressions de gonflage. Celle-ci pourrait donc être utilisée pour valider les modèles de calculs actuellement utilisés pour l'analyse des dommages en haut du revêtement et également ceux utilisés pour l'évaluation des dommages associés aux passages de véhicules hors normes. En effet, ces charges exceptionnelles requièrent des outils et des méthodes d'analyse adaptés aux caractéristiques et à l'arrangement complexe des charges. Bien que l'étude ait été effectuée sur seulement quatre structures de chaussées les résultats peuvent être repris avec jugement pour des structures équivalentes à celles considérées.

Les principaux résultats qui concernent l'effet du type de pneu, des paramètres de charge et de la charge totale appliquée, peuvent être exploités afin d'évaluer les conséquences qu'aurait

l'intégration de nouveau type de charge sur un réseau routier. L'étude a par exemple confirmé que l'utilisation des pneus à bande large en remplacement des pneus jumelés traditionnels entraînerait une augmentation des déformations à la base du revêtement et une augmentation des déformations verticales au niveau du sol d'infrastructure et des couches de fondation. Par contre, les pneus à bande large réduisent les déformations verticales et le cisaillement dans les premiers centimètres sous la charge. Ces variations sont fonction des structures de chaussée, des charges et des conditions environnementales et l'endommagement relatif de ces pneus doit être évalué en tenant compte des caractéristiques du réseau routier.

L'intégration de la viscoélasticité de l'interface a montré que les couches bitumineuses pouvaient être soumises à de la traction à leur base en fonction des conditions climatiques. En particulier, la base du revêtement est soumise à des niveaux de contraintes et de déformations plus élevés qu'usuellement calculés. Il est donc recommandé pour l'ingénieur-concepteur d'en tenir compte dans ses études de dimensionnement. Le modèle de comportement viscoélastique de l'interface est un modèle simple qui n'augmente pas significativement les temps de calcul. Il peut donc facilement être intégré aux outils de calculs actuels, à condition que ces derniers intègrent des lois de comportement viscoélastiques. Les choix du type d'enrobé, des types de bitume et de l'épaisseur des couches peuvent ainsi être optimisés en fonction des niveaux de sollicitations calculées avec le modèle. La prise en compte de la viscoélasticité permettrait également de proposer une profondeur optimale à laquelle placer l'interface lors de la construction de la chaussée en fonction des conditions de températures et de vitesses anticipées pour la structure.

La modélisation proposée dans ce projet intègre les propriétés viscoélastiques du bitume. La figure 7.8 présente l'amplitude des contraintes et des déformations à la base de chacune des couches de la structure de chaussée détaillée à la section 7.2.1 en fonction de la température et en fonction du type de bitume modélisé. Les calculs sont effectués pour une charge tridem circulant à 90 km/h. Sur cette figure, les déformations et les contraintes précédemment obtenues sont comparées à celles pour laquelle l'interface est constituée d'un bitume modifié. Ce bitume possède un module plus élevé pour les températures chaudes. La figure montre que plus la température des couches augmente, plus le type de bitume a un impact direct sur les contraintes calculées à la base de chacune des couches. Pour des températures inférieures à

15 °C, les écarts d'amplitude sont inférieurs à 5 %, mais ces derniers augmentent avec la hausse des températures pour atteindre en moyenne 30 % à 30 °C. Les conclusions sont les mêmes au niveau des déformations. L'amplitude des contraintes et des déformations se rapproche des valeurs obtenues avec les interfaces collées. Il est à noter cependant que pour les températures évaluées les écarts restent de 10 % à 20 %. L'intégration d'une couche d'interface dans les modélisations permet donc d'intégrer les propriétés du liant d'accrochage dans la réponse mécanique de la chaussée.

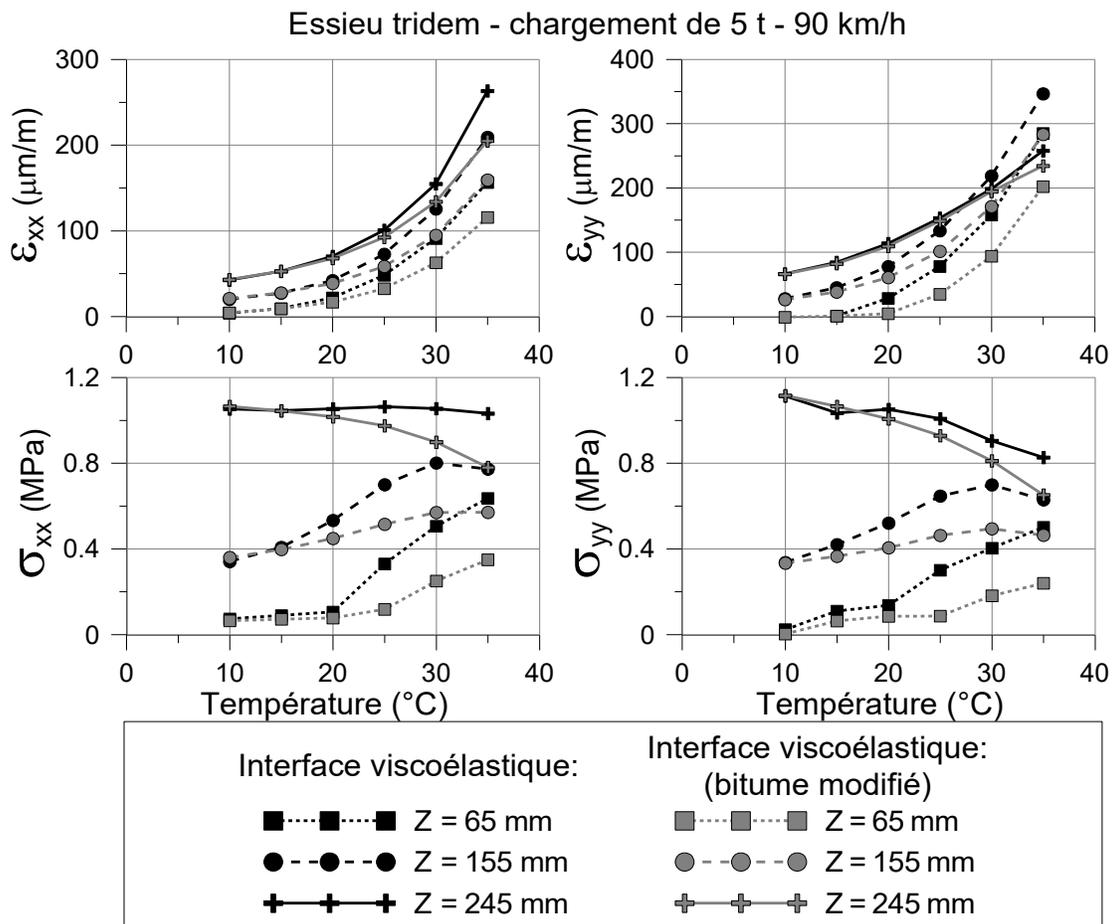


Figure 7.8 : Effet des propriétés thermoviscoélastiques de l'interface sur les déformations et les contraintes longitudinales et transversales calculées à la base des couches de BBSG (Z = 65 mm et Z = 155 mm) et de GB (Z = 245 mm)

Les travaux de recherche ont mis en évidence l'influence des paramètres de la charge et de la viscoélasticité de l'interface sur les déformations et les contraintes à faible profondeur. Ils n'abordent cependant pas l'effet de ces paramètres sur les modes d'endommagement qui s'initient à ces profondeurs tels que la fissuration par le haut ou l'ornièrage. L'analyse de

l'endommagement à faible profondeur requiert une fine caractérisation des contraintes verticales et tangentielles générées au contact entre le pneu et la surface (Wang, H. et Al-Qadi, 2010). Cette analyse demande également un suivi des propriétés physiques et mécaniques des matériaux tel que son degré d'oxydation (Roque et coll., 2010). Ces mesures n'ayant pas été effectuées lors des campagnes expérimentales, elles n'ont pas été intégrées aux modélisations ViscoRoute© 2.0. Les analyses à faible profondeur se sont donc limitées à l'étude des contraintes pour des cas simples de chargement. Il a cependant été montré, dans le cas de la section A, que la prise en compte de la viscoélasticité de l'interface avait pour effet d'augmenter de plus de 40 % la traction localisée à l'arrière de la charge. De même à faibles profondeurs, la compression augmentait d'environ 15 % pour les températures chaudes. Il est donc recommandé de tenir compte des propriétés de l'interface pour l'identification des modes de rupture localisés à faible profondeur dans les couches bitumineuses.

7.3.3 Critique objective et limite des travaux

Le choix des capteurs à fibre optique et d'un procédé d'installation après la mise en place du revêtement bitumineux a été fait afin d'instrumenter le haut des couches bitumineuses et d'éviter les approximations associées aux positionnements des capteurs. Ces procédés requièrent cependant d'effectuer des traits de scie ou des carottages dans la couche bitumineuse. Ces deux actions ont pour effet d'imposer localement des contraintes très élevées ainsi qu'un échauffement du matériau. Cela peut avoir comme conséquences de modifier localement les propriétés mécaniques du revêtement bitumineux, voire de l'endommager prématurément. Les plans de coupe (figure 4.32) ont également pour effet de sectionner les granulats et d'offrir des surfaces de contact importantes. Les jauges peuvent alors se retrouver à proximité de ces surfaces. Alors que la calibration des carottes permet de corriger en partie cet effet, les plaques sont mises en œuvre sans aucune calibration et sans possibilité d'étudier l'état de la surface des traits de scie. Localement, la présence des granulats peut aussi influencer la réponse mesurée par la jauge. L'avantage principal des plaques est de posséder au moins cinq capteurs et ainsi de pouvoir comparer et d'interpoler les résultats. Une dispersion dans les formes de signaux peut cependant apparaître, en particulier pour les températures chaudes. Il n'a pas été possible de quantifier précisément l'influence de ces procédés de mise en œuvre sur l'amplitude des déformations.

Contrairement aux capteurs résistifs qui sont entourés d'enrobé bitumineux, les capteurs à fibre optique sont fixés à la couche bitumineuse à l'aide de colle époxy. Lors de la mise en œuvre, la colle époxy peut s'infiltrer localement dans la couche bitumineuse en venant combler les vides présents au niveau du plan de coupe. Elle peut également s'écouler dans les premiers millimètres des matériaux granulaires situés sous le revêtement. À ces deux éléments de renforcement, s'ajoute également la présence de la plaque à travers la couche bitumineuse. Il est alors possible de s'interroger sur le rôle que tiennent respectivement la plaque et la colle dans la transmission des contraintes au passage de la charge. Afin de répondre à cette question, Garg et coll. (2014) ont effectué plusieurs séries de tests à l'aide d'un déflectomètre à masse tombante. La masse du déflectomètre a été lâchée à environ 30 cm (12 pouces) de part et d'autre de la plaque et également directement sur une plaque. Les bassins de déflexion ont par la suite été comparés afin d'évaluer le niveau de transmission des contraintes. Les conclusions de cette étude sont que le trait de scie et la plaque n'apportent aucun renforcement supplémentaire ni aucune faiblesse à la structure et que l'ensemble se comporte donc comme un seul bloc uniforme pour les températures testées.

L'objectif des études comparatives entre différents paramètres de charge est d'être capable de reproduire en tout temps les mêmes conditions expérimentales à l'exception du paramètre que l'on désire évaluer. Cet objectif n'a jamais été atteint compte tenu des protocoles suivis lors des essais en vraie grandeur. Chaque site expérimental possède ses avantages et inconvénients. La mise en place d'outil de contrôle de la température au SERUL permet de contrôler les propriétés des matériaux, mais rien ne permet de garantir la répétabilité des passages des véhicules en termes de vitesse et de distance de passage. À l'inverse, le manège de fatigue permet un bon contrôle des conditions de charge, mais les températures dépendent des conditions météorologiques. À titre d'exemple, des écarts allant jusqu'à 8 °C ont été relevés au niveau de la température de surface lors des mesures au manège de fatigue. Bien que ces effets soient quantifiables, les amplitudes mesurées n'ont pas été corrigées pour en tenir compte et cela peut influencer les écarts entre les capteurs mais également avec les modèles.

Comme il a été précédemment mentionné, les écarts de mesure entre les capteurs d'une même plaque peuvent atteindre 30 %, et ces écarts augmentent significativement lorsque la comparaison est effectuée avec les autres types de capteurs. Pour certaines conditions

expérimentales, les amplitudes mesurées à la base du revêtement pouvaient varier du simple au triple en fonction des types de capteurs. Il apparaît alors légitime de s'interroger sur la validité de ces mesures et sur la fiabilité de certains capteurs. Ces écarts peuvent sembler très élevés, mais ils sont cependant du même ordre de grandeur que ceux évalués lors du projet FORCE (OCDE, 1991) ou plus récemment dans les travaux de Chenevière et coll. (2005). La méthodologie suivie dans ce projet et inspirée des travaux antérieurs avait pour but de réduire ces écarts de par l'amélioration des procédures de mise en place et d'analyse des capteurs. Étant donné la non-homogénéité des matériaux de chaussée et le nombre élevé de conditions expérimentales, il apparaît difficile d'obtenir des écarts plus faibles que ceux obtenus au cours du projet.

La principale limitation du projet se situe au niveau de l'analyse théorique des déformations au sommet du revêtement. En effet, aucune donnée autre que les pressions de contact perpendiculaires à la surface n'ont été mesurées. Les modélisations n'intègrent donc pas les contraintes tangentielles imposées par la charge et n'intègrent également pas la non-uniformité de la contrainte verticale. L'effort giratoire imposé par la rotation du manège n'a pas été pris en compte dans les analyses non plus. Enfin, le coefficient de Poisson, qui a une influence directe sur l'amplitude des déformations, a été maintenu constant pour toutes les modélisations bien que celui-ci soit fonction de la température et de la fréquence de sollicitation. La réponse mécanique au sommet du revêtement est fonction de l'interaction de l'ensemble de ces paramètres. Les analyses à faible profondeur ont donc été effectuées en considérant un nombre important d'hypothèses simplificatrices et ces dernières peuvent avoir influencé les valeurs calculées. L'intégration de ces paramètres constitue une des avenues de recherche détaillée à la section 7.3.4.

Le modèle proposé pour l'interface viscoélastique ne repose que sur l'analyse comportementale d'une seule structure de chaussée. Il convient donc de rester prudent en ce qui concerne les signaux mesurés à cette profondeur, mais également en ce qui concerne l'optimisation du modèle. Les déformations de part et d'autre de l'interface restent pour le moment très peu étudiées. Les analyses comparatives des signaux obtenus avec d'autres techniques de mesure restent limitées. D'importants écarts ont été relevés entre les capteurs d'une même plaque et également avec les résultats de la modélisation. Le choix de l'épaisseur

de l'interface est uniquement basé sur l'analyse des amplitudes et se limite à un nombre restreint de conditions expérimentales. Compte tenu de l'influence de cette épaisseur sur les déformations et les contraintes à l'interface ainsi qu'à la base et au sommet du revêtement, des études complémentaires sont recommandées afin de valider le modèle proposé dans ces travaux.

Enfin, le projet de recherche effectué a permis d'étudier le comportement des couches bitumineuses d'un point de vue général pour une gamme de conditions expérimentales étendue. Cette étude a permis d'évaluer expérimentalement l'effet de la température, de la vitesse de charge, du type de pneu et de la configuration des essieux sur les déformations qui s'exercent à plusieurs profondeurs dans les structures de chaussées. Le projet apporte plusieurs points de vue intéressants en ce qui concerne la modélisation du comportement des interfaces bitumineuses et l'analyse des déformations à la base et au sommet du revêtement. Il est intéressant de noter que l'interprétation de l'ensemble de ces conditions expérimentales a été effectuée à travers un seul modèle pour lequel uniquement les paramètres de charge et de températures ont varié. Tandis que la plupart des études se concentrent habituellement sur un mode de rupture précis et focalisent leur analyse sur ce point précis, l'étude présentée dans ce projet considère la structure dans son ensemble lors des modélisations.

7.3.4 Recherches futures

Suite à cette discussion, plusieurs perspectives apparaissent intéressantes à envisager pour la poursuite des travaux de cette thèse. Ces perspectives concernent à la fois le dispositif expérimental, mais également les approches de modélisation et l'analyse de l'endommagement.

Il pourrait tout d'abord être pertinent de définir un protocole d'évaluation et de calibration des capteurs une fois mis en place dans la structure. Cette procédure pourrait s'inspirer des essais au deflectomètre discutés précédemment et pour lesquels un chargement simple et connu est appliqué sur les capteurs. Cette procédure non destructive pourrait être effectuée sous plusieurs conditions de température afin de définir une courbe de calibration pour chaque capteur. Cette procédure pourrait également servir pour faire un suivi de la fonctionnalité des capteurs en fonction du nombre de sollicitations rencontré.

Il serait également intéressant d'intégrer à la fois les pressions de contact tangentielles imposées par la charge et un coefficient de Poisson complexe afin de caractériser les déformations à faible profondeur dans le revêtement. Le modèle ainsi proposé pourrait être optimisé à l'aide des mesures expérimentales et permettrait d'identifier les points les plus critiques au passage de la charge.

Le modèle de comportement viscoélastique de l'interface est basé sur l'instrumentation d'une seule structure de chaussée. Il serait intéressant de poursuivre les travaux de cette thèse en évaluant un plus grand nombre de structures, en instrumentant plusieurs types d'interface et en particulier en faisant varier les liants d'accrochage utilisés. Ces études permettraient d'évaluer combien de temps ou jusqu'à combien de sollicitations de la charge le modèle proposé reste valide.

Chapitre 8

Conclusion

L'objectif principal de ce projet est de caractériser les déformations et les contraintes à plusieurs niveaux dans la structure de chaussée dans le but d'identifier les modes de sollicitations, les conditions de charges et les conditions environnementales susceptibles d'endommager les couches bitumineuses. Pour ce faire, trois campagnes d'essais en vraie grandeur ont été effectuées dont une en collaboration avec l'IFSTTAR en France. Quatre structures de chaussées ont été instrumentées à l'aide de capteurs à fibre optique installés à trois niveaux dans le revêtement bitumineux soit, à la base de celui-ci, proche de sa surface et à l'interface entre les couches qui le constituent. Les données obtenues ont été comparées aux résultats des modélisations effectuées avec le logiciel ViscoRoute© 2.0. Les résultats de l'étude ont montré comment la température, les paramètres de charge et le comportement de l'interface bitumeuse intervenaient dans la distribution des déformations et des contraintes à chacun des niveaux étudiés. Dans le cadre de cette étude, il a été montré que :

- Les capteurs à fibre optique possèdent une bonne répétabilité bien que celle-ci soit fonction des conditions environnementales, de l'orientation des capteurs et de la position de la charge.
- Les déformations mesurées avec les capteurs à fibre optique se situent dans la plage de valeurs obtenues avec les capteurs résistifs usuellement utilisés dans le domaine des chaussées. Les plus faibles écarts avec les modélisations ont été obtenus avec le capteur TML et avec les capteurs à fibre optique.
- Le tracé des bassins de déformation permet d'évaluer l'influence des paramètres de la charge, d'identifier les zones critiques de sollicitations et permet également de réduire les erreurs pouvant provenir des instruments de mesure.
- La viscoélasticité des enrobés bitumineux doit être prise en compte pour l'analyse des déformations à la base et proche de la surface des couches bitumineuses.
- À la base du revêtement, l'augmentation de l'intensité de la charge, de la température et

la diminution des vitesses ont pour effet d'augmenter l'extension sous la charge.

- À la base du revêtement, dans la direction longitudinale et transversale, le pneu à bande large engendre une extension supérieure à celle mesurée pour les pneus jumelés. Le ratio des déformations entre les deux types de pneus est fonction de la structure de chaussée et des conditions de températures et de l'intensité de la charge.
- À faible profondeur sous la surface, le passage de la charge génère, dans la direction longitudinale et transversale, de la contraction sous le pneu et de l'extension à l'extérieur de celui-ci. Dans la direction verticale, la charge impose une forte extension à l'extérieur du pneu tandis que sous celui-ci, le signe et l'amplitude des déformations dépendent des caractéristiques du pneu, de la température et des propriétés viscoélastiques de l'enrobé bitumineux.
- À faible profondeur sous la surface, l'amplitude des déformations augmente avec l'augmentation de l'intensité de la charge, avec celle de la température et également avec la diminution des vitesses.
- À faible profondeur, le pneu à bande large génère, dans la direction longitudinale et transversale, des déformations plus élevées que le pneu jumelé. À l'inverse dans la direction verticale celles-ci sont de plus faibles amplitudes. La déformation et la contrainte en cisaillement calculées sous le pneu à bande large sont également plus faibles que celles imposées par le pneu jumelé.
- Au passage de la charge, de l'extension et de la contraction se développent respectivement au bas de la couche de surface et au sommet de la couche de base. L'amplitude de ces déformations est principalement fonction de la température des couches bitumineuses et des caractéristiques de la charge.
- Le saut de déformation mesuré à l'interface peut être modélisé en considérant l'interface comme une couche viscoélastique de faible épaisseur.
- La prise en compte de la viscoélasticité de l'interface entraîne une augmentation des contraintes longitudinales et transversales de part et d'autre de l'interface. L'amplitude de ces contraintes augmente avec l'augmentation des températures jusqu'à une température critique à partir de laquelle elle commence à diminuer. Cette température critique est fonction de la distribution des températures dans la structure, des propriétés viscoélastiques des enrobés bitumineux et des paramètres de charge.

- En fonction de la température des couches bitumineuses, la prise en compte de la viscoélasticité de l'interface entraîne soit une hausse soit une baisse des contraintes calculées à la base et à faible profondeur dans le revêtement. Ces variations se répercutent sur l'amplitude des déformations calculées à ces profondeurs dans le revêtement.

Bibliographie

AASHTO (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures, 1993*. The American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, D.C 20001.

Airey, G., Rahimzadeh, B., Collop, A. (2004). *Linear Rheological Behavior of Bituminous Paving Materials*. Journal of Materials in Civil Engineering Volume 16, pp. 212-220. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(212)

Al-Qadi, I.L., Elseifi, M. (2007). *New Generation of Wide-Base Tires: Impact on Trucking Operations, Environment, and Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2008, pp. 100-109. doi:10.3141/2008-13

Al-Qadi, I.L., Via, C.E., Elseifi, M., Yoo, P.J. (2004). *Pavement Damage Due to Different Tires and Vehicle Configurations*. Final Report Submitted to Michelin Americas Research and Development Corporation. The Roadway Infrastructure Group. Virginia Tech Transportation Institute, p. 115.

Al-Qadi, I.L., Wang, H. (2009). *Evaluation of Pavement Damage Due to New Tire Designs*, Illinois Center for Transportation (ICT), FHWA-ICT-09-048.

Al-Qadi, I.L., Wang, H. (2012). *Impact of Wide-Base Tires on Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2304, pp. 169-176. doi:10.3141/2304-19

Ameri-Gaznon, M., Little, D.N. (1990). *Octahedral shear stress analysis of an ACP overlay on a rigid base*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists 59, pp. 443-476.

ARA, I., ERES Division (2004). *Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavements*. NCHRP 1-37A, Transportation Research Board, Washington, DC.

Artamendi, I., Allen, B., Ward, C., Phillips, P. (2012). *Differential Thermal Contraction of Asphalt Components*; Dordrecht; pp. 953-962. 978-94-007-4566-7.

Asphalt Institute (1982). *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1), 9th edition*. Research Report 82-2.

ASTM (2010). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) Standard D2487*. American Society for Testing and Materials ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. DOI: 10.1520/D2487-10

Autret, P., Baucheron de Boissoudy, A., Gramsammer, J.-C. (1988). *Le manège de fatigue du Laboratoire central des Ponts et Chaussées- Premiers résultats*. Bulletin de liaison du Laboratoire des ponts et chaussées Vol. 155 Mai-Juin, pp. 33-45.

Baaj, H. (2002). *Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydorcarbones* Thèse. Villeurbanne : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Badiane, M. (2016). *Effet des charges sur les chaussées en période de restriction des charges - volet terrain*, Département de génie civil. Mémoire de maîtrise, Université Laval.

Baek, C., Thirunavukkarasu, S., Underwood, B.S., Guddati, M., Kim, Y.R. (2012). *Top-Down Cracking Prediction Tool for Hot Mix Asphalt Pavements*. In: Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I., A, L. (Eds.), 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Springer Netherlands, pp. 465-474.

Bauer, M., Dalle, F., Travert, P. (1996). *Truck Tyres and Roads*. Heavy Vehicle Systems, Special Series, International Journal of Vehicle Design, Vol. 3, Nos. 1-4.

Bilodeau, J.-P. (2009). *Optimisation de la granulométrie des matériaux granulaires de fondation des chaussées*. Thèse de Doctorat, Université Laval, Département de génie civil, p. 442.

BNQ (2002). *Granulats-Travaux de génie civil*. Bureau de normalisation du Québec (Québec, QC) BNQ 2560-114.

Bodin, D., Breysse, D., Merbouh, M., Moriceau, L., Balay, J.M. (2009). *Experimental study of the waveform shape effect on asphalt mixes fatigue*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Two Volume Set. CRC Press.

Bonnaure, F., Gravois, A., Udron, J. (1980). *A New Method of Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist Volume 49.

Breysse, D., De La Roche, C., Domec, V., Chauvin, J.J. (2003). *Influence of rest time on recovery and damage during fatigue tests on bituminous composites*. Materials and Structures 36, pp. 648-651. 10.1007/BF02479496

C-SHRP (2002). *Pavement structural design practices across canada*. Canadian strategic highway research program, Technical brief #23.

Carpenter, S.H., Freeman, T.J. (1986). *Characterizing premature deformation in asphalt concrete placed over Portland cement concrete pavements*. Transportation Research Record 1070, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

Carter, A. (2002). *Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRSTS*, Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure.

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, pp. 227-250. 10.1080/14680629.2010.9690274

Chabot, A., Piau, J.M. (2001). *Calcul semi-analytique d'un massif viscoélastique soumis à une charge roulante rectangulaire*. 1^{er} conférence internationale Albert Caquot, Paris.

Chailleux, E., De La Roche, C., Piau, J.M. (2011). *Modeling of complex modulus of bituminous mixtures measured in tension/compression to estimate secant modulus in indirect tensile test*. Materials and Structures 44, pp. 641-657. DOI: 10.1617/s11527-010-9655-z

Chailleux, E., Ramond, G., Such, C., De La Roche, C. (2006). *A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials*. Road Materials and Pavement Design 7, pp. 75-92. DOI: 10.1080/14680629.2006.9690059

Chaire i3C (2015). *Site de la chaire de recherche industrielle CRSNG sur l'interaction charges lourdes/climat/chaussées de l'Université Laval [en ligne]*. <http://i3c.gci.ulaval.ca/> (page consultée le 01 mai 2015).

Charif, K. (1991). *Contribution à l'étude du comportement mécanique du béton bitumineux en petites et grandes déformations*, Thèse de doctorat Mécanique des sols. Ecole Centrale de Paris, p. 1 vol. (277 p.).

Chatti, K., El Mohtar, C. (2004). *Effect of Different Axle Configurations on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixture*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1891, pp. 121-130. 10.3141/1891-15

Chatti, K., Kim, T., Lee, D. (2000). *Truck damage factors using dissipated energy versus peak strains*, 6th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

Chatti, K., Manik, A., Salama, H., El Mohtar, C., Lee, H.S. (2009). *Effect of Michigan multi-axle trucks on pavement distress, Volume II – Flexible Pavements*, Project RC-1504. Michigan State University, Department of Civil and Environmental Engineering, East Lansing, Michigan.

Chenevière, P., Wistuba, M., Dumont, A.-G. (2005). *Full-Scale Testing of Pavement Response by Use of Different Types of Strain Gauges*; Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields; 27-29 June 2005, Trondheim, Norway.

Chupin, O., Chabot, A. (2009). *Influence of sliding interfaces on the response of a viscoelastic pavement*; MAIREPAV6; France; p. 10p.

Chupin, O., Chabot, A., Piau, J.M., Duhamel, D. (2010). *Influence of sliding interfaces on the response of a layered viscoelastic medium under a moving load*. International Journal of Solids and Structures 47, pp. 3435-3446. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.08.020>

Commission européenne (1999). *COST 333 : development of new bituminous pavement design method : final report of the action*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. ISBN: 928286796X.

De Beer, M., Fisher, C., Jooste, F.J. (1997). *Determination of pneumatic tyre/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers*. Eight (8th) International Conference on Asphalt Pavements (8th ICAP '97), August 10-14 1997, Seattle, Washington, USA. Vol. 1, pp 179-227. ISBN 8790145356.

De Beer, M., Fisher, C., Jooste, F.J. (2002). *Evaluation of non-uniform tyre contact stresses on thin asphalt pavements*. Ninth (9th) International Conference on Asphalt Pavements (ICAP 2002), August 17-22, Copenhagen, Denmark.

Deacon, J., Harvey, J., Guada, I., Popescu, L., Monismith, C. (2002). *Analytically Based Approach to Rutting Prediction*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1806, pp. 9-18. 10.3141/1806-02

Di Benedetto, H., Corté, J.-F. (2005). *Matériaux routiers bitumeux Volume 2*. Hermes Sciences Publications, Paris. ISBN: 2746209608.

Di Benedetto, H., Delaporte, B., Sauzéat, C. (2007). *Three-Dimensional Linear Behavior of Bituminous Materials: Experiments and Modeling*. International Journal of Geomechanics 7, pp. 149-157. doi:10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(149)

Di Benedetto, H., Nguyen, H.M., Pouget, S., Sauzéat, C. (2008). *time-temperature superposition principle for bituminous mixtures: three dimensional approach and extension in the non-linear domain*; First Intl. Conference Transport Infrastructure; Beijing, China.

Di Benedetto, H., Nguyen, Q.T., Sauzéat, C. (2011). *Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures*. Road Materials and Pavement Design 12, pp. 129-158. 10.1080/14680629.2011.9690356

Doré, G. (2008). *Conception et réhabilitation des chaussées. Notes de cours GCI-10202*. Département de Génie Civil, Université Laval, Québec.

Doré, G., Duplain, G. (2002). *Monitoring pavement response during spring thaw using fiber-optic sensors*; Proceedings of the 6th international conference on the bearing capacity of roads and airfields; Lisbon, Portugal; Correia, A.G., BRANCO, F.; pp. 15-24.

Doré, G., Duplain, G., Pierre, P. (2007). *Monitoring mechanical response of in service pavements using retrofitted fiber optic sensors*; Advanced characterisation of pavement and soil engineering materials: proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials; Athens, Greece; Loizos, A., Scarpas, T., Al-Qadi, I.L.; pp. 883-891. ISBN: 9780415448826.

Doré, G., Fachon, J., Grellet, D. (2009). *Étude de l'incidence des systèmes de contrôle de gonflement des pneus (SCGP) sur l'interaction véhicule-route*. Transport Canada, Rapport de recherche TP 14950F, p. 115.

Doré, G., Juneau, S., Pierre, P. (2010); *Retrofitable pavement strain gauge*; US 2010/0175485 A1 United States; p. 6; Université Laval (Cité Universitaire) Québec (Québec), CANADA

Doucet, F., Auger, B. (2010). *Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des transports du Québec*. Service des matériaux d'infrastructures, Direction des laboratoires des chaussées, Ministère des transports du Québec, Québec.

Duhamel, D., Chabot, A., Tamagny, P., Harfouche, L. (2005). *ViscoRoute: visco-elastic modeling for asphalt pavements*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées, pp. 258-259.

Duhamel, D., Nguyen, V., Chabot, A., Tamagny, P. (2003). *Modélisation de chaussées viscoélastiques*. 16^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nice, pp. 1-5.

Freund, D., Brady, S. (2009). *Commercial vehicle safety technologies: applications for tire pressure monitoring and management*. Proceedings of the international technical conference on the enhanced safety of vehicles Paper 09-0134, National Highway Traffic Safety Administration.

Garcia, G., Thompson, M. (2008). *Strain and Pulse Duration Considerations for Extended-Life Hot-Mix Asphalt Pavement Design*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2087, pp. 3-11. 10.3141/2087-01

Garg, N., Bilodeau, J.-P., Doré, G. (2014). *Experimental study of Asphalt Concrete Strain Distribution in Flexible Pavements at the National Airport Pavement Test Facility*; FAA worldwide airport technology transfer conference; Galloway, New Jersey, USA; p. 14.

Genivar Consultant Group (2005). *Étude économique - Utilisation de pneus simples à bande large pour les véhicules lourds circulant au Québec*. Genivar Groupe conseil Montréal, Québec, Canada, 83 p.

Ghuzlan, K., Carpenter, S. (2000). *Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1723, pp. 141-149. 10.3141/1723-18

Gokhale, S., Byron, T., Choubane, B., Iyer, S. (2008). *Evaluation of Pavement Strain Gauge Repeatability Under Accelerated Pavement Testing*, Research Report Florida Department of Transportation.

Golkowski, G. (2003). *Comparison of ALT-signals of different strain gauges*, COST 347 Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing. Short Term Scientific Mission, Final Report, Mission 1. BAST, Germany.

Gouvernement du Québec - Ministère des Transports du Québec (2013). *Guide des normes de charges et de dimensions des véhicules routiers*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, p. 44.

Greene, J., Toros, U., Kim, S., Byron, T., Choubane, B. (2010). *Impact of Wide-Base Single Tires on Pavement Damage*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2155, pp. 82-90. 10.3141/2155-09

Grellet, D., Doré, G., Bilodeau, J.-P. (2010). *Effect of tire type on strains occurring in asphalt concrete layers*; Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements; Nagoya, Japan.

Grellet, D., Doré, G., Bilodeau, J.-P. (2012a). *Comparative study on the impact of wide base tires and dual tires on the strains occurring within flexible pavements asphalt concrete surface course*. Canadian Journal of Civil Engineering 39, pp. 526-535. DOI: 10.1139/l2012-031

Grellet, D., Doré, G., Bilodeau, J.-P., Gauliard, T. (2013). *Wide-Base Single-Tire and Dual-Tire Assemblies: Comparison Based on Experimental Pavement Response and Predicted Damage*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2369, pp. 47-56. 10.3141/2369-06

Grellet, D., Doré, G., Chupin, O., Piau, J.-M. (2016). *Experimental evidence of the viscoelastic behavior of interfaces in bituminous pavements - An explanation to top-down cracking?*, 8th RILEM International Conference on Cracking in Pavements.

Grellet, D., Doré, G., Chupin, O., Piau, J.-M. (2018). *Highlighting of the viscoelastic behaviour of interfaces in asphalt pavements – a possible origin to top-down cracking*. Road Materials and Pavement Design 19, pp. 581-590. 10.1080/14680629.2018.1418721

Grellet, D., Doré, G., Kerzreho, J.-P., Piau, J.-M., Chabot, A., Hornych, P. (2012b). *Experimental and Theoretical Investigation of Three Dimensional Strain Occurring Near the Surface in Asphalt Concrete Layers*. In: Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I., A, L. (Eds.), 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Springer Netherlands, pp. 1017-1027.

Hajek, J.J., Agarwal, A.C. (1989). *Influence of axle group spacing on pavement damage*. Research and Development Branch, Ontario Ministry of Transportation, Downsview, Ontario, p. 25 pages.

Heinrich, M., Janauschek, M. (2003). *Laboratory testing on strain gauges*, COST 347 Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing. Short Term Scientific Mission, Mission Report, Mission 4 and 5. Institute for Road Construction and Maintenance, Vienna University of Technology, Austria.

Himeno, K., Kogo, K. (2008). *The effects of different waveforms and rest period in cyclic loading on the fatigue behavior of the asphalt mixtures*. Pavement Cracking. CRC Press.

Homsy, F. (2011). *Endommagement des chaussées bitumineuses sous chargements multi-essieux*. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Nantes.

Hopman, P. (1996). *VEROAD: A Viscoelastic Multilayer Computer Program*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1539, pp. 72-80. doi:10.3141/1539-10

Hudson, W.R., Finn, F.N., McCullough, B.F., Nair, K., Vallerga, B.A. (1968). *Systems Approach to Pavement Systems Formulation, Performance Definition and Materials Characterization*. Final Report, NCHRP Project 1-10, Materials Research and Development, Inc.,.

Huet, C. (1963). *Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*, Thèse de Docteur Ingénieur. Faculté des Sciences de l'université de Paris, p. 69.

Hugo, F., Epps-Martin, A. (2004). *NCHRP Synthesis 325: Significant findings from full-scale accelerated pavement testing - A Synthesis of Highway Practice*. Transportation Research Board. 0309069742.

Hugo, F., McCullough, B.F., Van der Walt, B. (1991). *FullScale Accelerated Pavement Testing for the Texas State Department of Highways and Public Transportation*. Transportation Research Record 1293, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 52–60.

Huhtala, M., Pihlajamäki, J. (1991). *Strain and stress measurements in pavements*; Proceedings of the conference: Road and Airport Pavement Response Monitoring Systems; West Lebanon, New Hampshire, U.S.A., September 12-16; pp. pp 229-243.

Kerzreho, J.-P. (2013). *Implantation et résumé de l'utilisation du manège*. Revue générale des routes et de l'aménagement N°914-915 Septembre-Octobre, pp. 38-43.

Kerzreho, J.-P., Hornych, P., Chabot, A., TRICHET, L., GOUY, T., COIRIER, G., DELOFFRE, L. (2012). *Evaluation of the Aggressiveness of Different Multi-axle Loads using APT Tests*. 4th International Conference on Accelerated Pavement Testing, pp. pp.505-517, fig., graphiques, schémas, tabl., ill., bibliogr. 10.1201/b13000-62

Kim, Y.R., Baek, C., Underwood, B.S., Subramanian, V., Guddati, M., Lee, K. (2008). *Application of viscoelastic continuum damage model based finite element analysis to predict the fatigue performance of asphalt pavements*. KSCE Journal of Civil Engineering 12, pp. 109-120. 10.1007/s12205-008-0109-x

Krarup, J. (1991). *Instrumentation for a Full-scale Pavement Test in the Danish Road Testing Machine*; Proceedings of the conference: Road and Airport Pavement Response Monitoring Systems; West Lebanon, New Hampshire, U.S.A., September 12-16; pp. pp 96-111.

Luo, R., Prozzi, J.A. (2007). *Strain Distribution in the Asphalt Layer under Measured 3-D Tire-pavement Contact Stresses*. Road Materials and Pavement Design 8, pp. 61-86. 10.1080/14680629.2007.9690067

Miner, M. (1945). *Cumulative fatigue damage*. Journal of applied mechanics 12, pp. A159-A164.

Minnesota Department of Transportation (2012). *MnPave Users's Guide*.

Myers, L., Roque, R., Ruth, B.E. (1998). *Mechanisms of surface-initiated longitudinal wheel path cracks in high-type bituminous pavements*. Asphalt Paving Technology, Vol. 67, pp.401-432.

NCHRP (2004). *National Cooperative Highway Research Program 2004. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, Appendice II-1: Calibration of fatigue cracking models for flexible pavements*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

NF EN 12697-24 (2012). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24 : résistance à la fatigue*.

NF EN 12697-26 (2012). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 : module de rigidité*.

Nguyen, V.-H. (2002). *Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Nilsson, R., Oost, I., Hopman, P. (1996). *Viscoelastic Analysis of Full-Scale Pavements: Validation of VEROAD*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1539, pp. 81-87. doi:10.3141/1539-11

OCDE (1985). *Essais en vraie grandeur des superstructures routières : rapport, Organisation de Coopération et de Développement Economiques*. OCDE, Paris. 9264227660 9789264227668.

OCDE (1991). *Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières, programme de recherche en matière de routes et de transports routiers, Organisation de Coopération et de Développement Economiques*. OCDE, Paris. 9264234691 9789264234697.

Olard, F. (2003). *Comportement thermomécanique des enrobés bitumeux à basses températures relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé*, Thèse de doctorat Génie civil. Villeurbanne: Institut national des sciences appliquées de Lyon.

Perraton, D., Baaj, H., Benedetto, H.D., Paradis, M. (2003). *Évaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai : aspects fondamentaux et application à l'enrobé à matrice de pierre*. Canadian Journal of Civil Engineering 30, pp. 902-913. 10.1139/103-067

Perraton, D., Di Benedetto, H., Carter, A. (2011). *Correspondances entre les coefficients des modèles de fatigue dans les méthodes mécanistiques-empiriques de dimensionnement de chaussées souples*. Canadian Journal of Civil Engineering 38, pp. 1287-1299. 10.1139/111-102

Perret, J. (2003). *Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic*. Thèse de doctorat N°2786. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Piau, J.M., Balay, J.M. (2012). *Facteurs d'endommagement des chaussées*, Congrès de l'IDRRIM, Lyon, France.

Pierre, P., Doré, G., Vagile, L. (2003). *Caractérisation et évaluation des sollicitations à l'interface pneu-chaussée. Rapport GCT-03-03*. Université Laval, Faculté des sciences et de génie, Département de génie civil, Québec, Canada.

Poupart, J. (2013). *Étude du comportement en déformation permanente des matériaux granulaires non liés de fondation de chaussées en condition de gel saisonnier*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département de génie civil.

Priest, A.L., Timm, D.H., Barrett, W.E. (2005). *Mechanistic comparison of wide-base single vs. standard dual tire configurations*. NCAT Report 05-03. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama.

Québec (1994). *Normes, ouvrages routiers, tome VII-matériaux*. Gouvernement du Québec, Ministère des Transports, Québec, CANADA. ISBN: 9782551159147.

Québec (2005). *Mesure de la force de liaison entre deux couches d'enrobé* Info DLC, Vol.10, N°7. Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada.

Québec (2007). *LC 26-700, Détermination du module complexe des enrobés*, Recueil des méthodes d'essai LC. Les publications du Québec, Canada. ISBN 9782551240159.

Québec (2009). *Guide technique sur la mise en place des enrobés bitumineux*. Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada. 978-2-550-55621-3.

Rahim, A.M., George, K.P. (2005). *Models to estimate subgrade resilient modulus for pavement design*. International Journal of Pavement Engineering Volume 6, Issue 2.

Roque, R., Zou, J., Kim, Y.R., Baek, C., Thirunavukkarasu, S., Underwood, B.S., Guddati, M.N. (2010). *NCHRP 1-42: Top-down cracking of hot-mix asphalt layers: models for initiation and propagation*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.

Salama, H.K., Chatti, K. (2010). *Evaluation of fatigue and rut damage prediction methods for asphalt concrete pavements subjected to multiple axle loads*. International Journal of Pavement Engineering 12, pp. 25-36. 10.1080/10298430903578978

Salama, H.K., Chatti, K., Lyles, R. (2006). *Effect of Heavy Multiple Axle Trucks on Flexible Pavement Damage Using In-Service Pavement Performance Data*. Journal of Transportation Engineering 132, pp. 763-770. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:10(763)

Sayegh, G. (1965). *Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux*, Thèse de Doctorat d'Ingénieur. Faculté des Sciences de l'université de Paris.

Sayegh, G. (1966). *Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux*. Cahiers du Groupe français de rhéologie N°2-Tome 1, pp. 51-74.

Scazziga, I.F., Dumont, A.-G., Knobel, W. (1987). *Strain Measurements in Bituminous Layers*; Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Volume I, Proceedings; University of Michigan, Ann Arbor - July 13-17, 1987.

Sebaaly, P.E., Tabatabaee, N. (1991). *Field Evaluation of Strain Gauges in Asphalt Concrete Pavements*; Proceedings of the conference: Road and Airport Pavement Response Monitoring Systems; West Lebanon, New Hampshire, U.S.A., September 12-16; pp. 382-396.

SETRA-LCPC (1994). *Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique*, p. 266. ISBN:2-7208-7010-2.

Shen, S., Carpenter, S.H. (2007). *Dissipated energy concepts for HMA performance: Fatigue and healing*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, Illinois.

Sohm, J. (2011). *Predictions des déformations permanentes des matériaux de chaussées*. Thèse de doctorat, Spécialité Génie Civil, École Centrale de Nantes.

Soon, S.-C., Drescher, A., Stolarski, H. (2004). *Tire-Induced Surface Stresses in Flexible Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1896, pp. 170-176. 10.3141/1896-17

Svasdisant, T., Schorsch, M., Baladi, G., Pinyosunun, S. (2002). *Mechanistic Analysis of Top-Down Cracks in Asphalt Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1809, pp. 126-136. 10.3141/1809-15

Tamagny, P., Wendling, L., Piau, J.M. (2004). *A new explanation of pavement cracking from top to bottom: The visco-elasticity of asphalt materials?*; Cracking in Pavements: mitigation, risk assessment and prevention, Proceedings of the 5th International RILEM Conference; Limoges, France; pp. 3-10.

Timm, D.H., Birgisson, B., Newcomb, D.E. (1999). *Mechanistic-empirical flexible pavement thickness design: The minnesota method*. Technical report MN/RC-P99-10. University of Minnesota, Department of Civil Engineering, Minneapolis, MN,.

Tschoegl, N.W., Knauss, W., Emri, I. (2002). *Poisson's Ratio in Linear Viscoelasticity – A Critical Review*. Mechanics of Time-Dependent Materials, Kluwer Academic Publishers Volume 6, pp. 3-51. 10.1023/A:1014411503170

Uzan, J. (1985). *Characterisation of granular materials*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C Transportation research record 1022.

Van Dijk, W., Visser, W. (1977). *Energy Approach to Fatigue for Pavement Design*; Association of Asphalt Paving Technologists Proc.

Vogelzang, C.H., Bouman, S.R. (1991). *In-situ stress and strain measurements in dynamically loaded asphalt pavement structures*; Proceedings of the conference: Road and Airport Pavement Response Monitoring Systems; West Lebanon, New Hampshire, U.S.A., September 12-16; pp. pp 244-260.

Vulcano Greullet, N., Kerzreho, J.-P., Chabot, A., Mauduit, V. (2010). *Stripping phenomenon in thick pavement top layers*; 11th International Conference on Asphalt Pavements; Nagoya, Aichi, Japan; p. 10.

Wang, H. (2011). *Analysis of Tire-Pavement Interaction and Pavement Responses Using a Decoupled Modeling Approach*. Ph.D. dissertation. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Wang, H., Al-Qadi, I.L. (2009). *Combined Effect of Moving Wheel Loading and Three-Dimensional Contact Stresses on Perpetual Pavement Responses*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2095, pp. 53-61. 10.3141/2095-06

Wang, H., Al-Qadi, I.L. (2010). *Near-Surface Pavement Failure Under Multiaxial Stress State in Thick Asphalt Pavement*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2154, pp. 91-99. 10.3141/2154-08

Wang, H., Al-Qadi, I.L. (2011). *Impact Quantification of Wide-Base Tire Loading on Secondary Road Flexible Pavements*. Journal of Transportation Engineering 137, pp. 630-639. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000245

Wang, L., Myers, L., Mohammad, L., Fu, Y. (2003). *Micromechanics Study on Top-Down Cracking*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1853, pp. 121-133. doi:10.3141/1853-14

Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D. (1955). *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids*. Journal of the American Chemical Society Volume 77, pp. 3701-3707. DOI: 10.1021/ja01619a008

Wistuba, M. (2004). *Analyses of strain data from ALT, COST 347 Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing*. Short Term Scientific Mission, Final Report, Mission 6. Institute for Road Construction and Maintenance, Vienna University of Technology, Austria.

Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R., Spiegl, M. (2006). *Low-temperature performance prediction of asphalt mixtures used for LLP—new approach based on fundamental test methods and numerical modeling*. International Journal of Pavement Engineering 7, pp. 121-132. 10.1080/10298430600627003

Wistuba, M., Perret, J. (2004). *Comparative strain measurement in bituminous layers with the use of ALT*; 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing; 2004, Minneapolis, Minnesota, USA; p. 24p.

Xue, W., Weaver, E. (2011). *Pavement Shear Strain Response to Dual and Wide-Base Tires*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2225, pp. 155-164. 10.3141/2225-17

Yoo, P.J. (2007). *Flexible pavement dynamic response analysis and validation for various tire configurations*. Ph.D. dissertation. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Annexe 1

Matrice expérimentale des campagnes de mesures

Matrice expérimentale de la campagne de mesure n° 1

- **Autobus urbain**

Cas n°	Saison 2008	Section n°	Pression Essieu 1 (kPa)	Pression Essieu 2 (kPa)	Distance Obstacle (mm)	Dénomination du relevé
1-1	Printemps	1	690	690	-	1S
1-2	Printemps	1	690	690	700	2D
1-3	Printemps	1	690	690	1200	3D
1-4	Printemps	1	517	517	1200	4D
1-5	Printemps	1	517	517	700	5D
1-6	Printemps	1	517	517	-	6S
1-7	Printemps	2	690	690	-	7S
1-8	Printemps	2	690	690	700	8D
1-9	Printemps	2	690	690	1200	9D
1-10	Printemps	2	517	517	1200	10D
1-11	Printemps	2	517	517	700	11D
1-12	Printemps	2	517	517	-	12S
1-13	Printemps	2	517	517	-	13T
1-101	Été	1	690	690	-	101S
1-102	Été	1	690	690	1200	102D
1-103	Été	1	690	690	1700	103D
1-104	Été	1	690	690	-	104T
1-105	Été	1	517	517	-	105T
1-106	Été	1	517	517	1700	106D
1-107	Été	1	517	517	1200	107D
1-108	Été	1	517	517	-	108S
1-109	Été	2	517	517	-	109S
1-110	Été	2	517	517	1200	110D
1-111	Été	2	517	517	1700	111D
1-112	Été	2	517	517	-	112T
1-113	Été	2	690	690	-	113T
1-114	Été	2	690	690	1700	114D
1-115	Été	2	690	690	1200	115D
1-116	Été	2	690	690	-	116S

Note : 100 psi = 690 kPa

• Camion (printemps)

Cas n°	Saison 2008	Section n°	Pression essieu moteur (kPa)	Pression essieu remorque (kPa)	Type de pneu	Dénomination du relevé
1-14	Printemps	1	690	690	Jumelé	14C
1-15	Printemps	1	414	380	Jumelé	15C
1-16	Printemps	4	414	380	Jumelé	16C
1-17	Printemps	4	690	690	Jumelé	17C
1-18	Printemps	3	690	690	Jumelé	18C
1-19	Printemps	3	414	380	Jumelé	19C
1-20	Printemps	3	690	830	Large	20C
1-21	Printemps	3	690	690	Large	21C
1-22	Printemps	3	517	380	Large	22C
1-23	Printemps	4	830	690	Large	23C
1-24	Printemps	4	690	690	Large	24C
1-25	Printemps	4	690	550	Large	25C
1-26	Printemps	4	690	830	Large	26C
1-27	Printemps	1	690	830	Large	27C
1-28	Printemps	1	690	690	Large	28C
1-29	Printemps	1	690	550	Large	29C

• Camion (été)

Cas n°	Saison 2008	Section n°	Pression essieu moteur (kPa)	Pression essieu remorque (kPa)	Type de pneu	Dénomination du relevé
1-117	Été	1	690	690	Jumelé	117C
1-118	Été	1	414	380	Jumelé	118C
1-119	Été	1	690	690	Jumelé	119T
1-120	Été	4	690	690	Jumelé	120C
1-121	Été	4	414	380	Jumelé	121C
1-122	Été	3	414	380	Jumelé	122C
1-123	Été	3	690	690	Jumelé	123C
1-124	Été	3	690	690	Jumelé	124T
1-125	Été	4	690	830	Large	125C
1-126	Été	3	690	830	Large	126C
1-127	Été	3	690	690	Large	127C
1-128	Été	3	690	690	Large	128T
1-129	Été	4	690	690	Large	129C
1-130	Été	4	690	550	Large	130C
1-131	Été	3	690	550	Large	131C
1-132	Été	1	690	830	Large	132C
1-133	Été	1	690	690	Large	133C
1-134	Été	1	690	690	Large	134T
1-135	Été	1	690	550	Large	135C
1-137	Été	1	690	690	Large – Charge 80 %	137C
1-139	Été	4	690	690	Large – Charge 80 %	139C
1-140	Été	3	690	690	Large – Charge 80 %	140C
1-141	Été	3	690	690	Jumelé – Charge 80 %	141C
1-142	Été	4	690	690	Jumelé – Charge 80 %	142C
1-143	Été	1	690	690	Jumelé – Charge 80 %	143C

Note : 100 psi = 690 kPa;

Matrice expérimentale de la campagne de mesure n° 2

- **Camion**

Cas n°	Saison	Section n°	Pression de gonflage (kPa)	Type de pneu	Dénomination du relevé
121	Automne 2009	1	830/830	Jumelé	1P à 6P
101	Automne 2009	1	690/690	Jumelé	9P à 12P
111	Automne 2009	1	550/550	Jumelé	14P à 16P
122	Automne 2009	1	830	Large	19P à 21P
102	Automne 2009	1	690	Large	23P à 26P
112	Automne 2009	1	550	Large	27P à 29P
201	Été 2010	2	690/690	Jumelé	200A, 200B, 202A, 202B
231	Été 2010	2	690/550	Jumelé	204A, 204B, 205A, 205B
211	Été 2010	2	550/550	Jumelé	207A, 207B, 208A, 208B
202	Été 2010	2	690	Large	209A, 209B, 211A, 211B
212	Été 2010	2	550	Large	212A, 212B, 214A, 214B

Commentaires :

- Les pressions de gonflage pour le pneu jumelé sont indiquées avec le symbole « / » afin de préciser la pression de gonflage dans le pneu extérieur / intérieur du jumelé.
- Pour une même condition d'essai, il existe plusieurs séries de mesures étant donné que l'acquisition des données pour l'ensemble des capteurs était effectuée en plusieurs prises de mesure.
- Pour les essais de l'été 2010, les dénominations portent une lettre A ou B étant donné que l'acquisition était effectuée simultanément avec deux appareils RadSens.

Matrice expérimentale de la campagne de mesure n° 3

• Section A : Épaisseur d'enrobé de 130 mm

Cas n°	Type de pneu	Date	Nb Tour	Pression	Charge	Vitesse	T° surf	T° 3 cm	T° 9 cm
41	Jumelé	25/05/2011 7 h 00	4 000	830 kPa (120 psi)	6,5 t	6 T/min (43 km/h)	18	20,5	20,1
42	Jumelé	25/05/2011 15 h 00	4 800	830 kPa (120 psi)	6,5 t	6 T/min (43 km/h)	39,5	40,5	36,2
15	Jumelé	10/06/2011 9 h 45	16 700	830 kPa (120 psi)	4 t	4,5 T/min (32 km/h)	18	18,5	19,2
16	Large								
11	Jumelé	08/06/2011 9 h 30	13 200	830 kPa (120 psi)	4 t	6 T/min (43 km/h)	19	20,5	21,0
12	Large								
13	Jumelé	08/06/2011 15 h 15	14 000	690 kPa (100 psi)	4 t	6 T/min (43 km/h)	25	29,0	28,0
14	Large								
27	Jumelé	17/06/2011 10 h 45	19 900	830 kPa (120 psi)	5 t	4,5 T/min (32 km/h)	17	19,5	20,3
28	Large								
21	Jumelé	17/06/2011 8 h 40	19 100	830 kPa (120 psi)	5 t	6 T/min (43 km/h)	18	19,2	20,0
22	Large								
25	Jumelé	14/06/2011 14 h 10	17 200	830 kPa (120 psi)	5 t	6 T/min (43 km/h)	29	28,3	25,7
26	Large								
23	Jumelé	29/06/2011 17 h 00	38 400	830 kPa (120 psi)	5 t	6 T/min (43 km/h)	34	34,7	31,8
24	Large								
29	Jumelé	17/06/2011 13 h 45	20 300	830 kPa (120 psi)	5 t	8 T/min (57 km/h)	18	18,8	19,8
30	Large								
V1	Jumelé	21/06/2011 15 h 00	25 800	830 kPa (120 psi)	5 t	Essais de 9 vitesses	22,5	21,0	20,0
V2	Large								
31	Jumelé	24/06/2011 8 h 30	27 400	830 kPa (120 psi)	5,8 t	6 T/min (43 km/h)	18	20,0	19,8
32	Large								
33	Jumelé	24/06/2011 15 h 00	29 300	830 kPa (120 psi)	5,8 t	6 T/min (43 km/h)	34,6	32,8	28,7
34	Large								

Commentaires :

- Le nombre de tours du manège correspond au nombre de rotations depuis la construction de la chaussée. Le nombre d'applications de charge est égal à 4 fois le nombre de tour.
- La vitesse est réglée en nombre de tour (T) par minute et convertie en km/h.
- Les températures sont une moyenne des températures au cours de l'essai (en °C).

• Section B : Épaisseur d'enrobé de 70 mm

Cas n°	Type de pneu	Date	Nb Tour	Pression	Charge	Vitesse	T° surface	T° 4 cm	T° 8 cm
81	Jumelé	24/05/2011 7 h 00	2 700	830 kPa (120 psi)	6,5 t	6 T/min (43 km/h)	15,5	19,2	21,5
82	Jumelé	24/05/2011 15 h 00	3 400	830 kPa (120 psi)	6,5 t	6 T/min (43 km/h)	33,5	37,0	33,8
83	Jumelé	31/05/2011 15 h 15	10 600	830 kPa (120 psi)	6,5 t	6 T/min (43 km/h)	24	27,2	25,5
51	Jumelé	09/06/2011 9 h 30	14 800	690 kPa (100 psi)	4 t	6 T/min (43 km/h)	22	22,5	21,0
52	Large								
53	Jumelé	09/06/2011 11 h 15	15 400	690 kPa (100 psi)	4 t	4,5 T/min (32 km/h)	23	24,2	23,0
54	Large								
55	Jumelé	09/06/2011 14 h 30	15 800	830 kPa (120 psi)	4 t	6 T/min (43 km/h)	24	28,0	25,0
56	Large								
57	Jumelé	09/06/2011 15 h 45	16 200	830 kPa (120 psi)	4 t	4,5 T/min (32 km/h)	23	24,8	24,8
58	Large								
61	Jumelé	29/06/2011 9 h 20	36 500	830 kPa (120 psi)	5 t	6 T/min (43 km/h)	22,5	22,0	21,0
62	Large								
67	Jumelé	15/06/2011 14 h 00	18 000	830 kPa (120 psi)	5 t	6 T/min (43 km/h)	28	29,0	26,7
68	Large								
65	Jumelé	16/06/2011 14 h 15	18 600	830 kPa (120 psi)	5 t	6 T/min (43 km/h)	26	30,5	28,0
66	Large								
63	Jumelé	29/06/2011 15 h 30	37 615	830 kPa (120 psi)	5 t	6 T/min (43 km/h)	36	36,0	32,0
64	Large								
69	Jumelé	17/06/2011 15 h 30	20 500	830 kPa (120 psi)	5 t	8 T/min (57 km/h)	18	19,0	19,8
70	Large								
V3	Jumelé	21/06/2011 10 h 30	24 100	830 kPa (120 psi)	5 t	Essais de 9 vitesses	22,5	21,0	20,0
V4	Large								
71	Jumelé	22/06/2011 09 h 30	26 200	830 kPa (120 psi)	5,8 t	6 T/min (43 km/h)	23,5	23,0	21,0
72	Large								
73	Jumelé	22/06/2011 15 h 30	26 876	830 kPa (120 psi)	5,8 t	6 T/min (43 km/h)	33	32,6	29,8
74	Large								

Commentaires :

- Le nombre de tours du manège correspond au nombre de rotations depuis la construction de la chaussée. Le nombre d'applications de charge est égal à 4 fois le nombre de tours.
- La vitesse est réglée en nombre de tour (T) par minute et convertie en km/h.
- Les températures sont une moyenne des températures au cours de l'essai (en °C).

Annexe 2

Résultats de caractérisation des matériaux de chaussées des structures du manège de fatigue de l'IFSTTAR

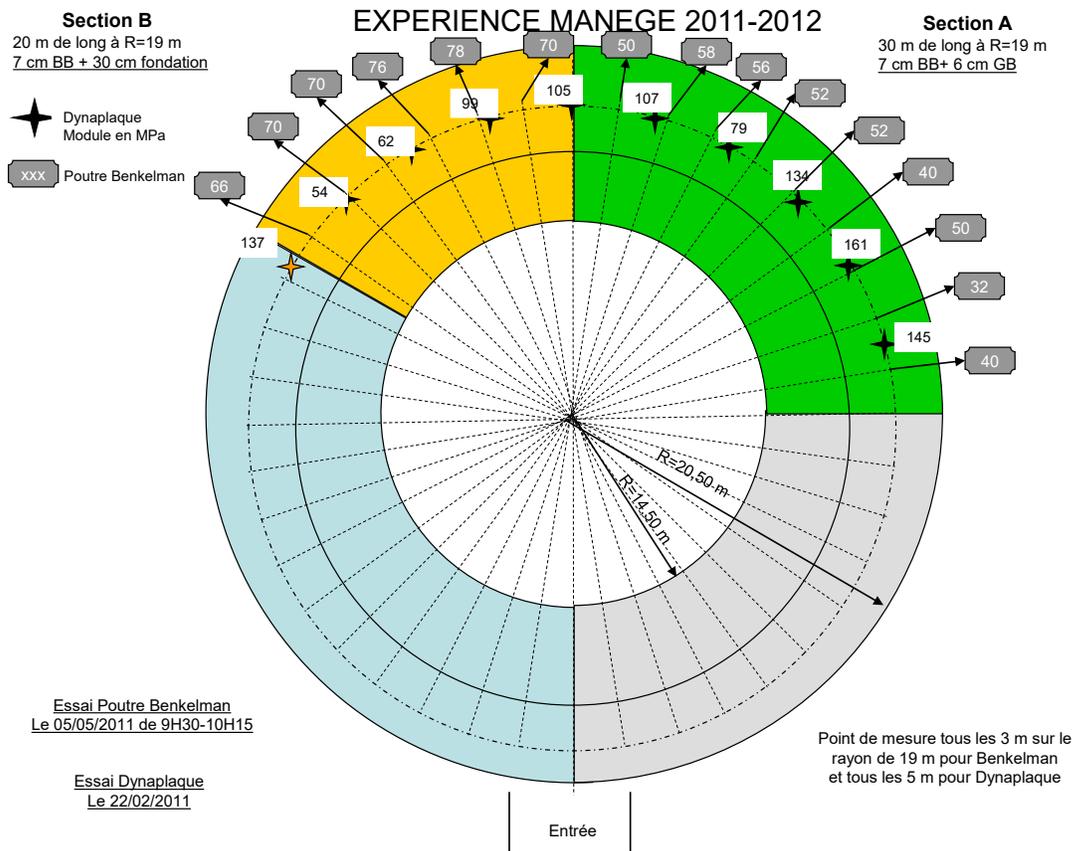
Mesures de portance du sol de fondation

Point de mesure	Section	Module dynamique en MPa
1	A	145
2	A	171
3	A	134
4	A	79
5	A	107
6	Transition A et B	105
7	B	99
8	B	62
9	B	54

Commentaires :

- Les essais ont été effectués suivant la norme AFNOR P 94-117.2
- Les zones dont les valeurs de module sont inférieures à 80 MPa ont été retravaillées afin d'assurer un module minimum de 90 MPa.
- Certaines zones présentes de faibles modules, car le sol a été remanié afin de faire passer des câblages modifiant ainsi la teneur en eau et la compaction des sols.
- Les essais ont été effectués le 22 février 2011, par Monsieur Poussin, V. sous la responsabilité de Monsieur Huet. Les essais ont été effectués par le laboratoire régional d'Angers et les données complètes sont présentes dans le rapport référence MH-FG 42.11.44.105(1)
- L'emplacement des points de mesure est représenté avec les mesures à la poutre de Benkelman

Mesures de la déflexion à la poutre de Benkelman

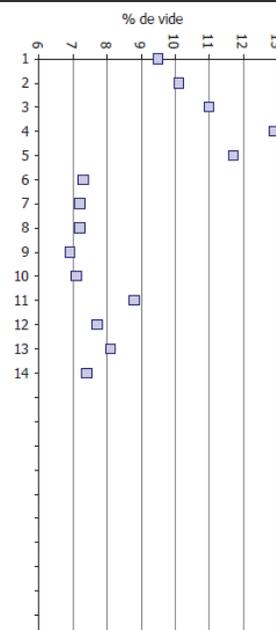
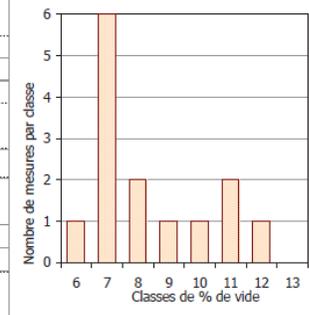


Commentaires :

- Les essais ont été effectués par un temps nuageux
- Seuls les essais effectués sur les sections A et B sont représentés.

Mesures de densité au gamma-densimètre (section B)

EIFFAGE Travaux Publics Ouest - St Jacques ZI de la Haie des Cognets,, 12 rue de Bellevue 35136 St Jacques de la Lande.

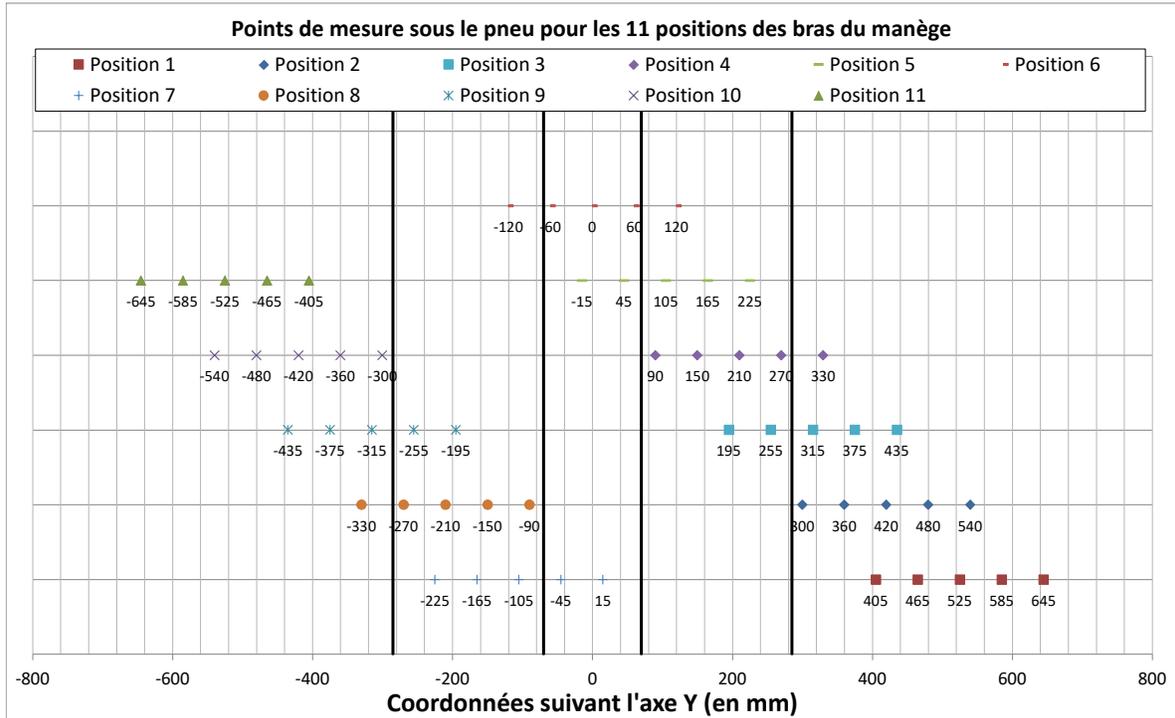
		RAPPORT DE MESURES DE DENSITE AU GAMMADENSIMETRE																																																																													
Rapport n° : ROU 11-0637-1 établi le : 14/03/2011				page : 1 / 1																																																																											
Affaire : Manège de fatigue, Nantes (44)		Demandeur : Mr Mickael BARBOT, Eiffage Travaux Publics ST HERBLAIN, 10 rue Launay, 44804 ST HERBLAIN Cedex.																																																																													
Ouvrage : Couche de roulement		n° affaire : AOU 09-331																																																																													
Matériau : BBSG 0/10 c3 ST LUCE		épaisseur en oeuvre : 8.5 cm position de mesure : 8 cm date mise en oeuvre : 01/03/2011 date des mesures : 01/03/2011																																																																													
Densité : densité = 2 430 kg/m ³																																																																															
Methode : MEI 01																																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>n°</th> <th>Situation repère</th> <th>prof. cm</th> <th>densité mesurée kg/m³</th> <th>vide %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td>8</td><td>2198</td><td>9.5</td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td>8</td><td>2185</td><td>10.1</td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td>8</td><td>2162</td><td>11.0</td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td>8</td><td>2117</td><td>12.9</td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td>8</td><td>2146</td><td>11.7</td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td>8</td><td>2252</td><td>7.3</td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td>8</td><td>2255</td><td>7.2</td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td>8</td><td>2256</td><td>7.2</td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td>8</td><td>2262</td><td>6.9</td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td>8</td><td>2258</td><td>7.1</td></tr> <tr><td>11</td><td></td><td>8</td><td>2216</td><td>8.8</td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>8</td><td>2244</td><td>7.7</td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td>8</td><td>2232</td><td>8.1</td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td>8</td><td>2250</td><td>7.4</td></tr> </tbody> </table>	n°	Situation repère	prof. cm	densité mesurée kg/m ³	vide %	1		8	2198	9.5	2		8	2185	10.1	3		8	2162	11.0	4		8	2117	12.9	5		8	2146	11.7	6		8	2252	7.3	7		8	2255	7.2	8		8	2256	7.2	9		8	2262	6.9	10		8	2258	7.1	11		8	2216	8.8	12		8	2244	7.7	13		8	2232	8.1	14		8	2250	7.4				
n°	Situation repère	prof. cm	densité mesurée kg/m ³	vide %																																																																											
1		8	2198	9.5																																																																											
2		8	2185	10.1																																																																											
3		8	2162	11.0																																																																											
4		8	2117	12.9																																																																											
5		8	2146	11.7																																																																											
6		8	2252	7.3																																																																											
7		8	2255	7.2																																																																											
8		8	2256	7.2																																																																											
9		8	2262	6.9																																																																											
10		8	2258	7.1																																																																											
11		8	2216	8.8																																																																											
12		8	2244	7.7																																																																											
13		8	2232	8.1																																																																											
14		8	2250	7.4																																																																											
		moyennes		2217	8.8																																																																										
		écarts types		48	2.0																																																																										
		valeur maximale		2262	12.9																																																																										
		valeur minimale		2117	6.9																																																																										
		nombre de mesures																																																																													
		total		14																																																																											
Appareil : Troxler 4640B n°2725																																																																															
Observations :																																																																															

Remarque : Les points de mesure n° 1 à 5 correspondent aux sections de cette étude

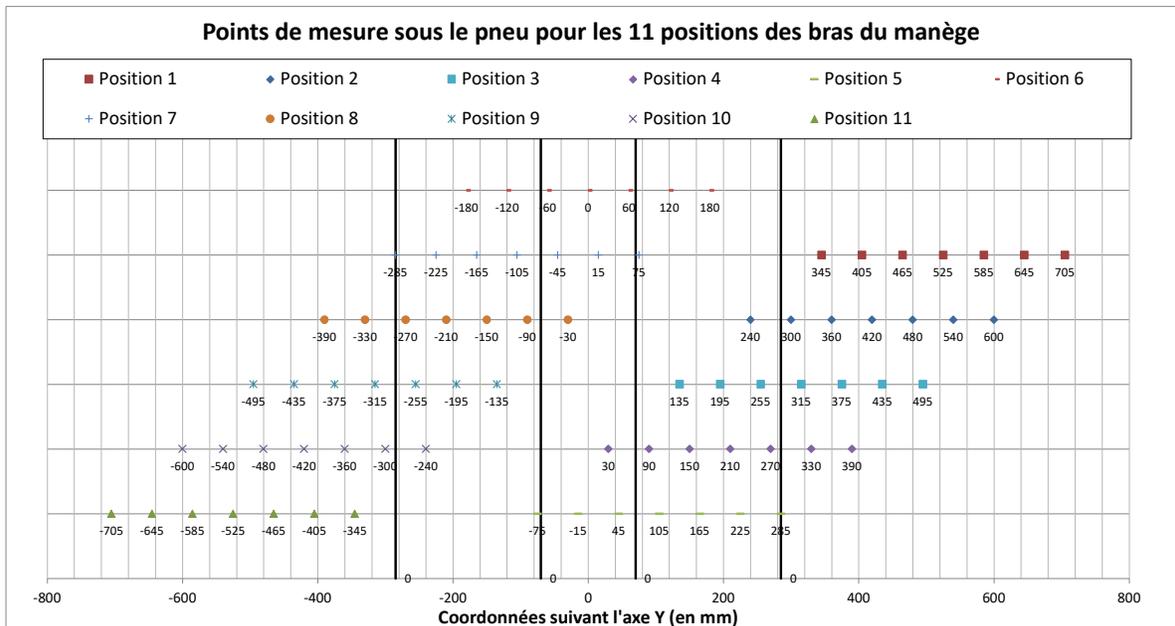
Annexe 3

Localisation des points de mesures sous le pneu

Section A



Section B



Remarque: Les traits verticaux correspondent aux bords extérieurs des pneus jumelés

Annexe 4

Température dans les structures de chaussées des sections A et B

Les numéros de cas correspondent aux numéros énoncés dans les matrices expérimentales à l'annexe 1. Les mesures présentées sont associées au temps entre la première et la dernière prise de mesure. Toutes les données de température sont données en °C dans les tableaux.

Section A : Épaisseur d'enrobé de 130 mm

Cas n° 41	Température					
	Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm
2011-05-25 06:59	13,41	15,87	16,93	18,71	20,89	24,30
2011-05-25 07:09	13,14	15,81	16,86	18,63	20,80	24,22
2011-05-25 07:19	13,06	15,77	16,79	18,56	20,72	24,15
2011-05-25 07:29	13,31	15,73	16,74	18,48	20,64	24,07
2011-05-25 07:39	13,53	15,517	16,72	18,43	20,56	23,99
2011-05-25 07:49	15,11	15,91	16,76	18,39	20,48	23,92
2011-05-25 07:59	16,43	16,38	16,93	18,41	20,42	23,84
2011-05-25 08:09	17,38	17,09	17,27	18,50	20,38	23,77
2011-05-25 08:19	18,18	17,74	17,68	18,67	20,37	23,70
2011-05-25 08:29	19,24	18,38	18,12	18,88	20,40	23,63
2011-05-25 08:39	20,21	19,06	18,60	19,13	20,44	23,56
2011-05-25 08:49	22,43	19,78	19,10	19,42	20,52	23,50
2011-05-25 08:59	24,76	20,78	19,73	19,517	20,61	23,44
2011-05-25 09:09	25,90	21,87	20,48	20,15	20,74	23,39
2011-05-25 09:19	27,08	22,91	21,27	20,62	20,90	23,34

Cas n° 42	Température					
	Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm
2011-05-25 15:09	42,72	44,31	41,82	38,41	33,19	26,60
2011-05-25 15:19	42,49	43,58	41,33	38,27	33,38	26,78
2011-05-25 15:29	41,97	43,06	40,91	38,09	33,51	26,96
2011-05-25 15:39	41,99	42,67	40,57	37,92	33,60	27,14
2011-05-25 15:49	41,26	42,31	40,29	37,77	33,67	27,31
2011-05-25 15:59	41,33	41,96	40,01	37,64	33,71	27,48
2011-05-25 16:09	40,79	41,67	39,76	37,51	33,517	27,64
2011-05-25 16:19	41,13	41,37	39,53	37,38	33,78	27,79
2011-05-25 16:29	40,64	41,16	39,34	37,27	33,79	27,94
2011-05-25 16:39	40,38	40,91	39,15	37,16	33,80	28,07
2011-05-25 16:49	40,00	40,69	38,96	37,06	33,81	28,20
2011-05-25 16:59	42,23	40,46	38,79	36,97	33,82	28,32
2011-05-25 17:09	43,85	40,85	38,81	36,89	33,82	28,43
2011-05-25 17:19	44,57	41,31	39,08	36,91	33,83	28,53

Cas n° 11 et 12	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-08 09:27	17,23	21,70	20,97	20,63	20,65	22,34
2011-06-08 09:37	16,56	20,34	20,51	20,517	20,78	22,31
2011-06-08 09:47	17,80	19,99	20,06	20,63	20,86	22,29
2011-06-08 09:57	19,72	20,14	19,96	20,54	20,89	22,28
2011-06-08 10:07	19,74	20,51	20,11	20,54	20,90	22,27
2011-06-08 10:17	19,81	20,65	20,28	20,60	20,93	22,26
2011-06-08 10:27	21,70	20,80	20,40	20,67	20,97	22,25
2011-06-08 10:37	22,46	21,29	20,66	20,76	21,00	22,25
2011-06-08 10:47	22,52	22,35	21,21	20,94	21,05	22,25
2011-06-08 10:57	22,43	22,50	21,59	21,23	21,14	22,25
2011-06-08 11:07	23,51	22,71	21,81	21,45	21,24	22,24
2011-06-08 11:17	23,08	23,22	22,13	21,65	21,35	22,24
2011-06-08 11:27	21,21	22,95	22,27	21,87	21,47	22,25
2011-06-08 11:37	22,11	22,52	22,11	21,95	21,58	22,25

Cas n° 13 et 14	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-08 15:17	27,92	32,98	31,82	30,32	27,27	23,63
2011-06-08 15:27	26,15	31,47	30,99	30,06	27,35	23,76
2011-06-08 15:37	26,08	30,36	30,11	29,63	27,36	23,88
2011-06-08 15:47	25,35	29,50	29,42	29,18	27,31	23,99
2011-06-08 15:57	24,84	28,87	28,80	28,74	27,21	24,10
2011-06-08 16:07	26,13	28,22	28,26	28,34	27,08	24,20
2011-06-08 16:17	30,83	28,92	28,19	28,01	26,95	24,30
2011-06-08 16:27	31,11	30,02	28,69	27,95	26,83	24,38
2011-06-08 16:37	27,91	30,63	29,16	28,11	26,77	24,45
2011-06-08 16:47	30,68	30,35	29,25	28,28	26,79	24,52
2011-06-08 16:57	32,47	30,53	29,27	28,33	26,82	24,57
2011-06-08 17:07	31,01	30,57	29,47	28,43	26,86	24,62
2011-06-08 17:17	27,15	30,25	29,36	28,49	26,90	24,67
2011-06-08 17:27	29,55	29,82	29,07	28,43	26,94	24,72

Cas n° 15 et 16	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-10 09:44	15,23	17,44	17,76	18,37	19,12	21,07
2011-06-10 09:54	15,38	17,15	17,57	18,33	19,13	21,04
2011-06-10 10:04	15,48	17,13	17,46	18,25	19,12	21,02
2011-06-10 10:14	15,83	17,06	17,40	18,20	19,09	21,00
2011-06-10 10:24	15,29	17,09	17,38	18,15	19,07	20,98
2011-06-10 10:34	15,60	16,93	17,29	18,12	19,04	20,96
2011-06-10 10:44	17,31	17,09	17,29	18,07	19,02	20,94
2011-06-10 10:54	18,44	17,54	17,51	18,09	18,99	20,92
2011-06-10 11:04	20,43	18,04	17,87	18,22	18,99	20,90
2011-06-10 11:14	22,53	19,12	18,46	18,45	19,02	20,88
2011-06-10 11:24	20,30	19,94	19,11	18,81	19,09	20,86
2011-06-10 11:34	24,11	20,27	19,47	19,15	19,21	20,84

Cas n° 25 et 26	Température					
	Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm
2011-06-14 14:05	32,45	29,69	27,60	25,92	23,89	21,517
2011-06-14 14:15	31,13	30,10	28,07	26,25	24,02	21,83
2011-06-14 14:25	28,52	29,82	28,21	26,52	24,17	21,91
2011-06-14 14:35	27,88	29,01	27,93	26,63	24,33	21,98
2011-06-14 14:45	29,02	28,64	27,62	26,56	24,45	22,05
2011-06-14 14:55	31,19	29,06	27,64	26,50	24,52	22,13
2011-06-14 15:05	30,74	29,40	27,88	26,58	24,58	22,20
2011-06-14 15:15	30,87	29,52	28,05	26,71	24,65	22,27
2011-06-14 15:25	35,54	30,04	28,25	26,83	24,74	22,35
2011-06-14 15:35	35,60	31,37	28,98	27,08	24,85	22,41
2011-06-14 15:45	35,43	32,03	29,64	27,50	24,99	22,48
2011-06-14 15:55	35,70	32,59	30,12	27,90	25,18	22,55

Cas n° 21 et 22	Température					
	Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm
2011-06-17 08:35	18,62	18,98	19,07	19,56	20,33	22,20
2011-06-17 08:45	17,68	18,97	19,13	19,63	20,35	22,17
2011-06-17 08:55	17,81	18,92	19,11	19,66	20,36	22,13
2011-06-17 09:05	17,80	18,90	19,11	19,67	20,36	22,10
2011-06-17 09:15	17,69	18,87	19,10	19,67	20,37	22,06
2011-06-17 09:25	18,13	18,85	19,08	19,67	20,37	22,04
2011-06-17 09:35	18,00	18,93	19,11	19,67	20,36	22,01
2011-06-17 09:45	17,95	18,93	19,13	19,68	20,36	21,98
2011-06-17 09:55	18,44	18,97	19,14	19,69	20,35	21,96
2011-06-17 10:05	18,55	19,12	19,21	19,71	20,35	21,93
2011-06-17 10:15	19,17	19,24	19,29	19,74	20,35	21,91

Cas n° 27 et 28	Température					
	Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm
2011-06-17 10:35	20,16	19,83	19,63	19,89	20,37	21,87
2011-06-17 10:45	20,47	20,12	19,84	20,01	20,40	21,85
2011-06-17 10:55	19,92	20,27	20,02	20,14	20,45	21,83
2011-06-17 11:05	19,52	20,21	20,08	20,24	20,50	21,81
2011-06-17 11:15	18,06	20,08	20,06	20,30	20,54	21,80
2011-06-17 11:25	17,09	19,58	19,88	20,30	20,58	21,78
2011-06-17 11:35	17,50	19,27	19,60	20,20	20,59	21,77
2011-06-17 11:45	17,53	19,13	19,45	20,08	20,57	21,76
2011-06-17 11:55	17,13	19,08	19,35	19,99	20,54	21,517
2011-06-17 12:05	16,30	18,72	19,18	19,90	20,51	21,74
2011-06-17 12:15	16,50	18,39	18,91	19,76	20,46	21,73
2011-06-17 12:25	16,61	18,29	18,517	19,61	20,41	21,72

Cas n° 29 et 30	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-17 13:35	19,00	19,76	19,53	19,76	20,23	21,61
2011-06-17 13:45	18,03	19,74	19,61	19,85	20,25	21,59
2011-06-17 13:55	17,18	19,29	19,47	19,89	20,28	21,57
2011-06-17 14:05	17,07	18,94	19,23	19,82	20,29	21,55
2011-06-17 14:15	17,81	18,79	19,06	19,72	20,28	21,54
2011-06-17 14:25	20,83	19,16	19,10	19,65	20,25	21,52
2011-06-17 14:35	20,06	19,67	19,41	19,70	20,22	21,51
2011-06-17 14:45	17,59	19,43	19,58	19,84	20,23	21,50
2011-06-17 14:55	16,51	18,86	19,37	19,88	20,26	21,49
2011-06-17 15:05	16,83	18,45	19,04	19,77	20,27	21,47
2011-06-17 15:15	16,95	18,33	18,83	19,62	20,25	21,46
2011-06-17 15:25	16,94	18,25	18,70	19,49	20,20	21,45

Cas V1 et V2	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-21 11:25	25,76	23,06	21,99	21,21	20,23	19,94
2011-06-21 11:35	25,33	23,38	22,28	21,43	20,35	19,96
2011-06-21 11:45	24,19	23,57	22,52	21,63	20,47	19,99
2011-06-21 11:55	26,04	23,77	22,67	21,80	20,60	20,02
2011-06-21 12:05	28,09	24,41	23,02	21,99	20,73	20,05
2011-06-21 15:05	30,16	29,03	27,22	25,59	23,38	21,04
2011-06-21 15:15	29,62	28,92	27,35	25,79	23,51	21,11
2011-06-21 15:25	29,48	28,86	27,37	25,91	23,64	21,18
2011-06-21 15:35	28,09	28,58	27,33	25,99	23,76	21,25

Cas n° 31 et 32	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-24 08:22	16,03	17,64	17,86	18,57	19,71	22,02
2011-06-24 08:32	16,04	17,61	17,89	18,63	19,71	21,96
2011-06-24 08:42	16,55	17,68	17,91	18,66	19,71	21,91
2011-06-24 08:52	17,46	17,94	18,00	18,69	19,70	21,86
2011-06-24 09:02	17,78	18,23	18,18	18,76	19,70	21,82
2011-06-24 09:12	18,85	18,54	18,37	18,86	19,71	21,77
2011-06-24 09:22	19,48	19,13	18,67	18,99	19,74	21,73
2011-06-24 09:32	20,46	19,70	19,06	19,19	19,78	21,69
2011-06-24 09:42	21,25	20,28	19,46	19,43	19,85	21,66
2011-06-24 09:52	21,95	20,76	19,88	19,70	19,94	21,62
2011-06-24 10:02	23,29	21,29	20,27	19,98	20,05	21,59
2011-06-24 10:12	22,17	22,09	20,78	20,28	20,17	21,57
2011-06-24 10:22	24,32	22,24	21,12	20,61	20,31	21,55
2011-06-24 10:32	24,17	22,60	21,50	20,89	20,46	21,53

Cas n° 33 et 34	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-24 14:40	35,48	31,86	29,65	27,93	25,45	22,63
2011-06-24 14:50	34,53	31,99	30,06	28,20	25,58	22,72
2011-06-24 15:00	35,53	32,72	30,36	28,42	25,73	22,81
2011-06-24 15:10	35,81	33,42	30,85	28,72	25,90	22,89
2011-06-24 15:20	35,94	33,76	31,24	29,05	26,09	22,98
2011-06-24 15:30	36,04	34,18	31,57	29,35	26,30	23,06
2011-06-24 15:40	34,82	34,55	31,91	29,65	26,50	23,15
2011-06-24 15:50	36,36	34,41	32,06	29,91	26,71	23,23
2011-06-24 16:00	35,44	34,39	32,14	30,09	26,91	23,32
2011-06-24 16:10	34,77	34,48	32,26	30,23	27,09	23,41
2011-06-24 16:20	35,60	34,42	32,31	30,36	27,26	23,51
2011-06-24 16:30	33,02	33,90	32,23	30,45	27,40	23,60
2011-06-24 16:35	33,52	33,68	32,07	30,45	27,47	23,64

Cas n° 23 et 24	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 3 cm	T° à 6 cm	T° à 9 cm	T° à 12 cm	T° à 27 cm
2011-06-29 16:59	34,89	36,05	34,82	33,34	30,40	26,09
2011-06-29 17:09	35,27	35,91	34,55	33,19	30,43	26,20
2011-06-29 17:19	36,17	35,99	34,49	33,10	30,45	26,30
2011-06-29 17:29	36,31	36,09	34,52	33,07	30,46	26,40
2011-06-29 17:39	36,17	36,19	34,57	33,08	30,49	26,50
2011-06-29 17:49	36,27	36,21	34,60	33,11	30,53	26,59
2011-06-29 17:59	36,05	36,18	34,61	33,14	30,57	26,67
2011-06-29 18:09	35,72	36,14	34,61	33,16	30,61	26,517
2011-06-29 18:19	36,02	36,12	34,59	33,17	30,66	26,83
2011-06-29 18:29	34,58	36,05	34,57	33,18	30,70	26,90
2011-06-29 18:39	34,02	35,79	34,45	33,16	30,74	26,98
2011-06-29 18:49	31,43	34,69	34,06	33,09	30,76	27,05

Section B : Épaisseur d'enrobé de 70 mm

Cas n° 81	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-05-24 07:09	15,27	19,29	21,66	24,52	25,98	26,07
2011-05-24 07:19	14,94	19,29	21,57	24,45	25,93	26,03
2011-05-24 07:29	14,68	19,16	21,50	24,39	25,88	26,00
2011-05-24 07:39	15,36	19,05	21,41	24,32	25,83	25,96
2011-05-24 07:49	15,22	19,06	21,34	24,26	25,78	25,93
2011-05-24 07:59	15,69	19,07	21,27	24,20	25,74	25,89
2011-05-24 08:09	16,12	19,17	21,23	24,13	25,69	25,86
2011-05-24 08:19	16,36	19,29	21,21	24,07	25,64	25,82
2011-05-24 08:29	16,38	19,39	21,20	24,01	25,59	25,79
2011-05-24 08:39	16,77	19,48	21,20	23,95	25,55	25,517
2011-05-24 08:49	19,47	19,77	21,21	23,89	25,50	25,72
2011-05-24 08:59	19,18	20,24	21,28	23,83	25,45	25,68

Cas n° 82	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-05-24 14:59	34,92	38,93	34,57	27,35	25,17	24,96
2011-05-24 15:09	34,15	38,25	34,46	27,55	25,23	24,98
2011-05-24 15:19	34,78	37,69	34,33	27,517	25,29	24,99
2011-05-24 15:29	33,86	37,32	34,18	27,93	25,36	25,02
2011-05-24 15:39	34,41	36,98	34,05	28,09	25,42	25,04
2011-05-24 15:49	33,21	36,68	33,92	28,23	25,49	25,06
2011-05-24 15:59	34,19	36,42	33,80	28,36	25,56	25,09
2011-05-24 16:09	33,24	36,17	33,69	28,47	25,63	25,12
2011-05-24 16:19	31,02	35,99	33,58	28,57	25,71	25,15
2011-05-24 16:29	29,29	35,26	33,47	28,66	25,78	25,19

Cas n° 83	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-05-31 15:31	29,28	27,05	25,42	23,19	22,91	23,17
2011-05-31 15:41	26,06	28,00	25,51	23,27	22,94	23,18
2011-05-31 15:51	22,25	27,73	25,72	23,34	22,97	23,18
2011-05-31 16:01	21,86	26,67	25,517	23,41	23,00	23,19
2011-05-31 16:11	22,83	25,94	25,61	23,48	23,03	23,20
2011-05-31 16:21	23,65	25,79	25,43	23,54	23,06	23,21
2011-05-31 16:31	23,85	25,517	25,32	23,60	23,09	23,22
2011-05-31 16:41	27,29	25,67	25,24	23,65	23,12	23,23
2011-05-31 16:51	28,01	26,27	25,21	23,70	23,15	23,25
2011-05-31 17:01	27,71	26,97	25,30	23,73	23,18	23,26
2011-05-31 17:11	27,88	27,57	25,47	23,77	23,21	23,27

Cas n° 51 et 52	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-09 09:37	19,23	21,35	20,18	20,517	22,46	23,40
2011-06-09 09:47	19,00	21,07	20,38	20,77	22,43	23,37
2011-06-09 09:57	20,00	20,92	20,48	20,80	22,40	23,34
2011-06-09 10:07	22,12	21,10	20,56	20,84	22,37	23,31
2011-06-09 10:17	23,36	21,68	20,67	20,88	22,34	23,29
2011-06-09 10:27	21,05	22,13	20,87	20,92	22,31	23,26
2011-06-09 10:37	24,58	22,26	21,07	20,96	22,29	23,23
2011-06-09 10:47	26,06	23,05	21,26	21,00	22,27	23,21
2011-06-09 10:57	23,81	23,81	21,56	21,05	22,25	23,19
2011-06-09 11:07	26,97	24,00	21,87	21,10	22,24	23,17

Cas n° 53 et 54	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-09 11:17	24,59	24,82	22,15	21,15	22,22	23,14
2011-06-09 11:27	24,18	25,01	22,48	21,22	22,21	23,12
2011-06-09 11:37	25,31	24,90	22,73	21,29	22,20	23,11
2011-06-09 11:47	22,81	25,11	22,91	21,36	22,20	23,09
2011-06-09 11:57	21,11	24,61	23,07	21,44	22,19	23,07
2011-06-09 12:07	20,51	23,97	23,09	21,52	22,19	23,06
2011-06-09 12:17	21,39	23,49	23,02	21,61	22,19	23,04
2011-06-09 12:27	24,76	23,46	22,93	21,69	22,19	23,03
2011-06-09 12:37	25,97	24,00	22,93	21,76	22,19	23,02

Cas n° 55 et 56	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-09 14:17	32,63	29,41	25,30	22,40	22,40	23,02
2011-06-09 14:27	25,37	29,04	25,67	22,49	22,42	23,02
2011-06-09 14:37	25,04	28,22	25,82	22,59	22,44	23,03
2011-06-09 14:47	23,99	27,53	25,81	22,69	22,46	23,03
2011-06-09 14:57	23,97	26,98	25,72	22,79	22,48	23,04
2011-06-09 15:07	22,95	26,52	25,60	22,89	22,50	23,04
2011-06-09 15:17	22,43	26,02	25,45	22,99	22,52	23,05
2011-06-09 15:27	21,91	25,53	25,29	23,07	22,54	23,06
2011-06-09 15:37	22,92	25,15	25,11	23,15	22,57	23,07

Cas n° 57 et 58	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-09 15:37	22,92	25,15	25,11	23,15	22,57	23,07
2011-06-09 15:47	23,51	25,08	24,95	23,21	22,60	23,08
2011-06-09 15:57	22,86	25,09	24,84	23,26	22,63	23,09
2011-06-09 16:07	22,89	24,99	24,77	23,30	22,65	23,10
2011-06-09 16:17	22,09	24,86	24,70	23,33	22,68	23,12
2011-06-09 16:27	21,88	24,63	24,62	23,35	22,71	23,13
2011-06-09 16:37	22,99	24,49	24,53	23,38	22,74	23,14
2011-06-09 16:47	24,33	24,53	24,45	23,39	22,76	23,16
2011-06-09 16:57	25,80	24,93	24,42	23,40	22,79	23,18

Cas n° 67 et 68	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-15 13:35	28,22	29,08	26,57	23,42	22,62	22,93
2011-06-15 13:45	28,52	29,05	26,65	23,49	22,64	22,94
2011-06-15 13:55	27,00	28,93	26,72	23,57	22,66	22,94
2011-06-15 14:05	27,44	28,66	26,517	23,65	22,68	22,94
2011-06-15 14:15	27,55	28,46	26,517	23,72	22,70	22,95
2011-06-15 14:25	30,54	28,56	26,73	23,79	22,72	22,96
2011-06-15 14:35	27,58	28,85	26,78	23,86	22,74	22,96
2011-06-15 14:45	29,54	28,95	26,85	23,93	22,77	22,98
2011-06-15 14:55	32,16	29,18	26,94	23,99	22,79	22,98
2011-06-15 15:05	33,98	29,49	27,04	24,04	22,82	23,00

Cas n° 65 et 66	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-16 14:15	29,50	31,98	29,15	23,73	22,23	22,64
2011-06-16 14:25	31,32	31,69	29,03	23,88	22,27	22,66
2011-06-16 14:35	31,90	31,517	28,96	24,01	22,32	22,67
2011-06-16 14:45	26,99	31,88	28,94	24,14	22,37	22,69
2011-06-16 14:55	23,96	30,83	28,93	24,26	22,41	22,71
2011-06-16 15:05	23,24	29,60	28,72	24,36	22,46	22,73
2011-06-16 15:15	26,92	28,77	28,40	24,46	22,51	22,517
2011-06-16 15:25	30,46	28,96	28,09	24,54	22,57	22,77
2011-06-16 15:35	31,61	29,72	27,97	24,61	22,62	22,80

Cas n° 69 et 70	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-17 15:35	17,27	18,40	19,61	20,88	21,88	22,70
2011-06-17 15:45	17,84	18,67	19,57	20,86	21,86	22,69
2011-06-17 15:55	18,73	19,00	19,59	20,84	21,85	22,68
2011-06-17 16:05	18,26	19,09	19,66	20,82	21,83	22,66
2011-06-17 16:15	18,69	19,23	19,70	20,80	21,82	22,65
2011-06-17 16:25	17,05	19,20	19,517	20,78	21,80	22,63
2011-06-17 16:35	16,71	18,88	19,76	20,77	21,79	22,62
2011-06-17 16:45	16,65	18,63	19,71	20,517	21,77	22,61

Cas V3 et V4	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-21 10:05	22,51	19,99	19,45	19,56	20,30	21,09
2011-06-21 10:15	21,90	20,61	19,59	19,57	20,29	21,08
2011-06-21 10:25	21,82	20,81	19,78	19,58	20,28	21,07
2011-06-21 10:35	22,52	20,71	19,93	19,60	20,27	21,06
2011-06-21 10:45	22,44	20,93	20,03	19,62	20,26	21,05
2011-06-21 10:55	23,49	21,21	20,16	19,65	20,26	21,04
2011-06-21 11:05	23,43	21,57	20,31	19,68	20,25	21,03

Cas n° 71 et 72	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-22 09:25	22,77	21,14	19,85	19,85	20,63	21,37
2011-06-22 09:35	22,81	21,58	20,08	19,86	20,62	21,36
2011-06-22 09:45	24,48	22,01	20,32	19,87	20,60	21,35
2011-06-22 09:55	22,11	22,54	20,57	19,89	20,59	21,34
2011-06-22 10:05	23,14	22,52	20,81	19,93	20,58	21,32
2011-06-22 10:15	23,55	22,517	20,99	19,96	20,57	21,31
2011-06-22 10:25	23,63	23,15	21,18	20,01	20,56	21,30
2011-06-22 10:35	24,30	23,43	21,39	20,06	20,55	21,29
2011-06-22 10:45	23,64	23,58	21,58	20,11	20,54	21,28
2011-06-22 10:55	23,92	23,88	21,76	20,16	20,54	21,27

Cas n° 73 et 74	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-22 15:15	35,67	35,39	30,36	23,52	21,20	21,43
2011-06-22 15:25	32,00	34,94	30,45	23,69	21,26	21,46
2011-06-22 15:35	22,27	34,03	30,45	23,86	21,32	21,48
2011-06-22 15:45	29,38	32,31	30,28	24,02	21,39	21,51
2011-06-22 15:55	32,63	32,19	29,98	24,17	21,45	21,55
2011-06-22 16:05	33,68	32,54	29,81	24,31	21,52	21,58
2011-06-22 16:15	33,25	32,62	29,78	24,43	21,59	21,62
2011-06-22 16:25	33,62	32,68	29,77	24,54	21,66	21,65
2011-06-22 16:35	32,67	32,66	29,78	24,63	21,73	21,69

Cas n° 61 et 62	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-29 09:19	20,16	20,80	20,00	21,74	23,72	24,43
2011-06-29 09:29	21,07	21,06	20,25	21,73	23,68	24,40
2011-06-29 09:39	21,08	21,28	20,47	21,73	23,64	24,37
2011-06-29 09:49	21,53	21,50	20,66	21,74	23,60	24,33
2011-06-29 09:59	22,49	21,90	20,84	21,517	23,57	24,31
2011-06-29 10:09	22,48	22,53	21,07	21,78	23,53	24,28
2011-06-29 10:19	22,67	23,10	21,35	21,80	23,50	24,25
2011-06-29 10:29	22,27	23,64	21,65	21,84	23,47	24,22
2011-06-29 10:39	23,03	24,10	21,95	21,88	23,44	24,19

Cas n° 63 et 64	Température					
Date et heure	T° Surface	T° à 4 cm	T° à 8 cm	T° à 23 cm	T° à 38 cm	T° à 48 cm
2011-06-29 14:39	34,56	34,17	30,22	24,76	23,57	23,89
2011-06-29 14:49	34,68	34,30	30,28	24,93	23,62	23,90
2011-06-29 14:59	39,18	34,55	30,37	25,10	23,66	23,91
2011-06-29 15:09	44,27	34,79	30,51	25,26	23,71	23,93
2011-06-29 15:19	44,10	35,77	30,70	25,41	23,77	23,94
2011-06-29 15:29	46,19	36,72	31,01	25,56	23,82	23,96
2011-06-29 15:39	38,51	37,28	31,41	25,70	23,88	23,98
2011-06-29 15:49	35,99	36,96	31,73	25,84	23,93	24,00
2011-06-29 15:59	35,83	36,53	31,91	25,98	23,99	24,02
2011-06-29 16:09	36,08	36,25	31,98	26,13	24,05	24,05
2011-06-29 16:19	35,55	36,06	32,03	26,28	24,11	24,08
2011-06-29 16:29	34,27	35,80	32,06	26,43	24,17	24,10
2011-06-29 16:39	34,88	35,43	32,04	26,57	24,23	24,13
2011-06-29 16:49	34,83	35,24	32,00	26,71	24,29	24,16

Annexe 5

Protocole d'installation des carottes instrumentées



Étape 1 : Positionner le capteur

- Marquer la position sur la chaussée.
- Forer sur la hauteur de la couche avec un carottier ayant 2 mm de diamètre de plus que la carotte instrumentée.



Étape 2 : Sculpter le trou de forage

- S'assurer de la profondeur du trou de forage à l'aide d'un galon à mesurer. Forer quelques millimètres supplémentaires dans la fondation granulaire afin de permettre un ajustement de la hauteur.
- Effectuer une rainure allant du trou jusqu'à l'accotement de la route en suivant un tracé arrondi afin de réduire les risques d'amorce de fissures transversales de la chaussée.
- Faire converger l'ensemble des rainures en un même point de l'accotement pour centraliser les jauges.
- Élargir la rainure au niveau du trou en forme de V pour permettre un passage progressif du câblage de la carotte afin de limiter la torsion sur le câble.



Étape 3 : Ajuster et préparer le trou de forage

- Tamiser une partie du sol de fondation.



Étape 3 (suite) : Ajuster et préparer le trou de forage

- Nettoyer le trou à l'aide d'un jet d'air sous pression. Retirer au besoin les gros granulats pouvant se trouver au fond du trou.
- Mesurer la profondeur du trou
- Ajuster la hauteur du trou à l'aide du sol tamisé afin d'assurer la planéité du sol. Laisser une hauteur de 1 cm entre le haut de la carotte et le haut de la couche d'enrobé. Compacter le sol ajouté.
- Nettoyer les parois du trou afin d'éliminer les poussières et autres éléments pouvant réduire l'efficacité de la colle époxy.
- Bien sécher le trou de forage avant la mise en place de la carotte.



Étape 4 : Contrôler le forage et la position du capteur

- Placer la carotte dans le trou de forage. Bien veiller à positionner les jauges longitudinales et transversales dans leurs directions respectives.



Étape 4 (suite): Contrôler le forage et la position du capteur

- Imposer des petits mouvements à la carotte dans le trou pour stabiliser sa position.
- Contrôler le passage adéquat des câbles au-dessus de la carotte
- Placer les câbles sur toute la longueur de la rainure et s'assurer qu'ils ne dépassent pas à la surface de la chaussée. Au besoin augmenter la profondeur de la rainure.



Étape 5 : Aligner la carotte

- Positionner une règle pour contrôler l'alignement des carottes les unes par rapport aux autres dans le cas où plusieurs capteurs sont installés sur une même structure.
- Vérifier le parallélisme avec la ligne d'accotement de la route où avec un repère servant de référence.



Étape 6 : Sceller la carotte

- Vérifier, à l'aide d'un appareil d'acquisition (PicoSens ou ProSens) la qualité du signal de chaque jauge.
- Noter la position des jauges dans la structure (orientation, profondeur, facteur de jauge)
- Mettre du scellant à fissure dans les rainures extérieures des rondelles polymères.
- Mettre de la colle époxy dans les rainures de la carotte d'asphalte (rainure où circulent les câbles).
- Placer la carotte dans le trou de forage, ajuster l'alignement du capteur, placer les câbles dans les rainures et les fixer à l'aide de ruban adhésif.
- Insérer de la colle époxy tout autour de la carotte d'enrobée tout en imposant des petits mouvements à la carotte pour permettre l'écoulement de la colle sur toute la hauteur de la paroi.
- Itérer l'opération jusqu'à saturation du trou.
- Imposer un blocage des câbles dans la rainure prévue à cet effet et attendre le séchage de la colle. Penser à extraire le dispositif de blocage avant le durcissement complet de la colle.



Étape 7 : Ranger le câblage

- Dérouler l'ensemble du câblage et les fixer correctement à la rainure lors du séchage de la colle.
- Placer le câblage dans une gaine de protection. Prévoir des gaines individuelles si tout le câblage ne peut pas être placé dans la même protection.



Étape 7 : Fixer le câblage

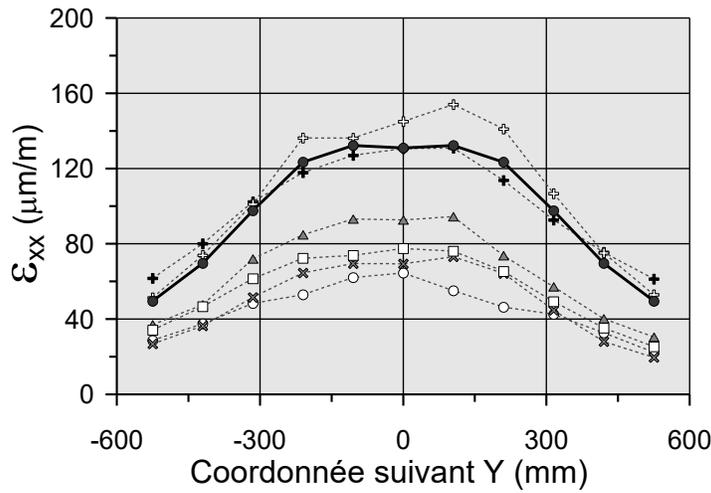
- Disposer du scellant sur l'ensemble des rainures de câblage ainsi qu'au niveau des jauges.
- Bien sceller les sorties au niveau de l'accotement pour assurer une bonne protection et une bonne étanchéité.
- Placer l'ensemble des jauges dans le boîtier accoté à la route prévu à cet effet.

Annexe 6

Résultats : Bassin des déformations

**Bassin des déformations transversales et longitudinales
au bas de la couche de GB 0/14 de la section A et au bas
de la couche de BBSG 0/10 de la section B.**

Section A - Cas expérimental N° 11



Capteurs longitudinaux:

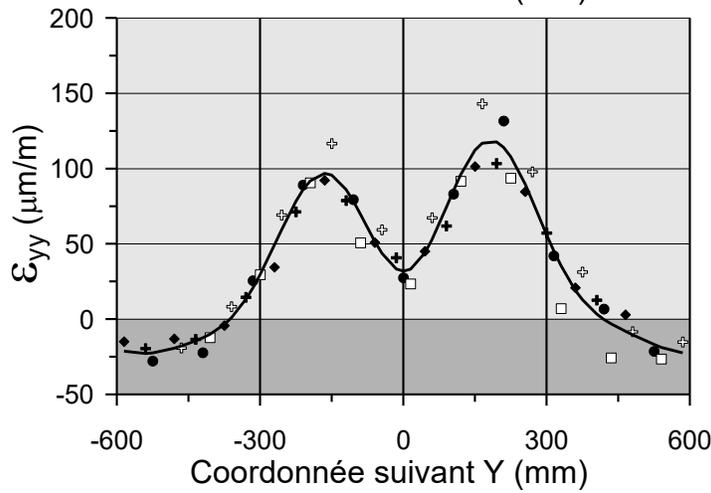
Plexiglas®: Aluminium:

---▲--- L2 ---○--- AL2
 ---×--- L3 ---□--- AL4

TML: Fibre optique:
 ---+--- TML ---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

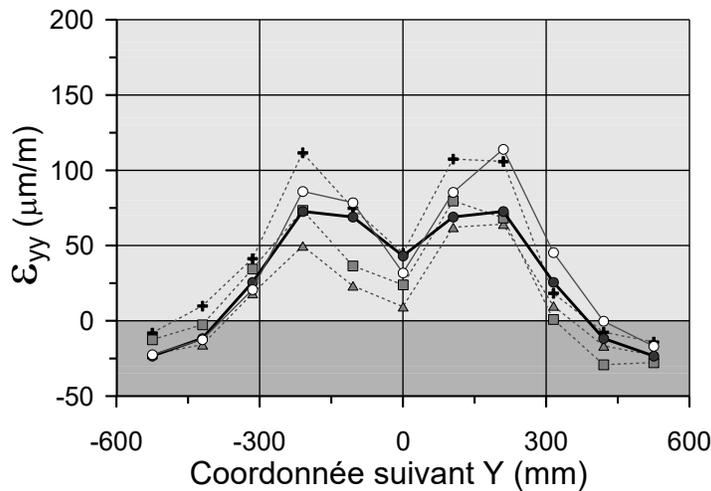


Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1
 ◆ TB 2
 ● TB 3
 + TB 4
 □ TB 5

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T1
 ---■--- T3

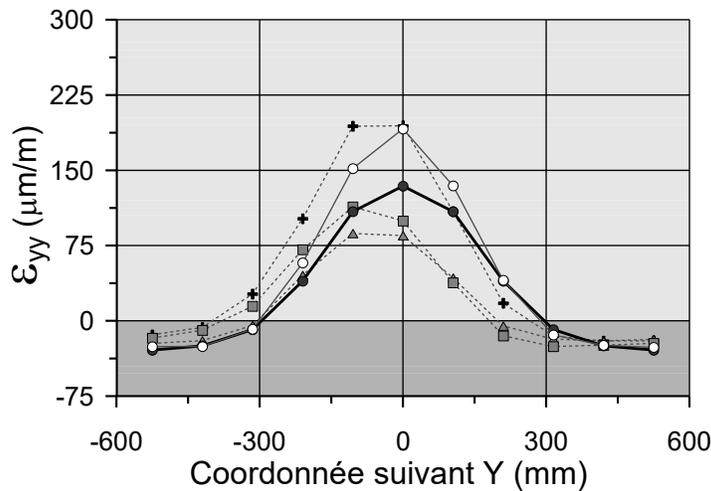
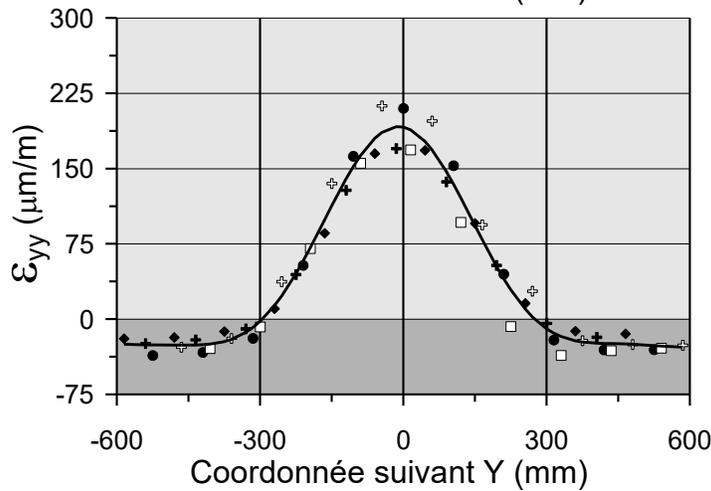
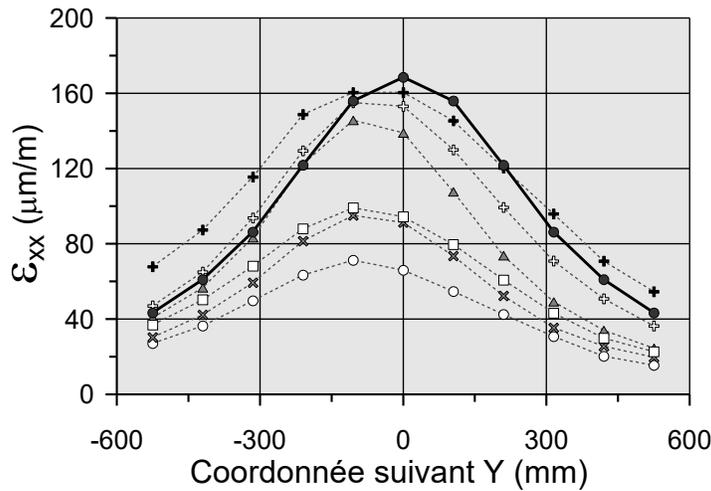
Fibre optique:

---+--- TBC
 ---○--- TB : points
 de l'interpolation

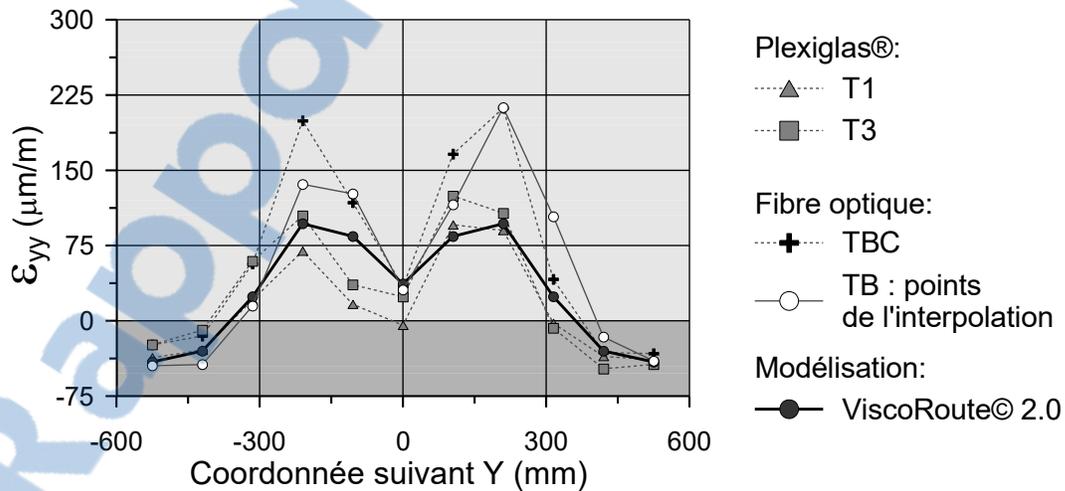
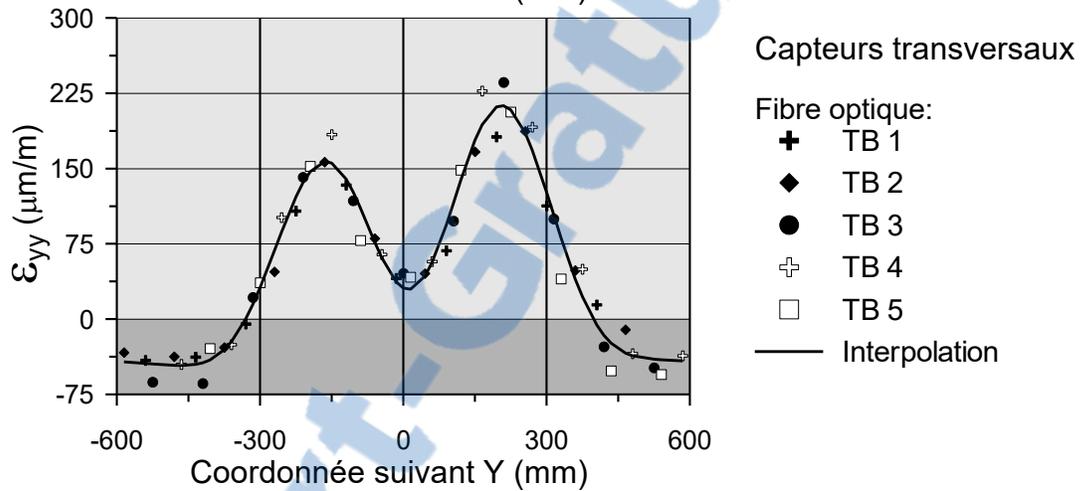
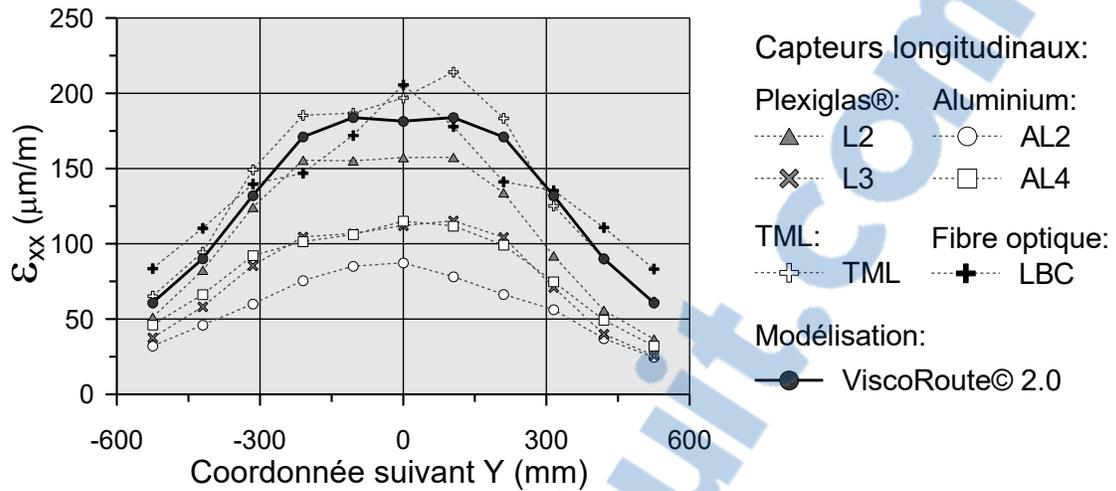
Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

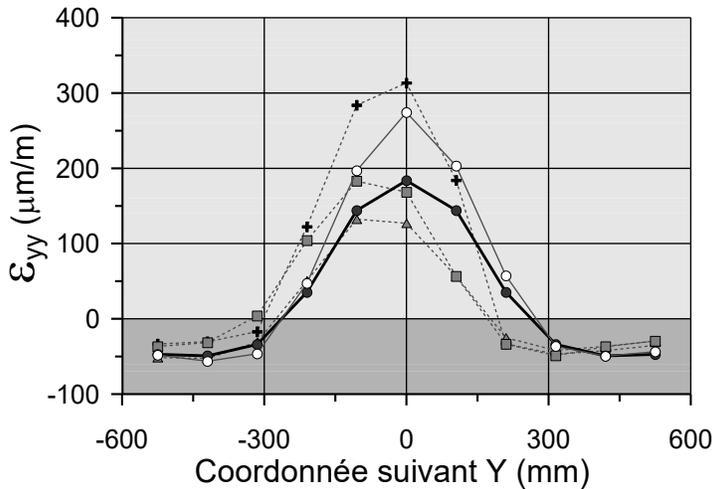
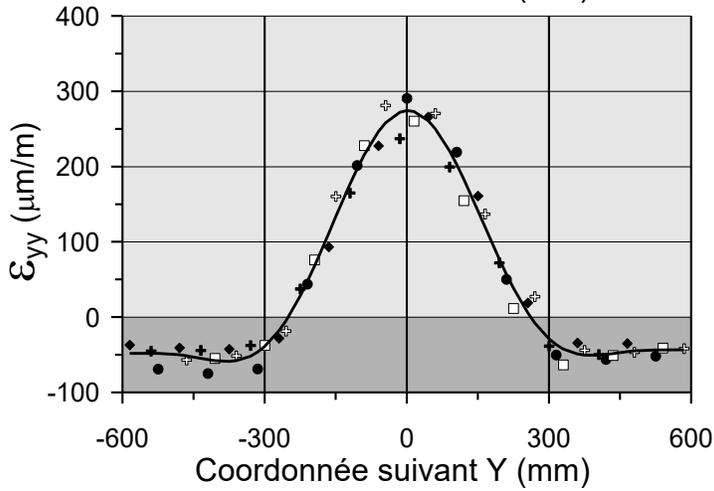
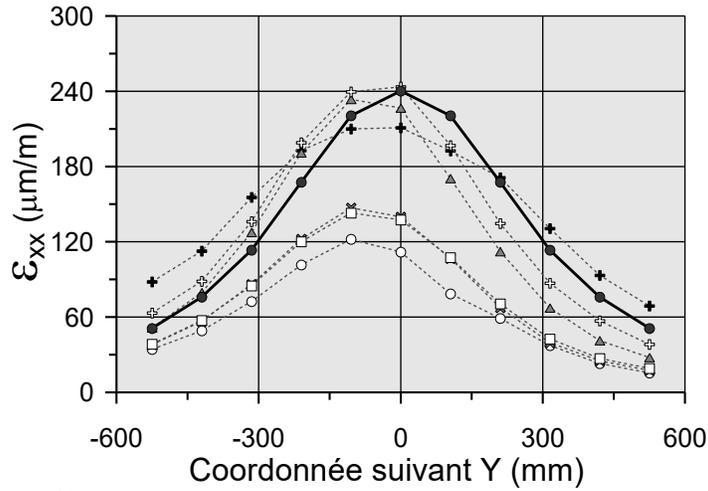
Section A - Cas expérimental N° 12



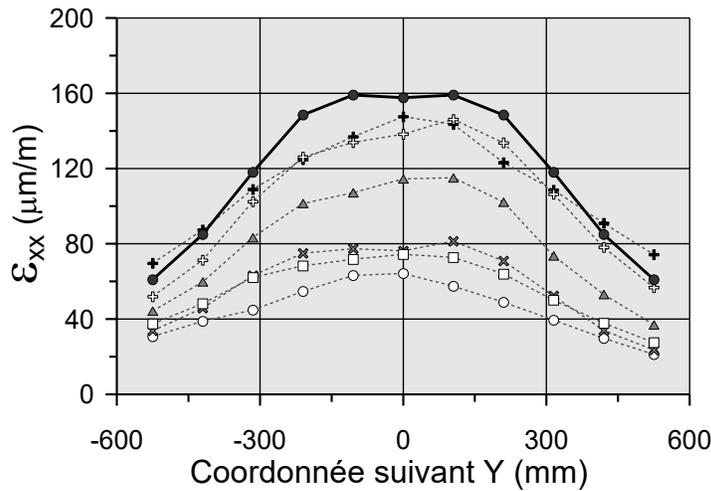
Section A - Cas expérimental N° 13



Section A - Cas expérimental N° 14



Section A - Cas expérimental N° 21



Capteurs longitudinaux:

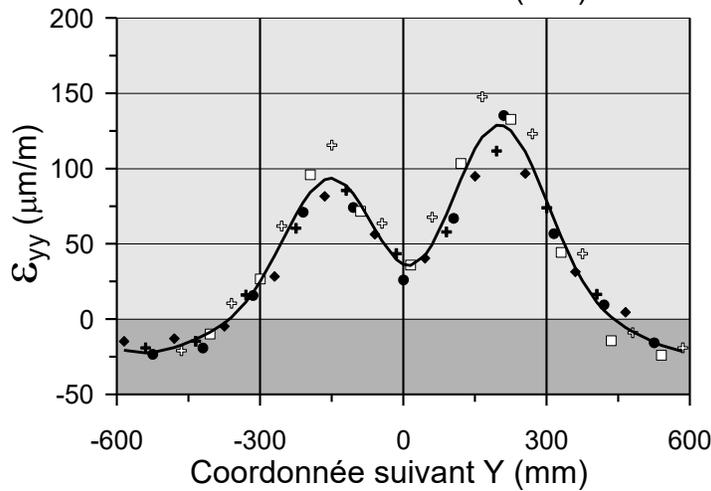
Plexiglas®: Aluminium:

---▲--- L2 ---○--- AL2
---×--- L3 ---□--- AL4

TML: Fibre optique:
---+--- TML ---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

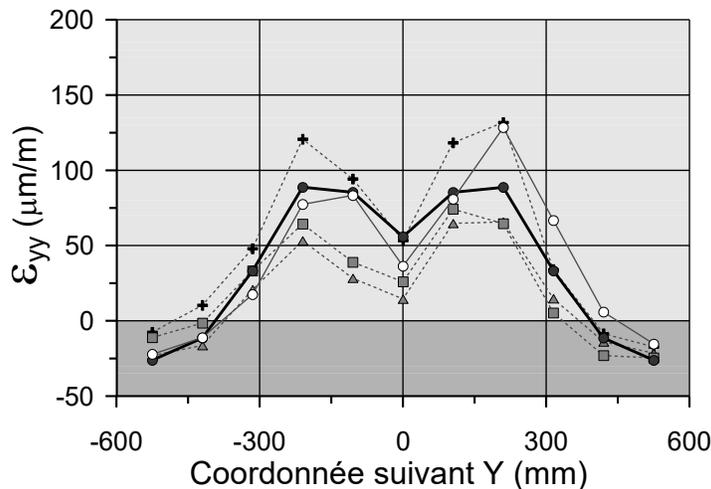


Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1
◆ TB 2
● TB 3
+ TB 4
□ TB 5

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T1
---■--- T3

Fibre optique:

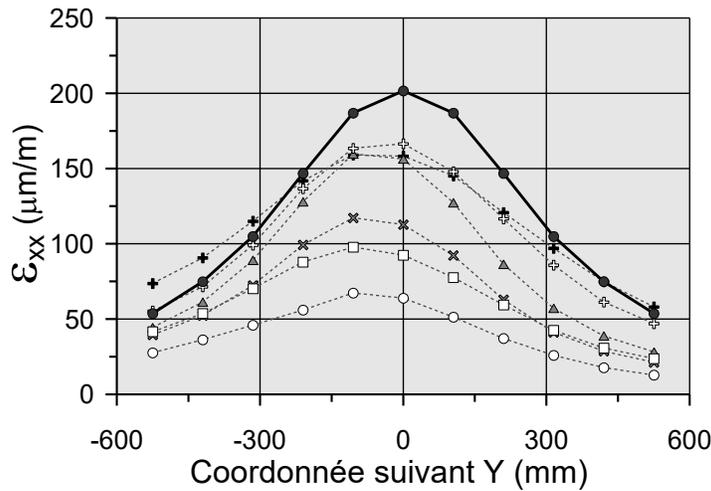
---+--- TBC
—○— TB : points
de l'interpolation

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Section A - Cas expérimental N° 22



Capteurs longitudinaux:

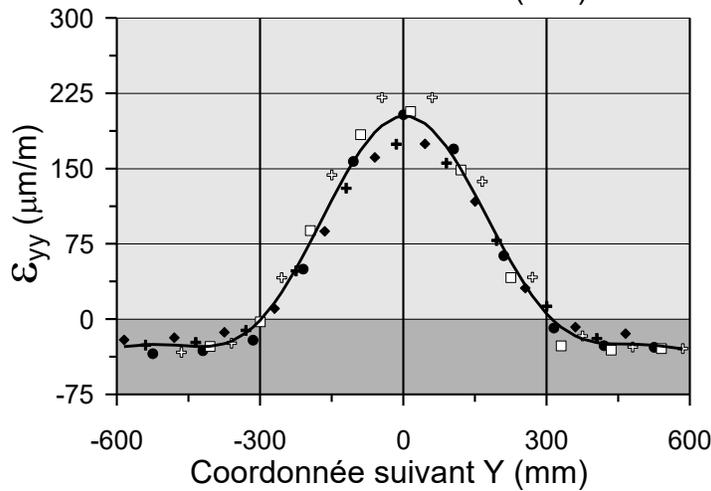
Plexiglas®: Aluminium:

---▲--- L2 ---○--- AL2
 ---×--- L3 ---□--- AL4

TML: Fibre optique:
 ---+--- TML ---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

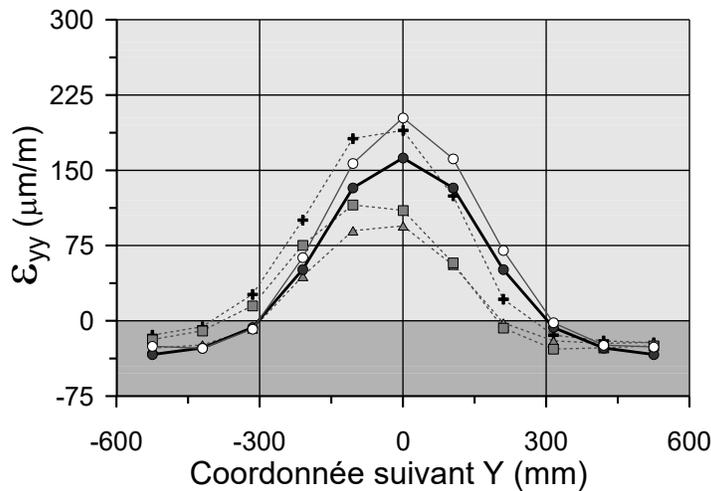


Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1
 ◆ TB 2
 ● TB 3
 + TB 4
 □ TB 5

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T1
 ---■--- T3

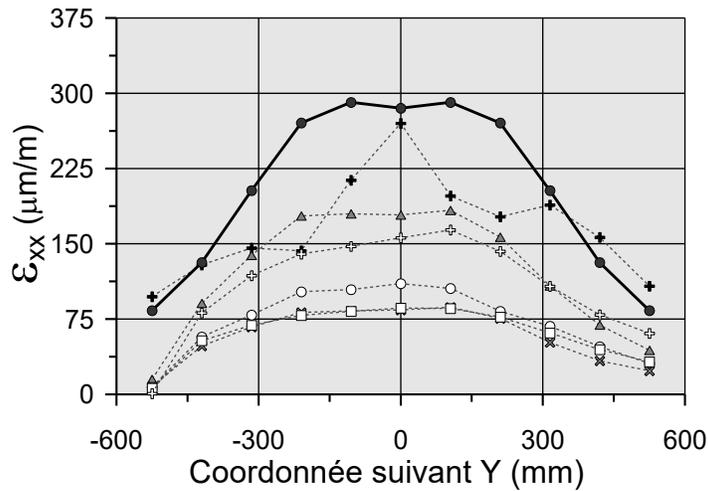
Fibre optique:

---+--- TBC
 ---○--- TB : points
 de l'interpolation

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

Section A - Cas expérimental N° 23



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®: Aluminium:

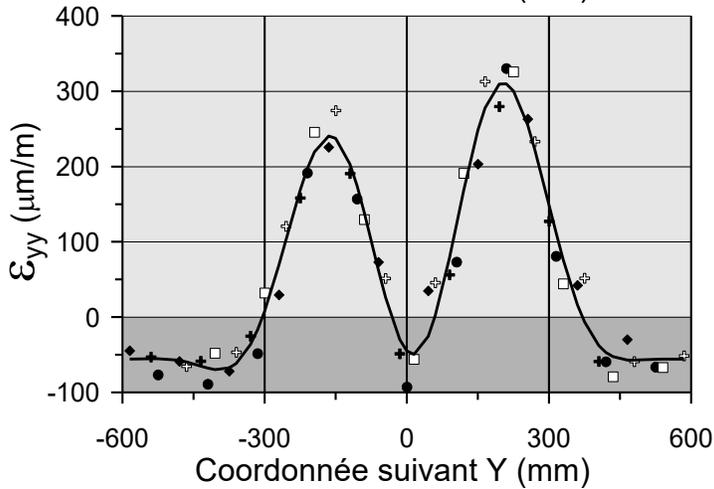
---▲--- L2 ---○--- AL2
 ---×--- L3 ---□--- AL4

TML: Fibre optique:

---+--- TML ---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

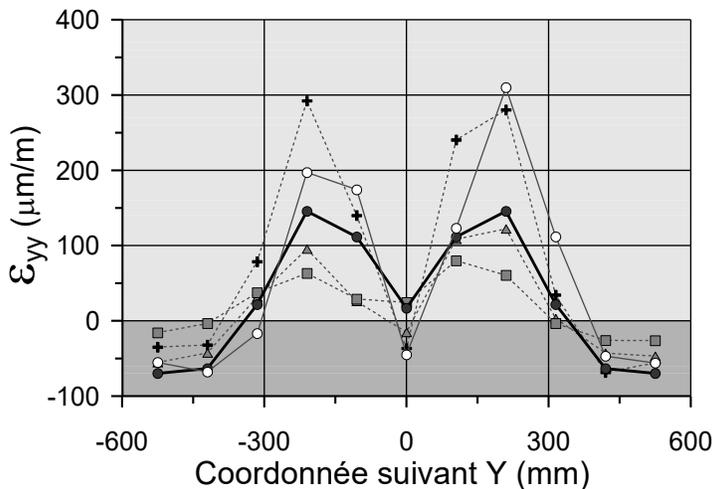
◆ TB 2

● TB 3

+ TB 4

□ TB 5

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T1

---■--- T3

Fibre optique:

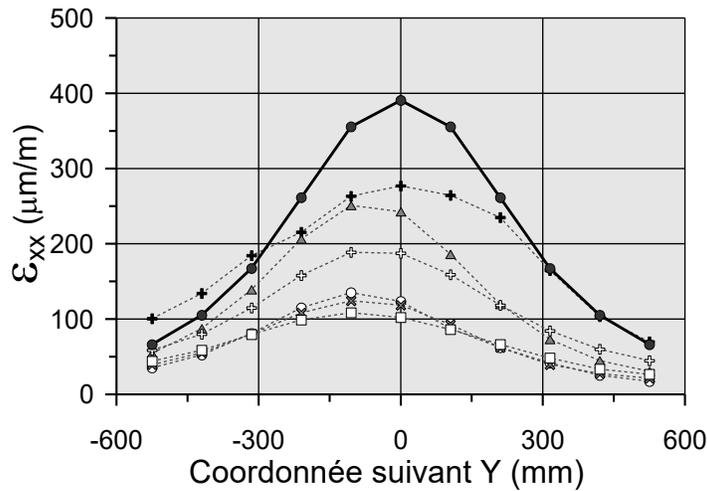
---+--- TBC

—○— TB : points
de l'interpolation

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

Section A - Cas expérimental N° 24



Capteurs longitudinaux:

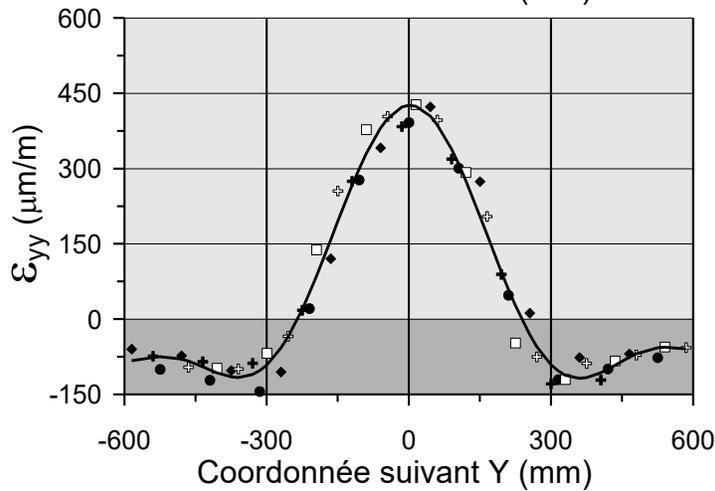
Plexiglas®: Aluminium:

---▲--- L2 ---○--- AL2
 ---×--- L3 ---□--- AL4

TML: Fibre optique:
 ---+--- TML ---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

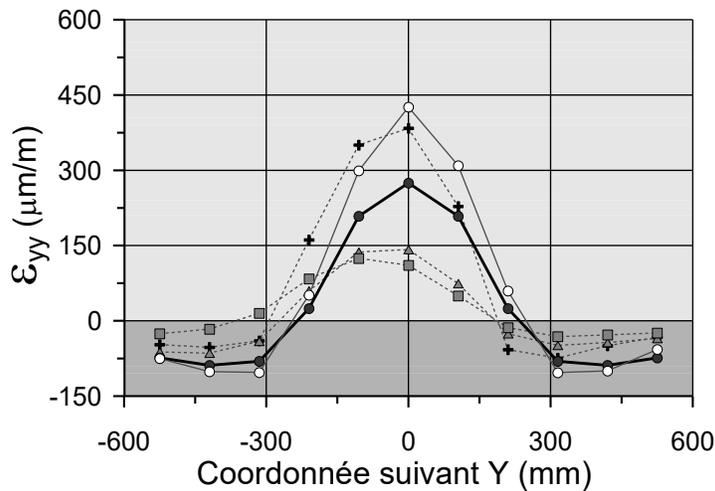


Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1
 ◆ TB 2
 ● TB 3
 + TB 4
 □ TB 5

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T1
 ---■--- T3

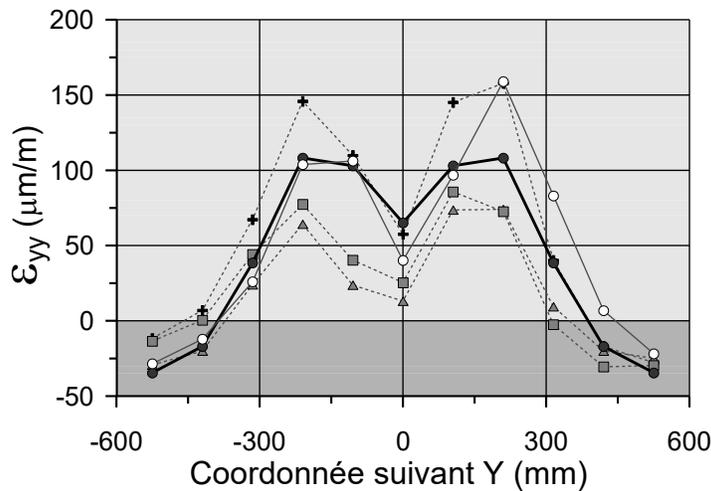
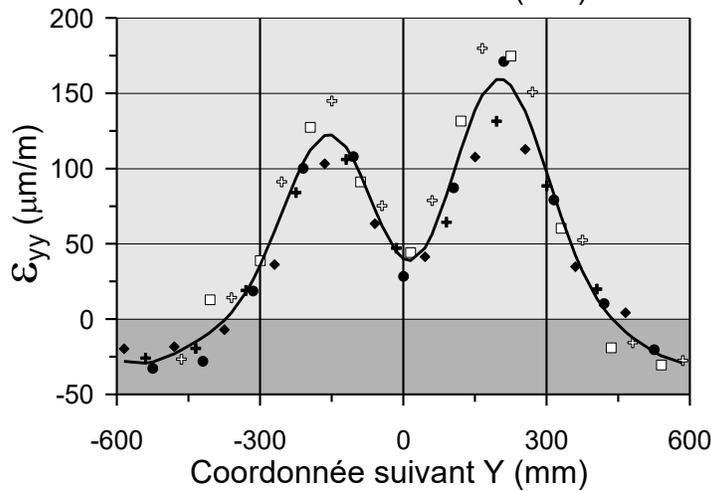
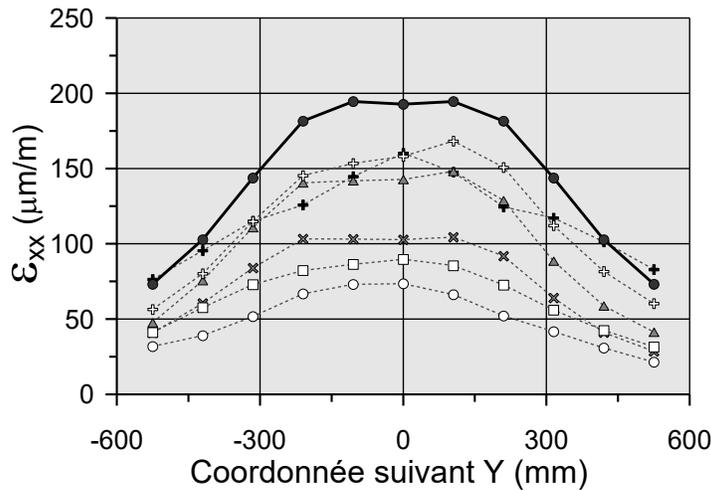
Fibre optique:

+ TBC
 ○ TB : points de l'interpolation

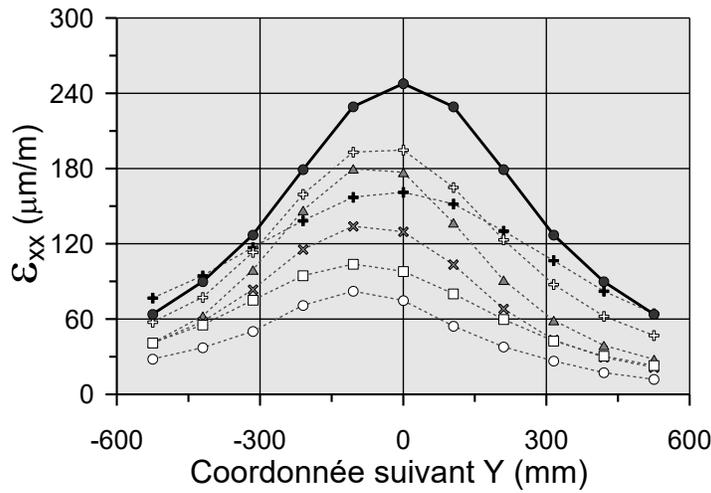
Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

Section A - Cas expérimental N° 31



Section A - Cas expérimental N° 32



Capteurs longitudinaux:

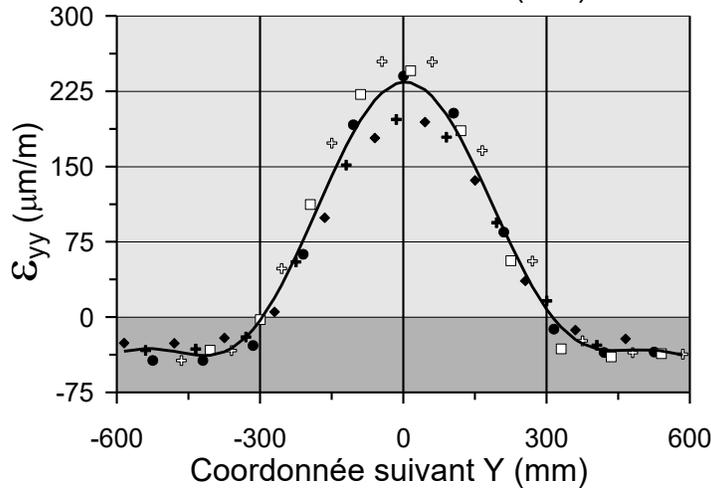
Plexiglas®: Aluminium:

---▲--- L2 ---○--- AL2
 ---×--- L3 ---□--- AL4

TML: Fibre optique:
 ---+--- TML ---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

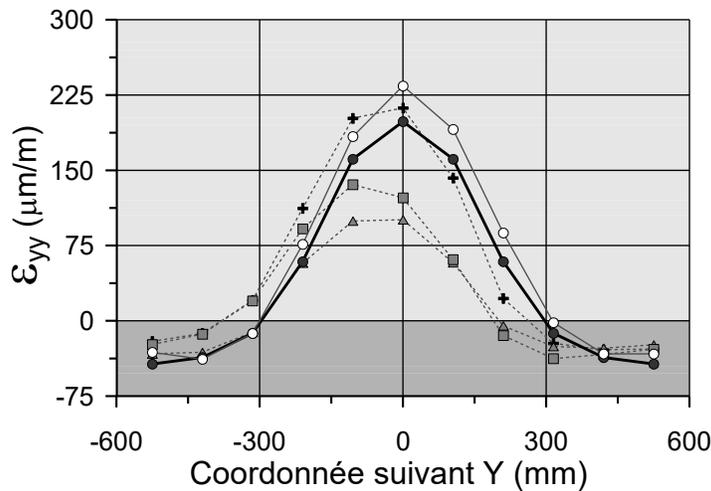


Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1
 ◆ TB 2
 ● TB 3
 + TB 4
 □ TB 5

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T1
 ---■--- T3

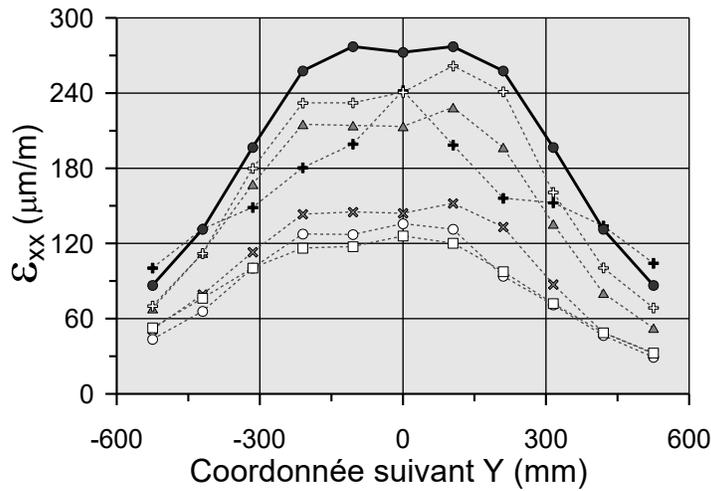
Fibre optique:

---+--- TBC
 ---○--- TB : points
 de l'interpolation

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

Section A - Cas expérimental N° 33



Capteurs longitudinaux:

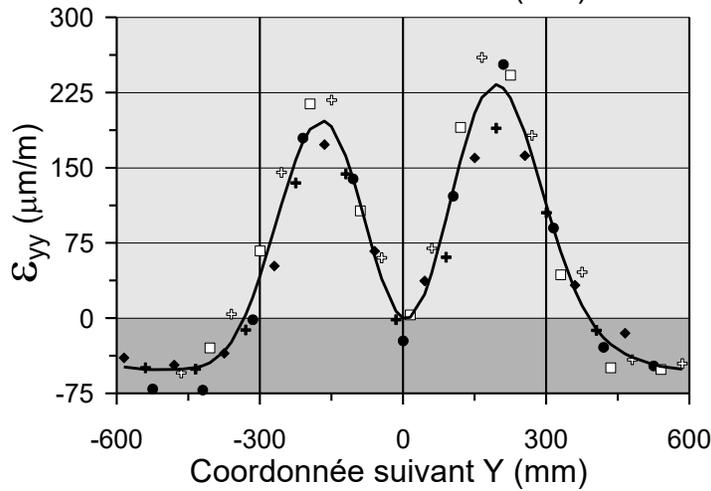
Plexiglas®: Aluminium:

---▲--- L2 ---○--- AL2
 ---×--- L3 ---□--- AL4

TML: Fibre optique:
 ---+--- TML ---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

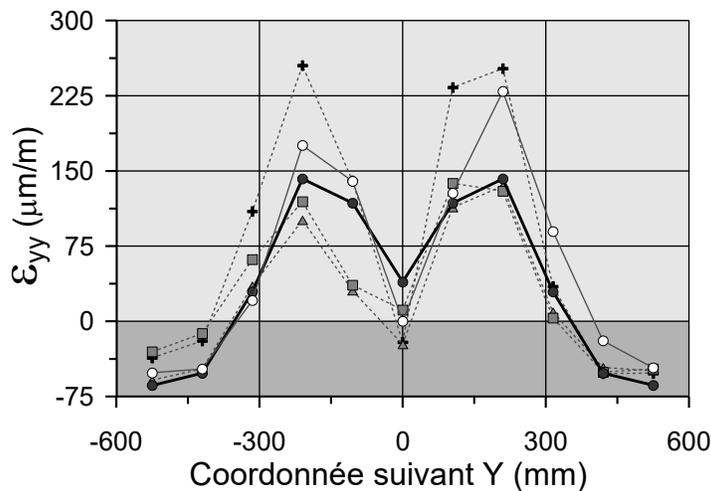


Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1
 ◆ TB 2
 ● TB 3
 + TB 4
 □ TB 5

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T1
 ---■--- T3

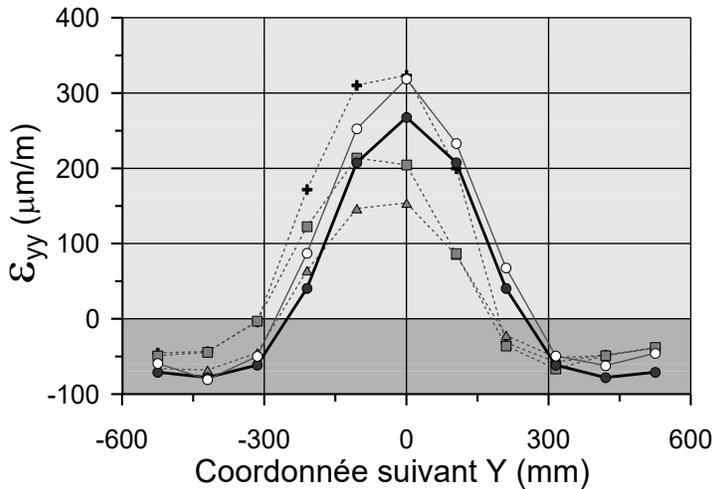
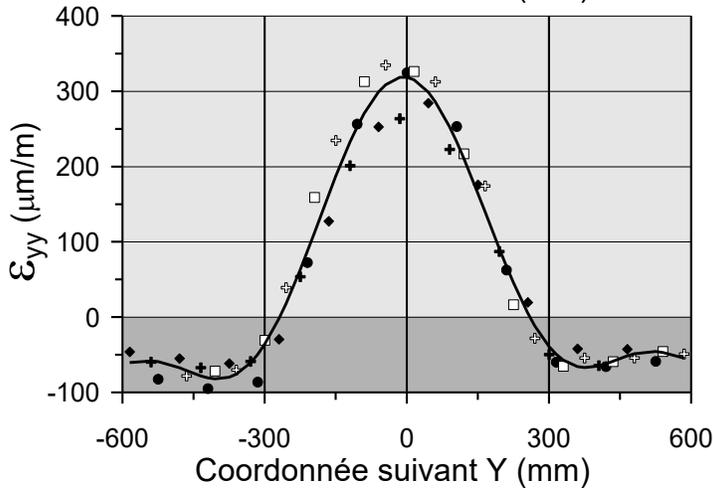
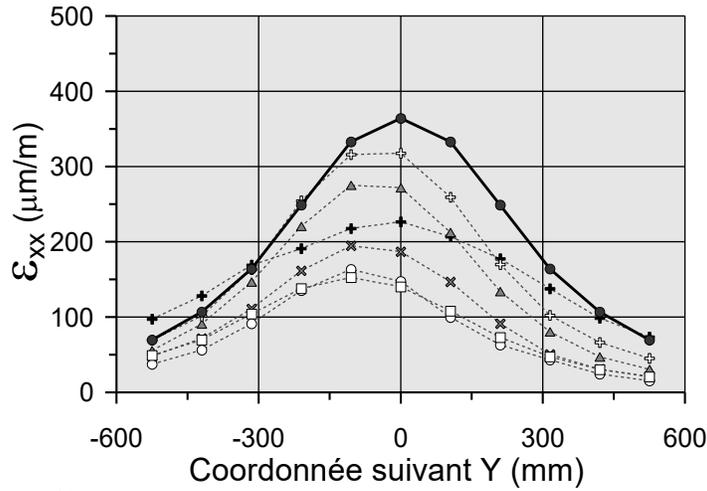
Fibre optique:

---+--- TBC
 ---○--- TB : points
 de l'interpolation

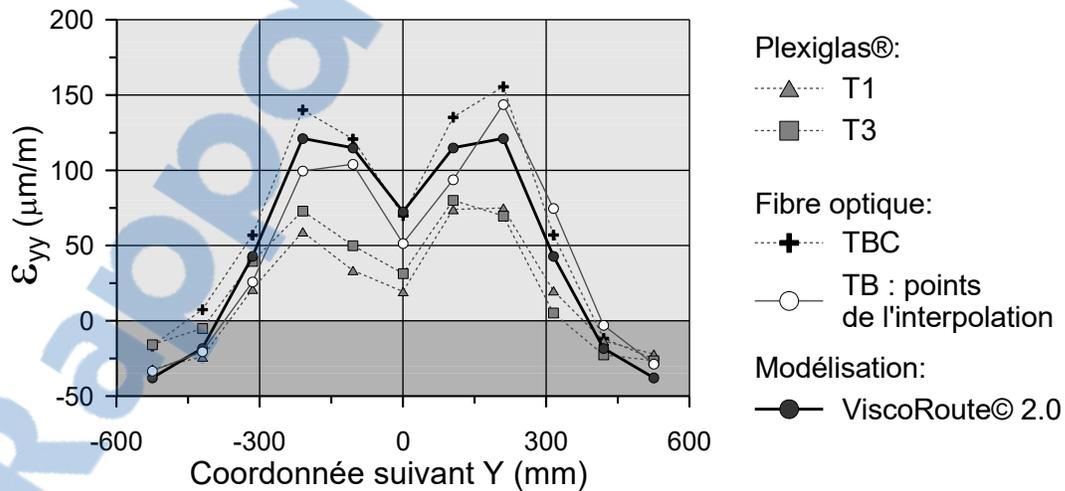
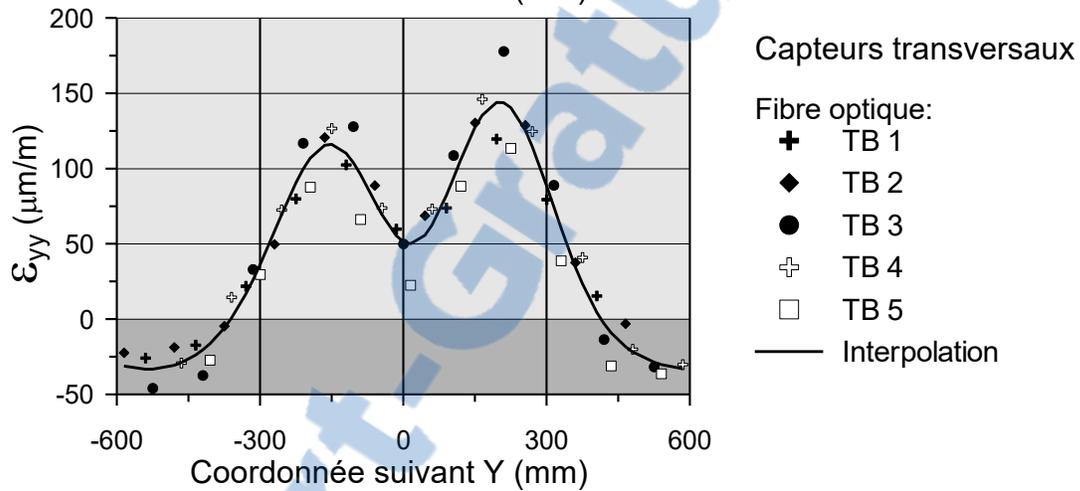
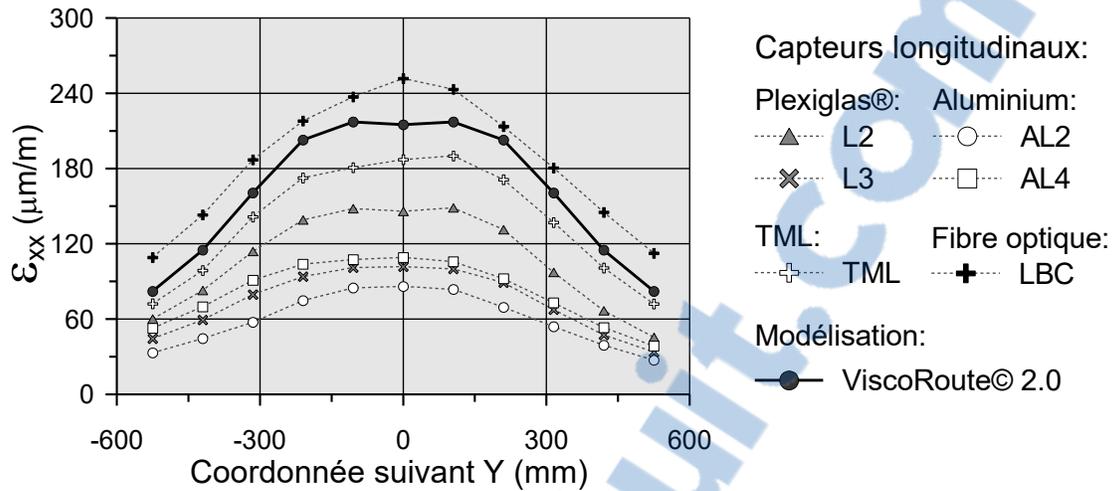
Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

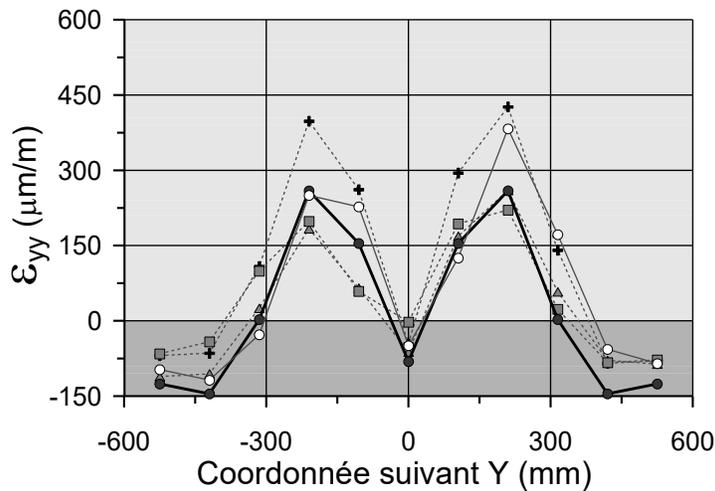
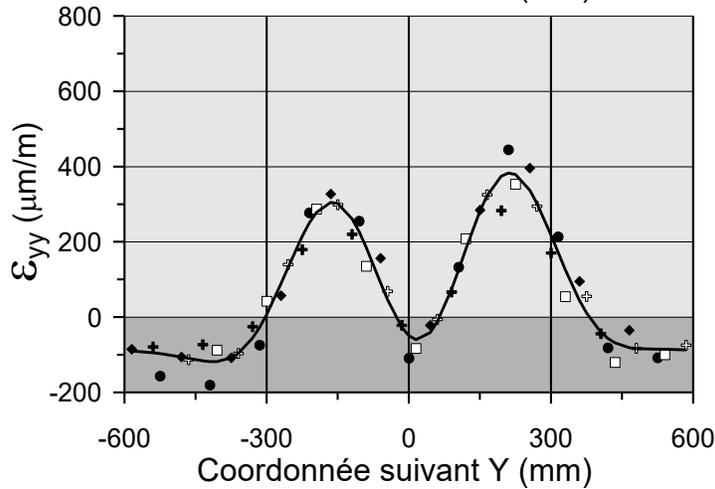
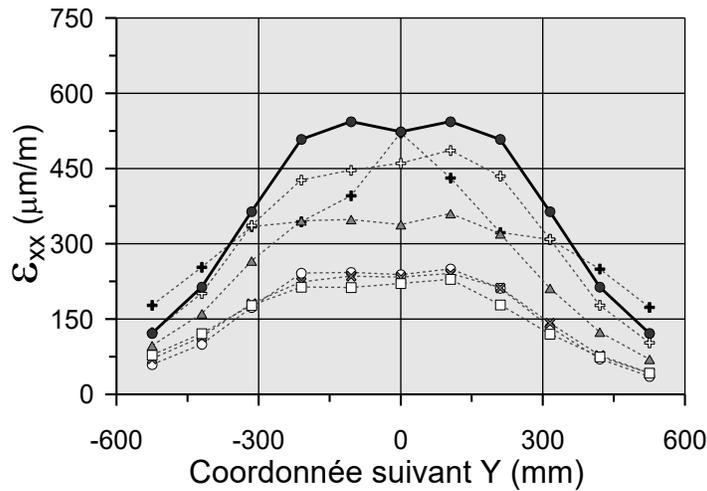
Section A - Cas expérimental N° 34



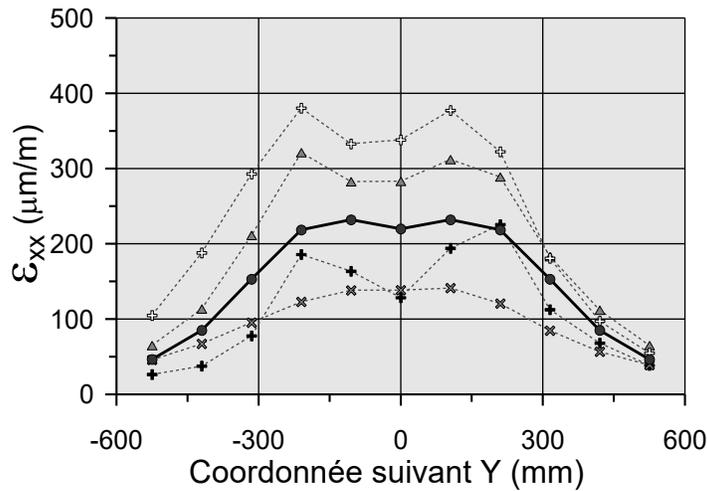
Section A - Cas expérimental N° 41



Section A - Cas expérimental N° 42



Section B - Cas expérimental N° 51



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®:

---▲--- L7

---×--- L9

TML:

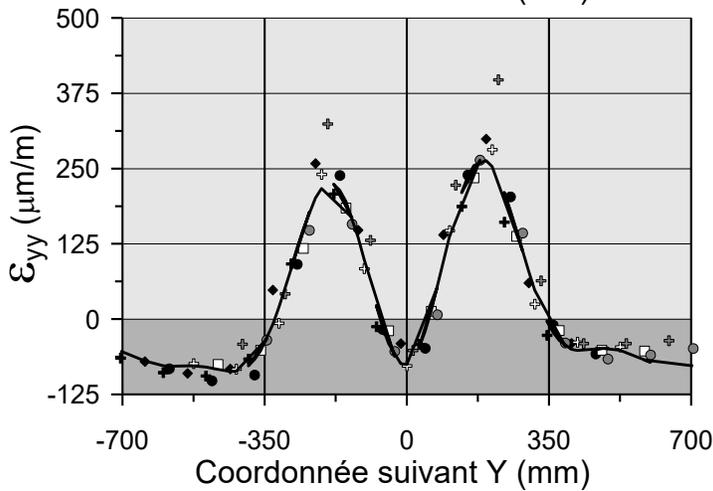
Fibre optique:

---+--- TML

---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

◆ TB 2

● TB 3

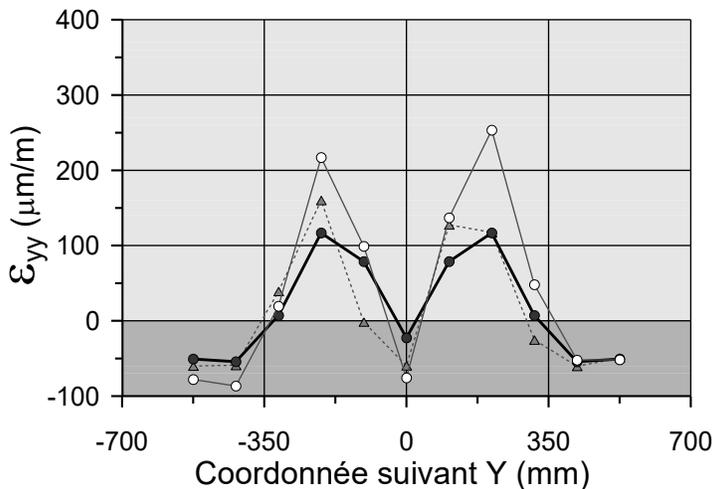
+ TB 4

□ TB 5

+ TB 6

● TB 7

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T7

Fibre optique:

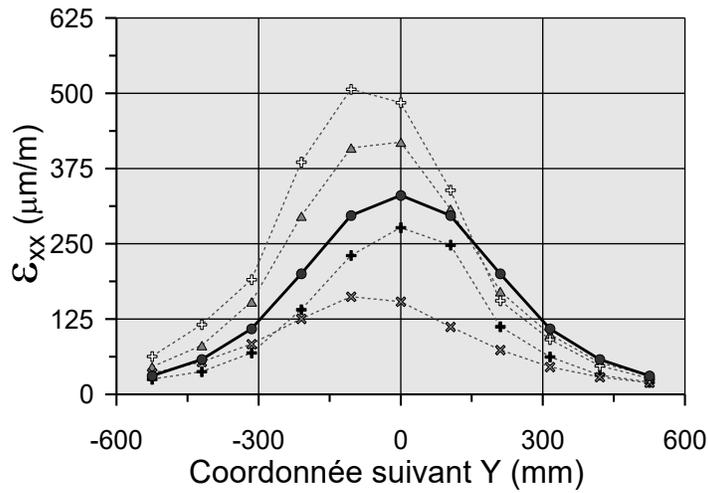
○ TB : points de l'interpolation

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Section B - Cas expérimental N° 52



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®:

---▲--- L7

---×--- L9

TML:

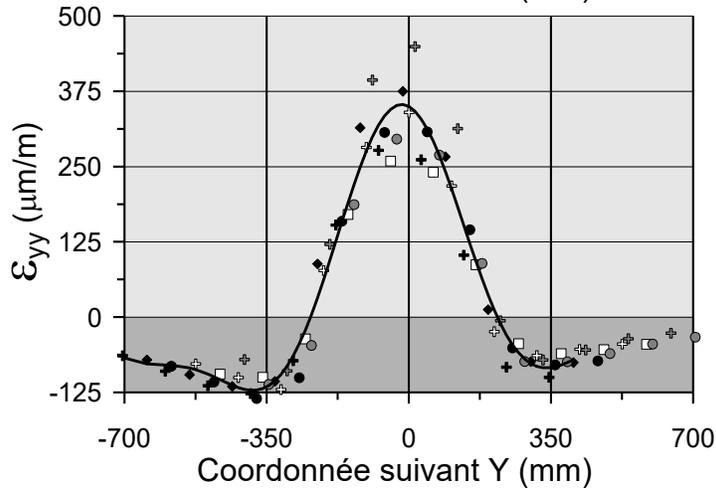
Fibre optique:

---+--- TML

---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

◆ TB 2

● TB 3

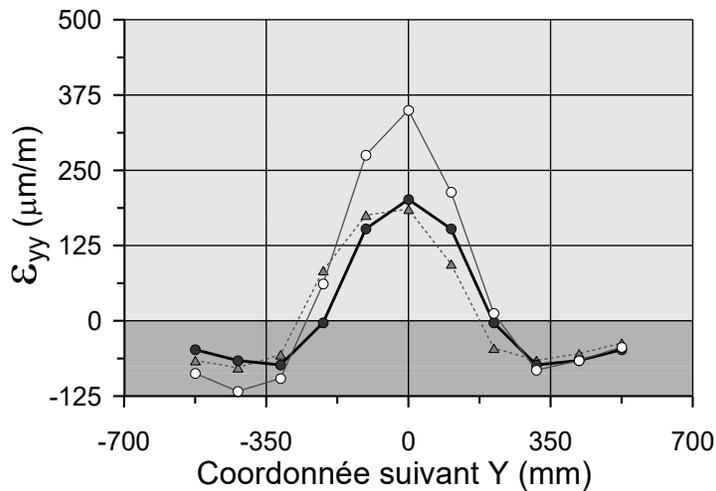
+ TB 4

□ TB 5

+ TB 6

● TB 7

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T7

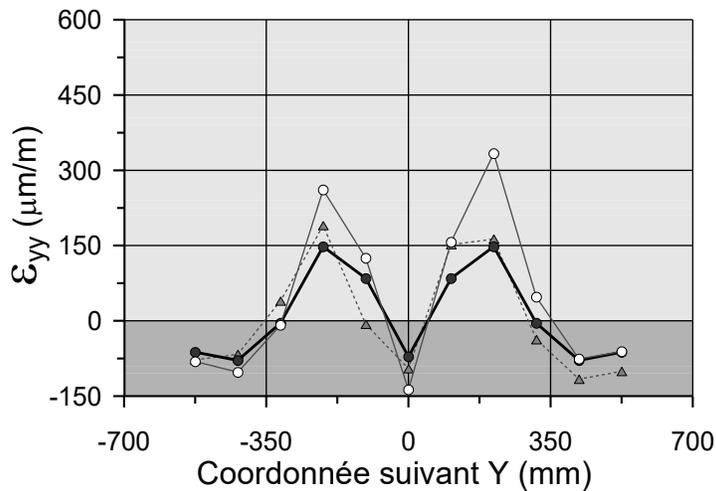
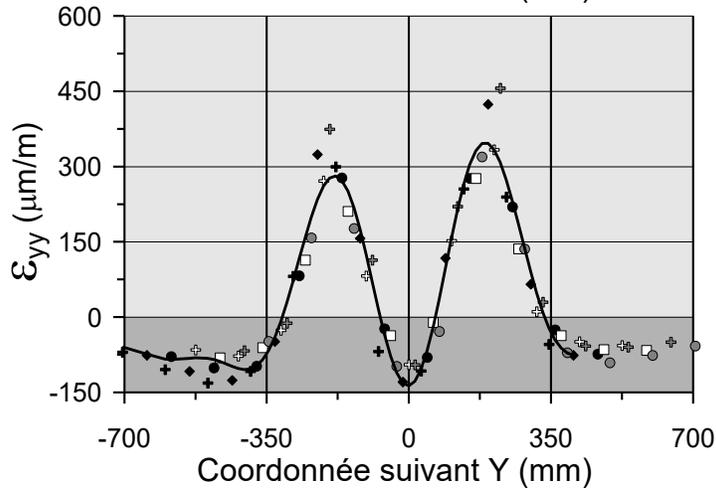
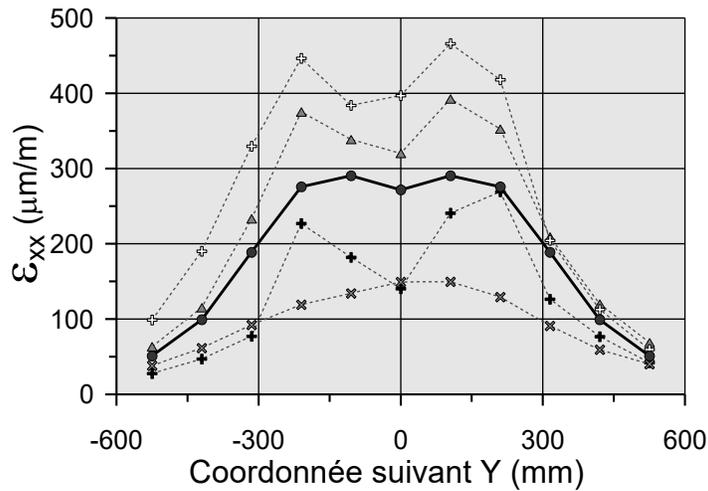
Fibre optique:

○ TB : points de l'interpolation

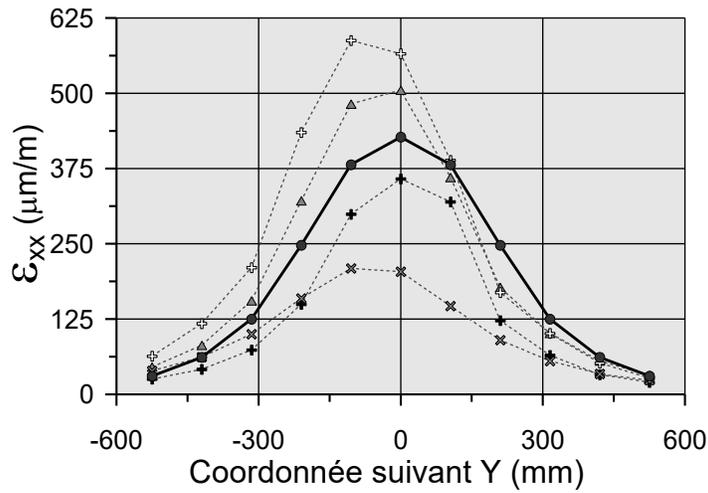
Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

Section B - Cas expérimental N° 55



Section B - Cas expérimental N° 56



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®:

---▲--- L7

---×--- L9

TML:

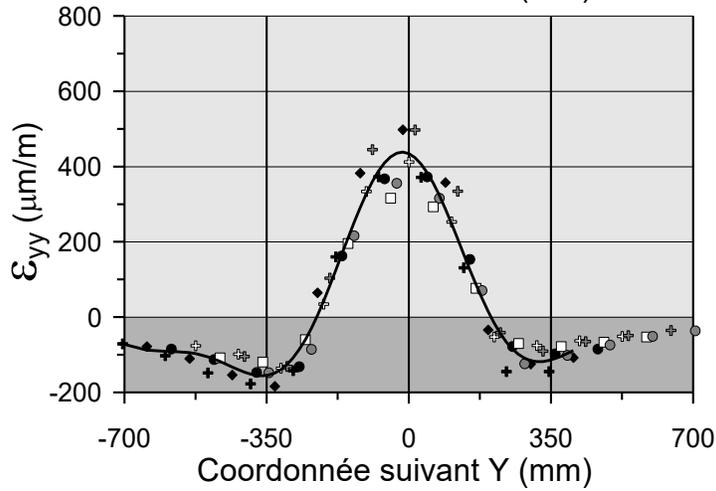
---+--- TML

Fibre optique:

---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

◆ TB 2

● TB 3

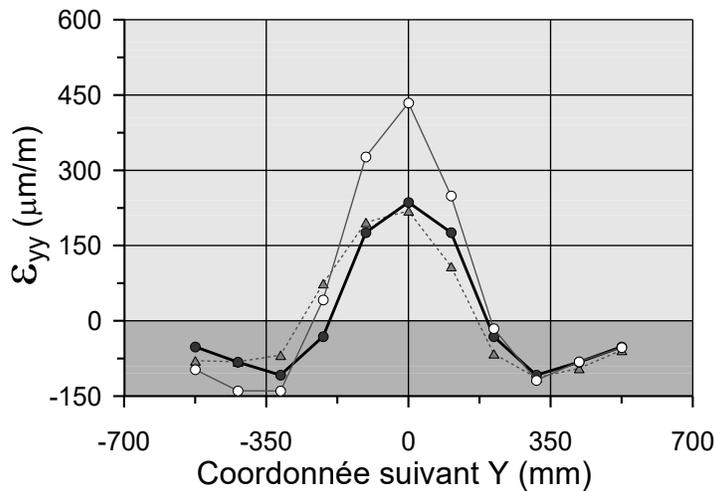
+ TB 4

□ TB 5

+ TB 6

● TB 7

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T7

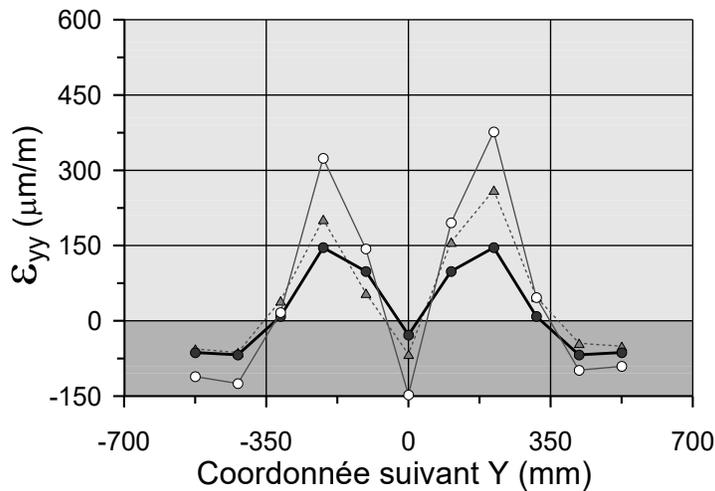
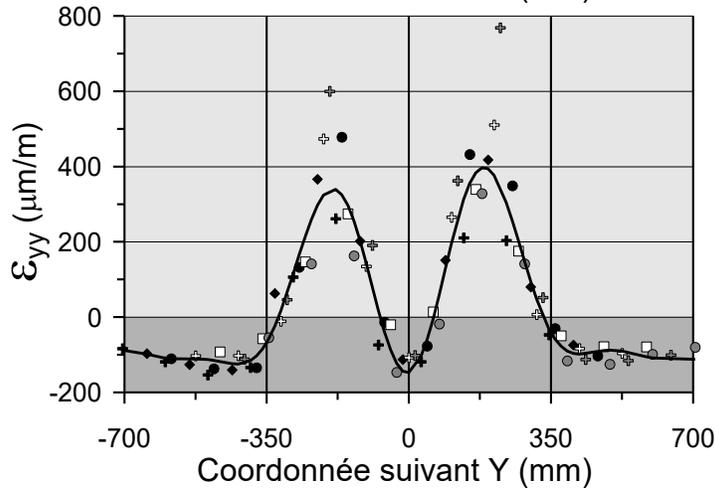
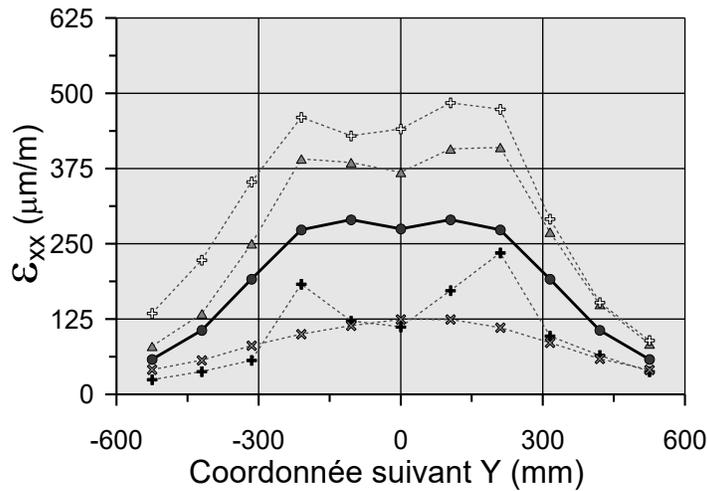
Fibre optique:

○ TB : points de l'interpolation

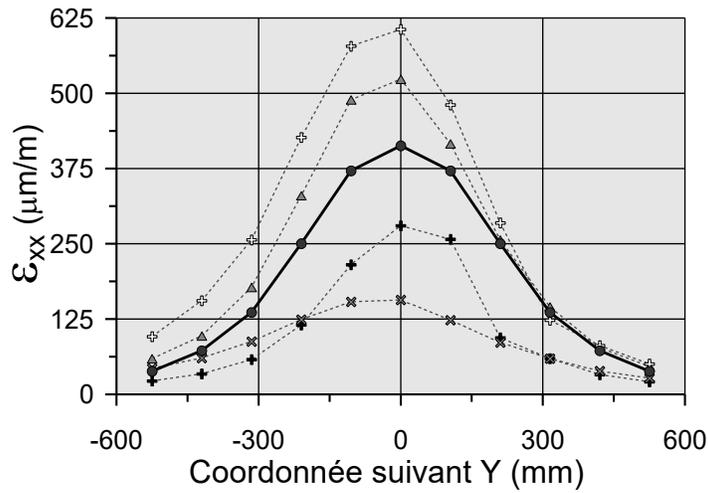
Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

Section B - Cas expérimental N° 61



Section B - Cas expérimental N° 62



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®:

---▲--- L7

---×--- L9

TML:

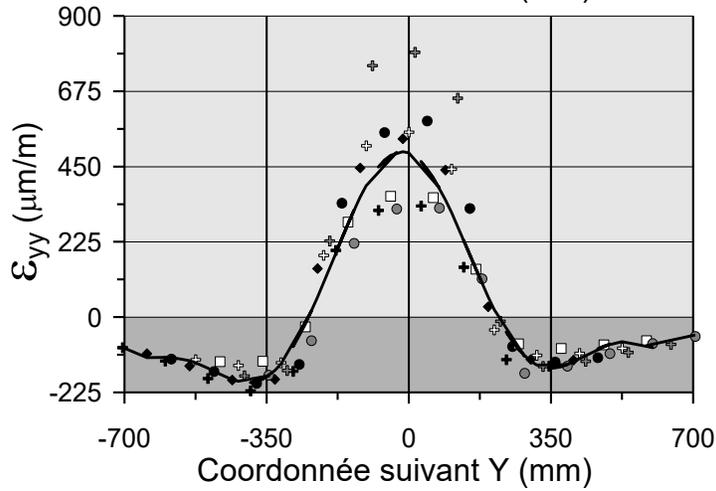
Fibre optique:

---+--- TML

---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

◆ TB 2

● TB 3

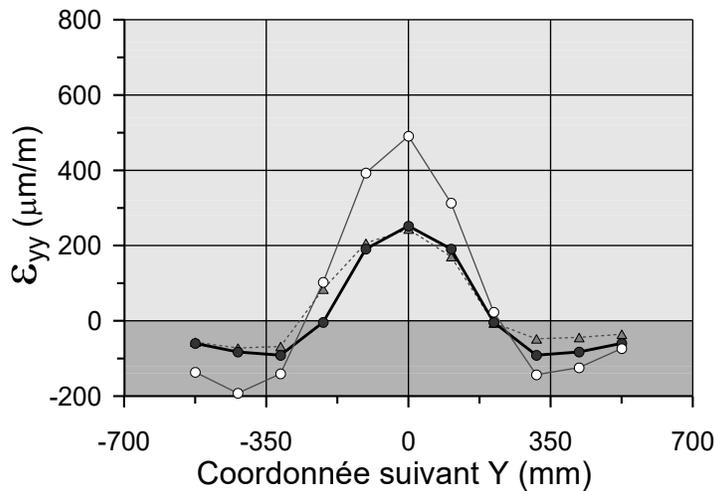
+ TB 4

□ TB 5

+ TB 6

● TB 7

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T7

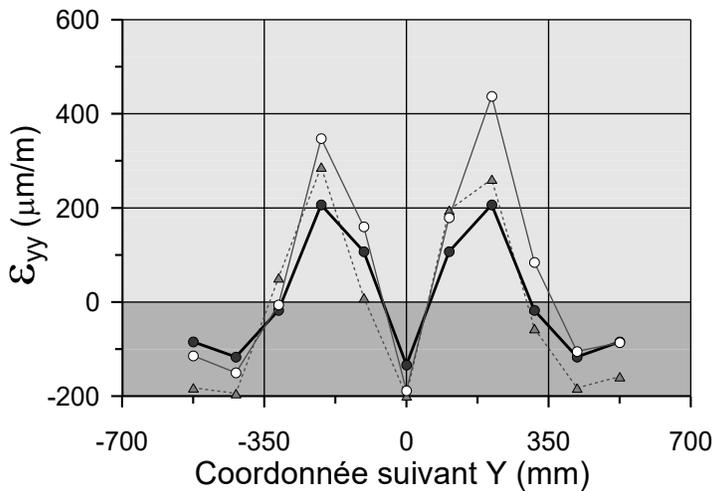
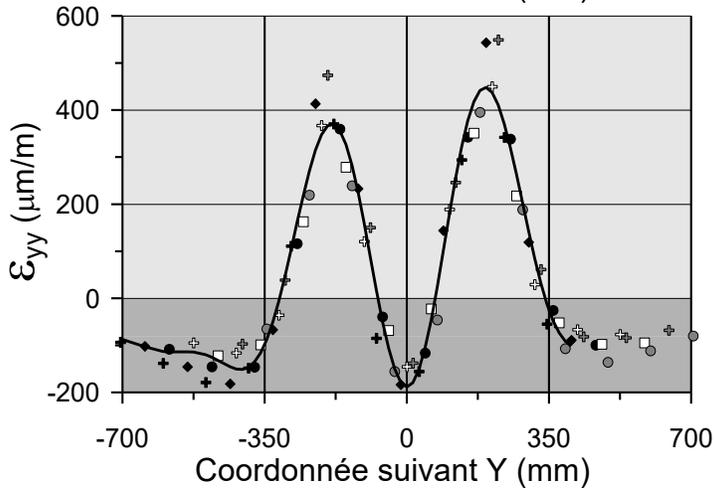
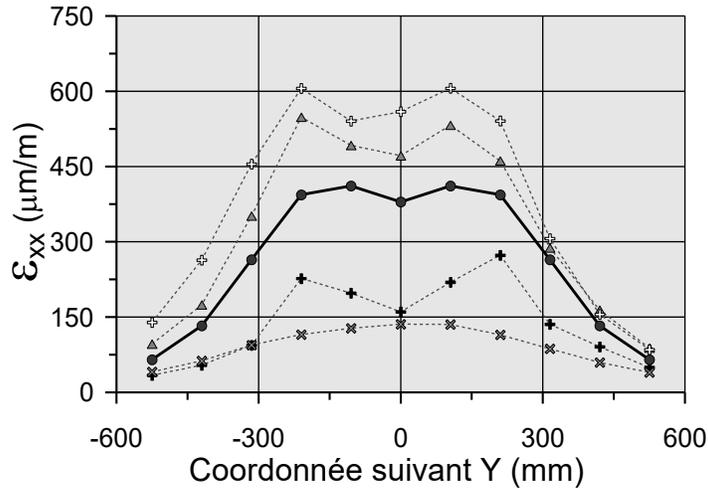
Fibre optique:

○ TB : points de l'interpolation

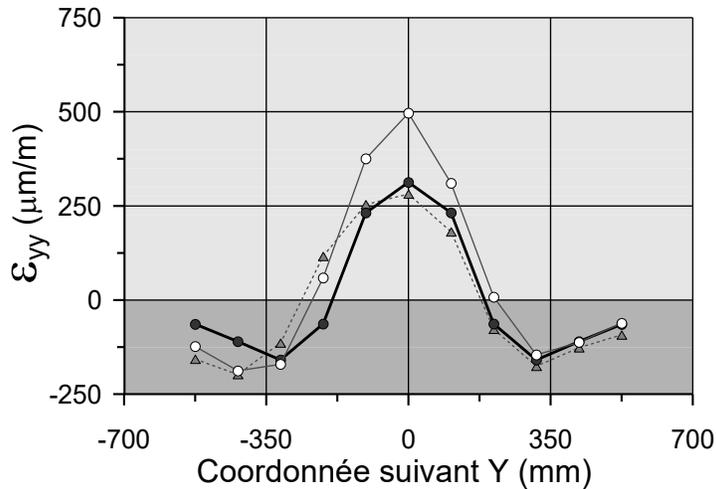
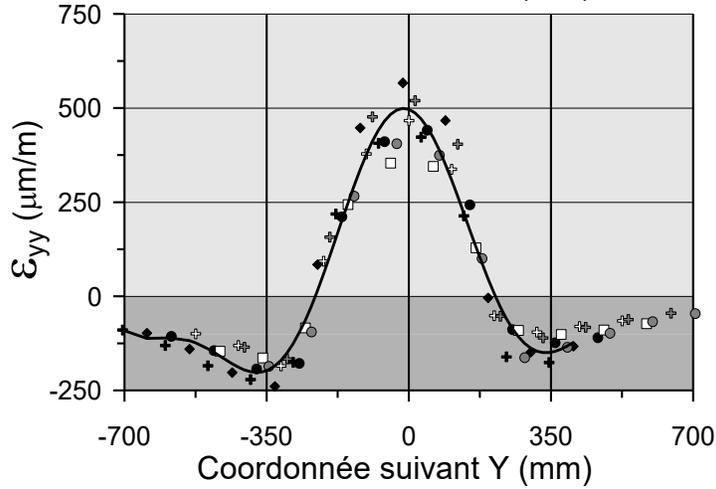
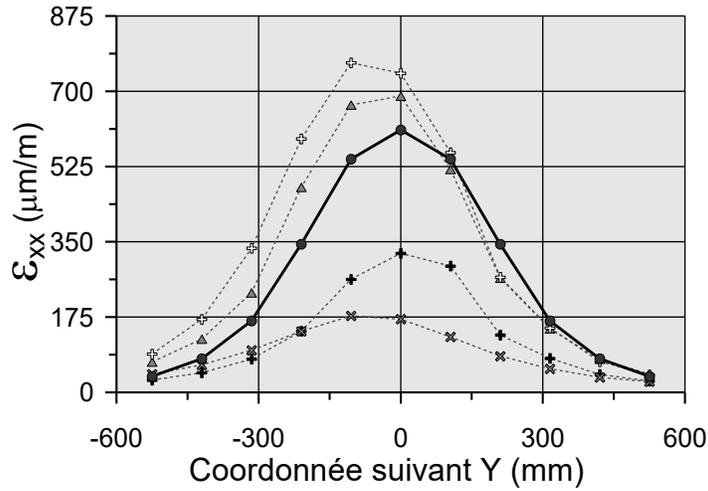
Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

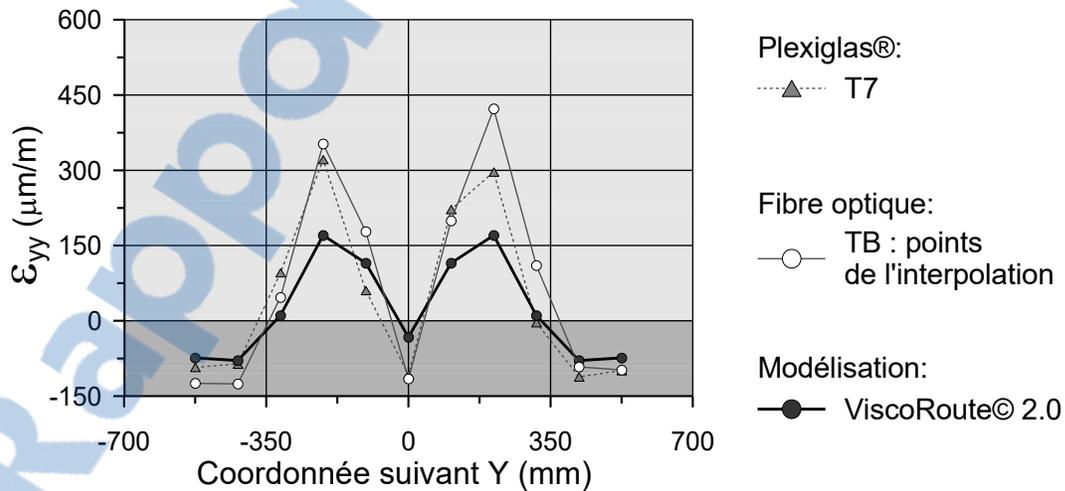
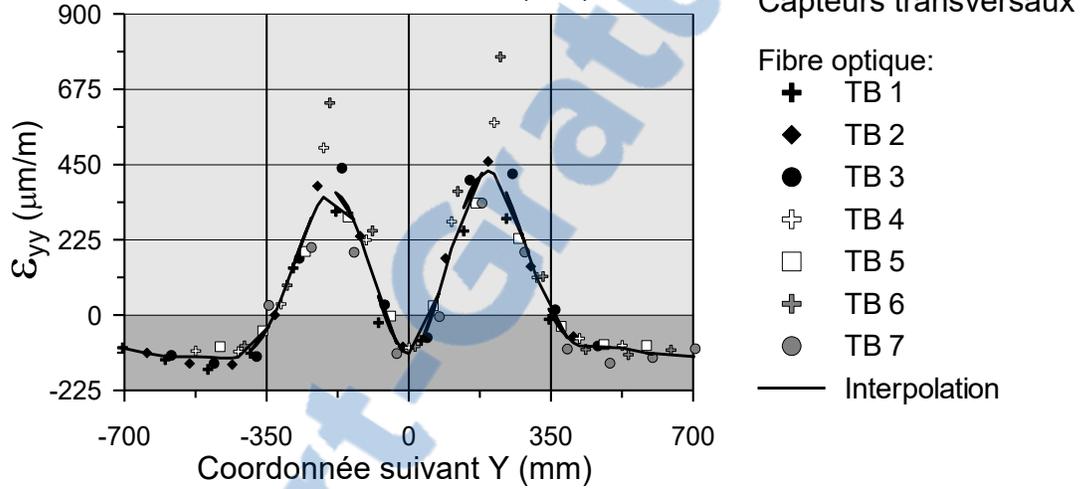
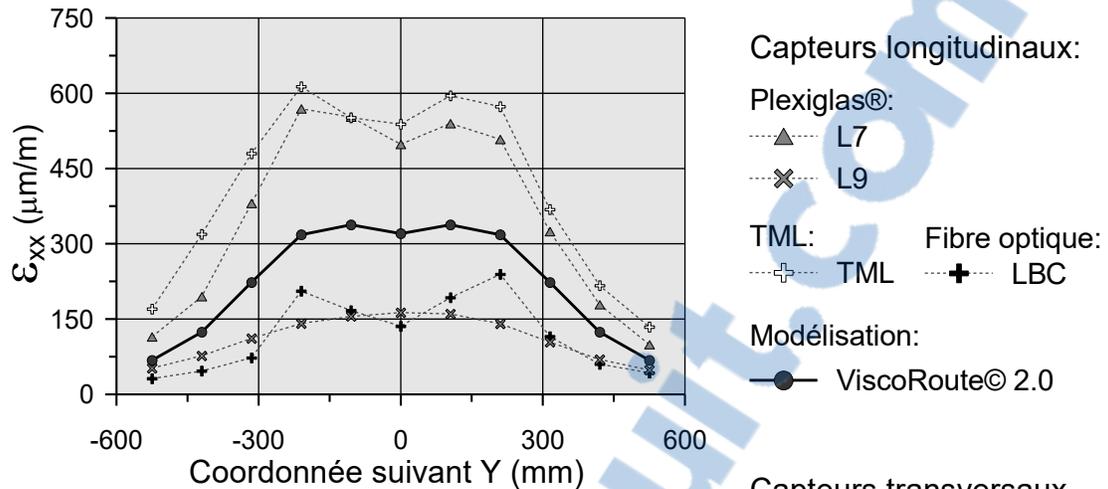
Section B - Cas expérimental N° 65



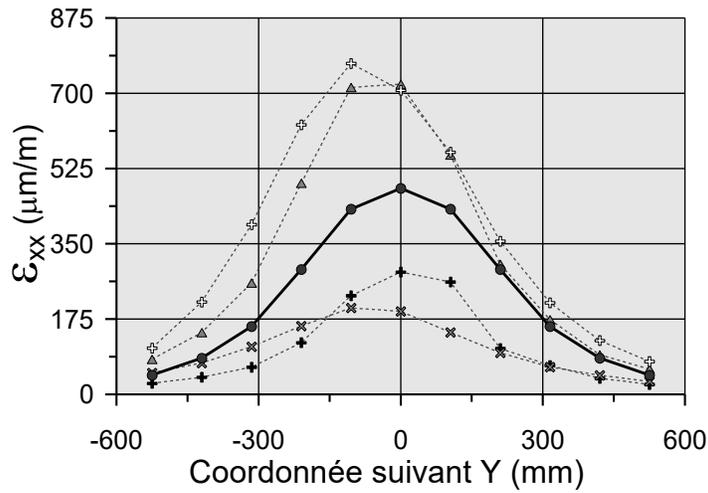
Section B - Cas expérimental N° 66



Section B - Cas expérimental N° 71



Section B - Cas expérimental N° 72



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®:

---▲--- L7

---×--- L9

TML:

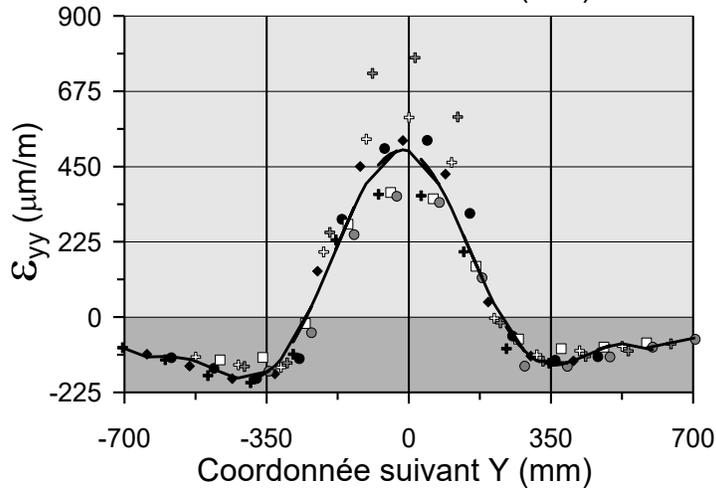
Fibre optique:

---+--- TML

---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

◆ TB 2

● TB 3

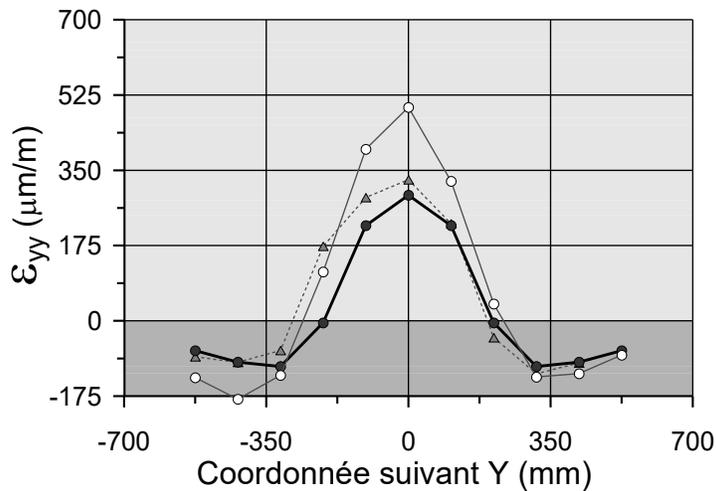
+ TB 4

□ TB 5

+ TB 6

● TB 7

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T7

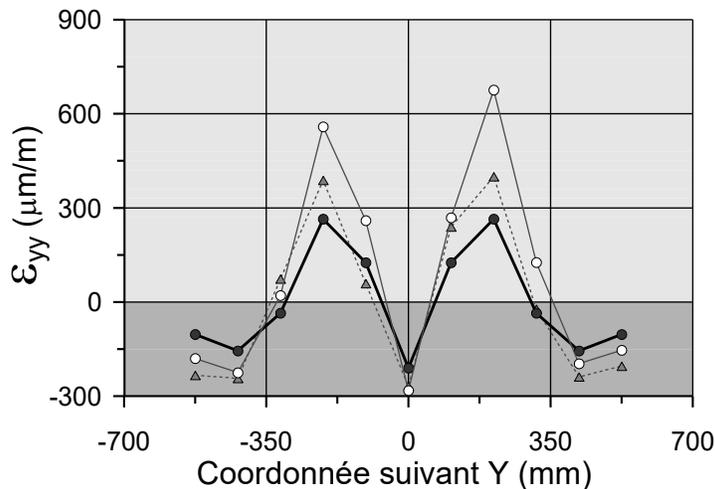
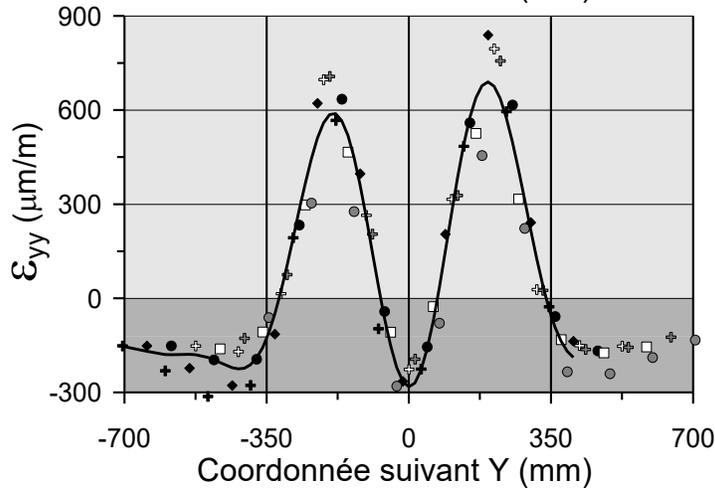
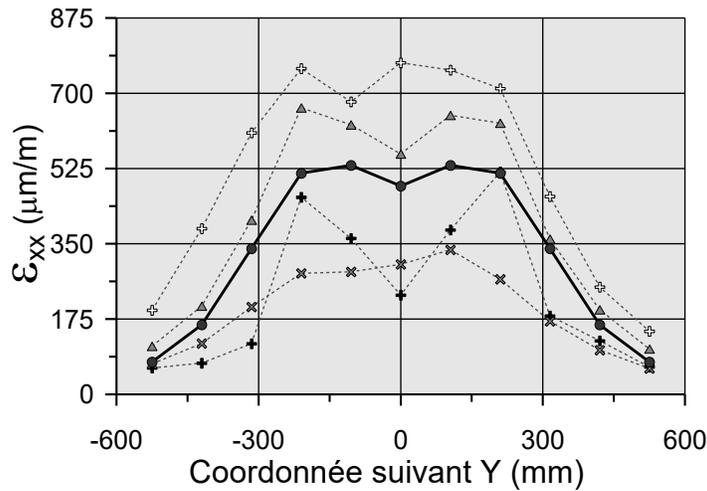
Fibre optique:

○ TB : points de l'interpolation

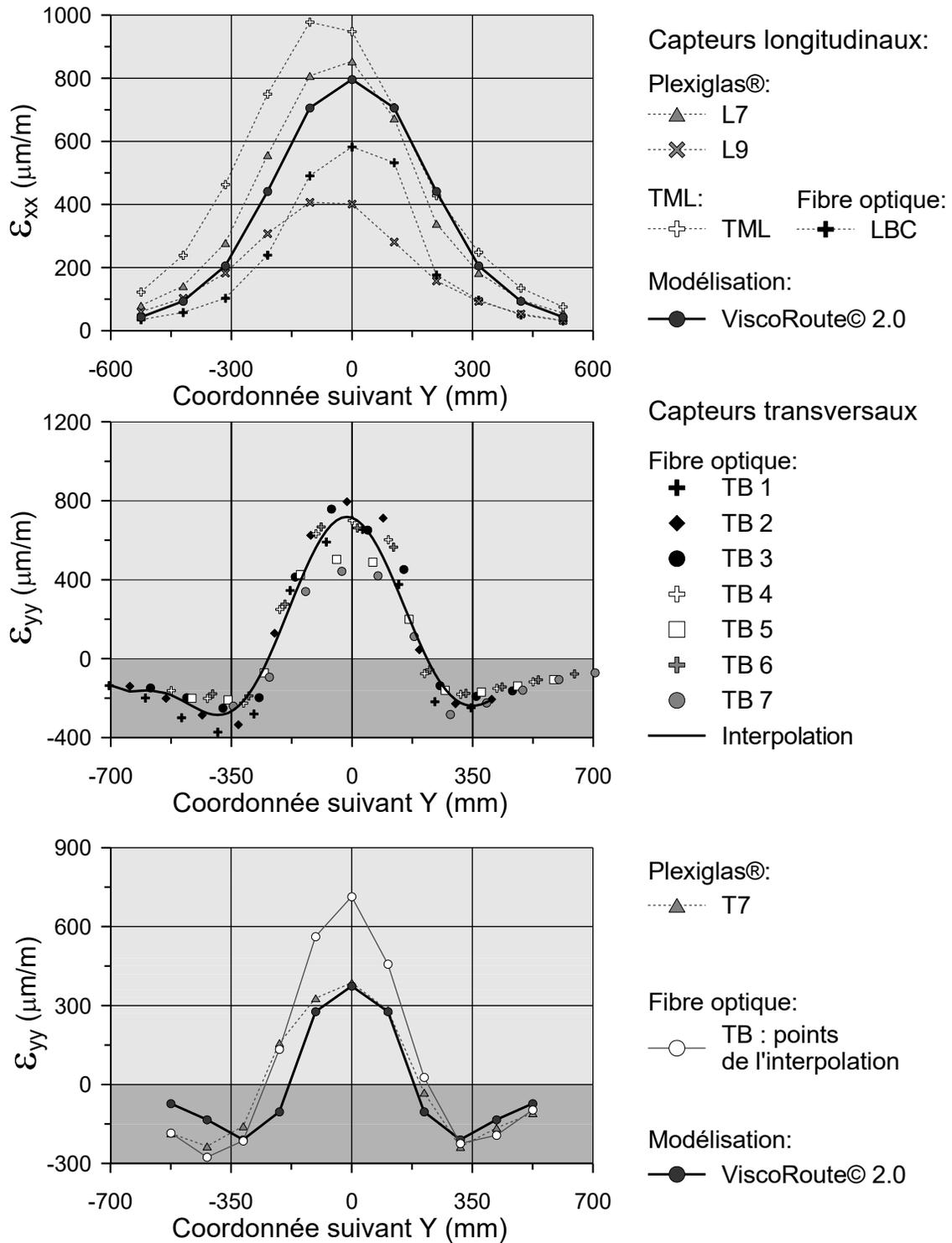
Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

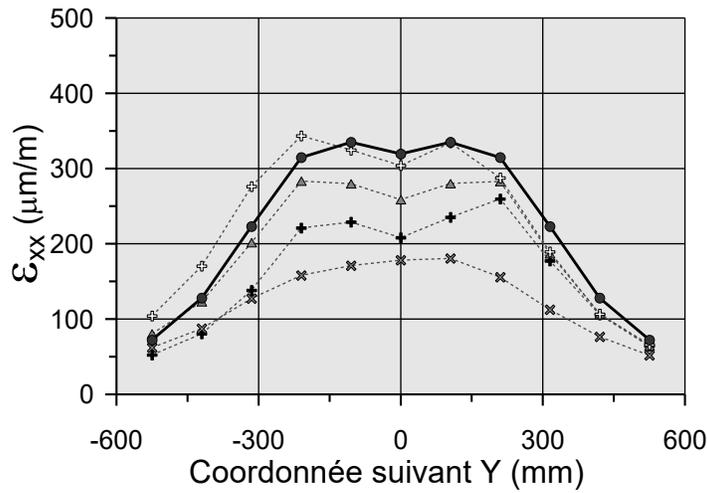
Section B - Cas expérimental N° 73



Section B - Cas expérimental N° 74



Section B - Cas expérimental N° 81



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®:

---▲--- L7

---×--- L9

TML:

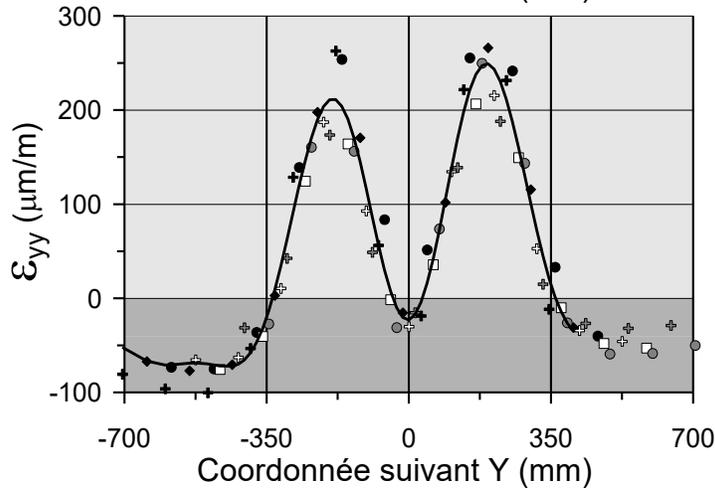
Fibre optique:

---+--- TML

---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

◆ TB 2

● TB 3

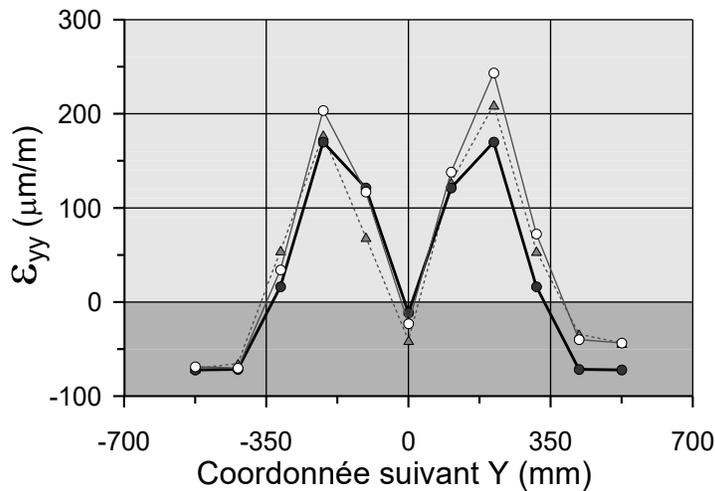
+ TB 4

□ TB 5

+ TB 6

● TB 7

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T7

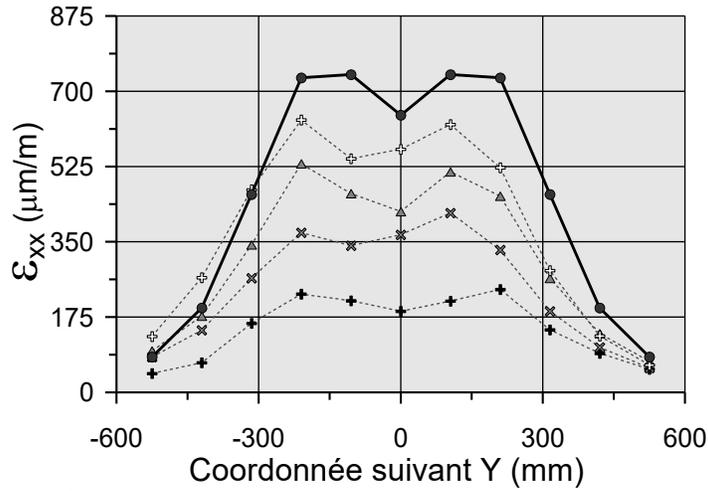
Fibre optique:

○ TB : points de l'interpolation

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

Section B - Cas expérimental N° 82



Capteurs longitudinaux:

Plexiglas®:

---▲--- L7

---×--- L9

TML:

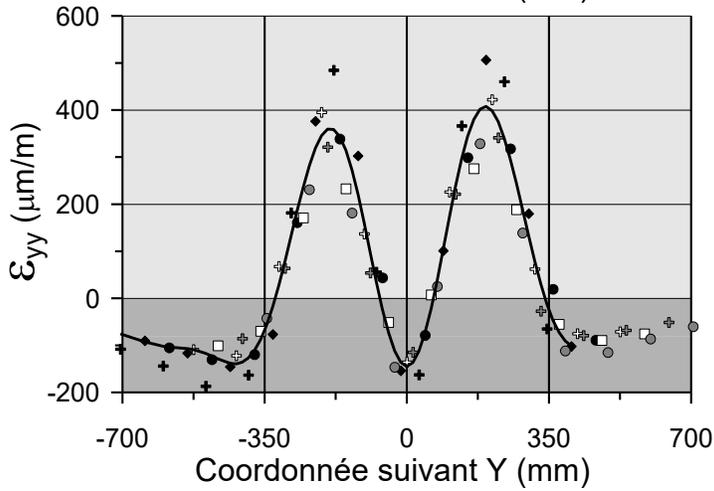
---+--- TML

Fibre optique:

---+--- LBC

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0



Capteurs transversaux

Fibre optique:

+ TB 1

◆ TB 2

● TB 3

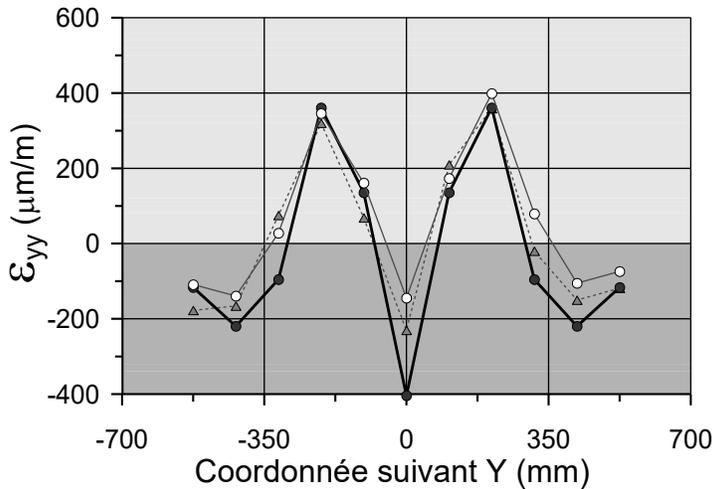
+ TB 4

□ TB 5

+ TB 6

● TB 7

— Interpolation



Plexiglas®:

---▲--- T7

Fibre optique:

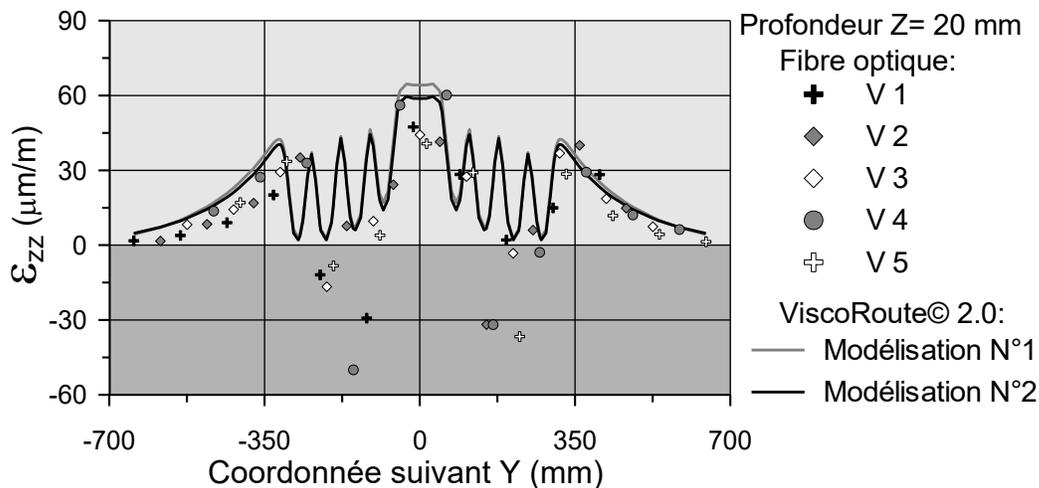
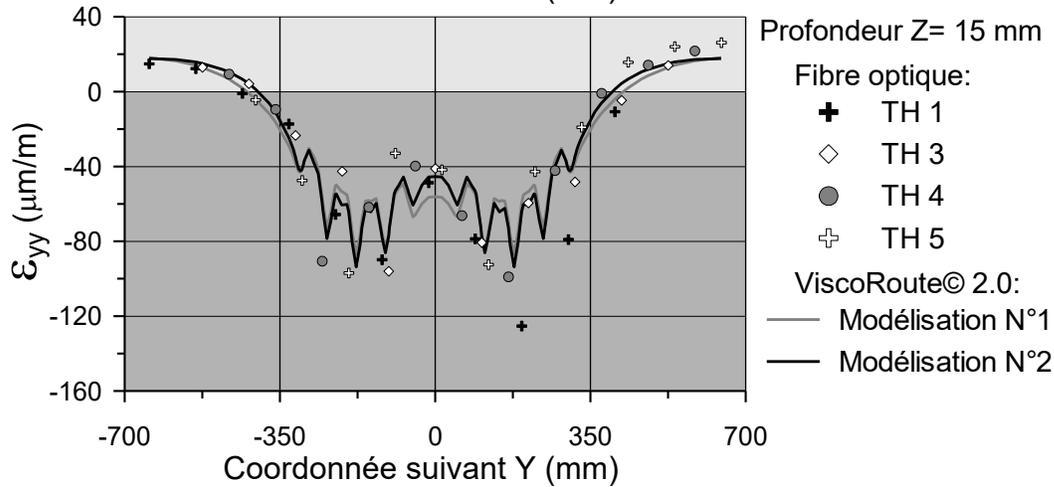
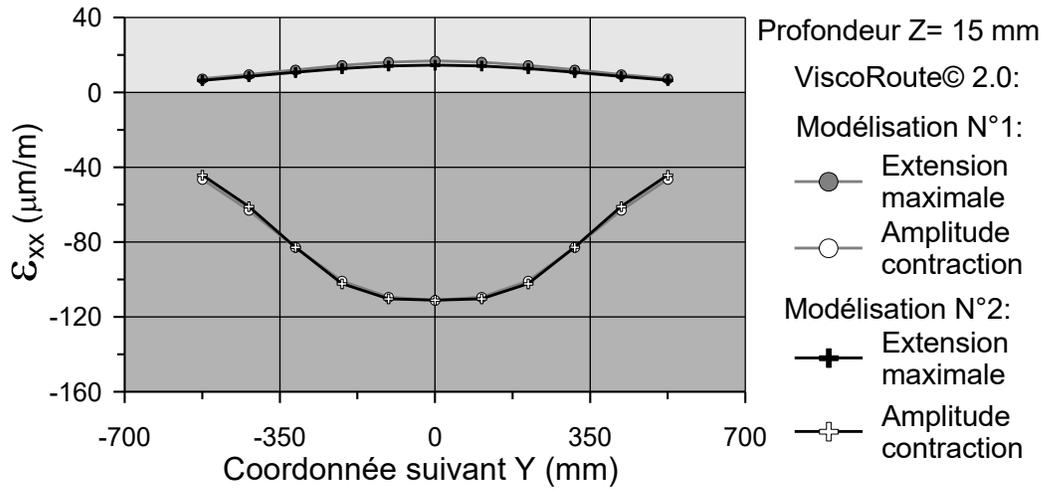
○ TB : points de l'interpolation

Modélisation:

—●— ViscoRoute© 2.0

**Bassin des déformations longitudinales, transversales et
verticales dans les premiers centimètres de la couche de
BBSG 0/10 de la section A et de la section B**

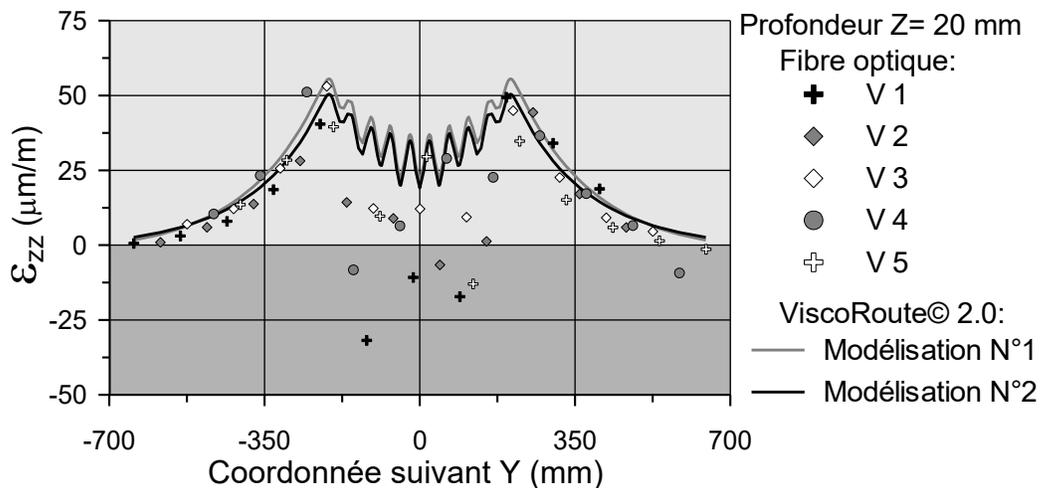
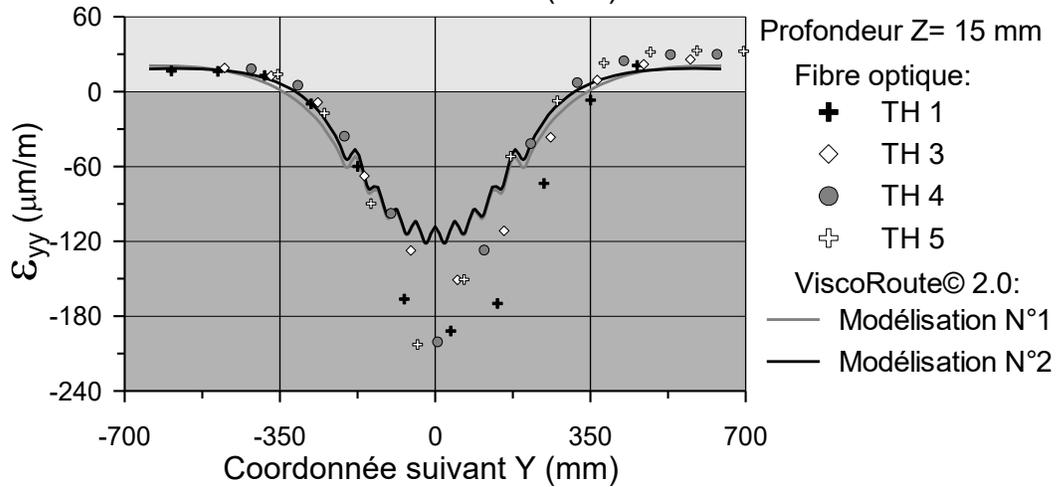
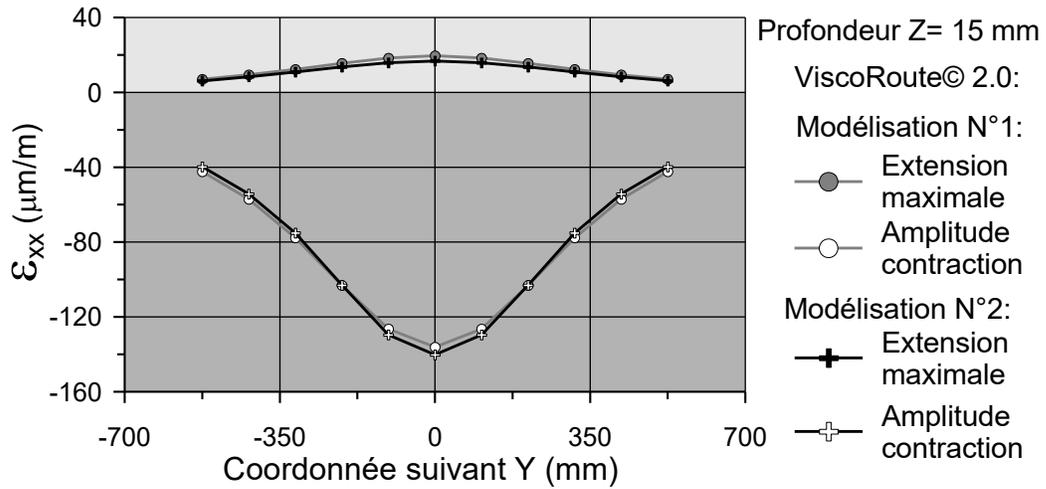
Section A - Cas expérimental N° 11



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

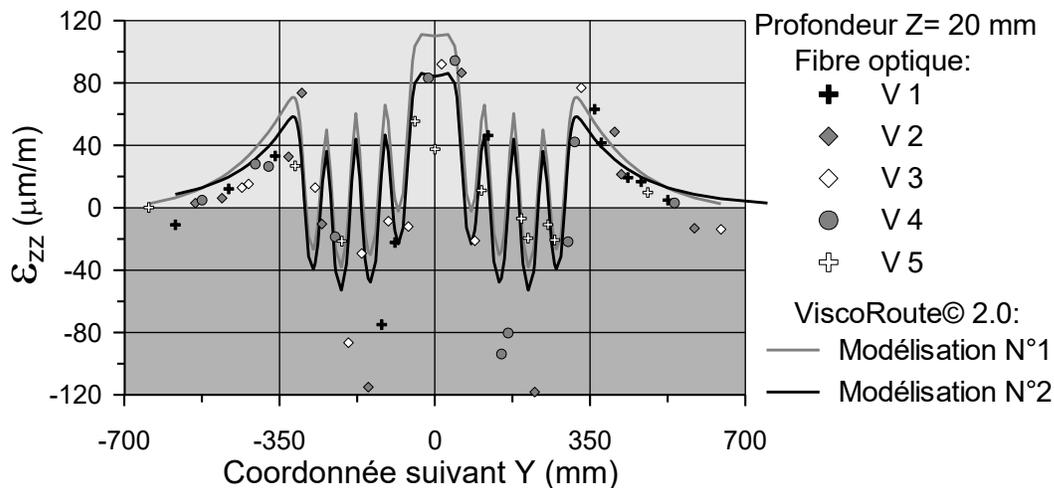
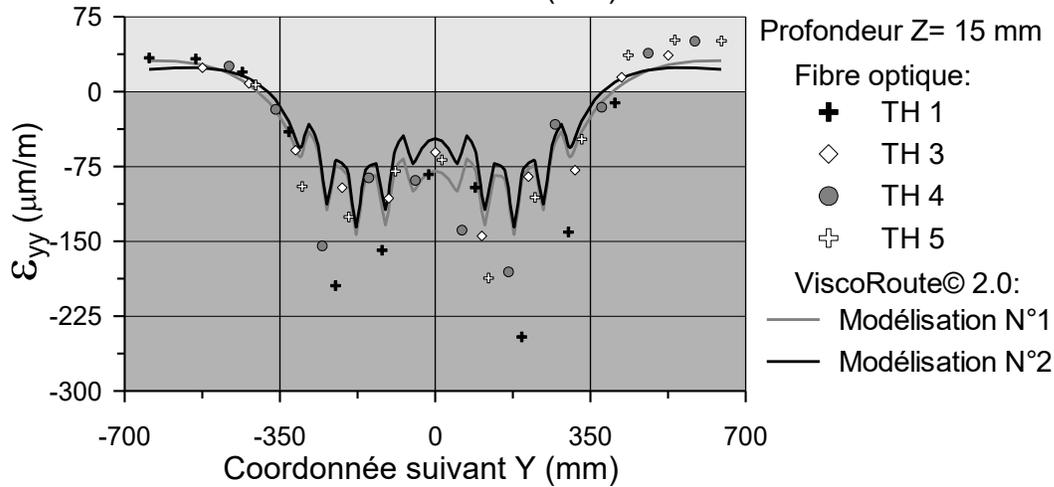
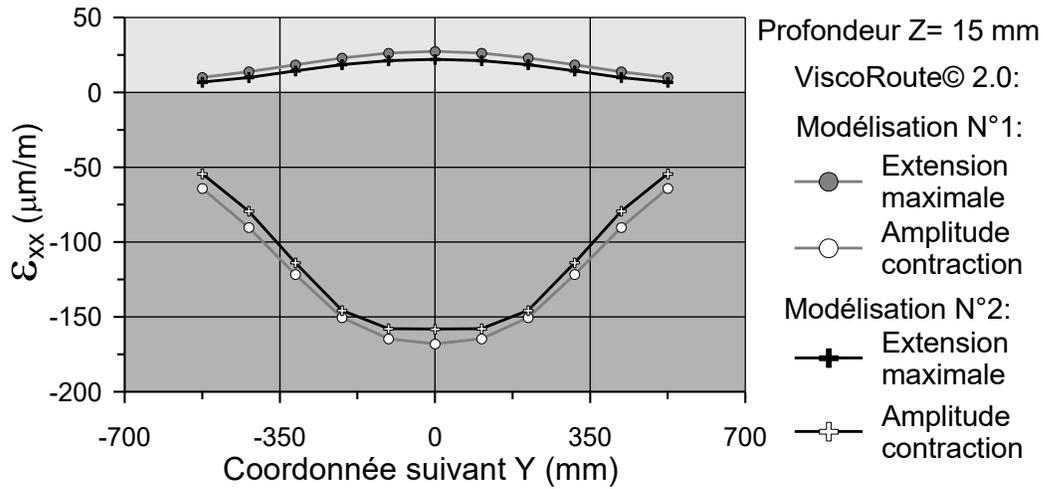
Section A - Cas expérimental N° 12



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

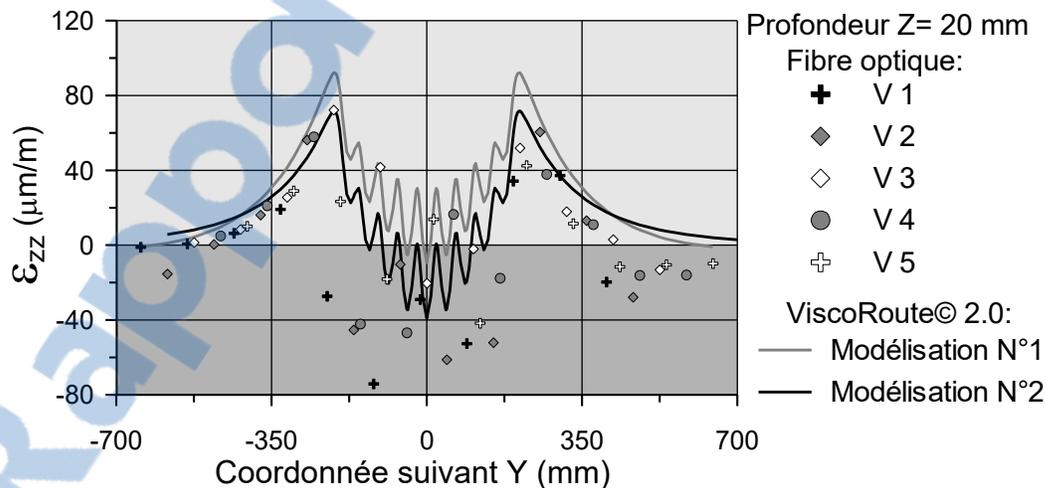
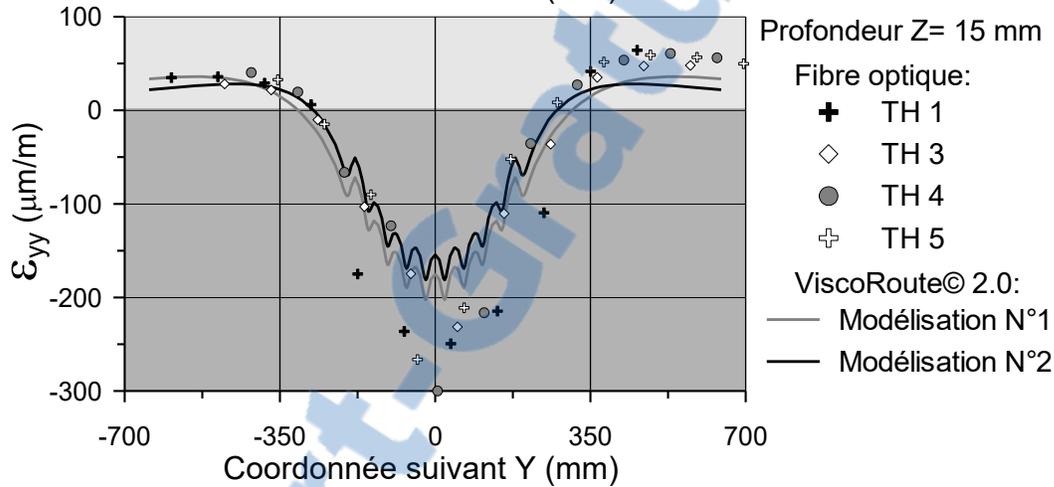
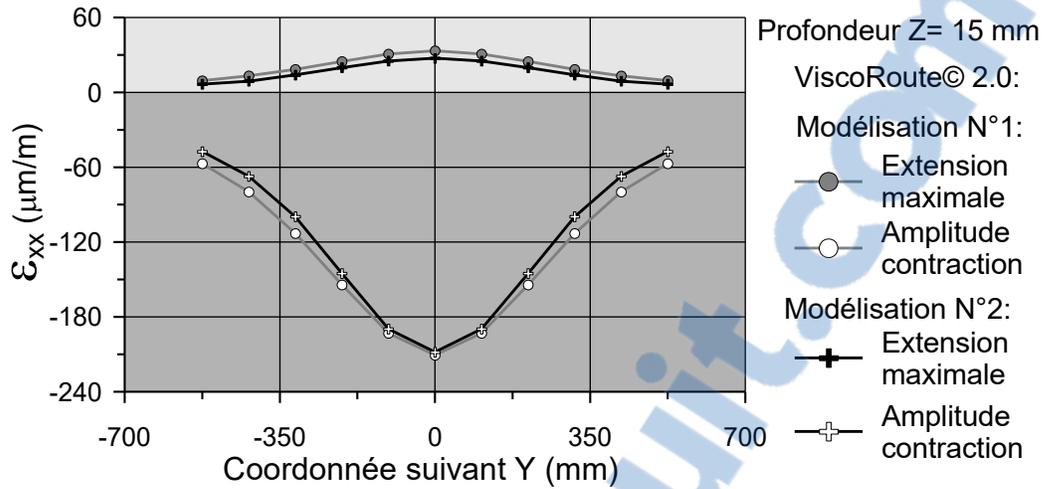
Section A - Cas expérimental N° 13



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

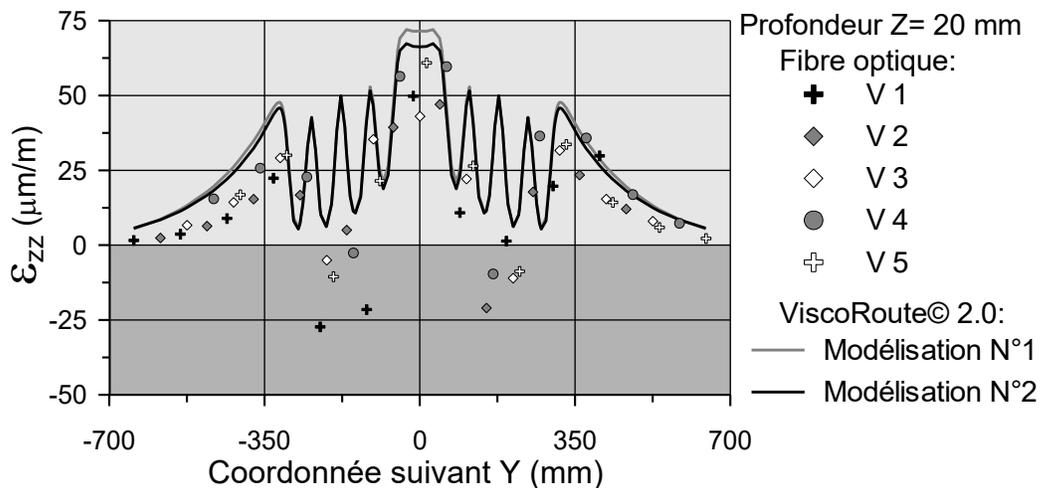
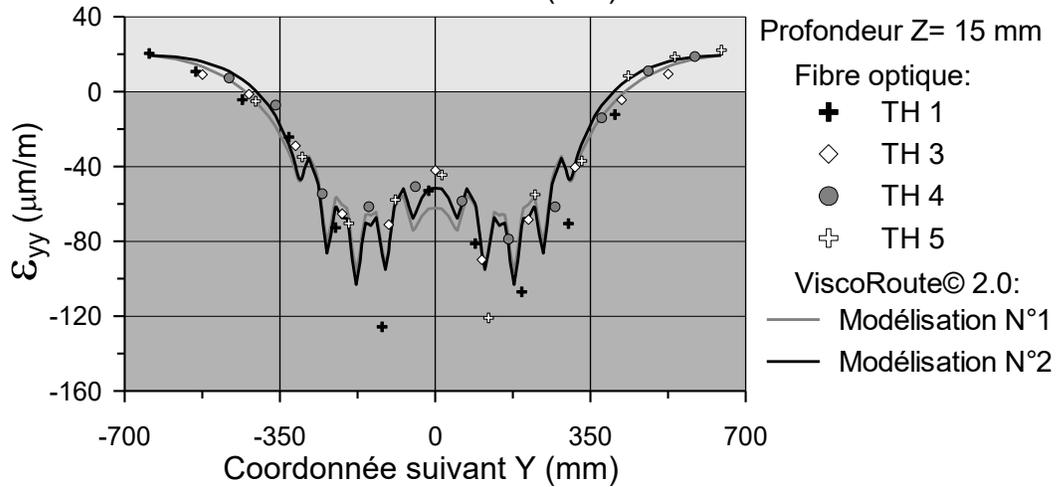
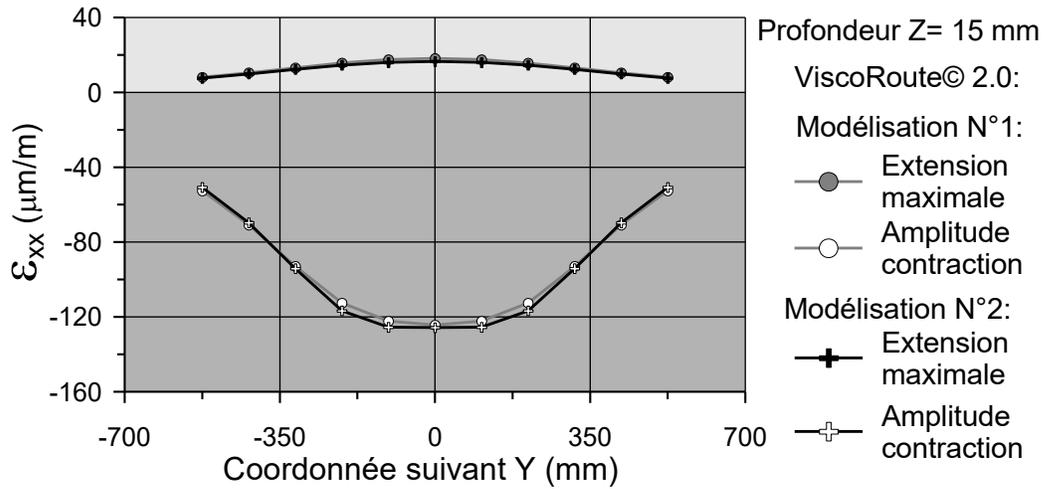
Section A - Cas expérimental N° 14



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

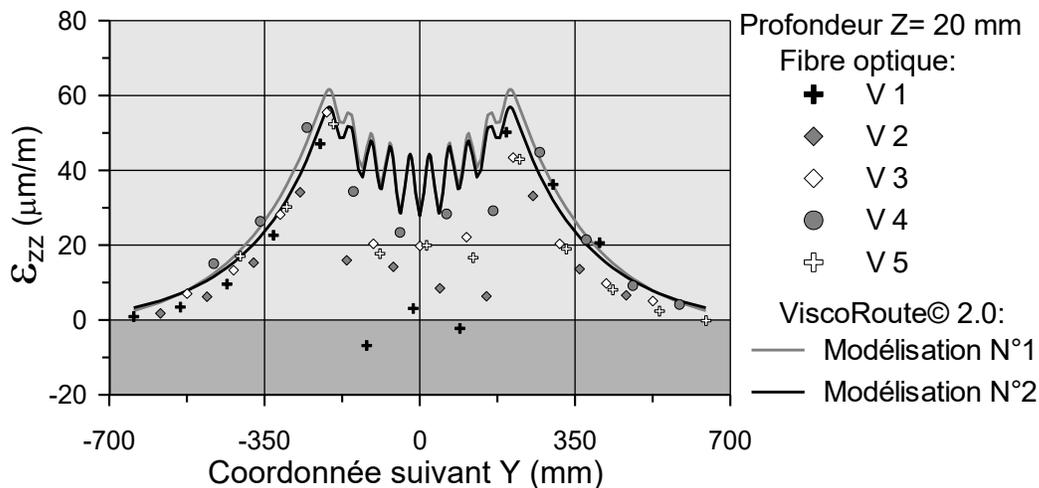
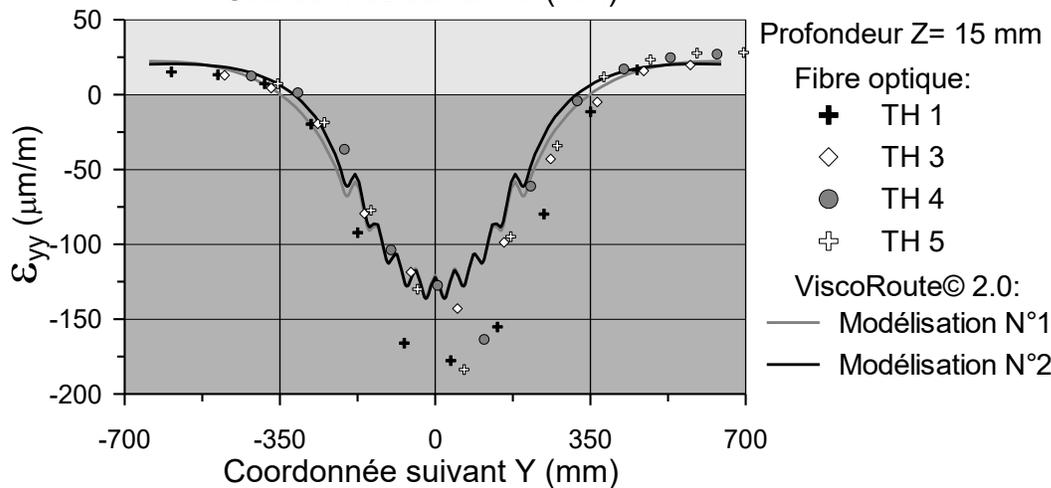
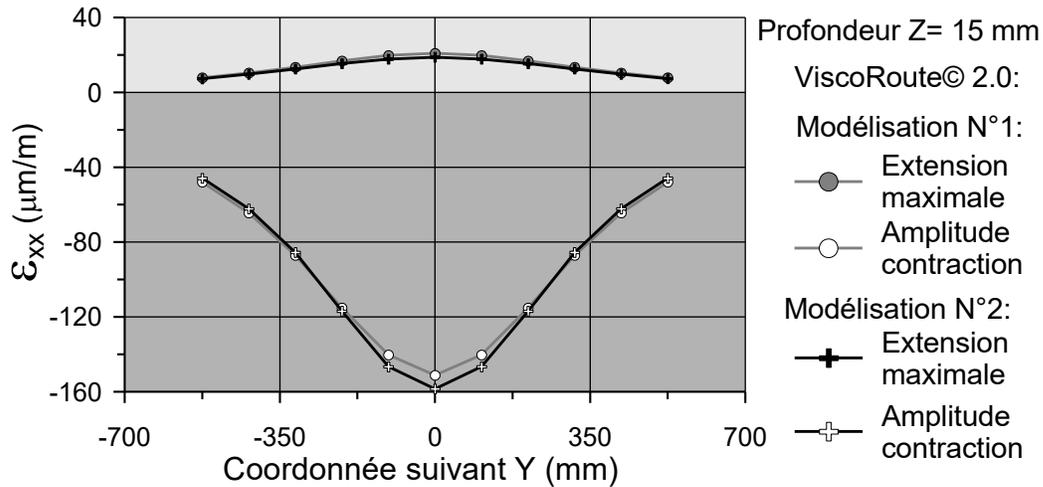
Section A - Cas expérimental N° 21



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

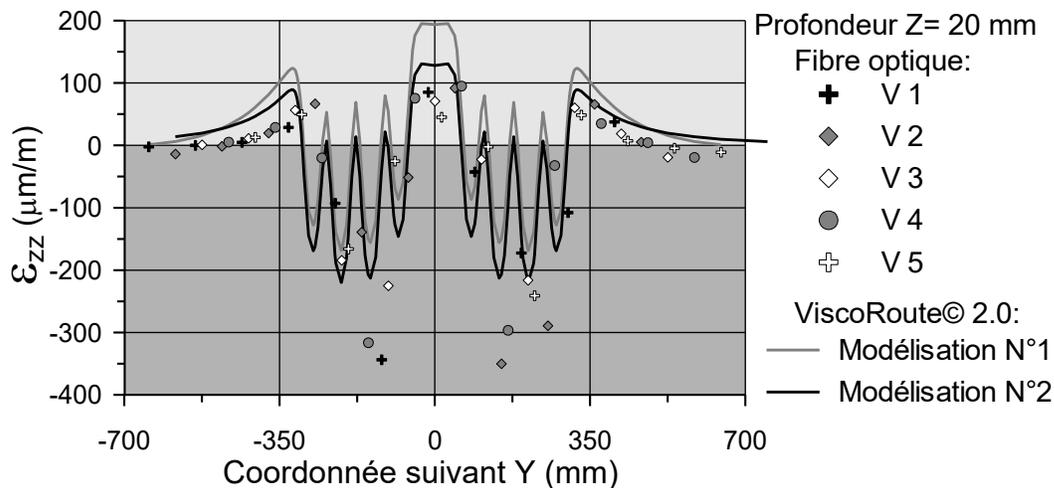
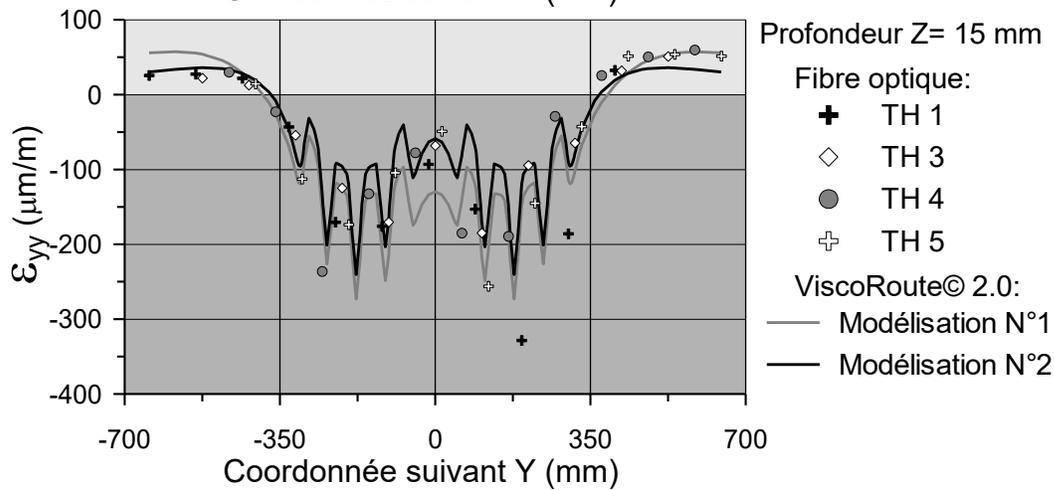
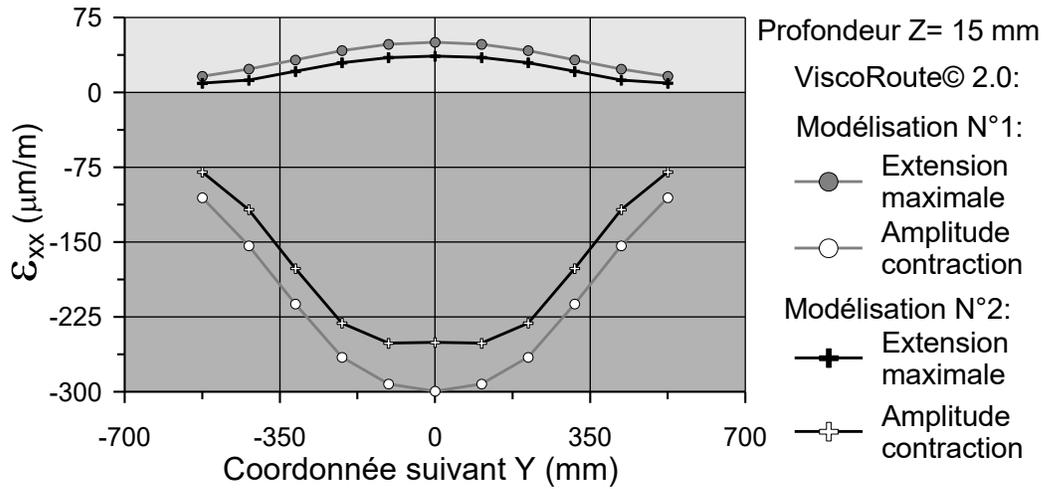
Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 22



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

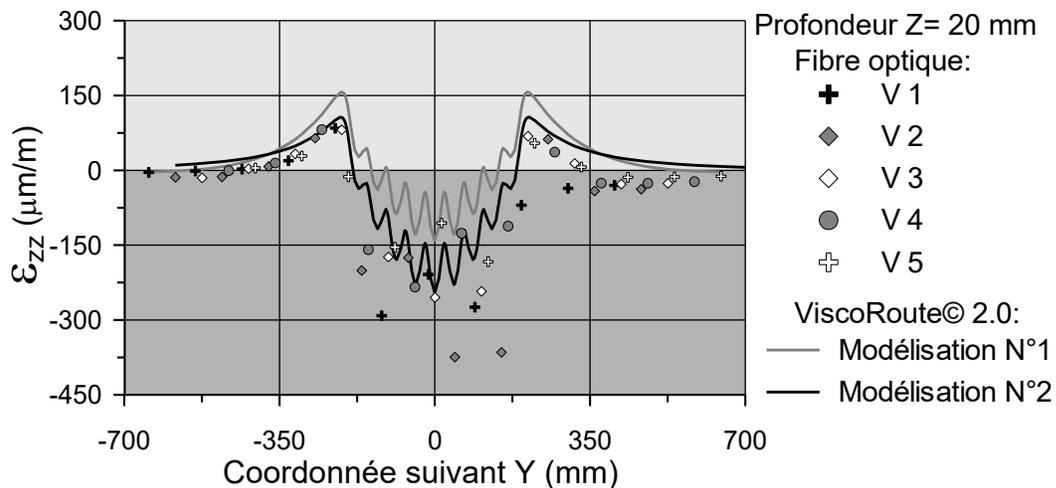
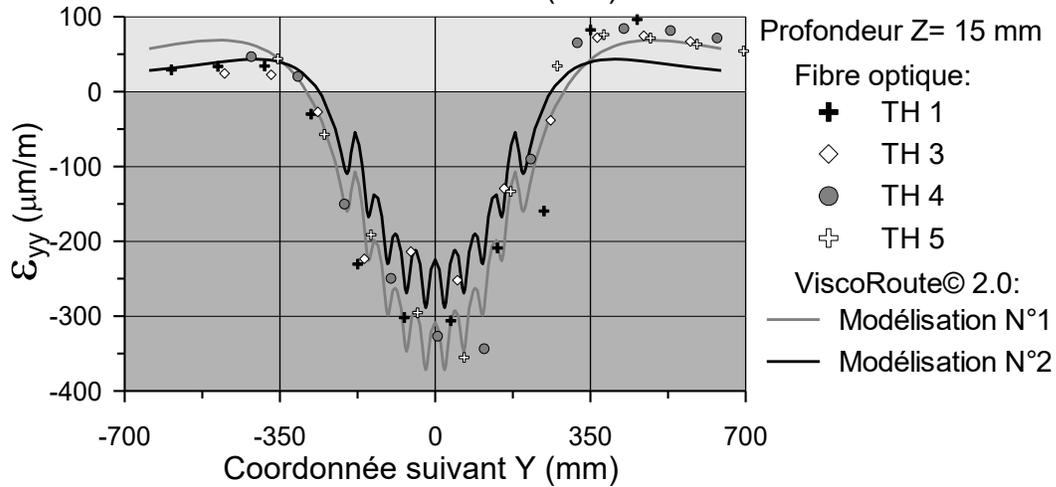
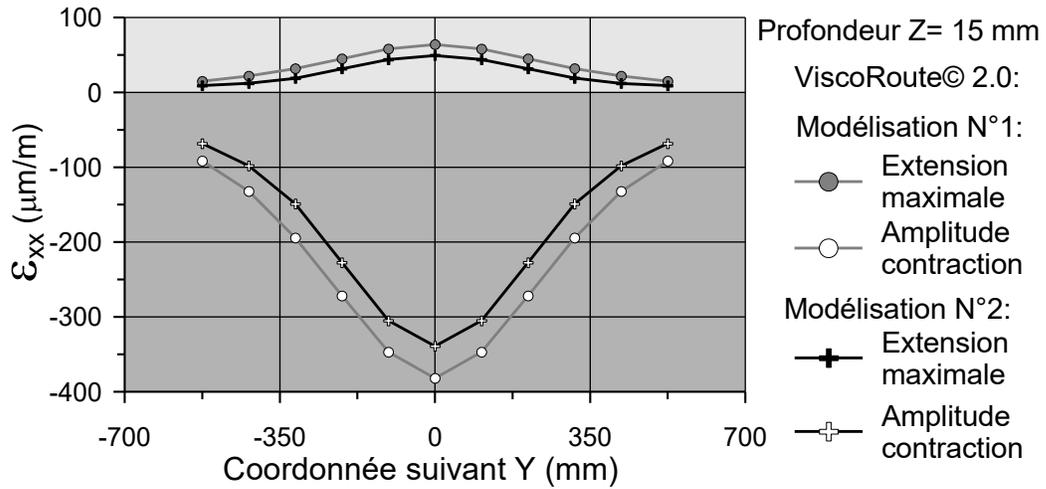
Section A - Cas expérimental N° 23



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

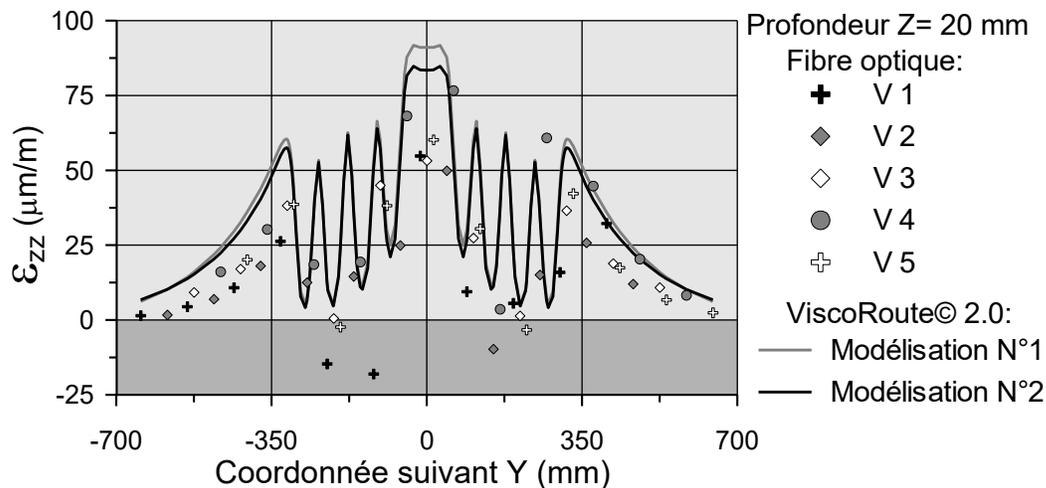
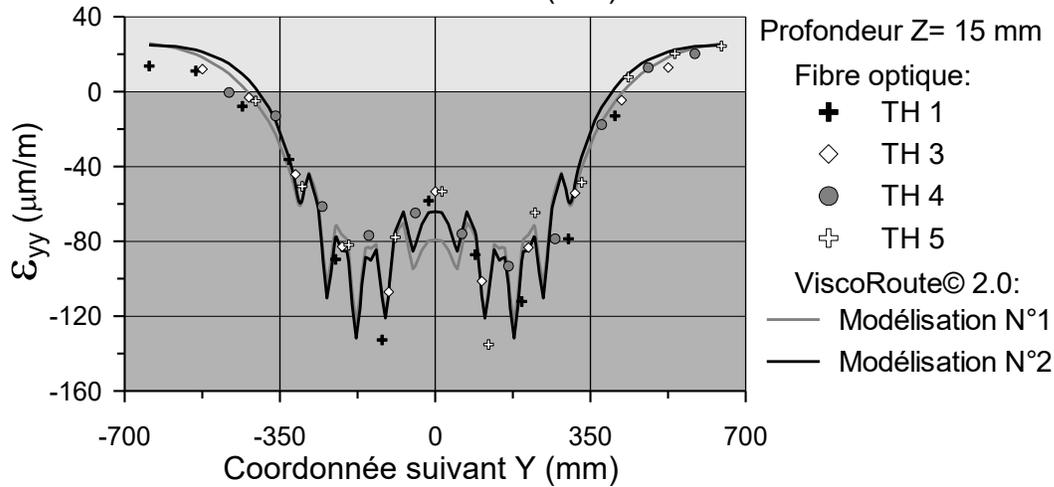
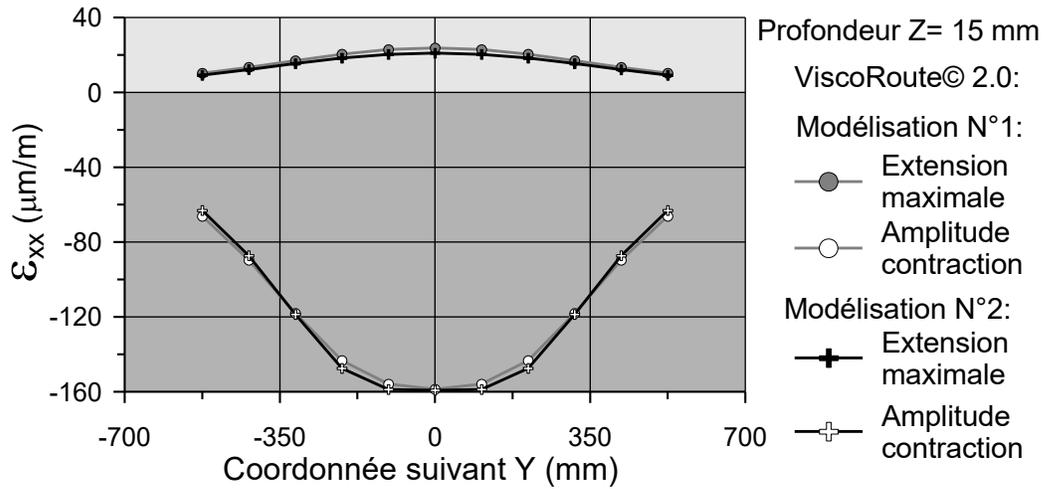
Section A - Cas expérimental N° 24



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

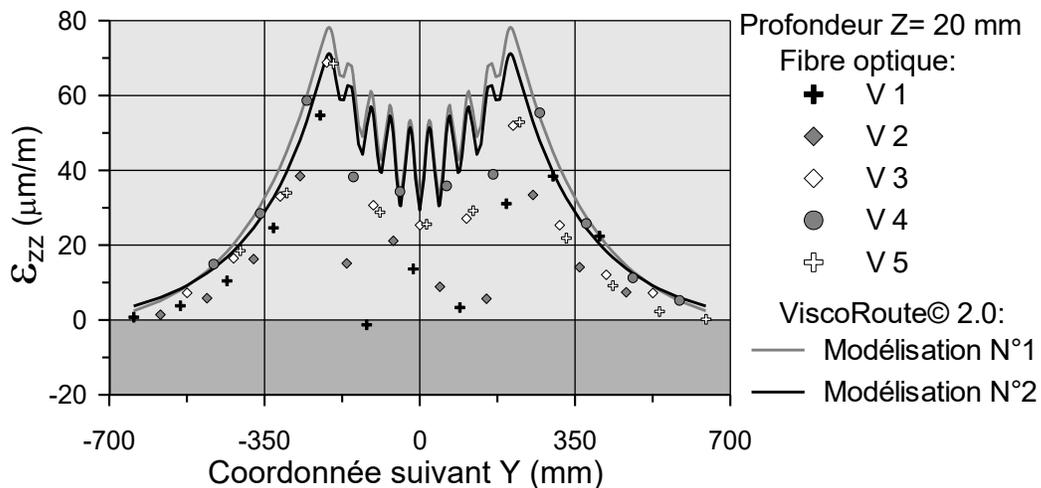
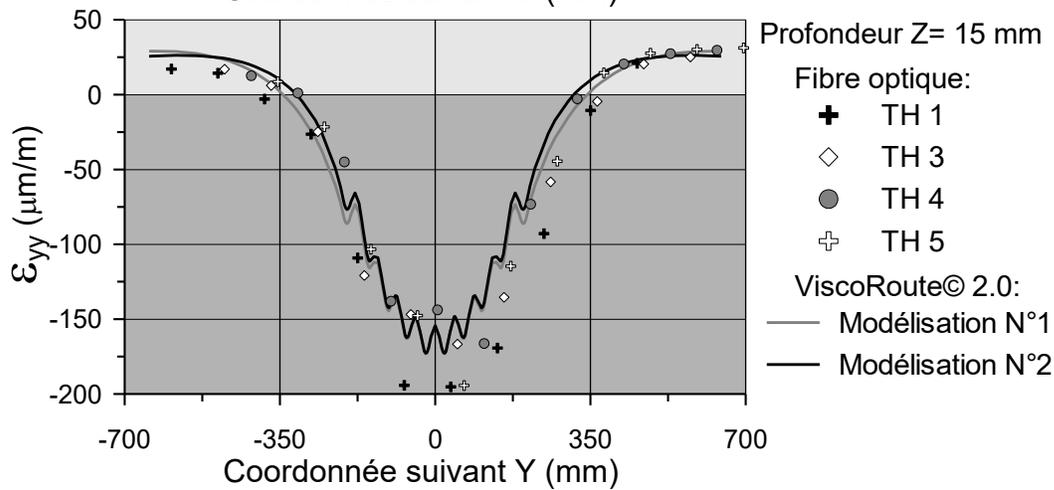
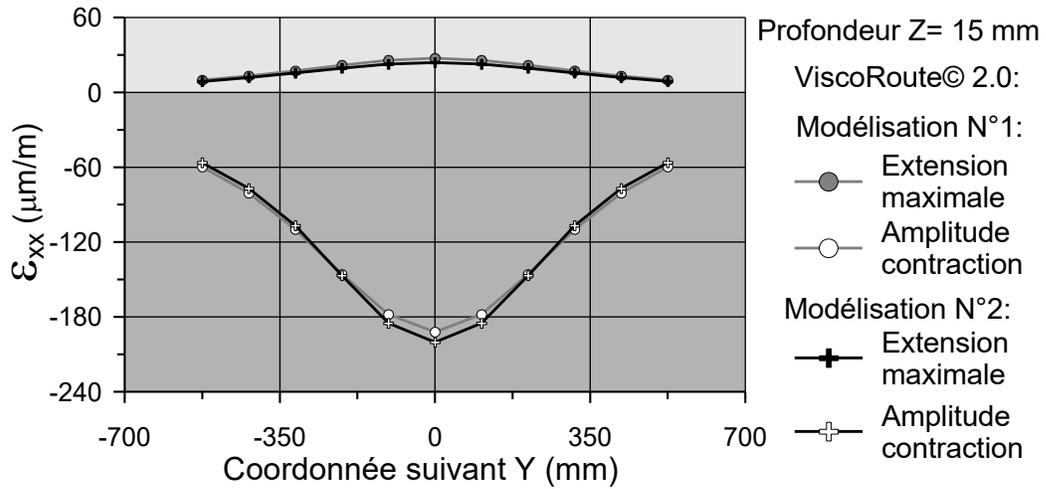
Section A - Cas expérimental N° 31



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

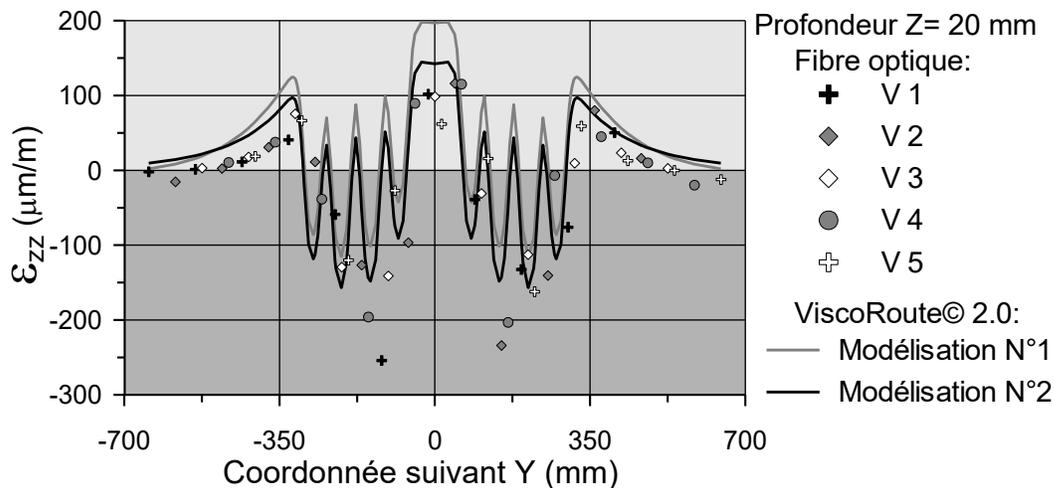
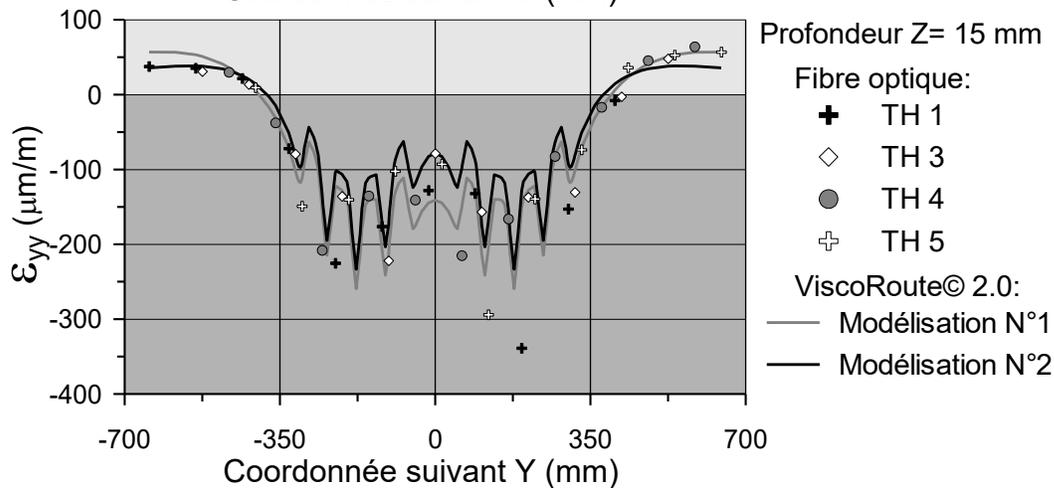
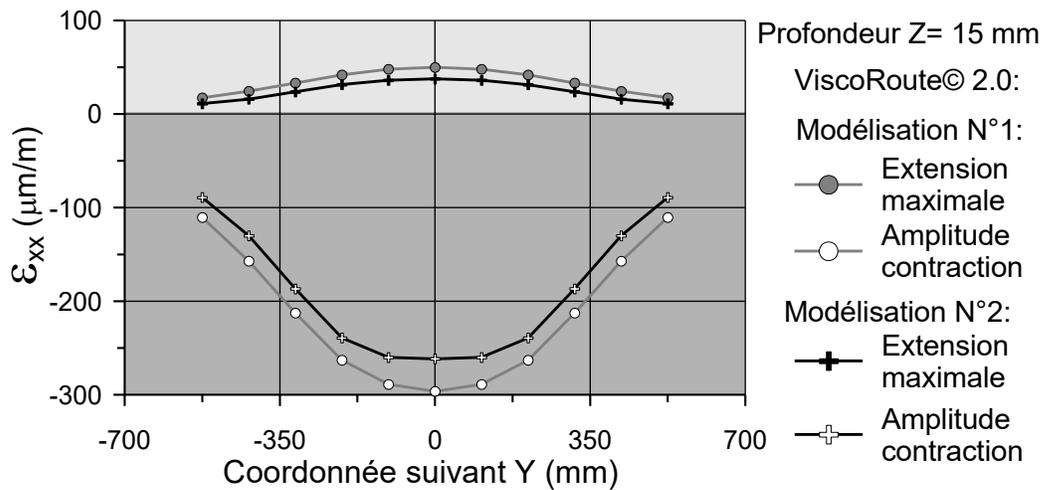
Section A - Cas expérimental N° 32



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

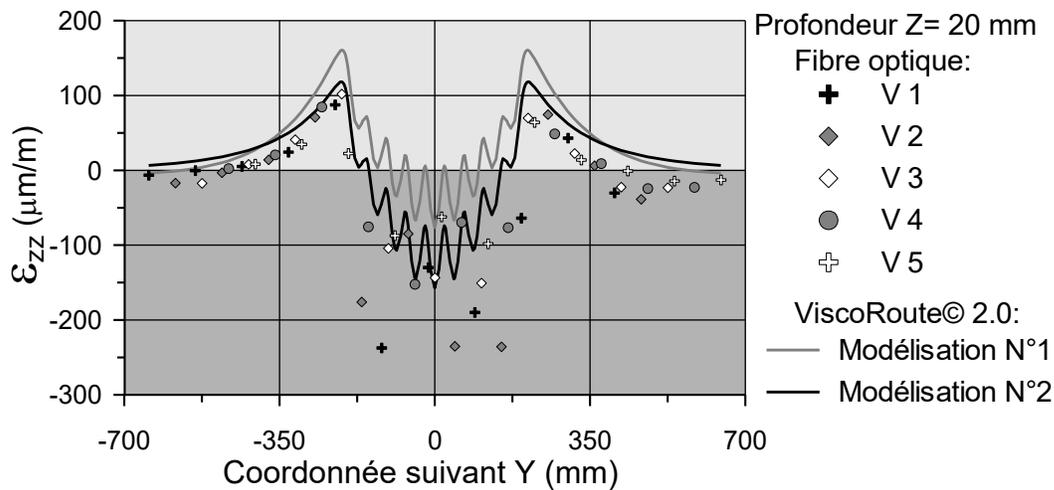
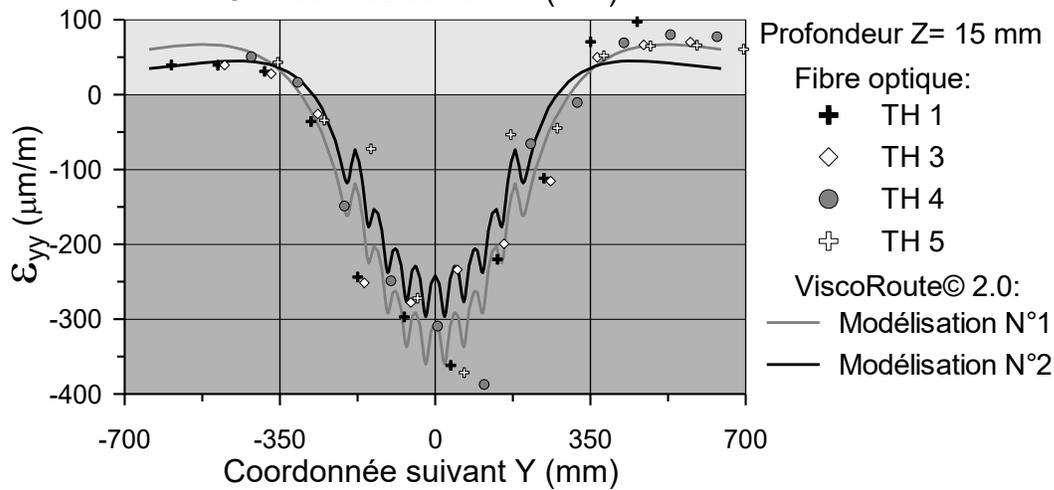
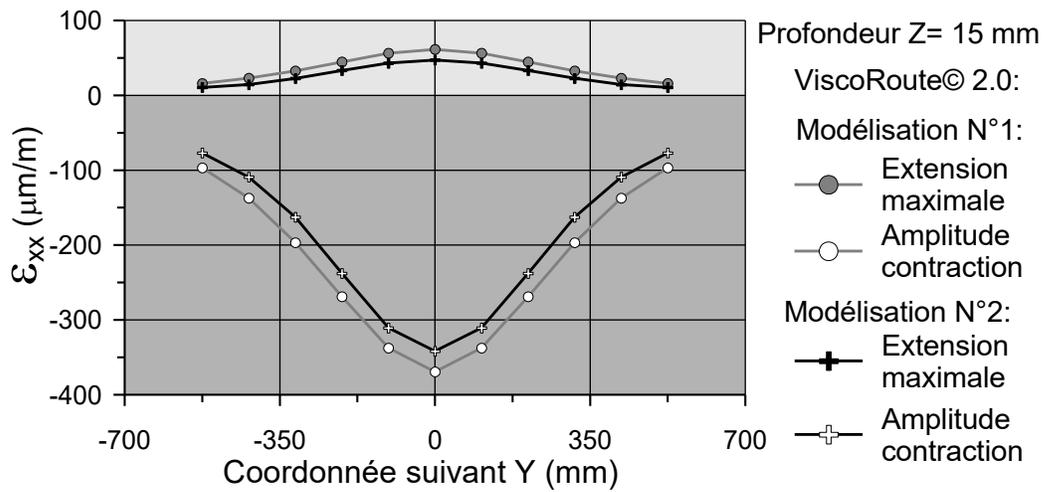
Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 33



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

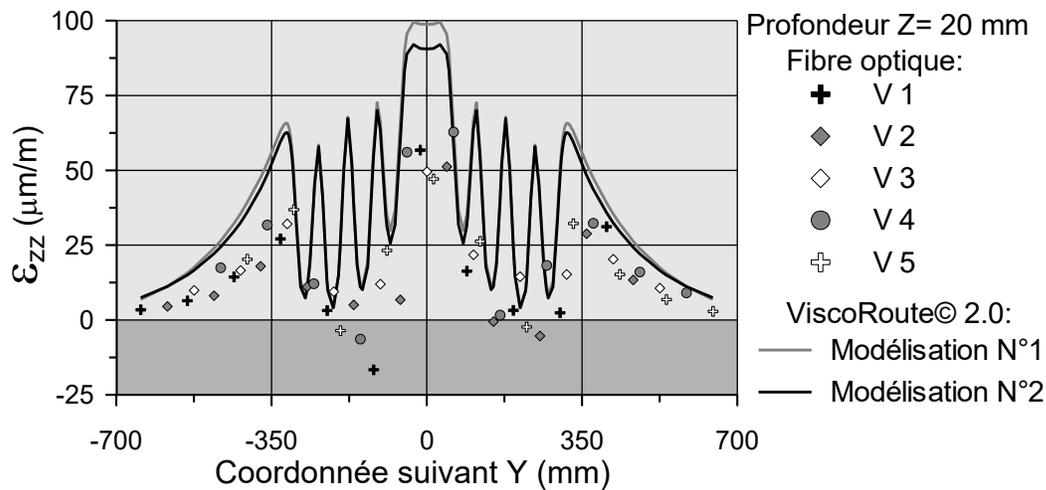
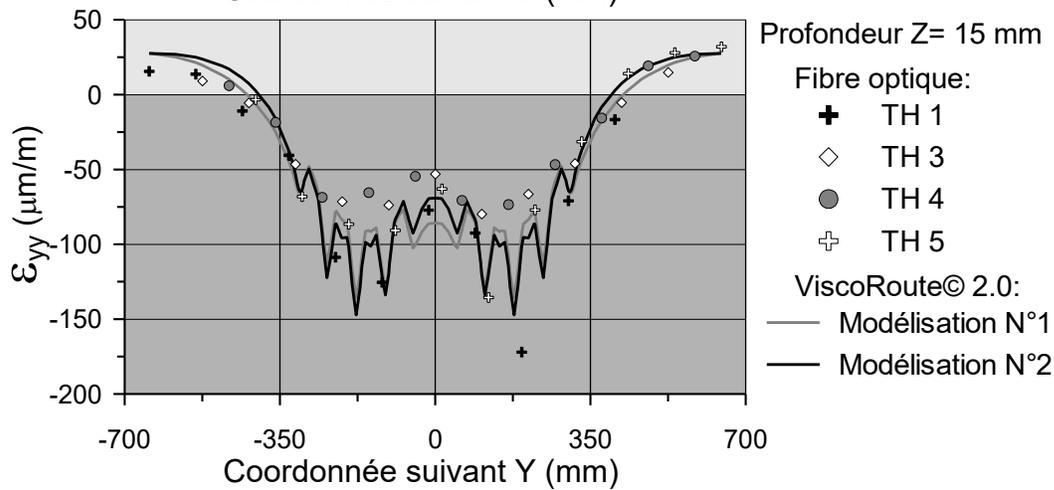
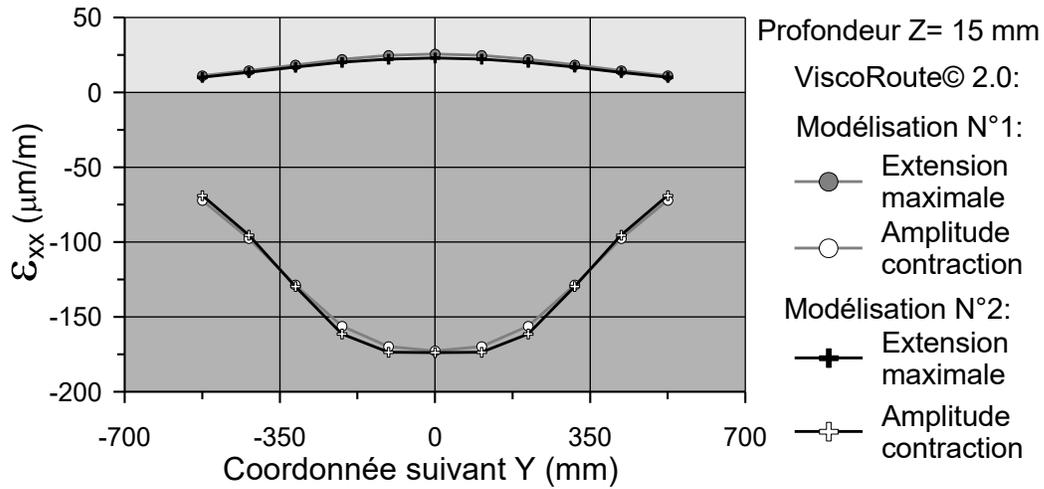
Section A - Cas expérimental N° 34



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

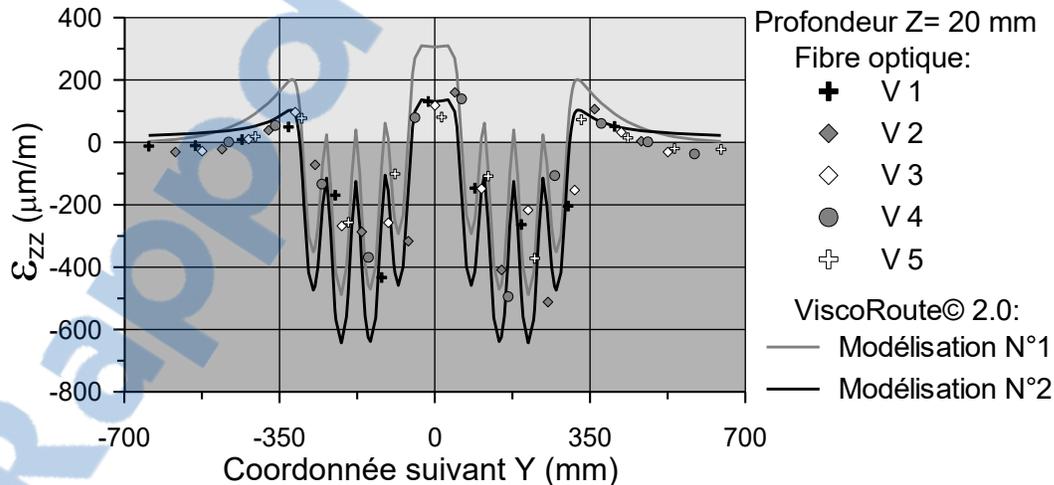
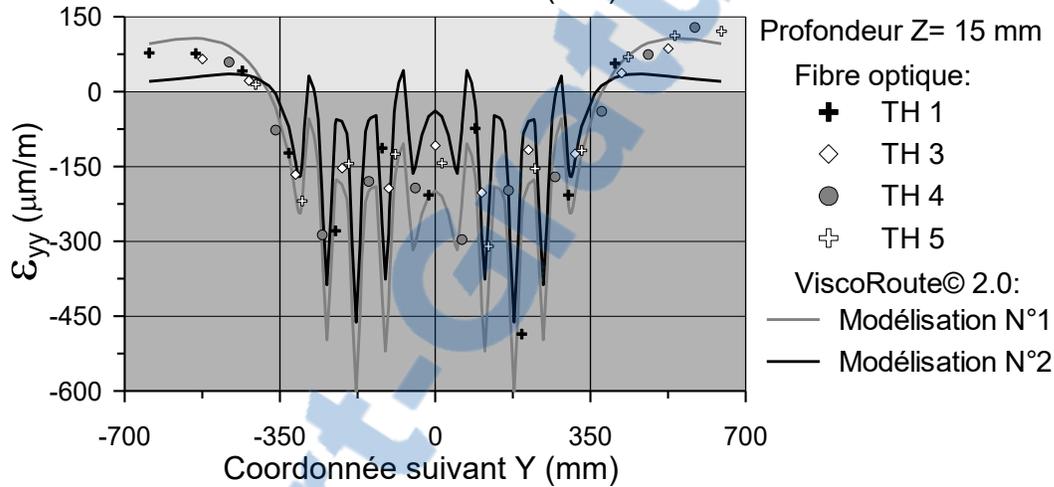
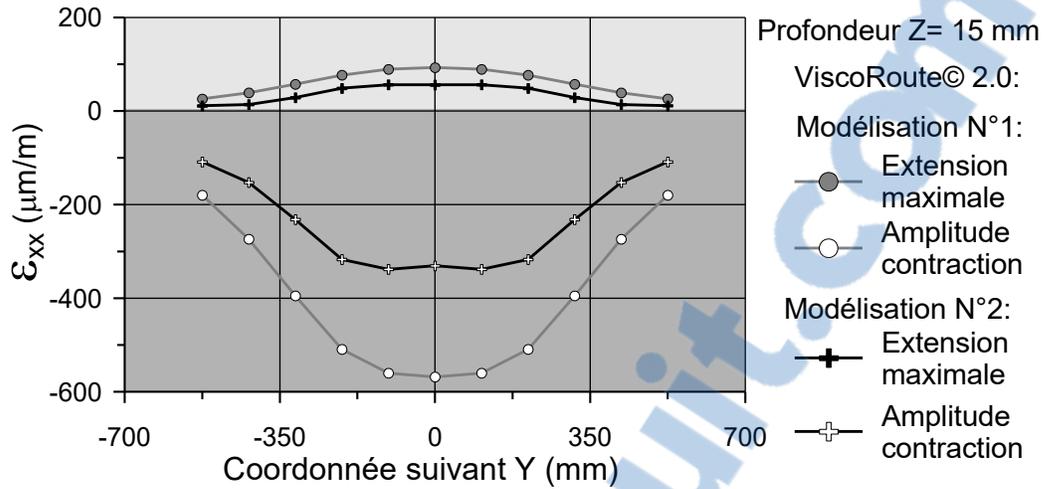
Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 41



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

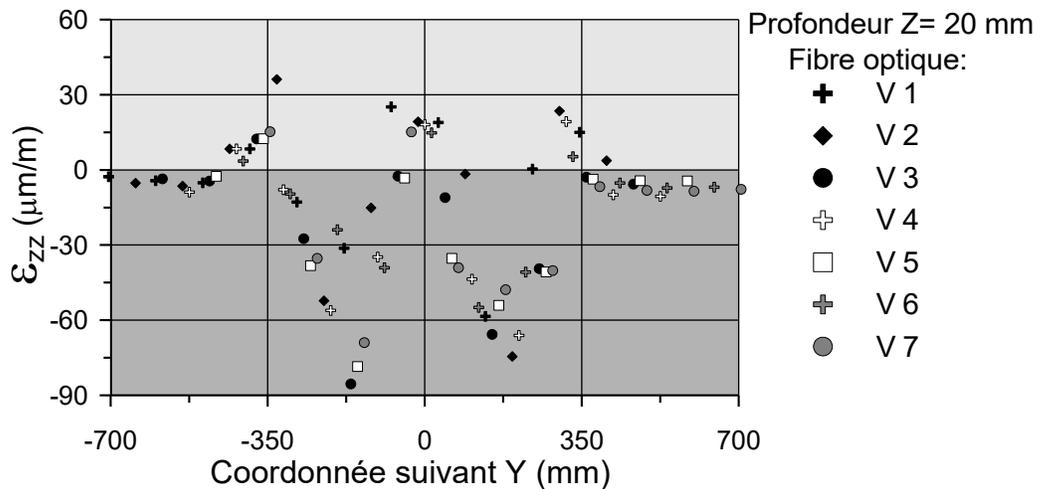
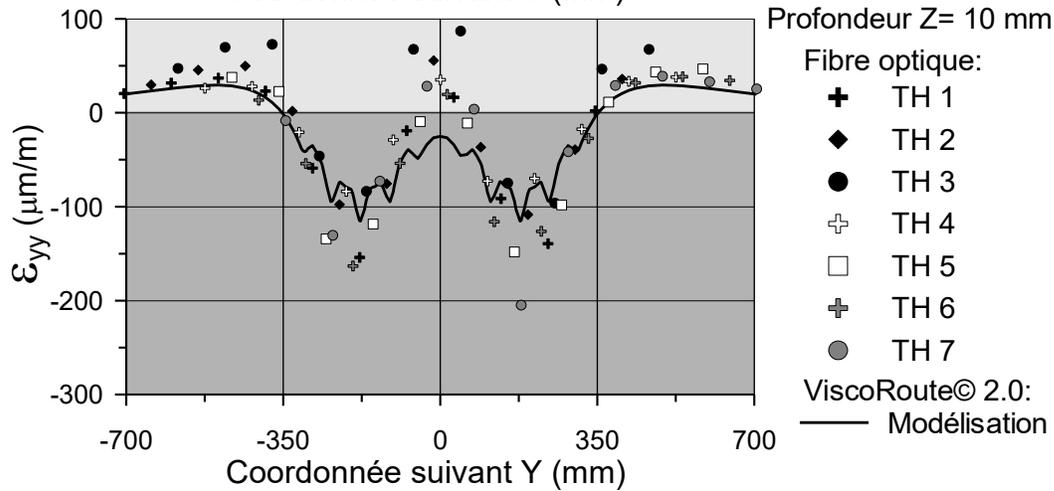
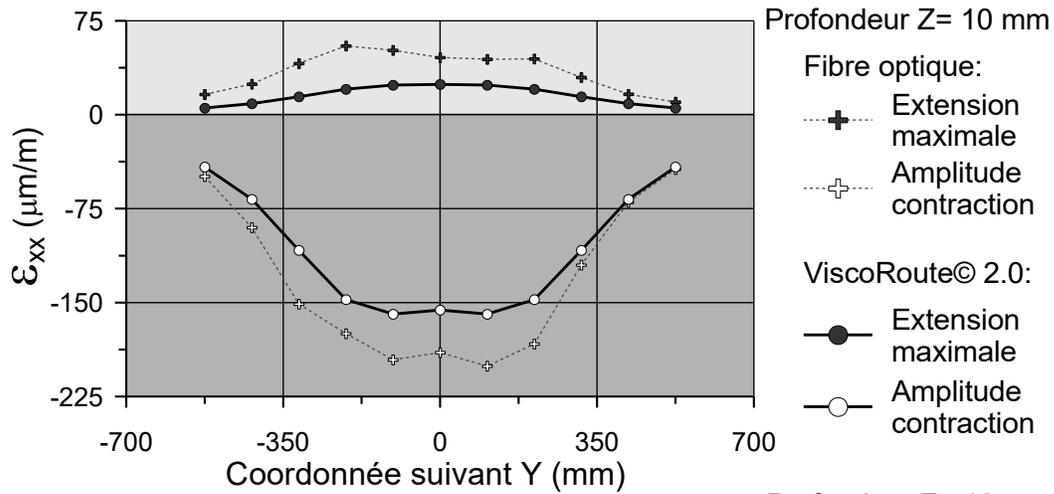
Section A - Cas expérimental N° 42



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques

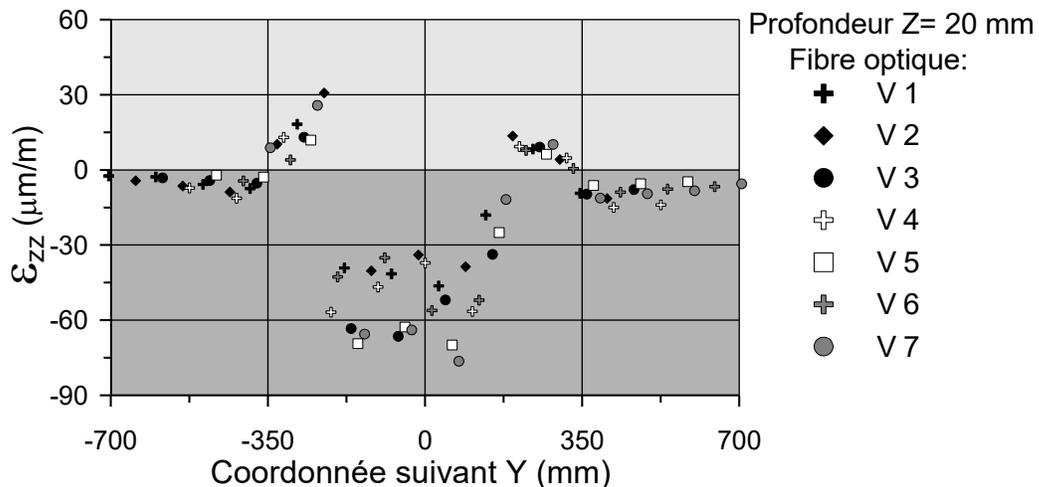
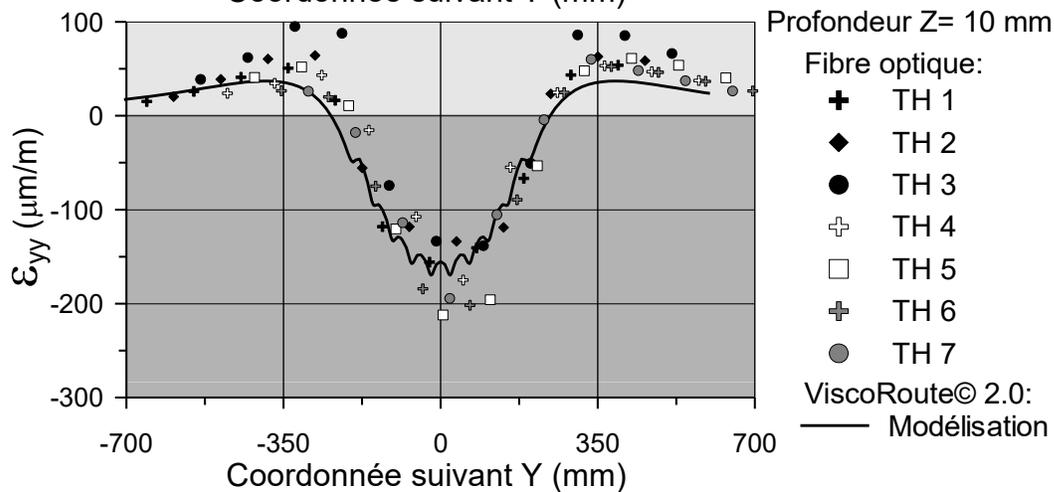
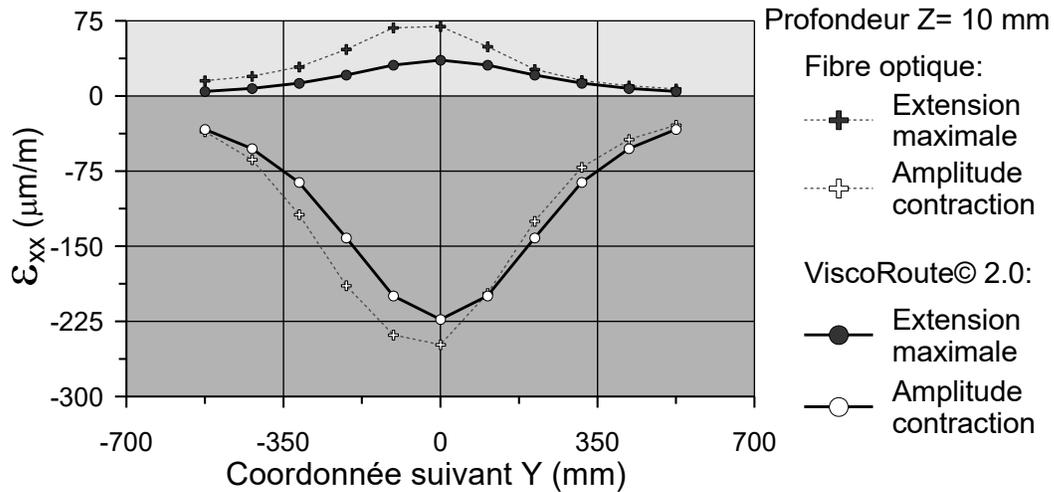
Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section B - Cas expérimental N° 51



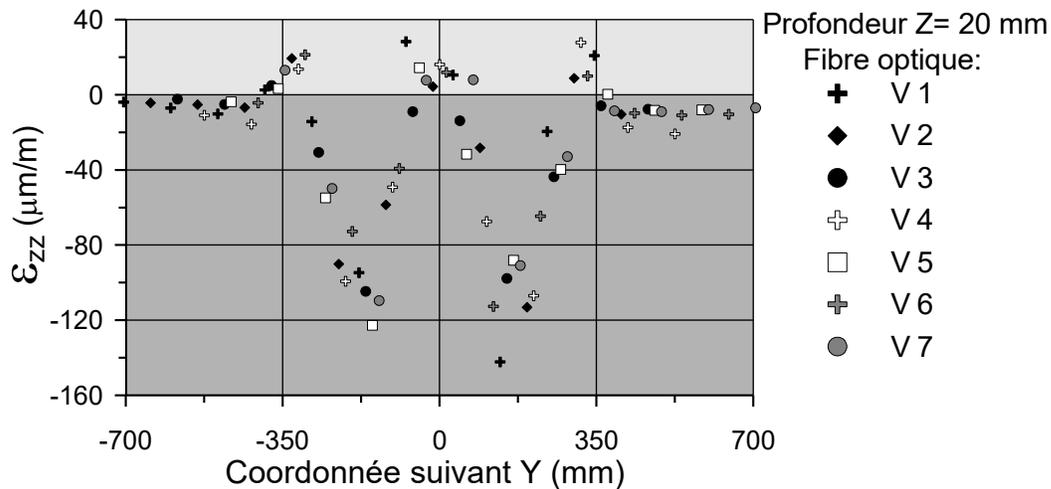
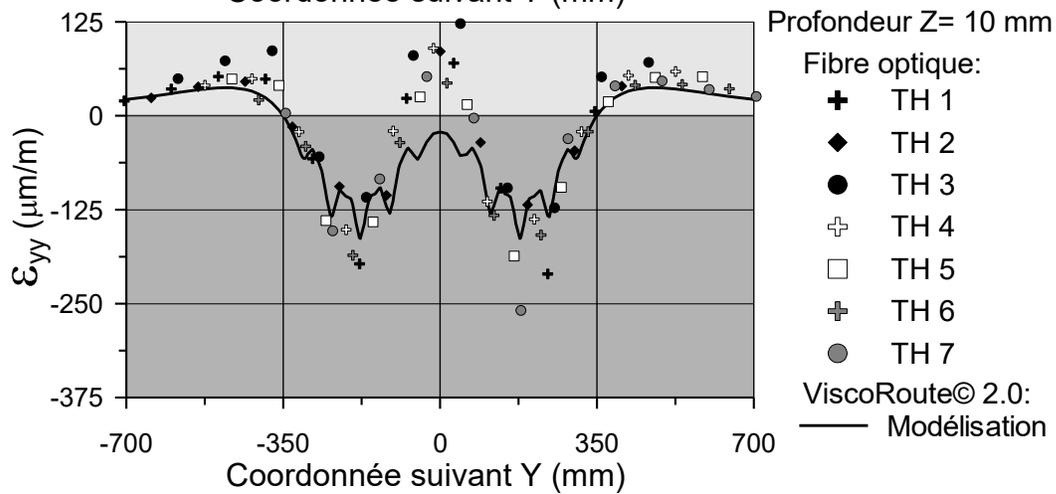
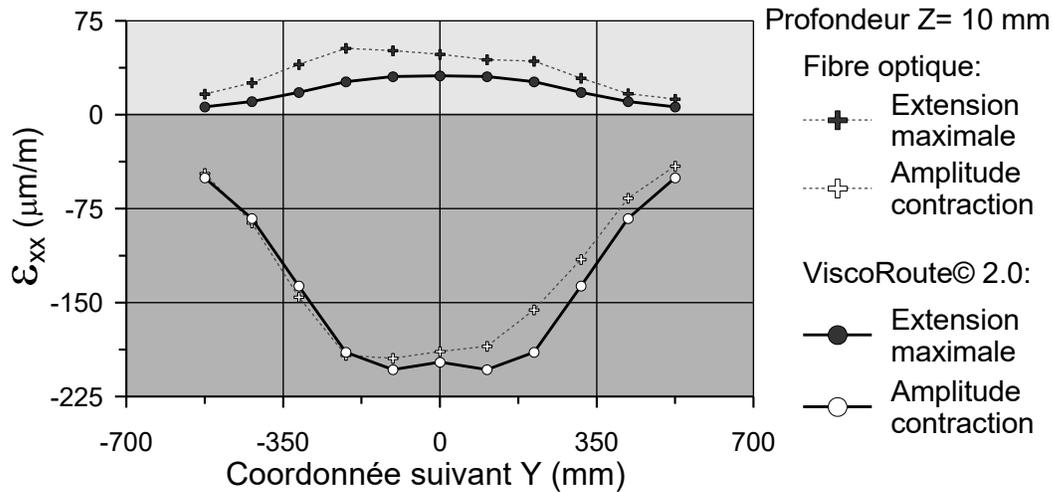
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 52



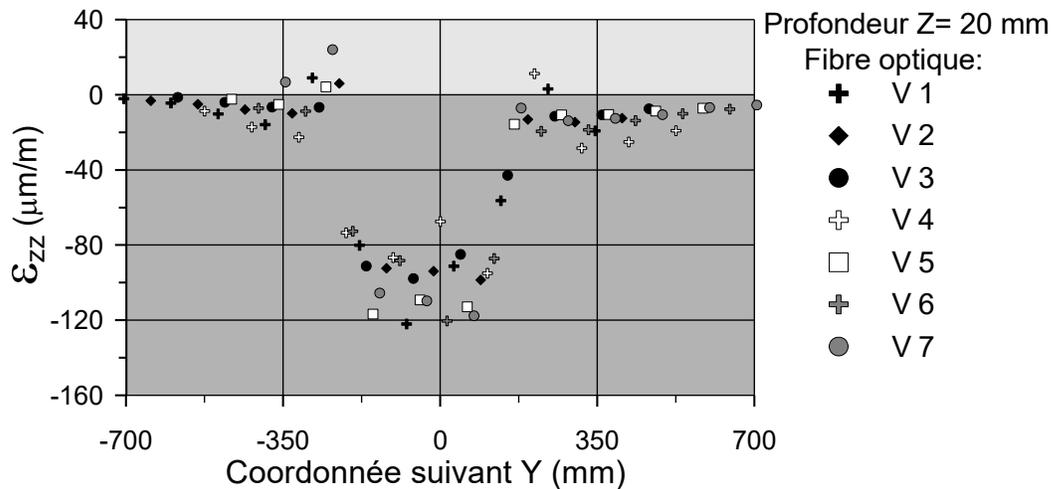
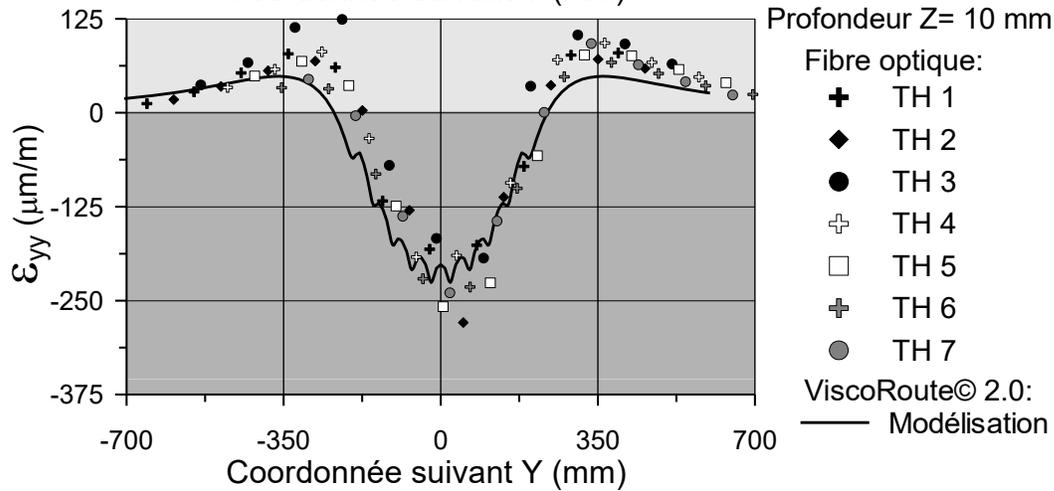
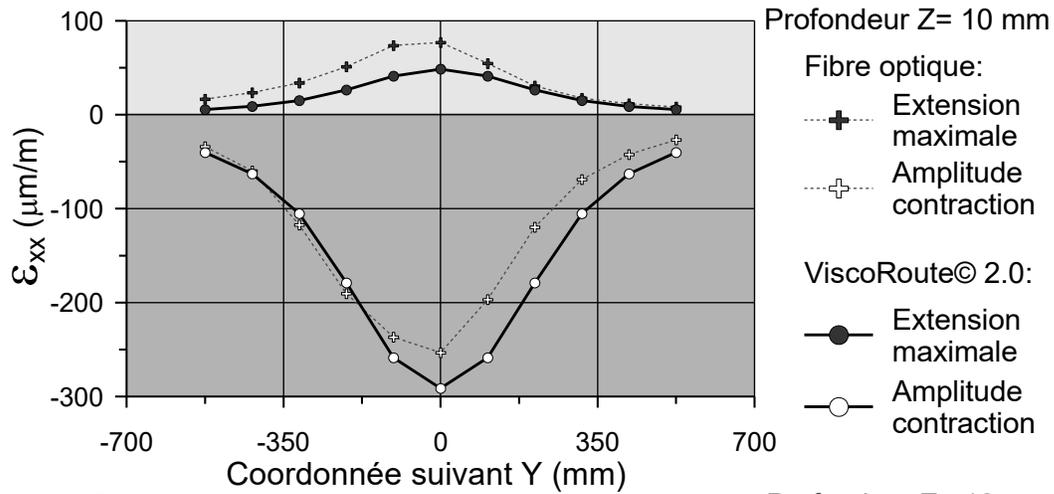
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 55



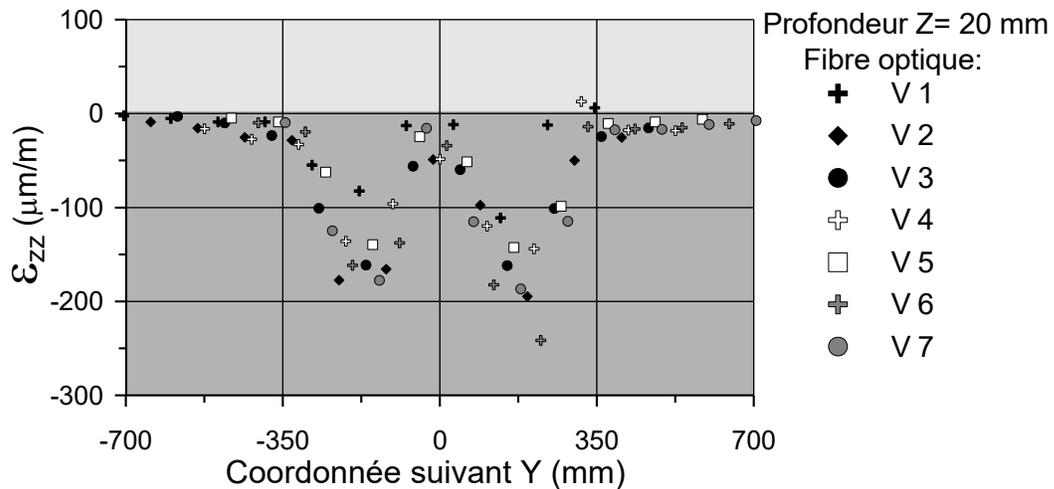
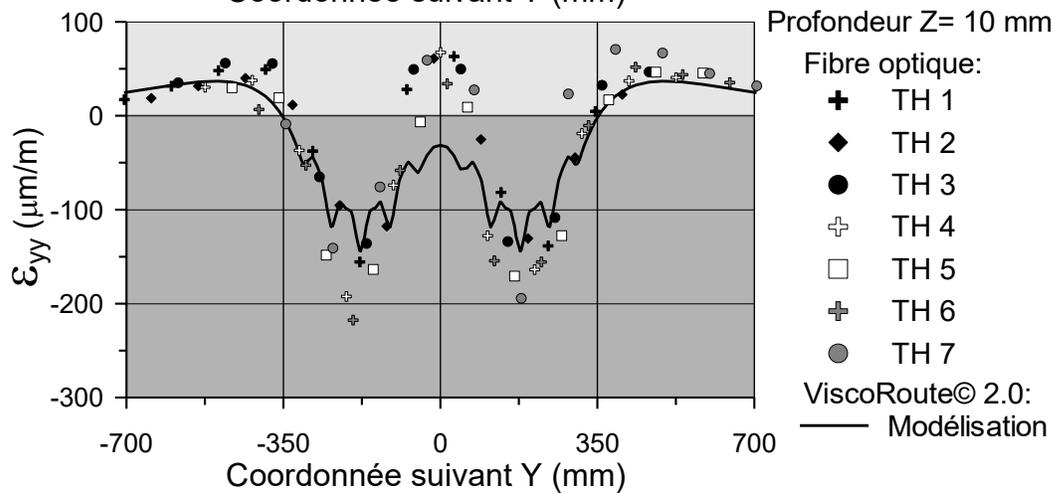
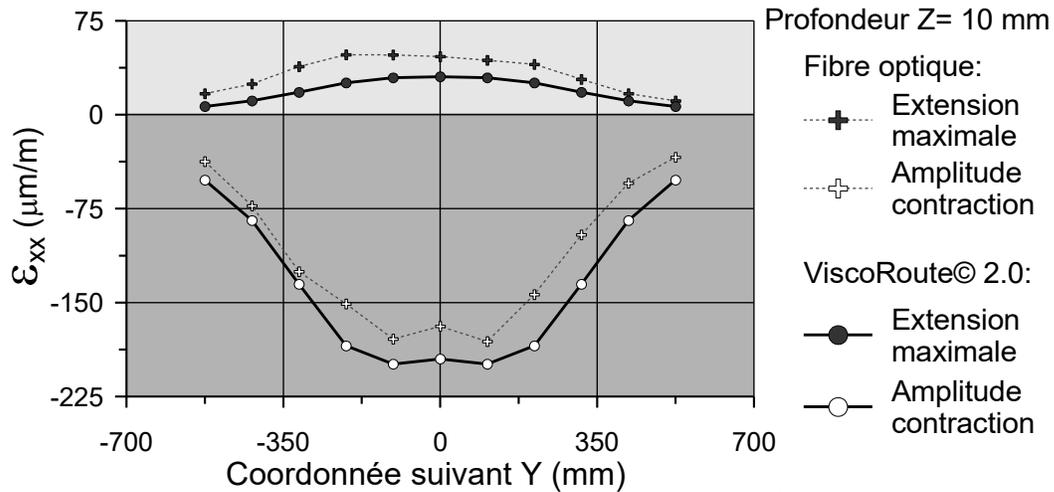
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 56



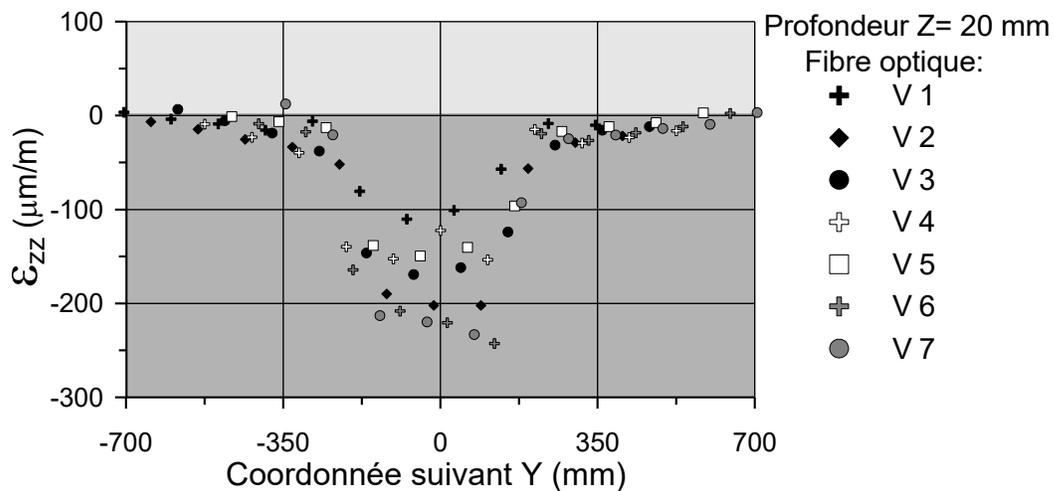
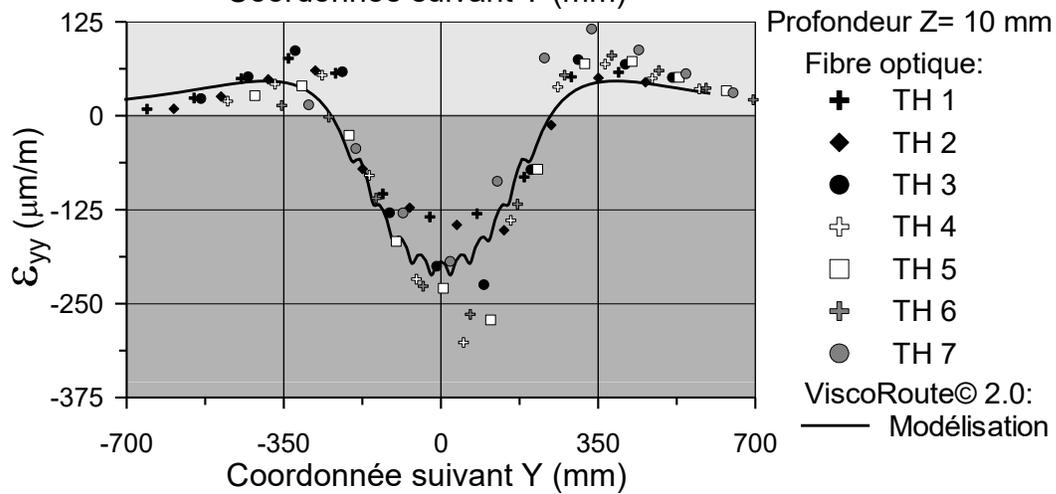
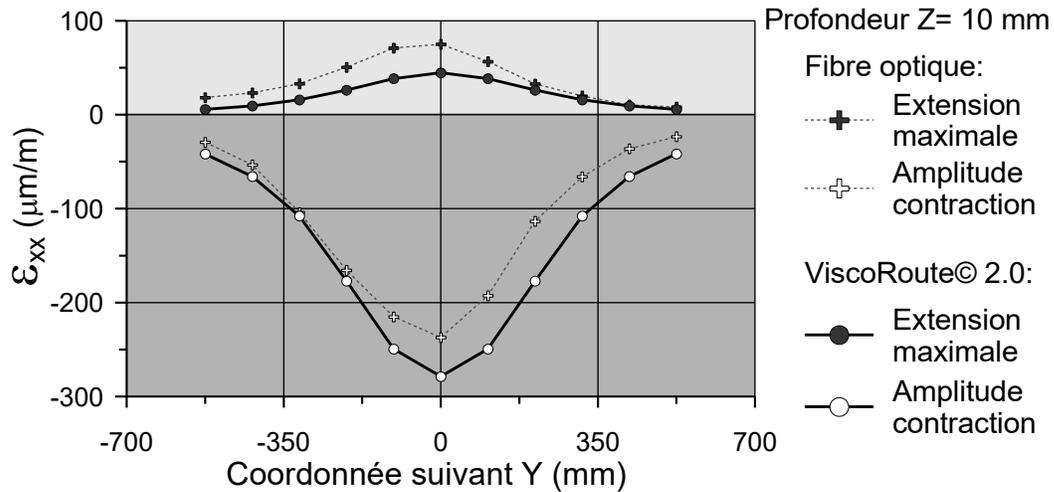
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 61



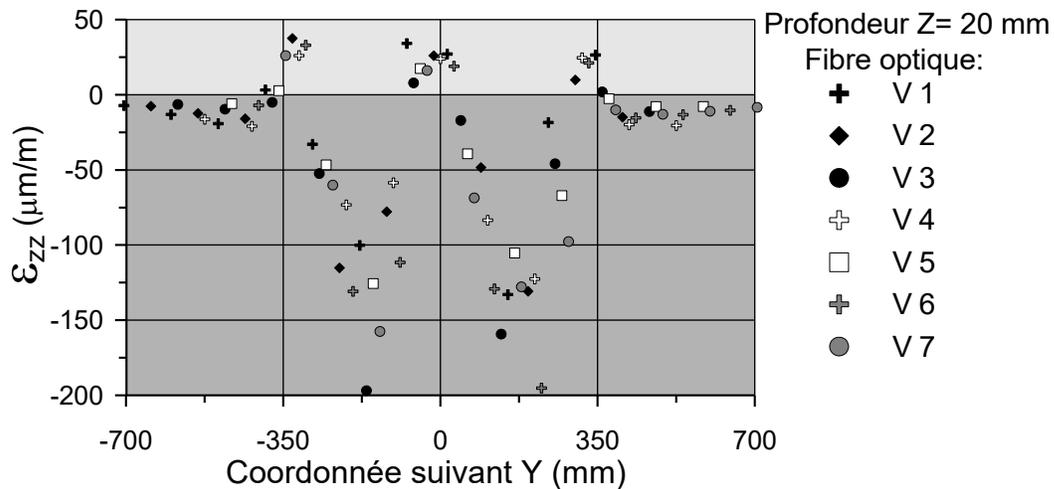
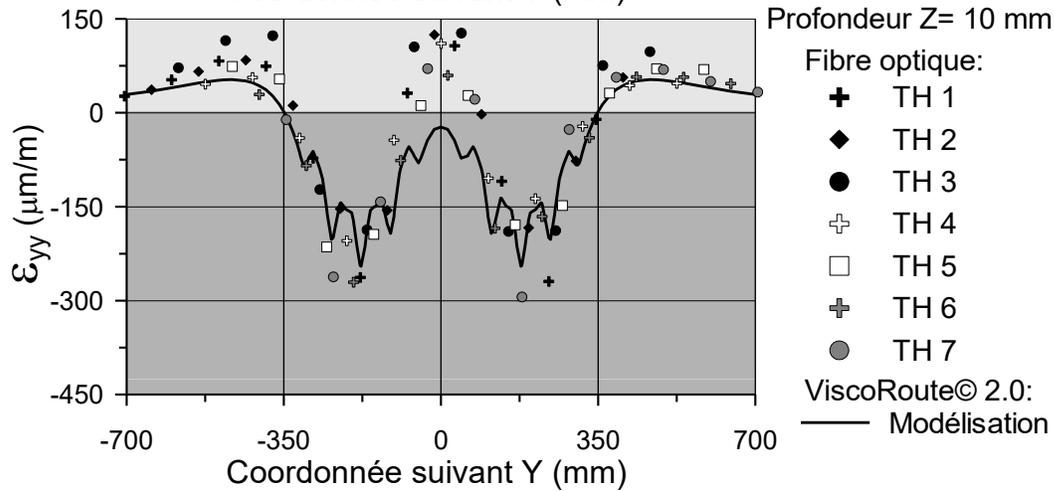
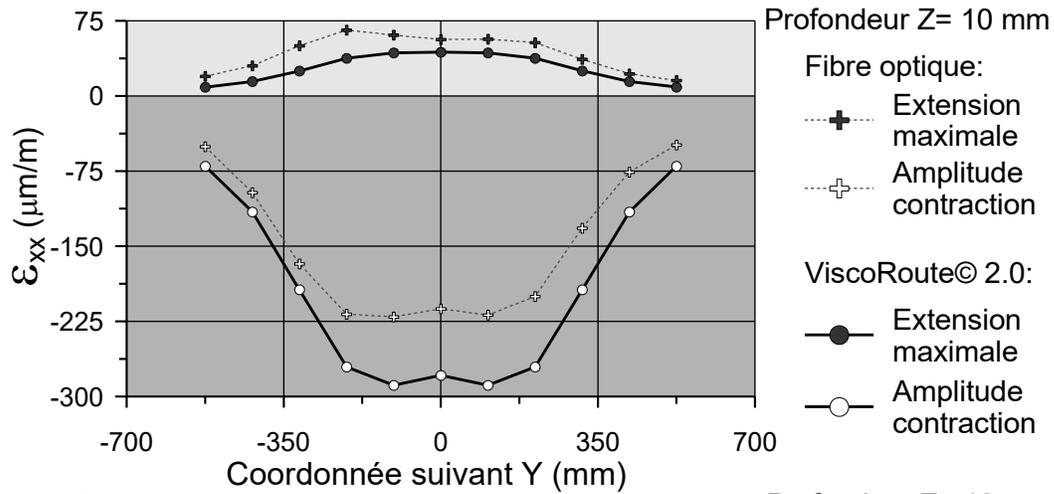
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 62



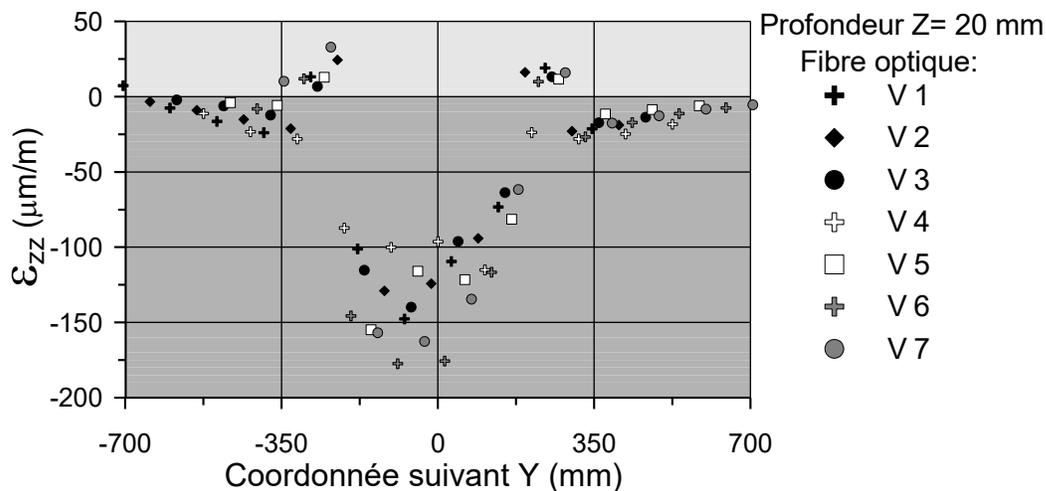
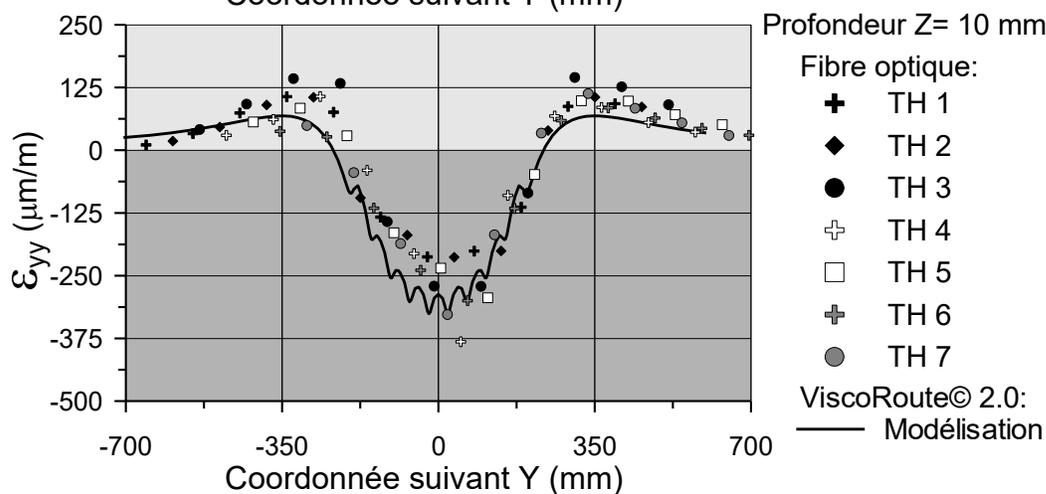
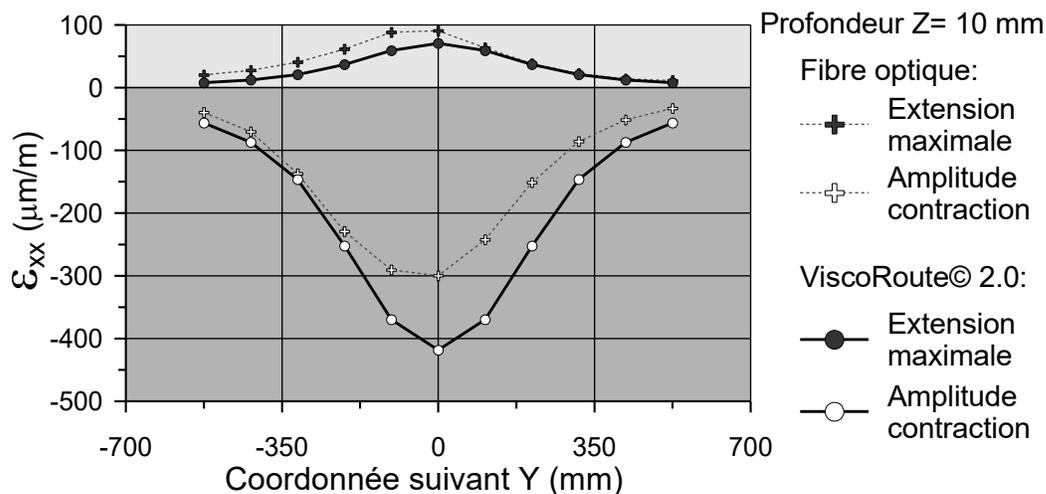
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 65



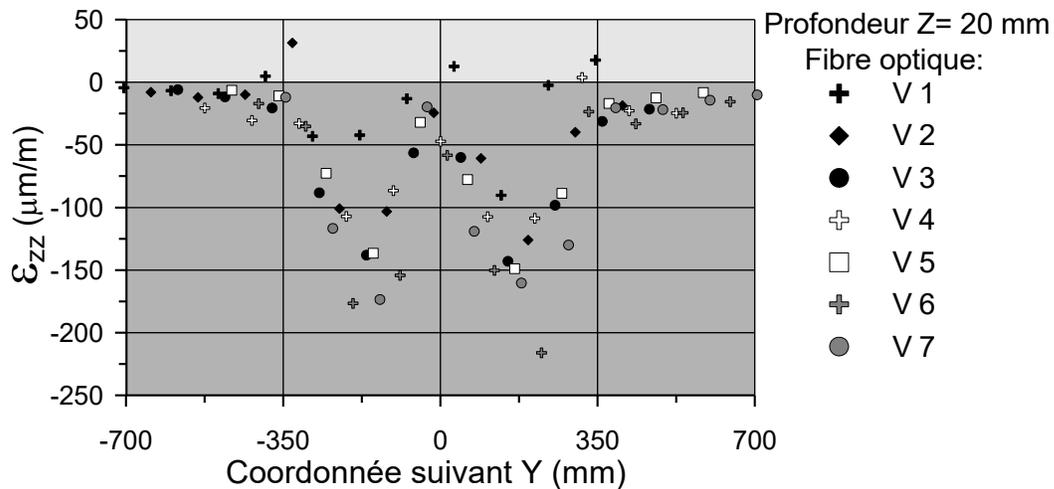
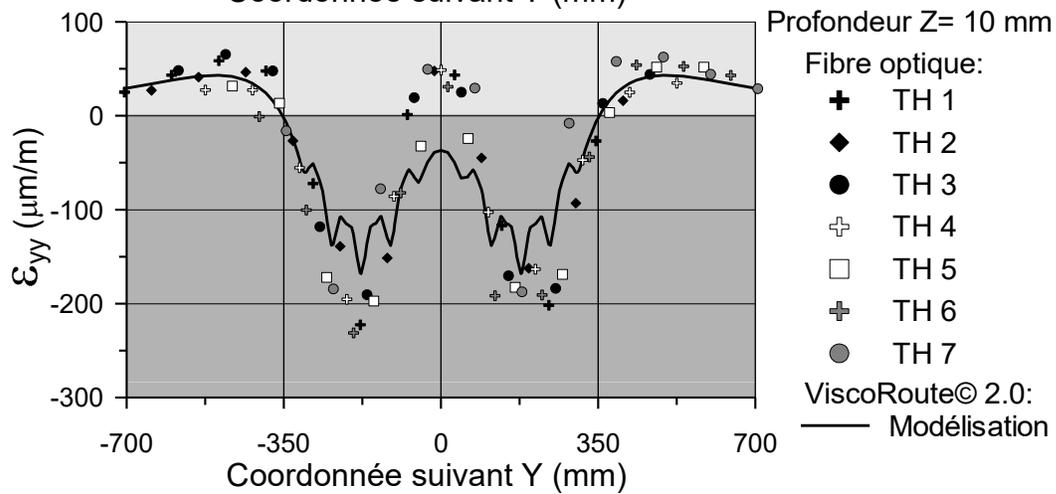
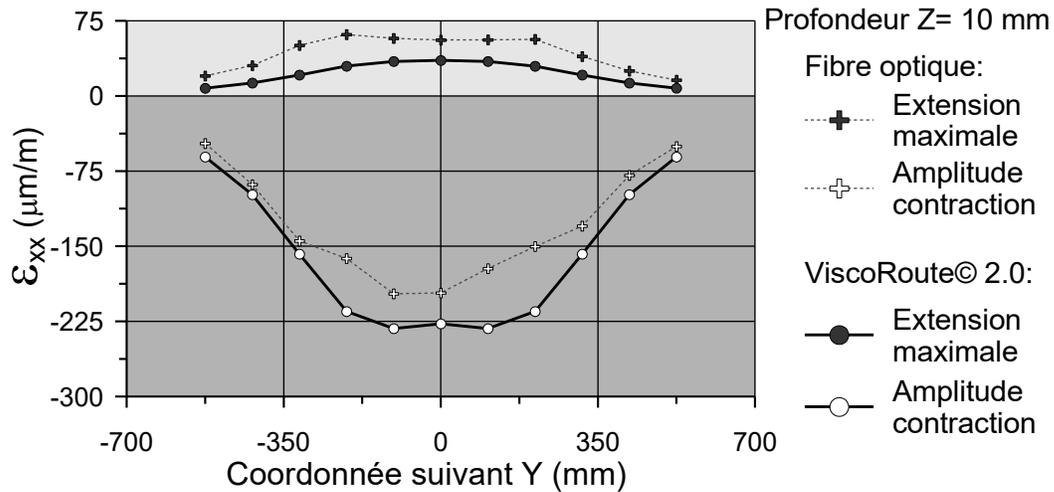
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 66



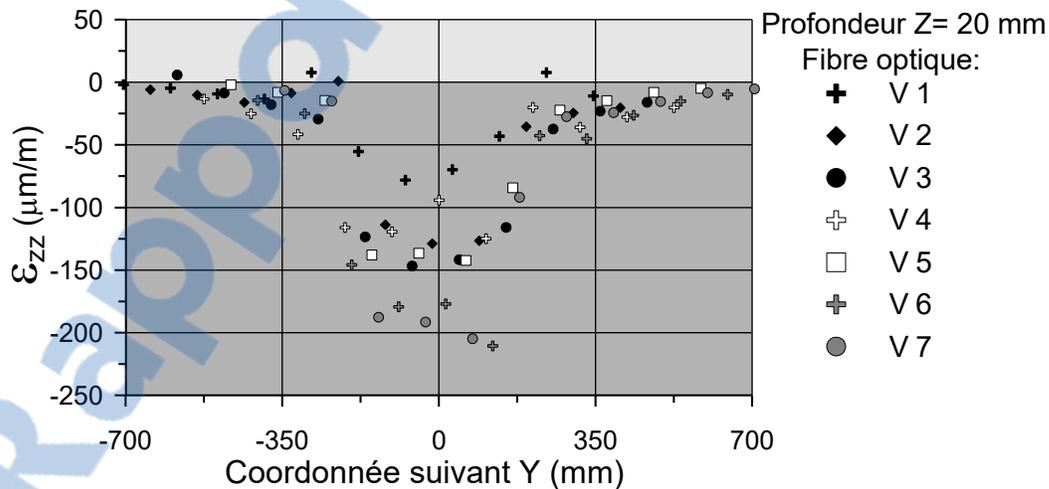
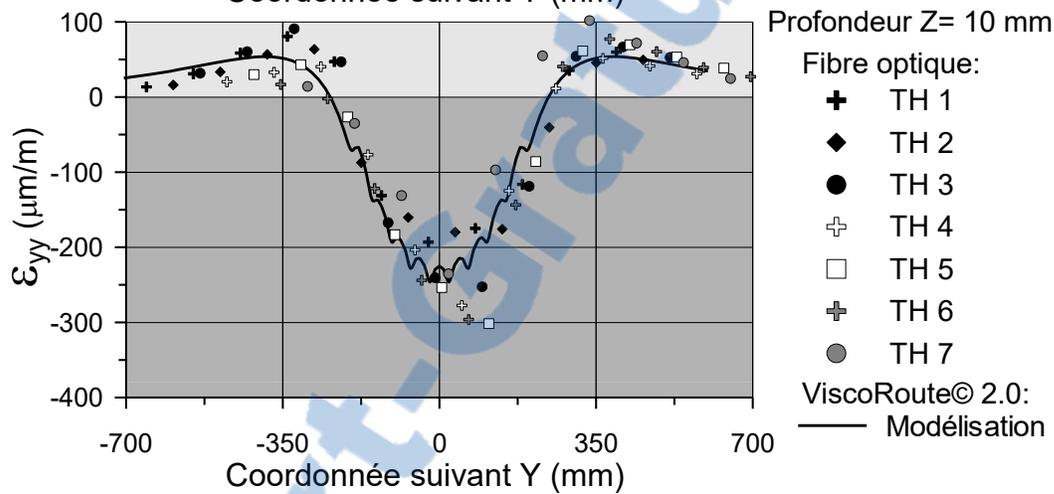
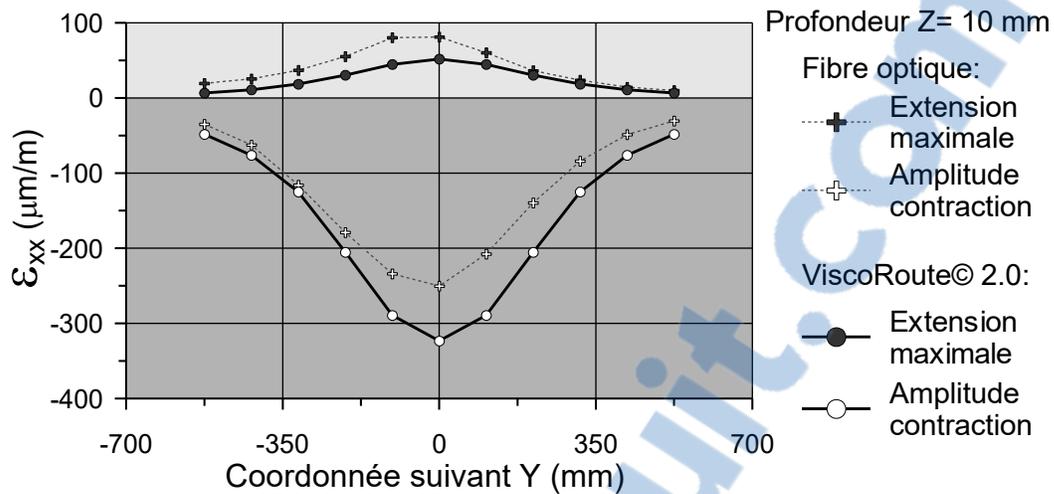
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 71



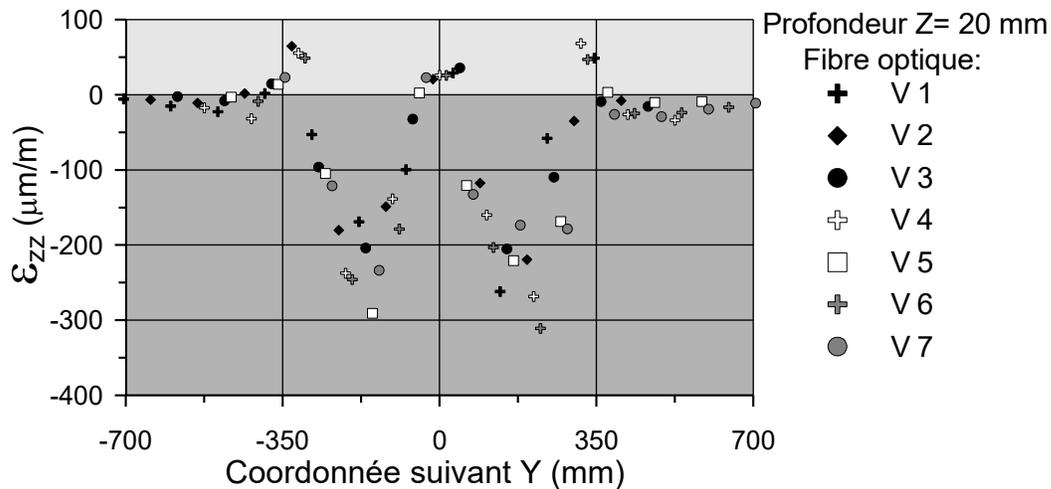
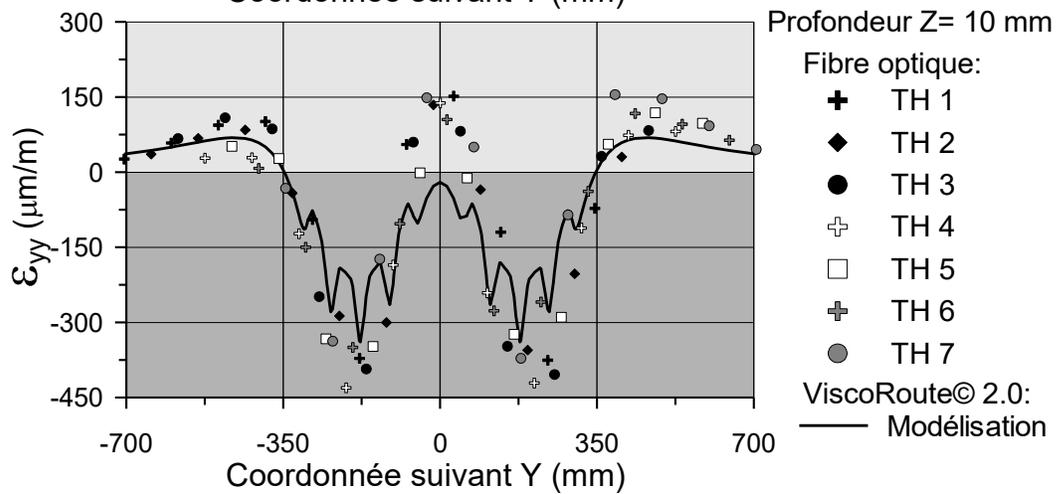
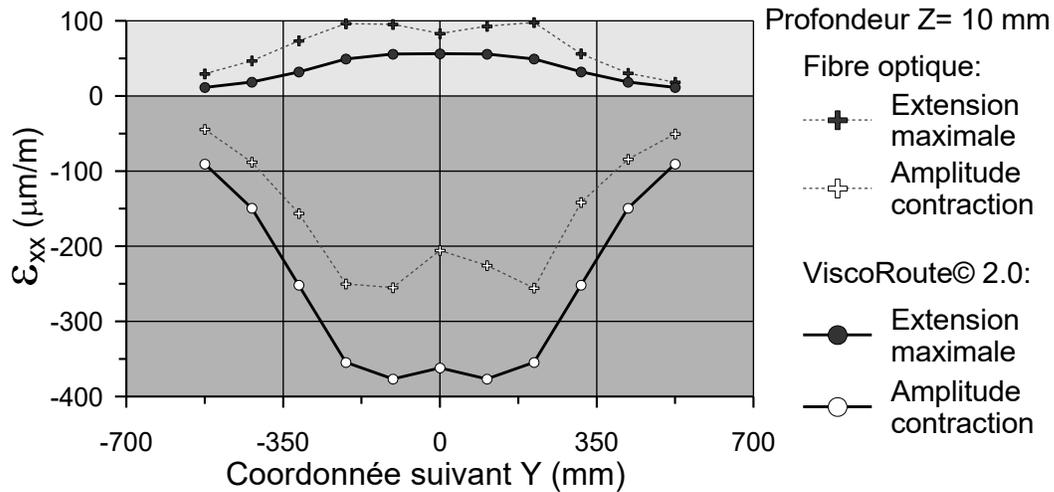
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 72



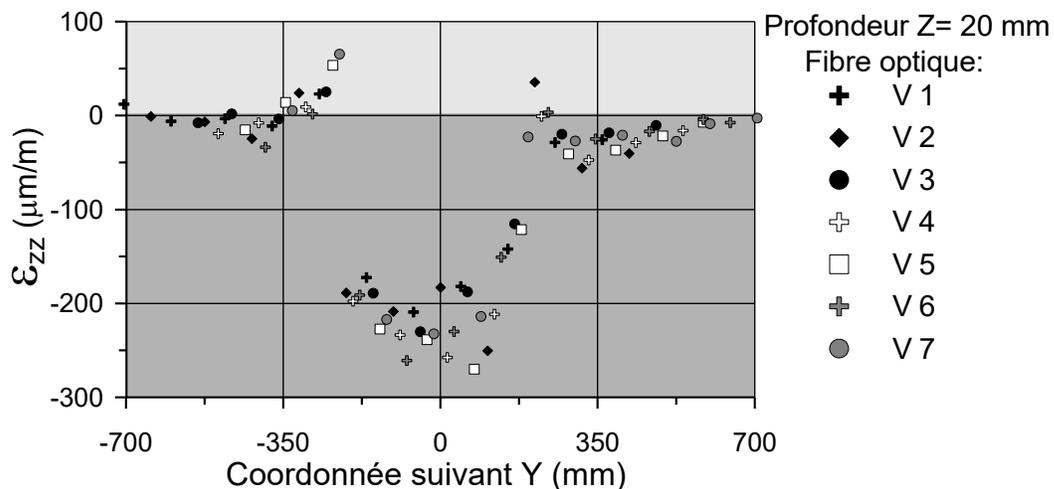
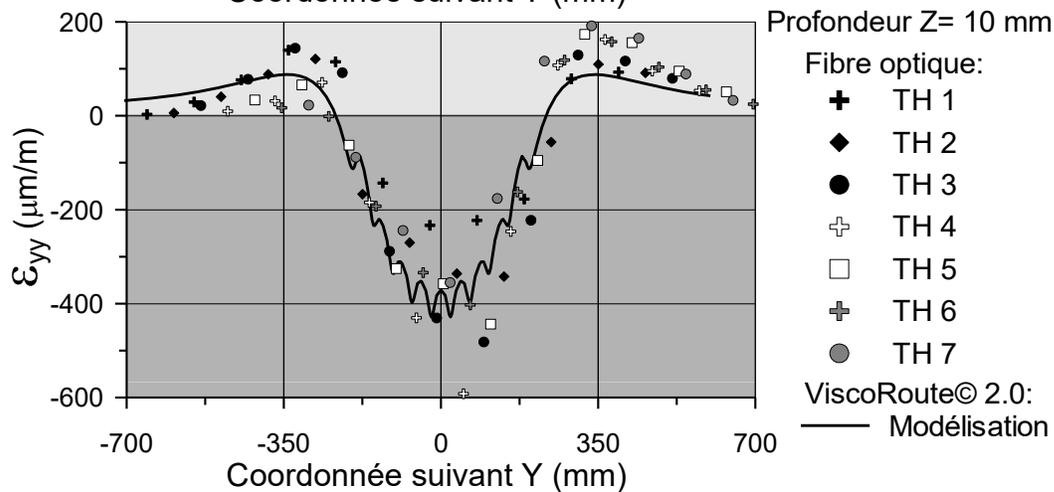
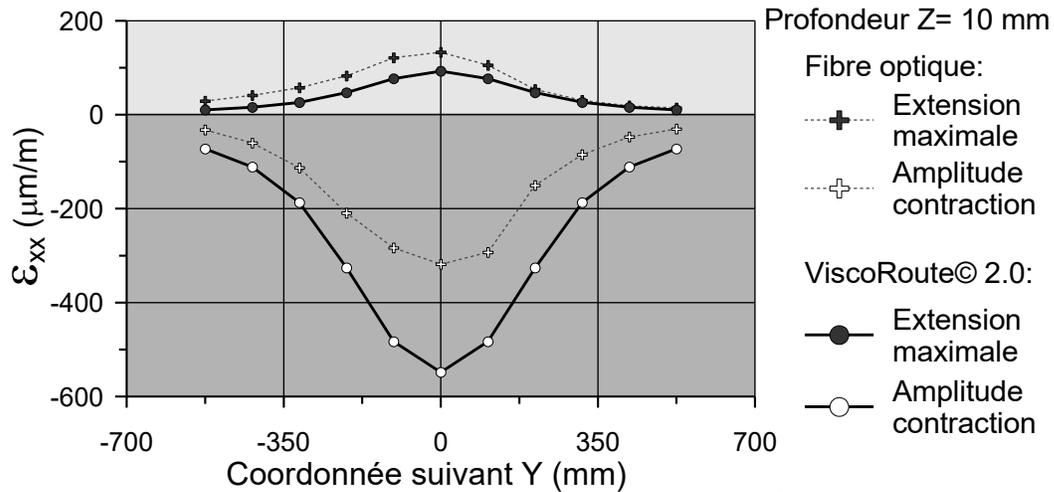
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 73



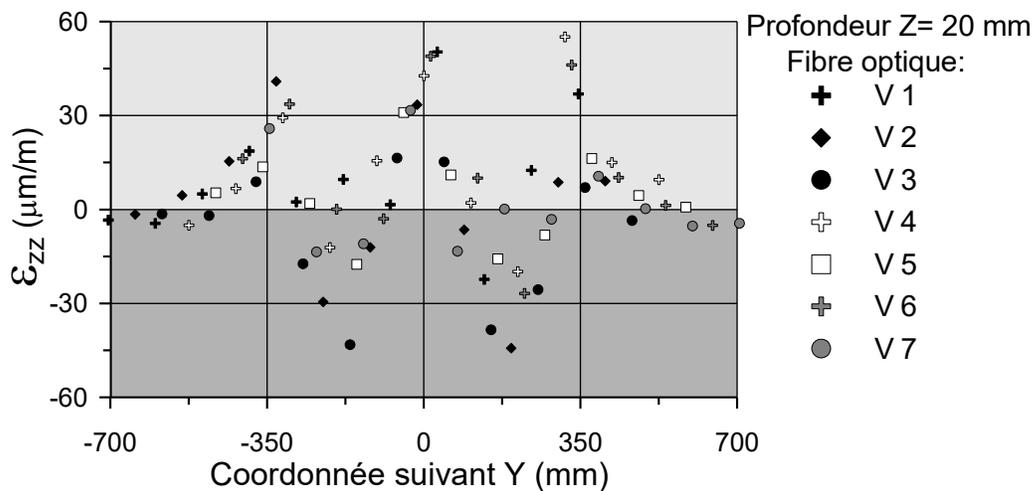
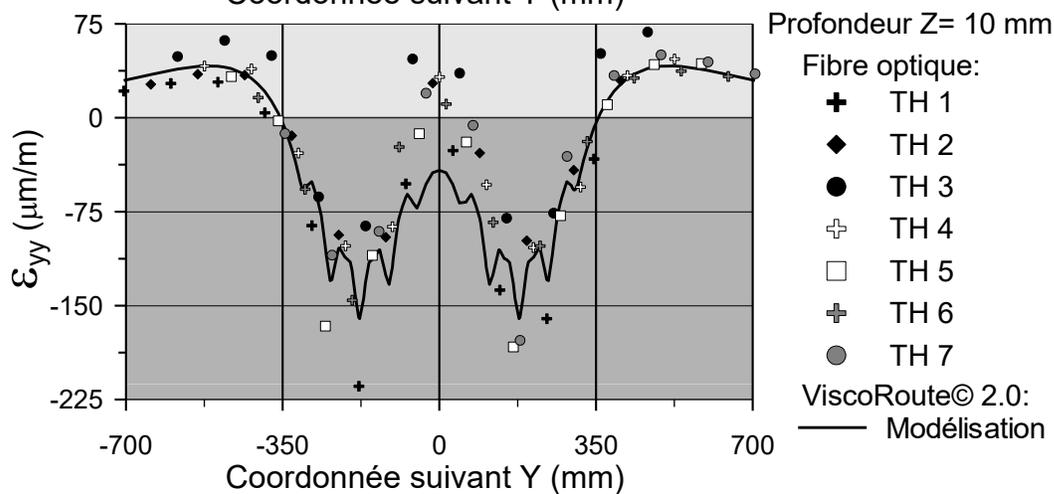
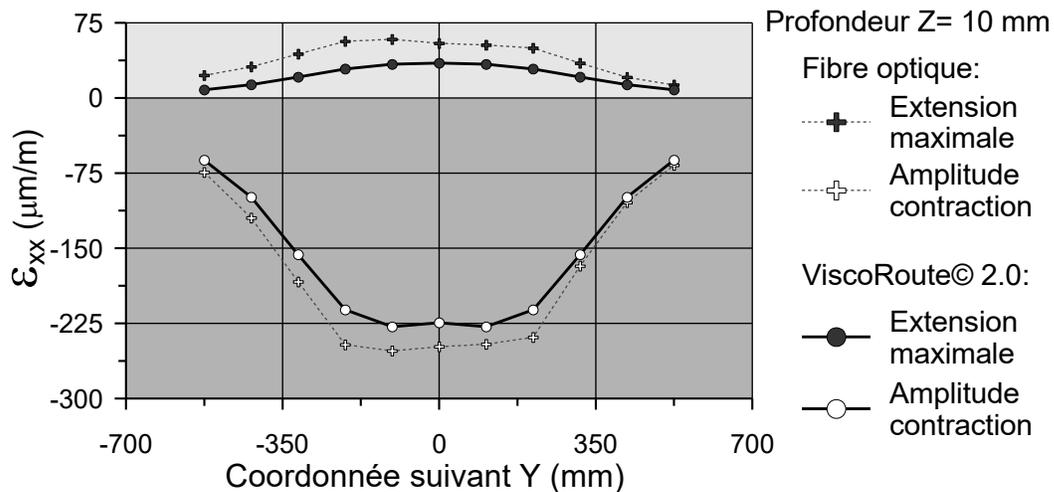
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 74



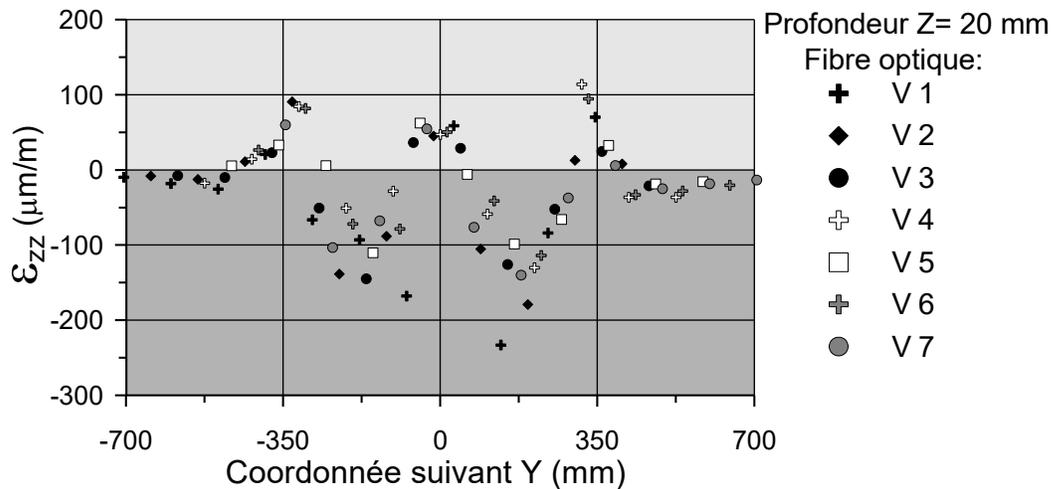
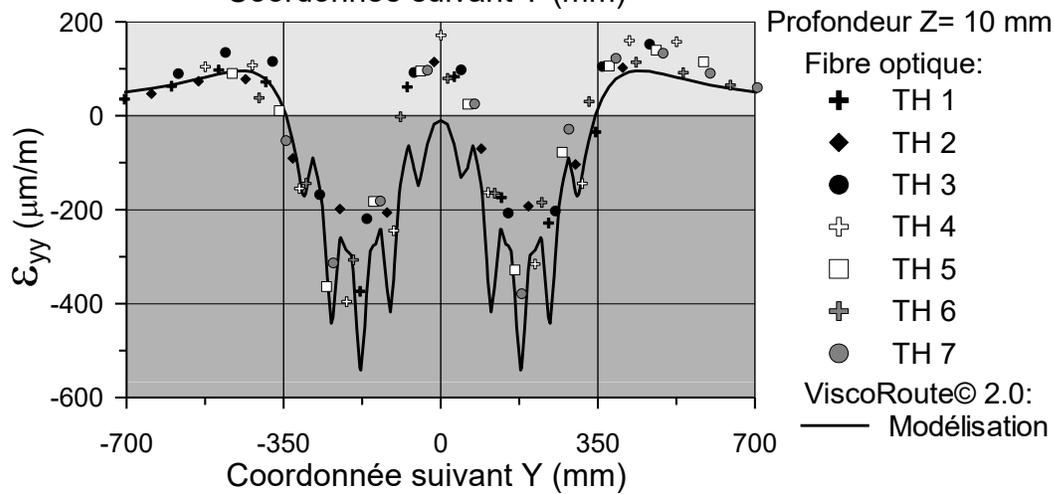
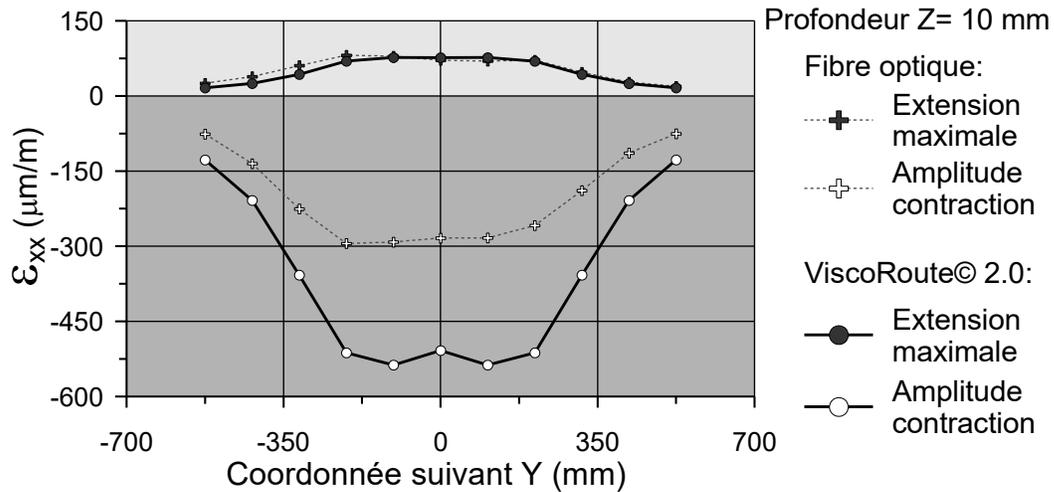
Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

Section B - Cas expérimental N° 81



Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

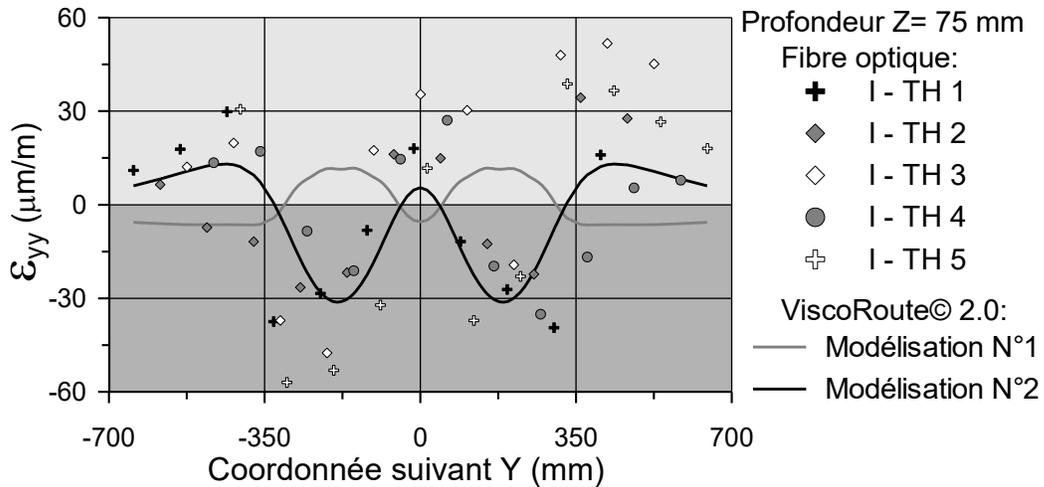
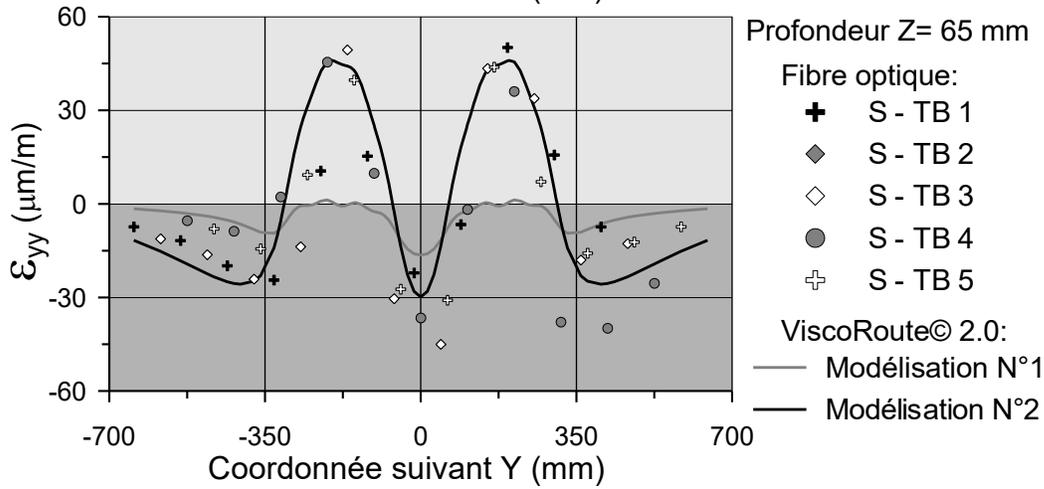
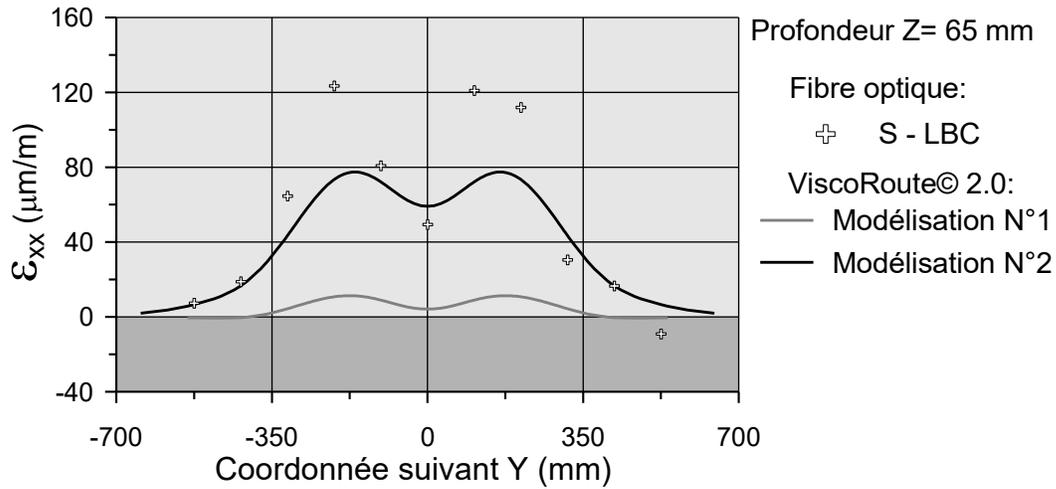
Section B - Cas expérimental N° 82



Modélisation ViscoRoute© 2.0: Couche de BBSG 0/10 viscoélastiques

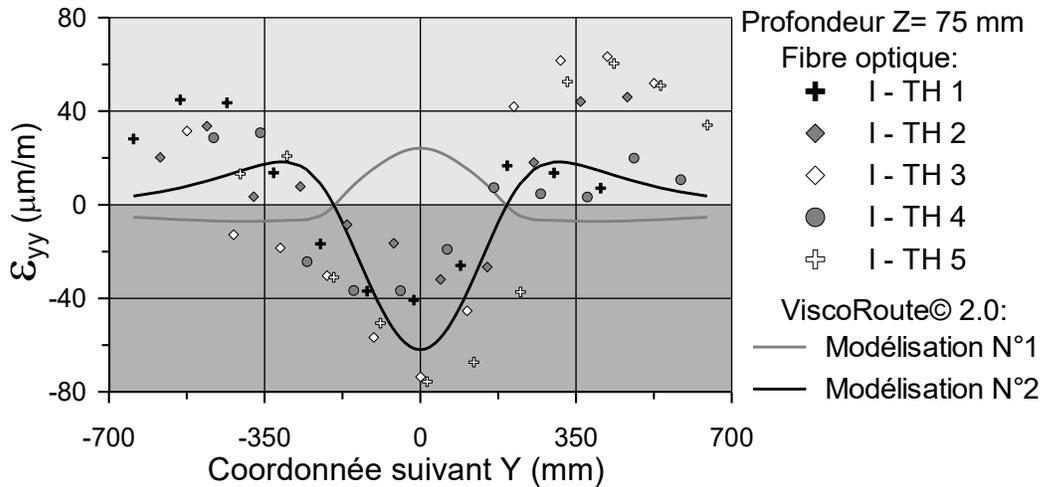
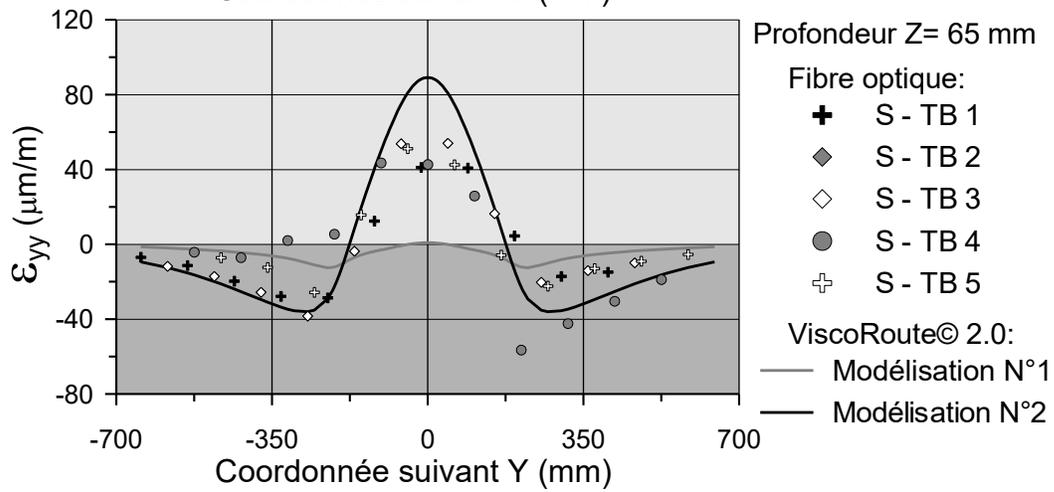
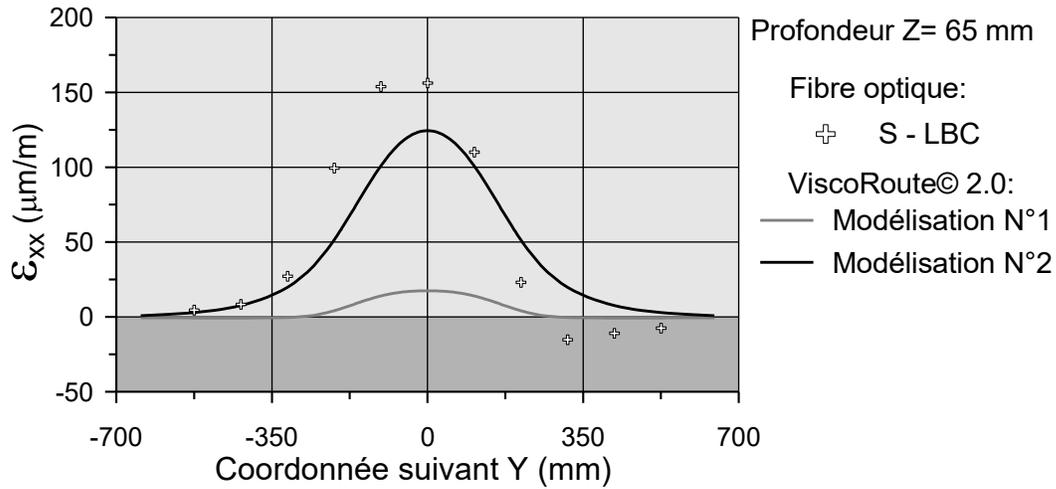
**Bassin des déformations longitudinales et transversales
au bas de la couche de BBSG 0/10 ($Z = 65$ mm) et en haut
de la couche de GB 0/14 ($Z = 517$ mm) de la section A.**

Section A - Cas expérimental N° 11



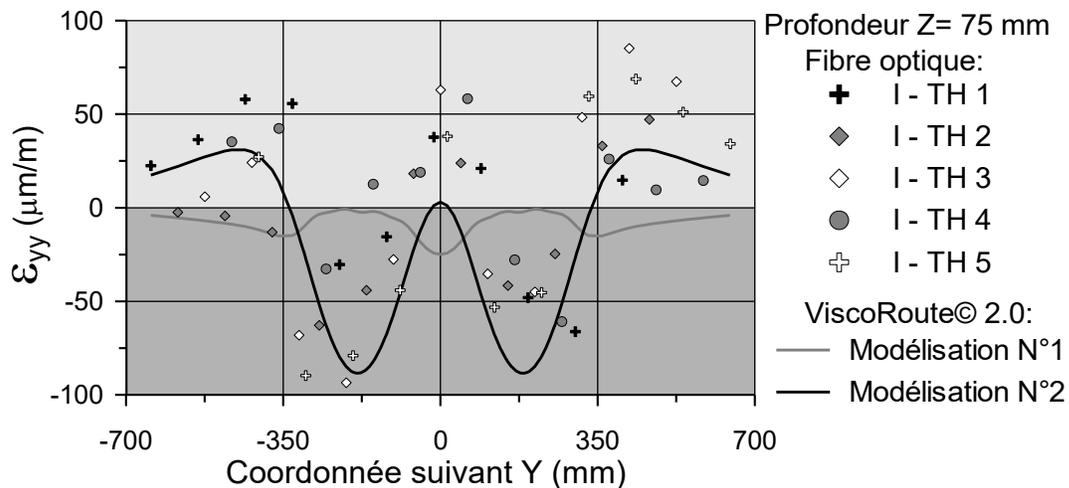
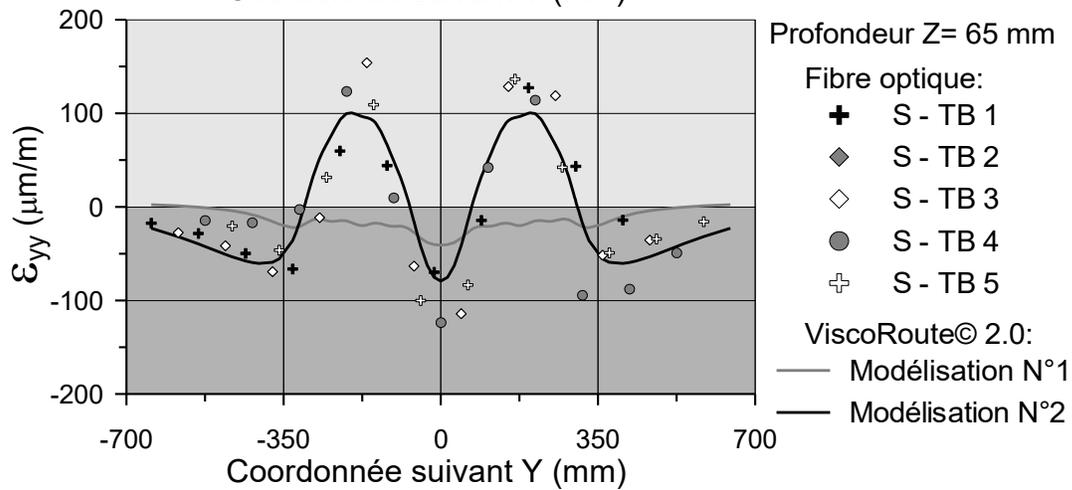
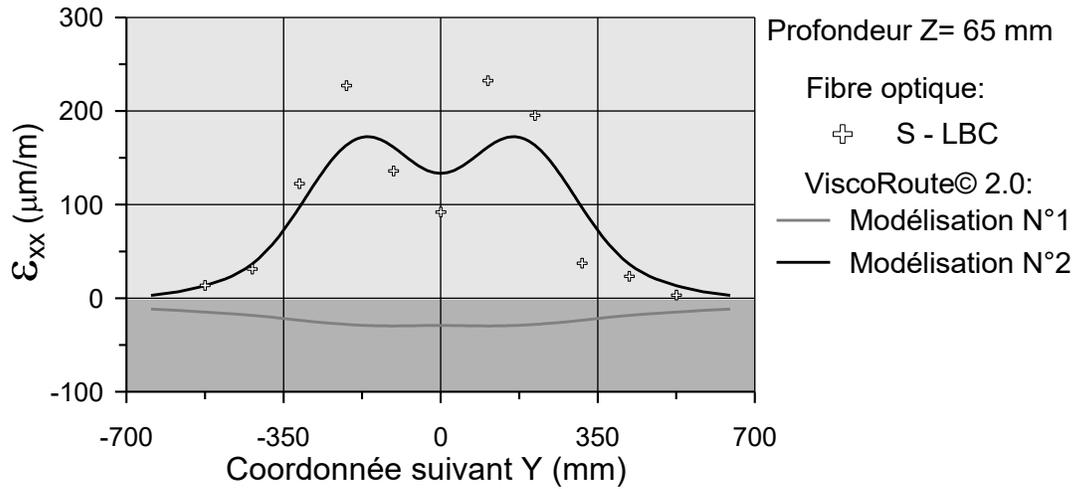
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 12



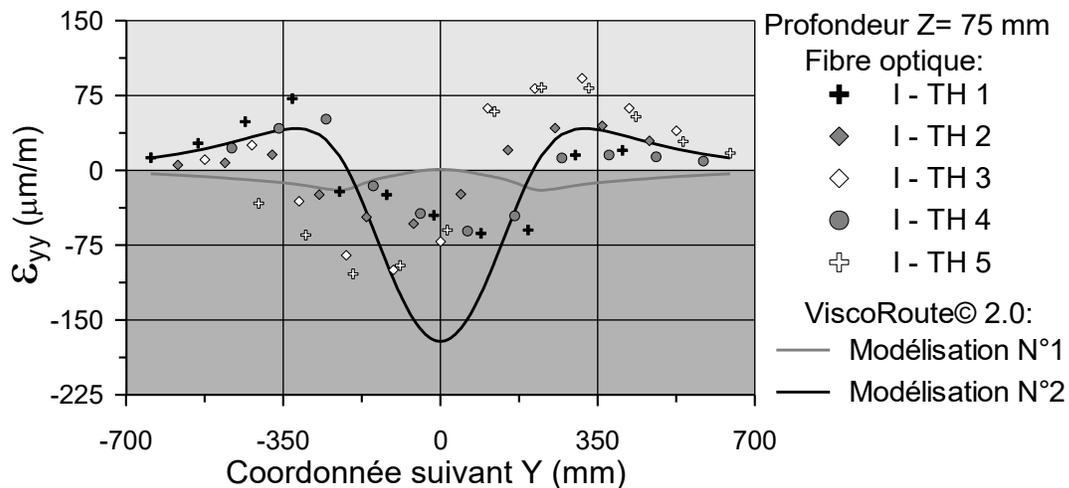
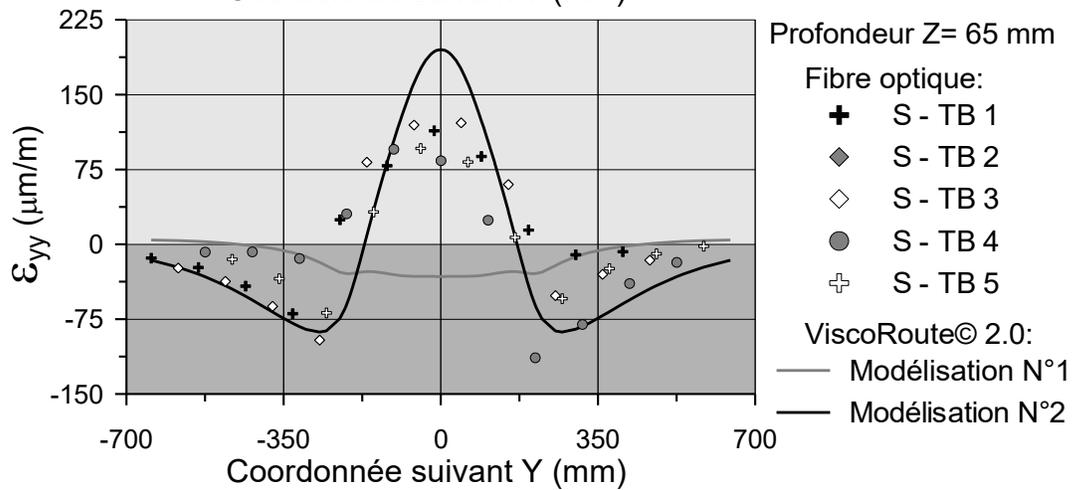
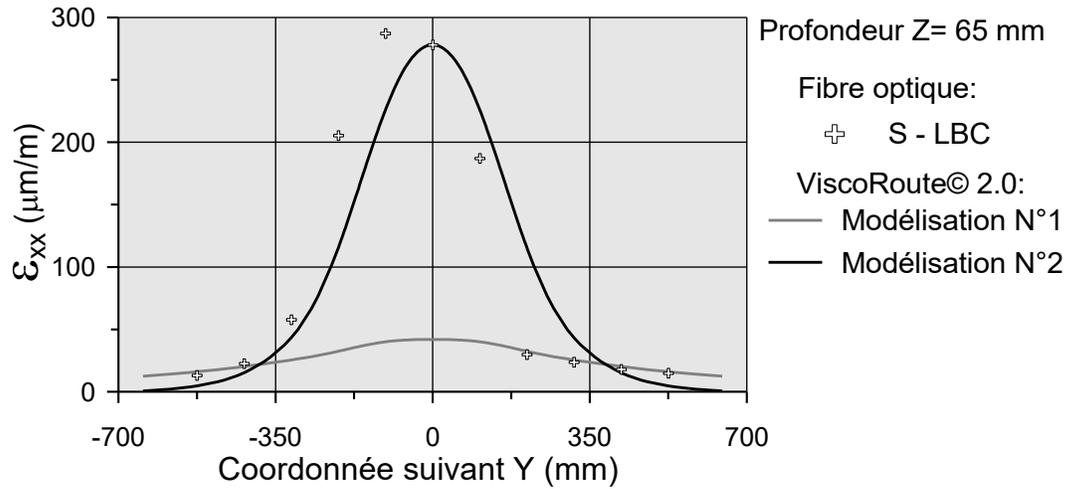
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 13



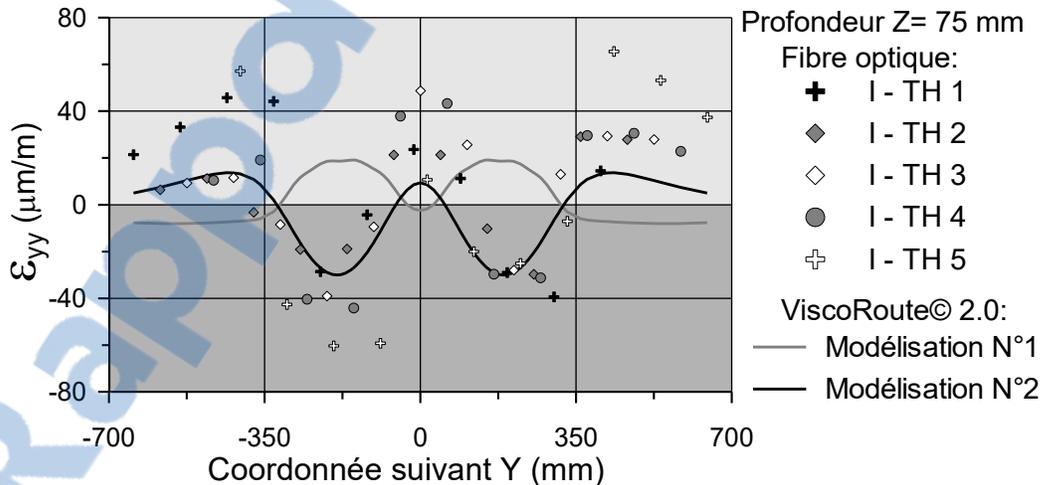
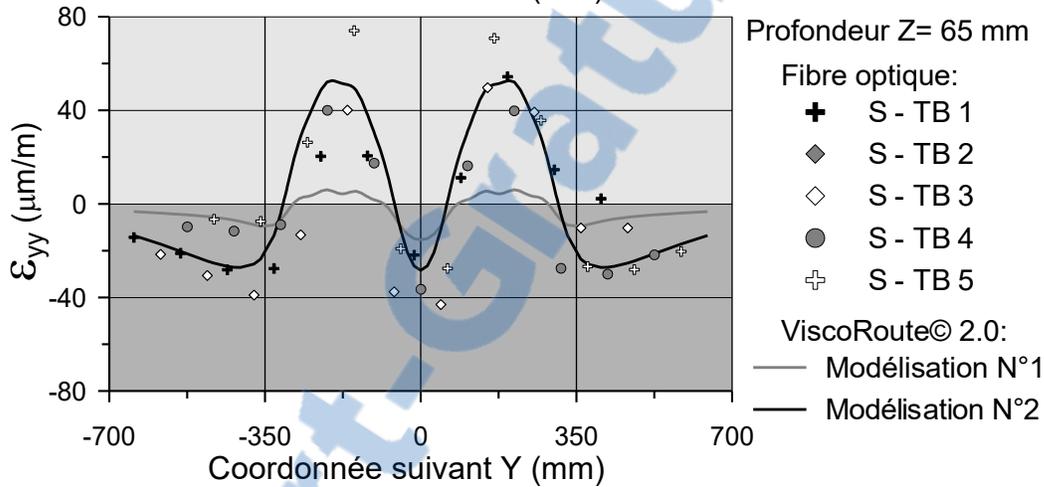
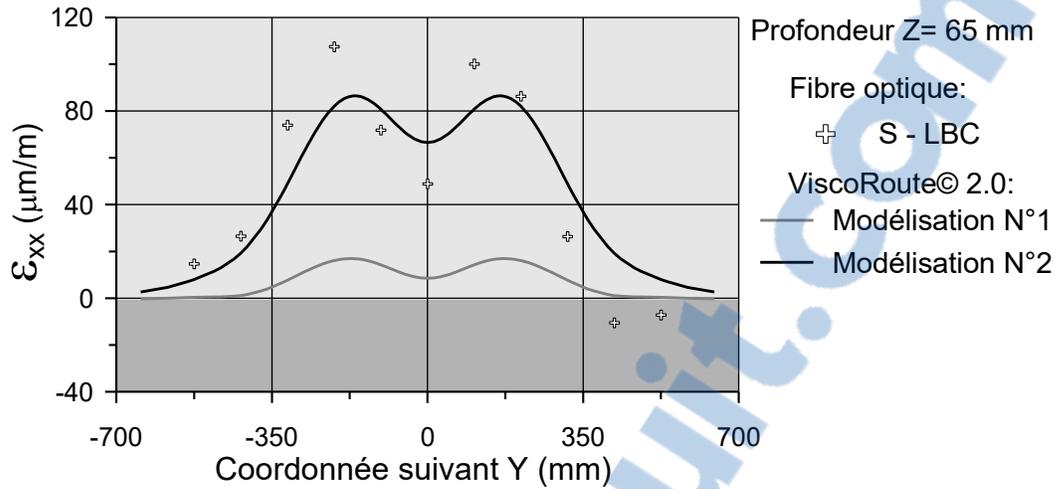
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 14



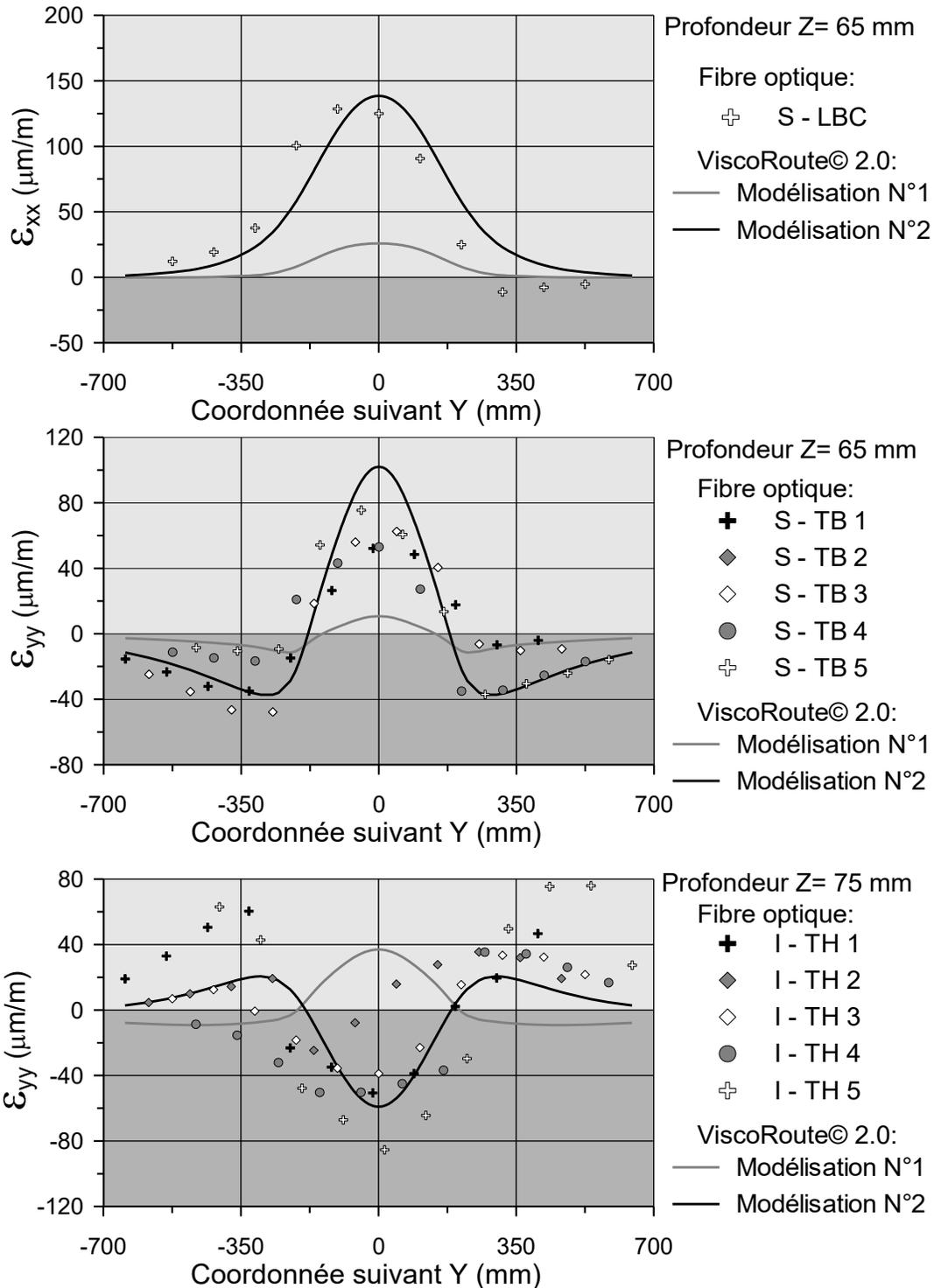
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 21



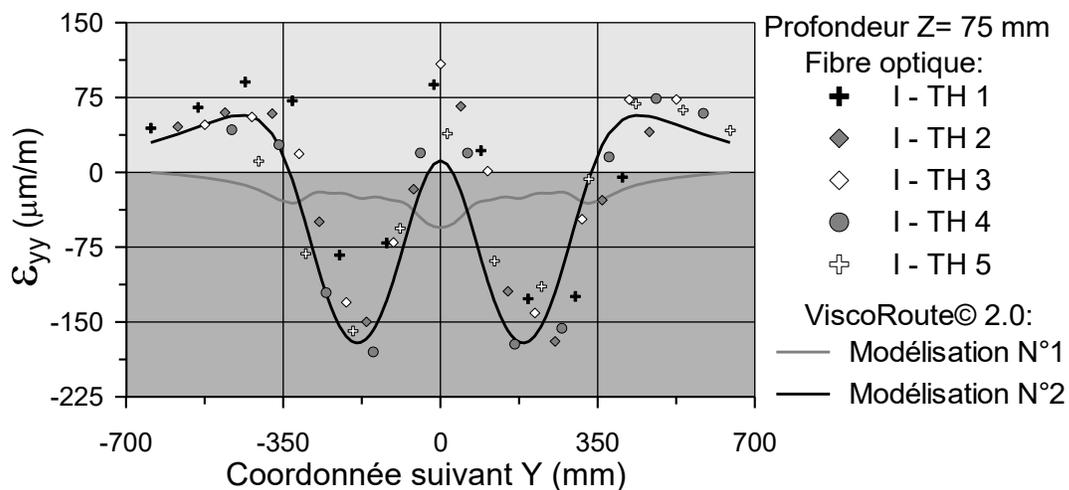
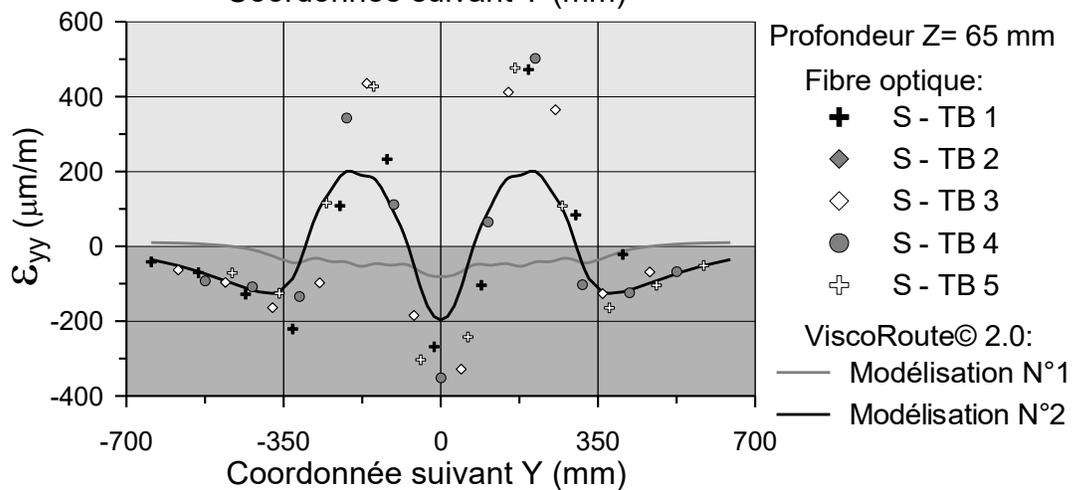
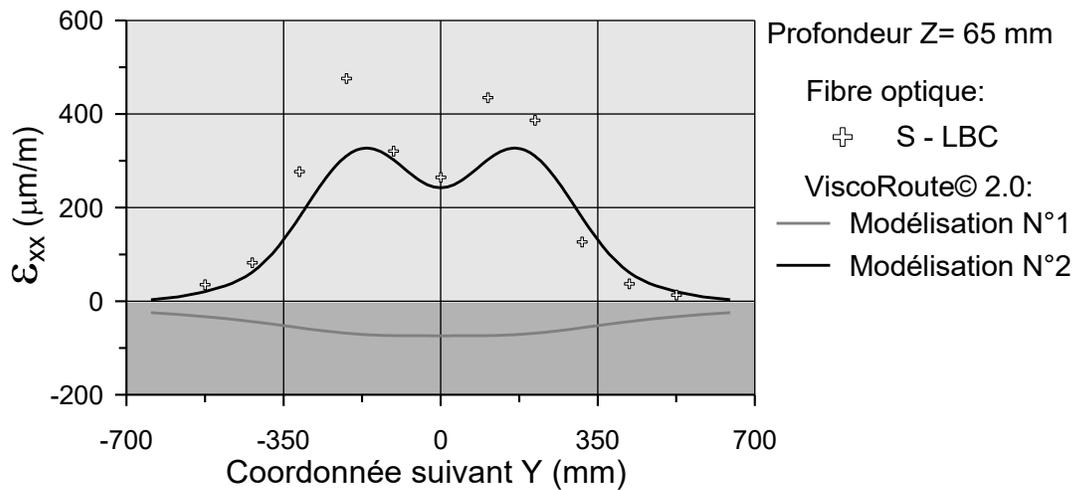
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 22



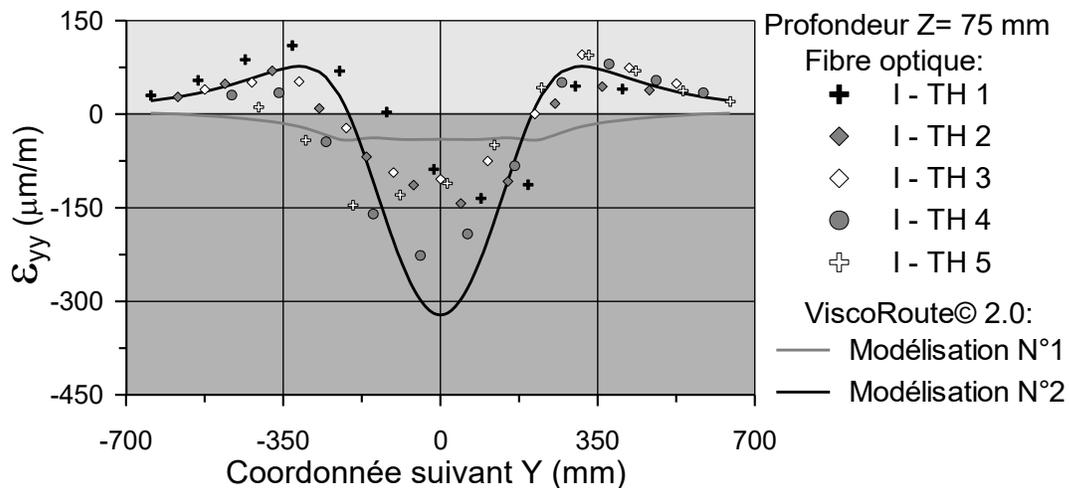
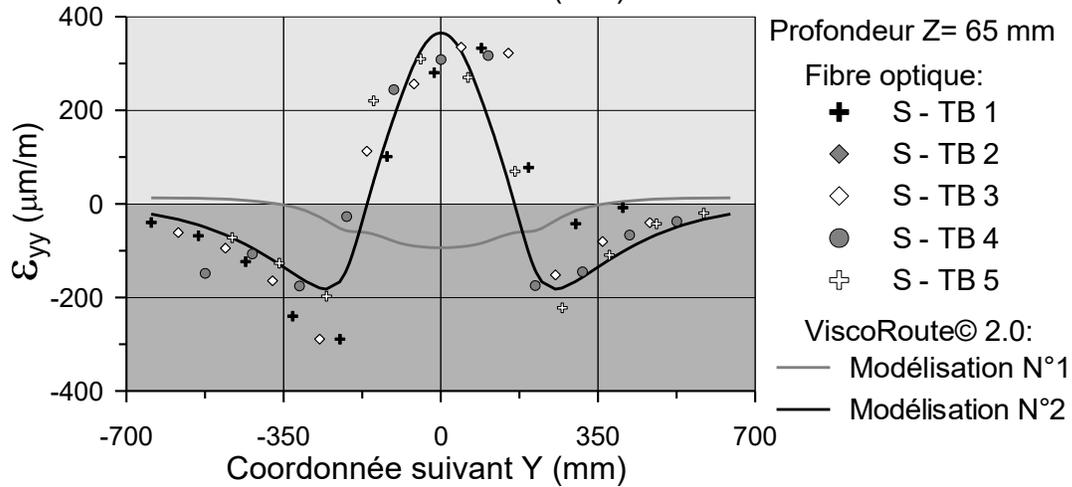
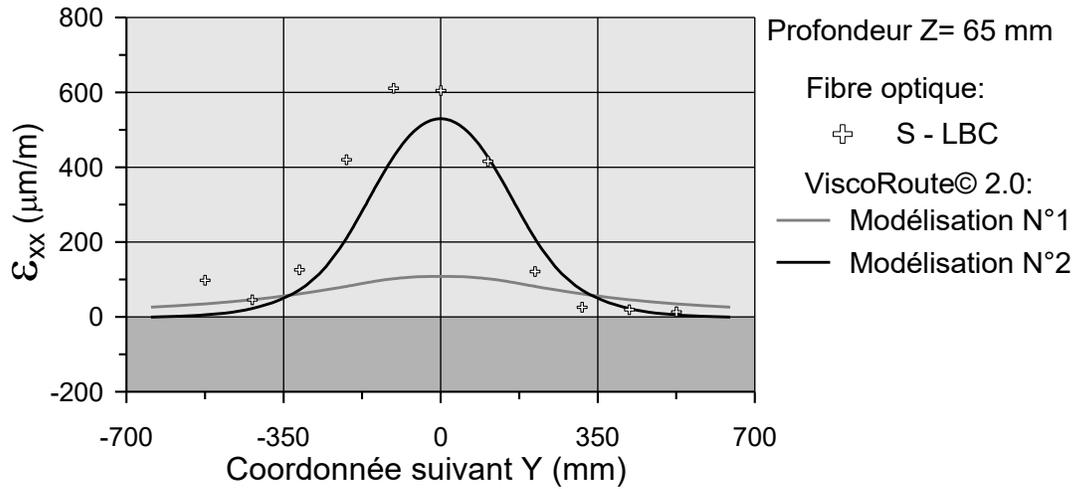
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 23



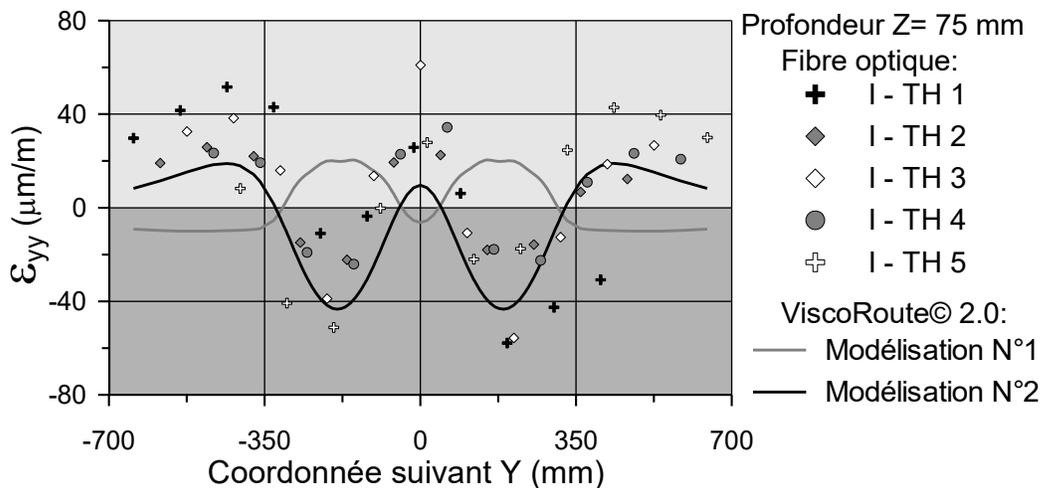
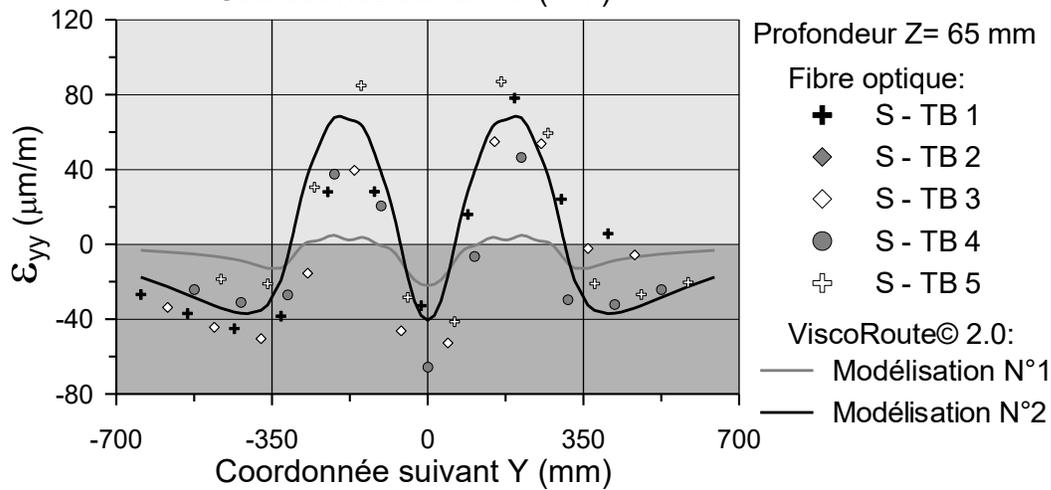
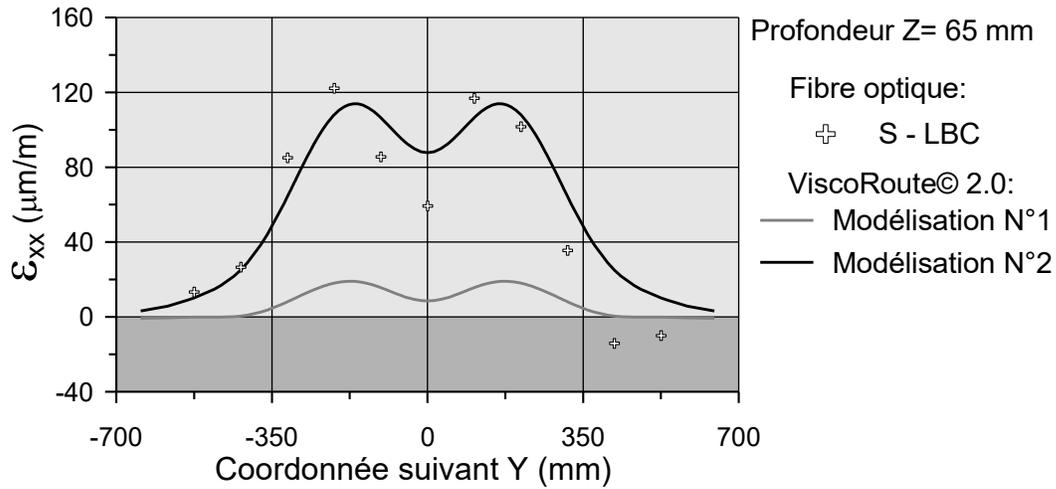
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 24



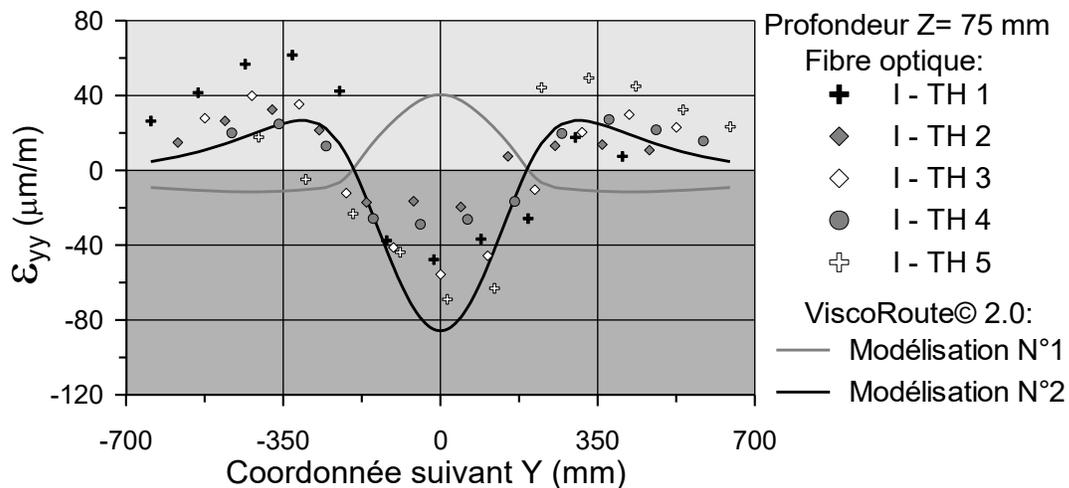
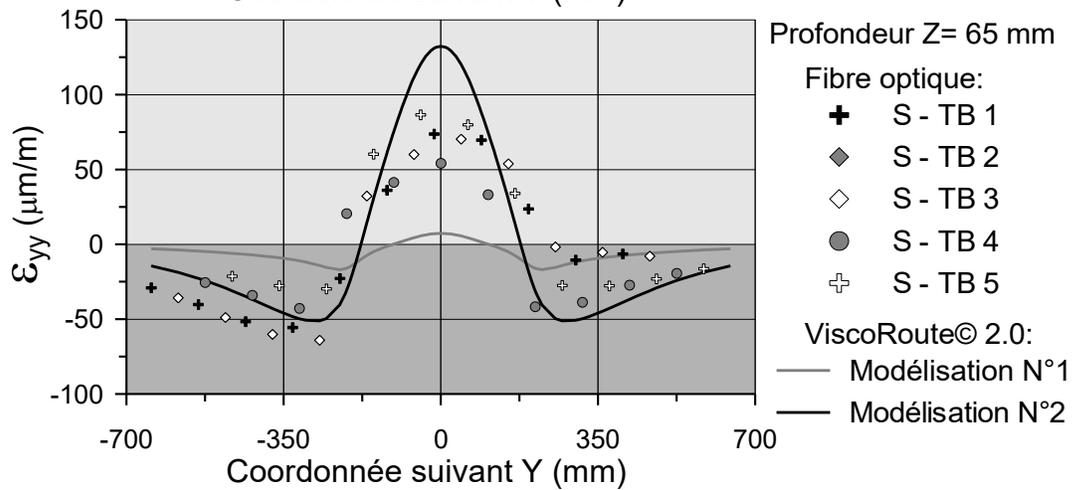
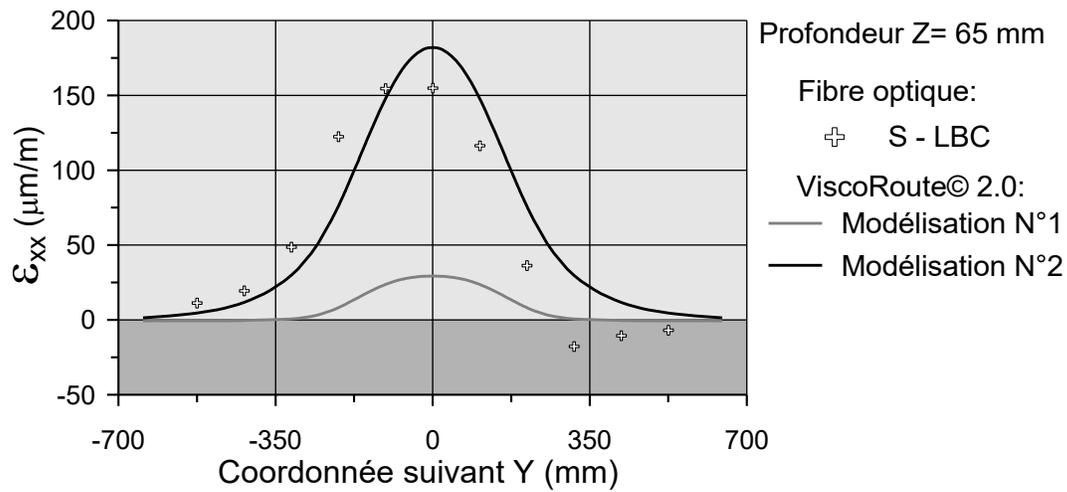
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 31



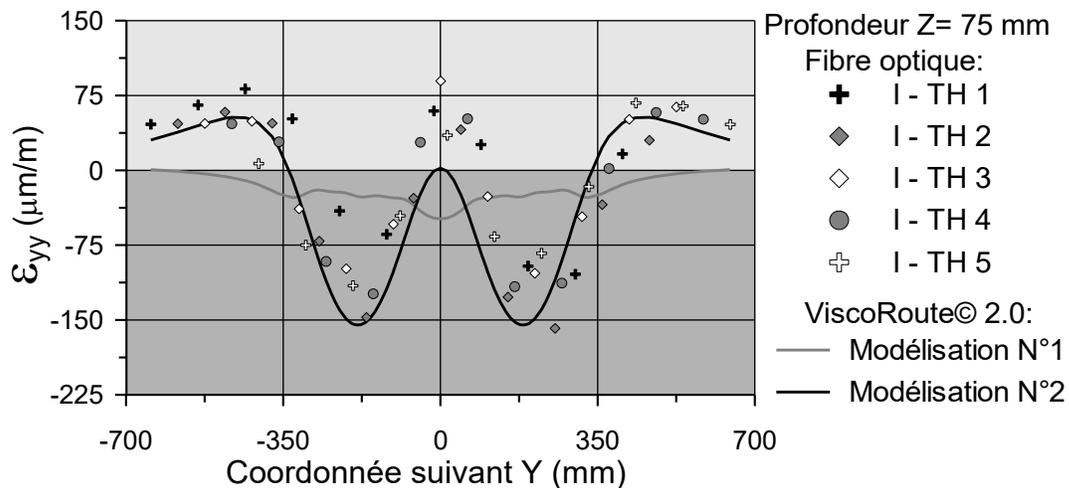
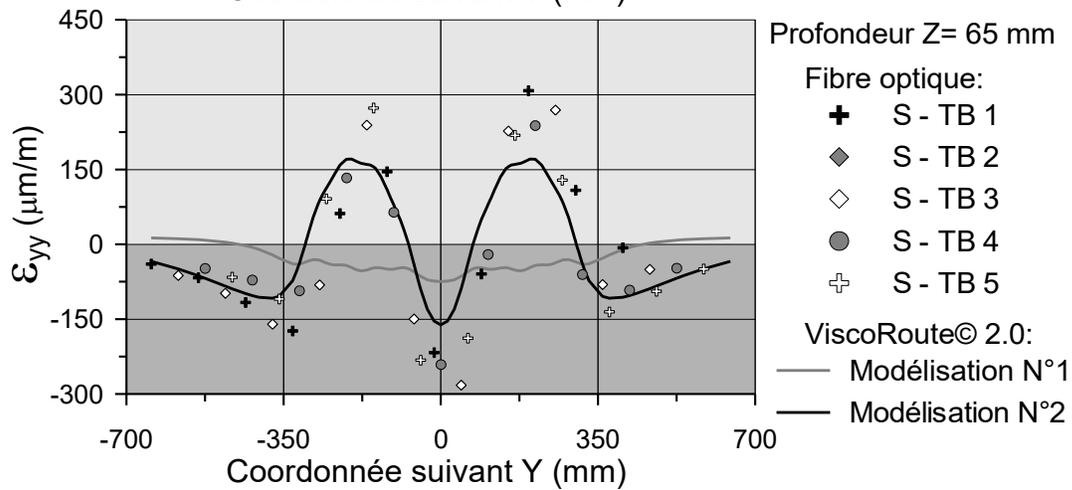
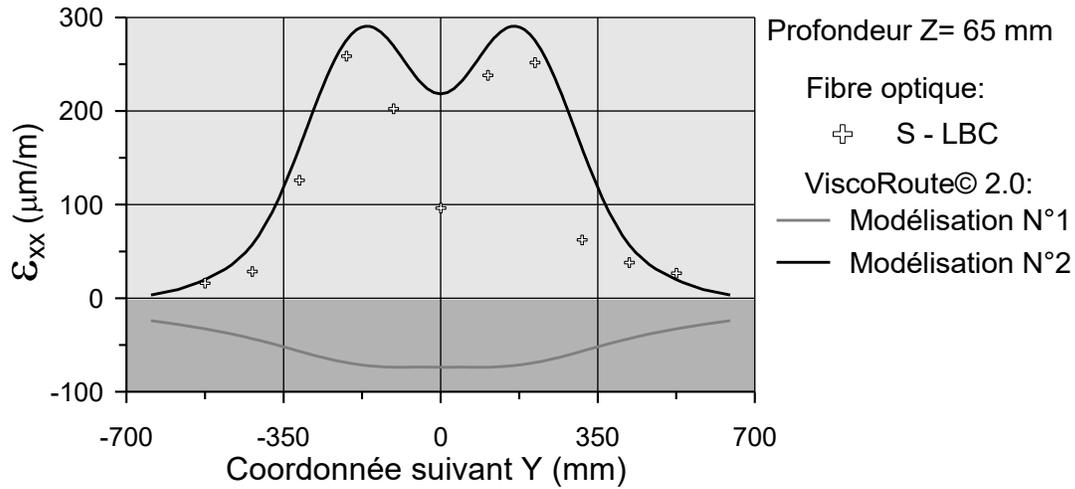
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 32



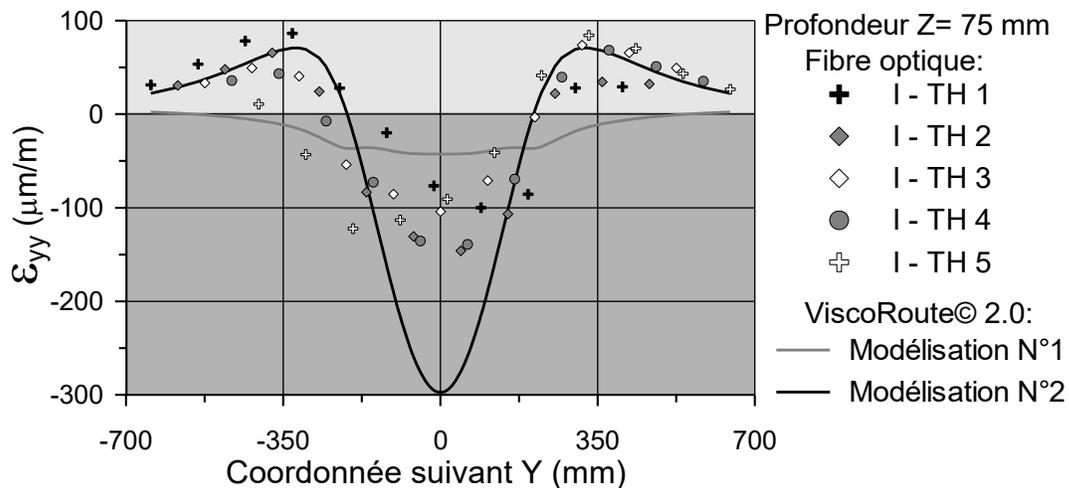
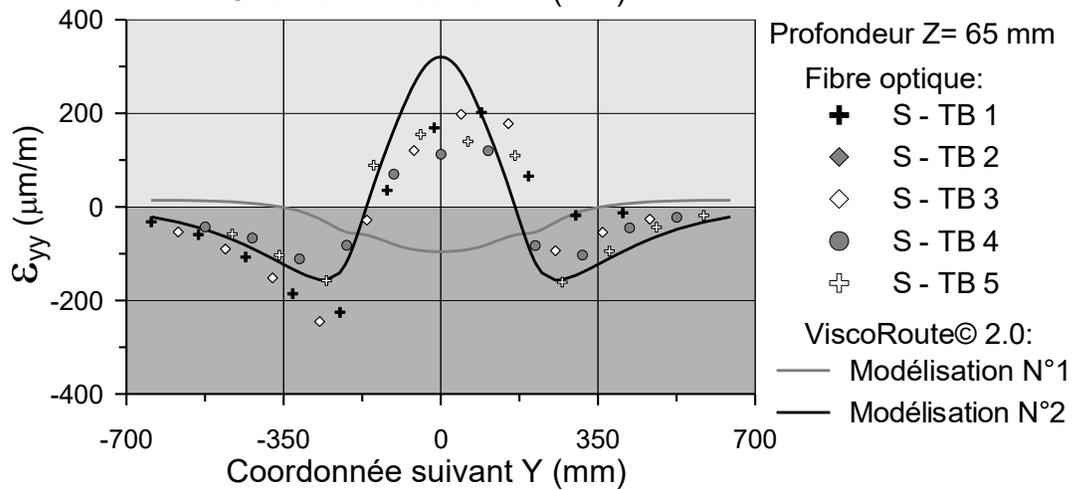
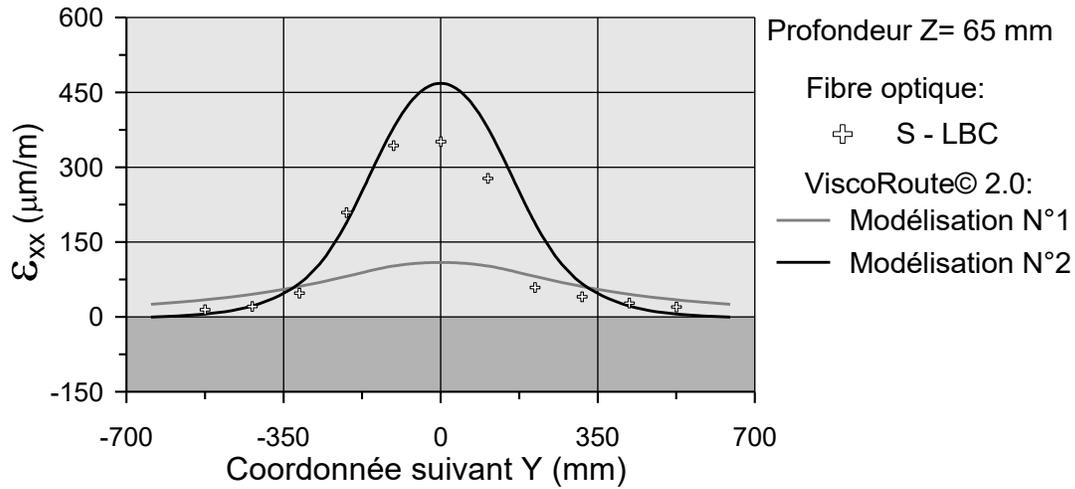
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 33



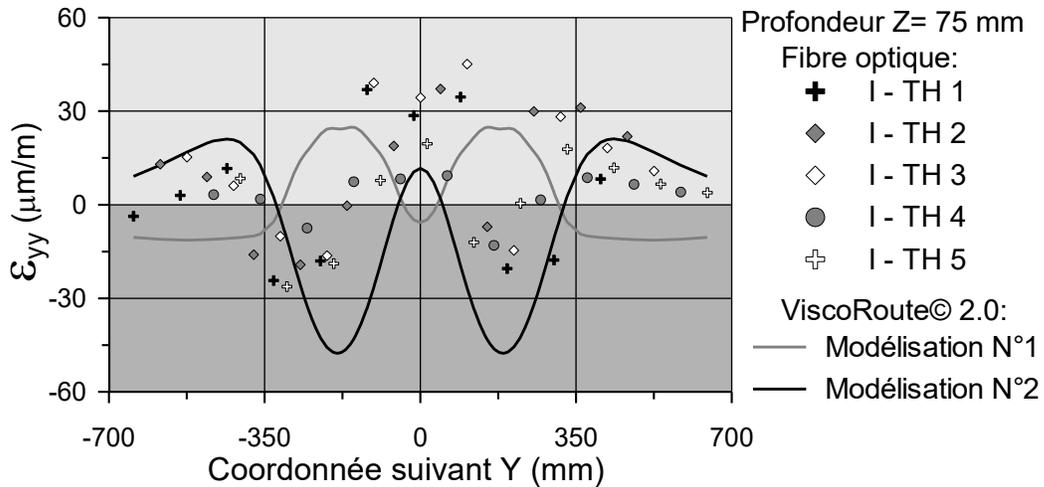
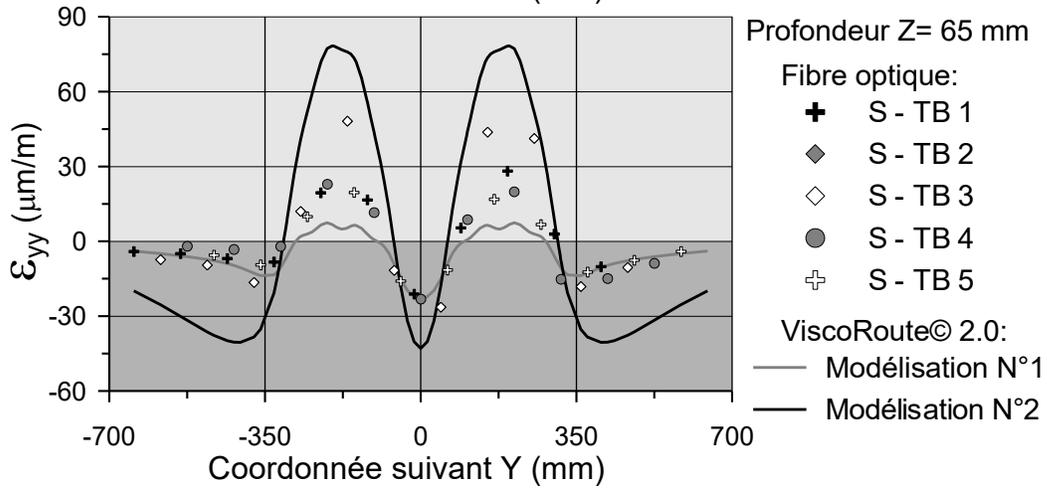
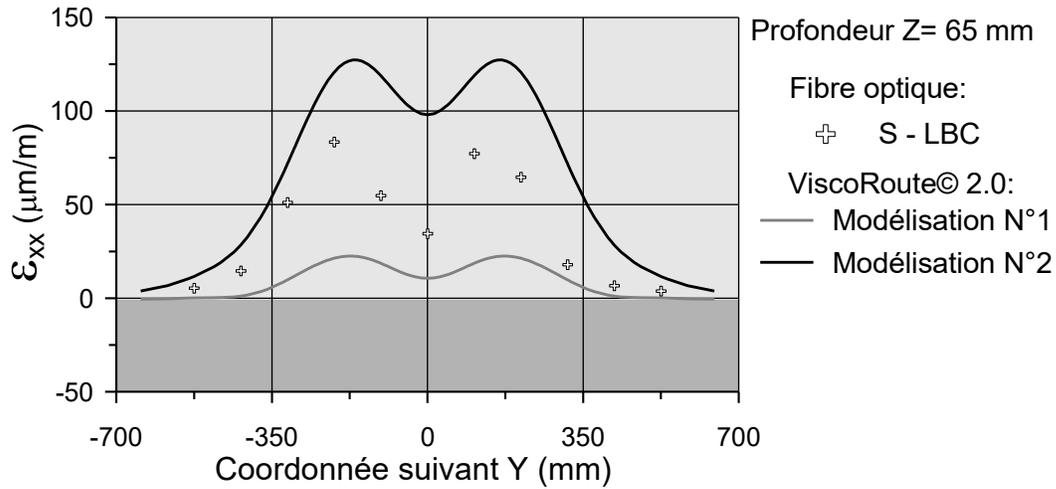
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 34



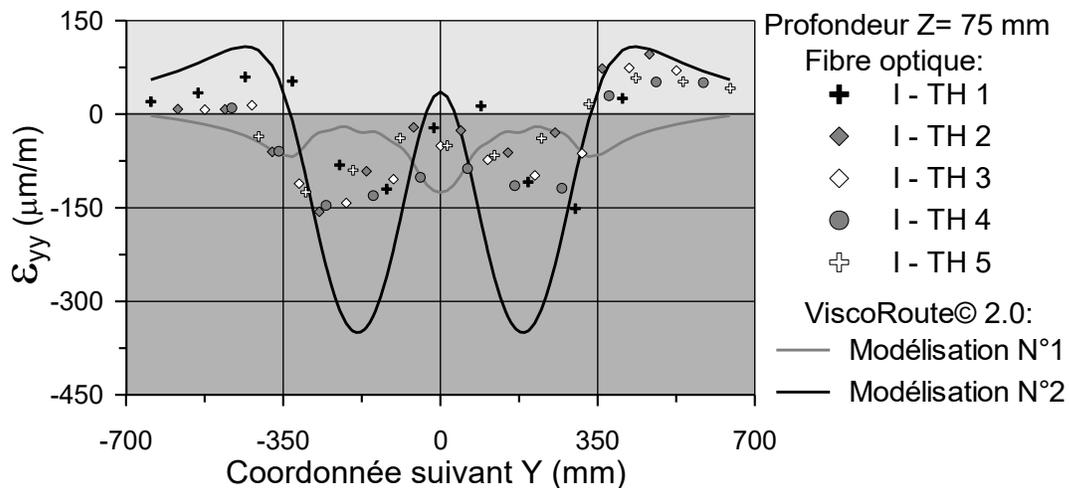
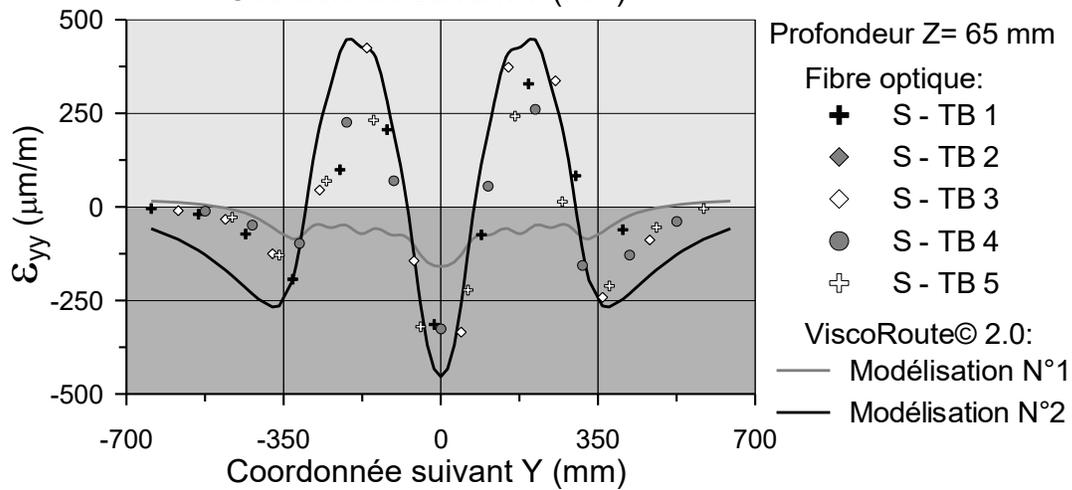
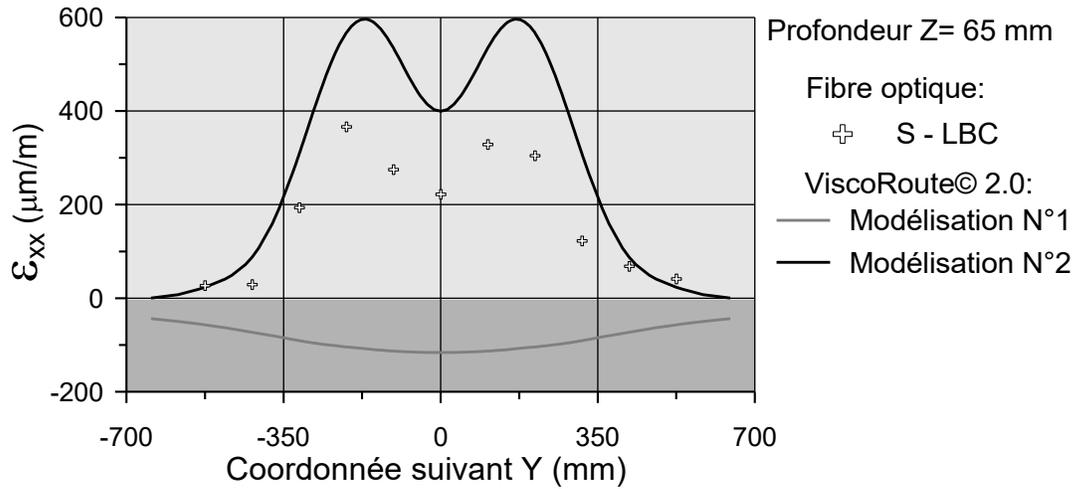
Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 41



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Section A - Cas expérimental N° 42



Modélisation N°1: Couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 viscoélastiques
 Modélisation N°2: Modélisation N°1 avec ajout d'une interface viscoélastique de 0,5 mm d'épaisseur entre les deux couches

Rapport-Gratuit.com

Annexe 7

Étude paramétrique de l'épaisseur de modélisation de la couche d'interface

Cette annexe présente l'ensemble des déformations mesurées expérimentalement et calculées avec les modélisations ViscoRoute© 2.0. Les tableaux et les graphiques présentés dans cette annexe détaillent l'amplitude maximale mesurée sous la charge et à l'extérieur de celle-ci pour 14 conditions expérimentales de la section A.

L'écart entre les modélisations et les mesures expérimentales est calculé en suivant les méthodes d'analyse présentées dans les chapitres 3 à 6. Les écarts sont exprimés en pourcentage dans les tableaux. Les résultats sont présentés pour quatre modélisations. Ces dernières sont les suivantes :

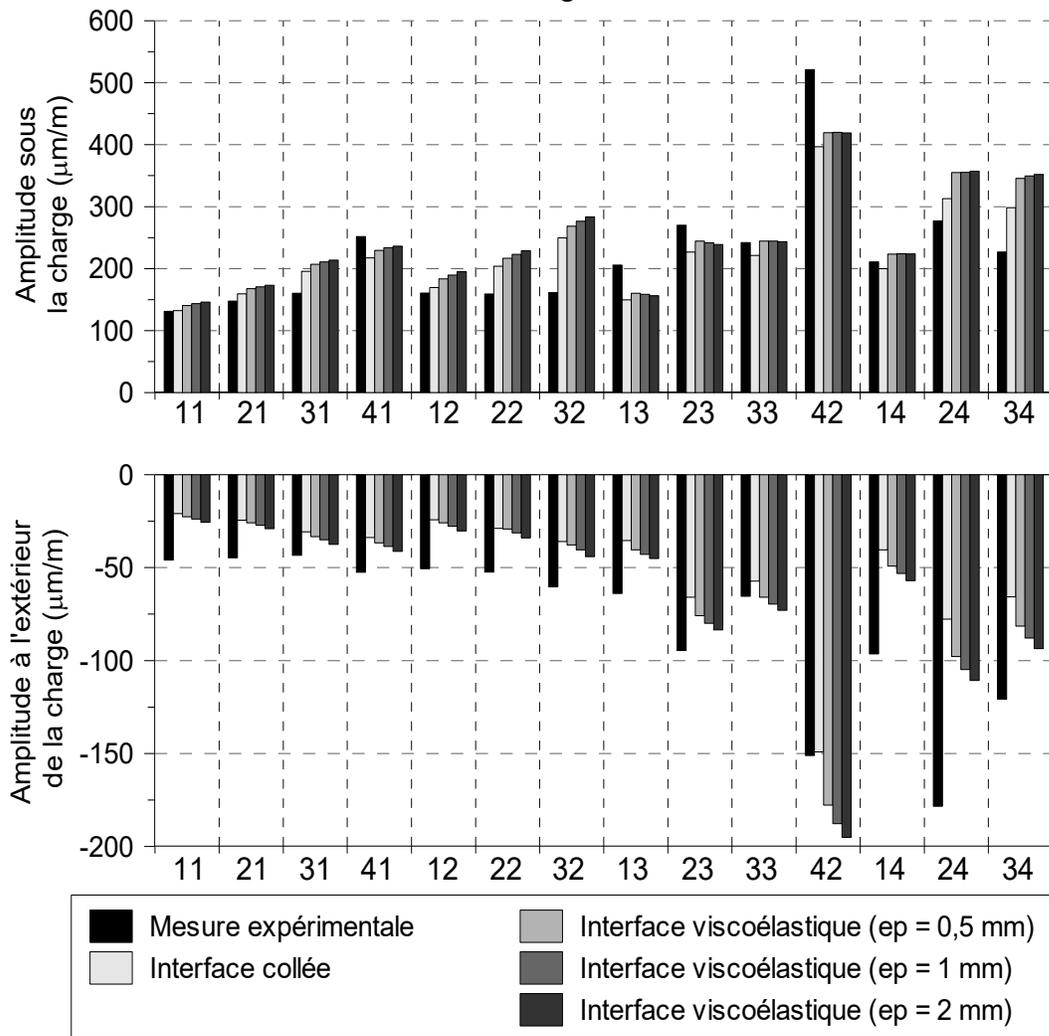
- Modélisation n° 1 : La modélisation n° 1 correspond à celle présentée à la section 3 du chapitre 3. Les propriétés physiques des couches de BBSG 0/10 et de GB 0/14 sont viscoélastiques et les deux couches sont considérées parfaitement collées. Les résultats présentés dans les chapitres 4 et 5 correspondent à ceux obtenus à partir de cette modélisation. Cette modélisation est également appelée « interface collée » dans le chapitre 6.
- Modélisation n° 2 : Le liant d'accrochage présent entre les deux couches bitumineuses est modélisé par une couche viscoélastique de faible épaisseur. L'épaisseur de cette couche est de 0,5 mm. Le comportement viscoélastique de cette couche est caractérisé par le modèle de Huet. Les paramètres considérés pour cette modélisation sont plus spécifiquement détaillés au chapitre 6. Cette modélisation est appelée « interface viscoélastique » dans le chapitre 6.
- Modélisation n° 3: La modélisation n° 3 est identique à la n° 2 pour laquelle la couche de l'interface est fixée à 1 mm.
- Modélisation n° 4: La modélisation n° 4 est identique à la n° 2 pour laquelle la couche de l'interface est fixée à 2 mm.

Les résultats sont présentés successivement pour les mesures suivantes :

- Déformation longitudinale et transversale à la profondeur $Z = 125$ mm
- Déformation transversale à la profondeur $Z = 517$ mm
- Déformation longitudinale et transversale à la profondeur $Z = 65$ mm
- Déformation verticale à la profondeur $Z = 20$ mm
- Déformation transversale à la profondeur $Z = 15$ mm.

Pour chaque graphique, les valeurs associées aux figures sont détaillées aux tableaux situés au-dessous des figures. Sur ces graphiques, l'écart n° 1 correspond à l'écart entre les mesures modélisées et les mesures expérimentales pour les déformations maximales relevées sous la charge. L'écart n° 2 correspond aux déformations maximales relevées à l'extérieur de la charge. Dans les deux cas, les écarts sont exprimés en pourcentage par rapport à la valeur expérimentale. Un écart de 10 % signifie que les valeurs modélisées surestiment de 10 % la mesure expérimentale.

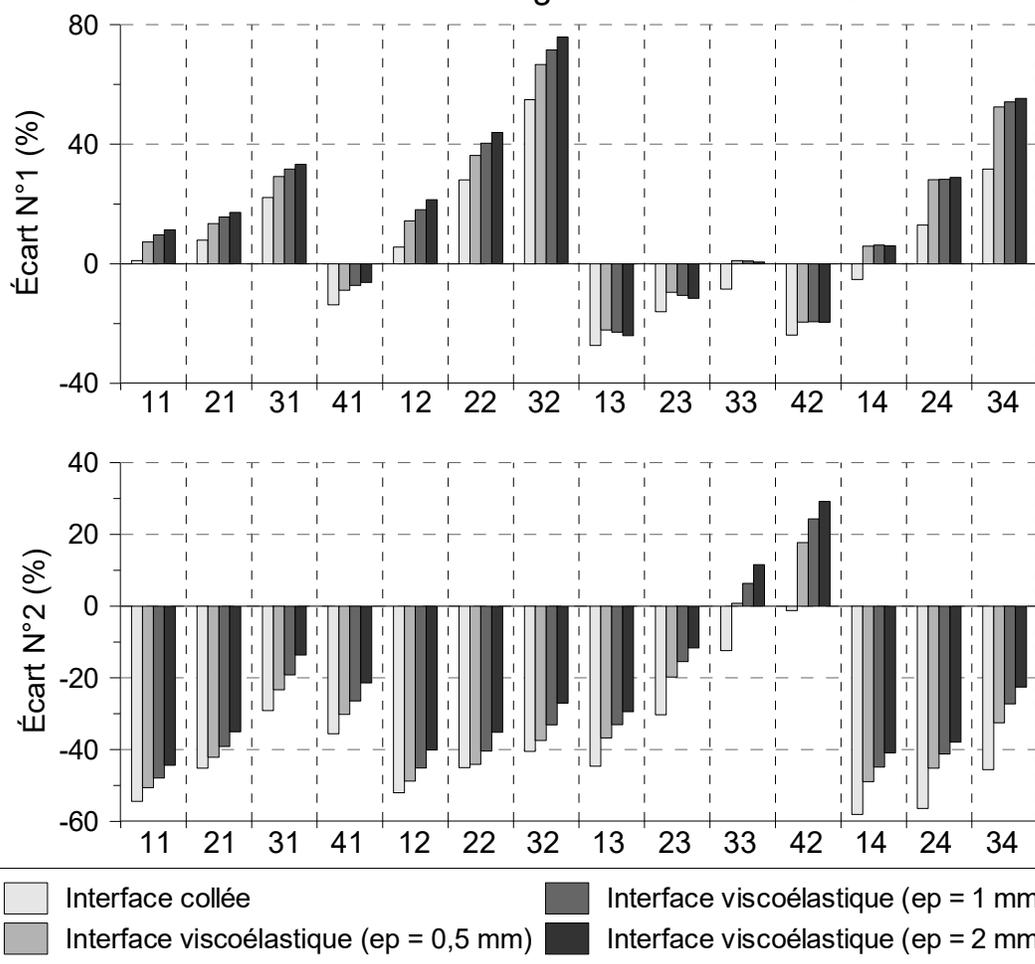
Déformation longitudinale en Z = 125 mm



Cas n°	Amplitude sous la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	131	148	160	252	160	159	161	206	270	242	521	211	277	227
Modélisation n° 1	132	159	196	217	169	204	250	149	227	221	397	200	313	298
Modélisation n° 2	140	167	207	229	183	217	269	160	244	244	419	223	355	346
Modélisation n° 3	144	171	211	234	189	223	276	159	242	244	420	224	355	349
Modélisation n° 4	146	173	214	236	195	229	284	156	239	243	419	224	357	352

Cas n°	Amplitude à l'extérieur de la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	-46	-45	-43	-52	-51	-52	-60	-64	-95	-65	-151	-96	-178	-121
Modélisation n° 1	-21	-24	-31	-34	-24	-29	-36	-35	-66	-57	-149	-40	-78	-66
Modélisation n° 2	-23	-26	-33	-37	-26	-29	-38	-40	-76	-66	-178	-49	-98	-81
Modélisation n° 3	-24	-27	-35	-39	-28	-31	-40	-43	-80	-70	-188	-53	-105	-88
Modélisation n° 4	-26	-29	-37	-41	-30	-34	-44	-45	-84	-73	-195	-57	-111	-94

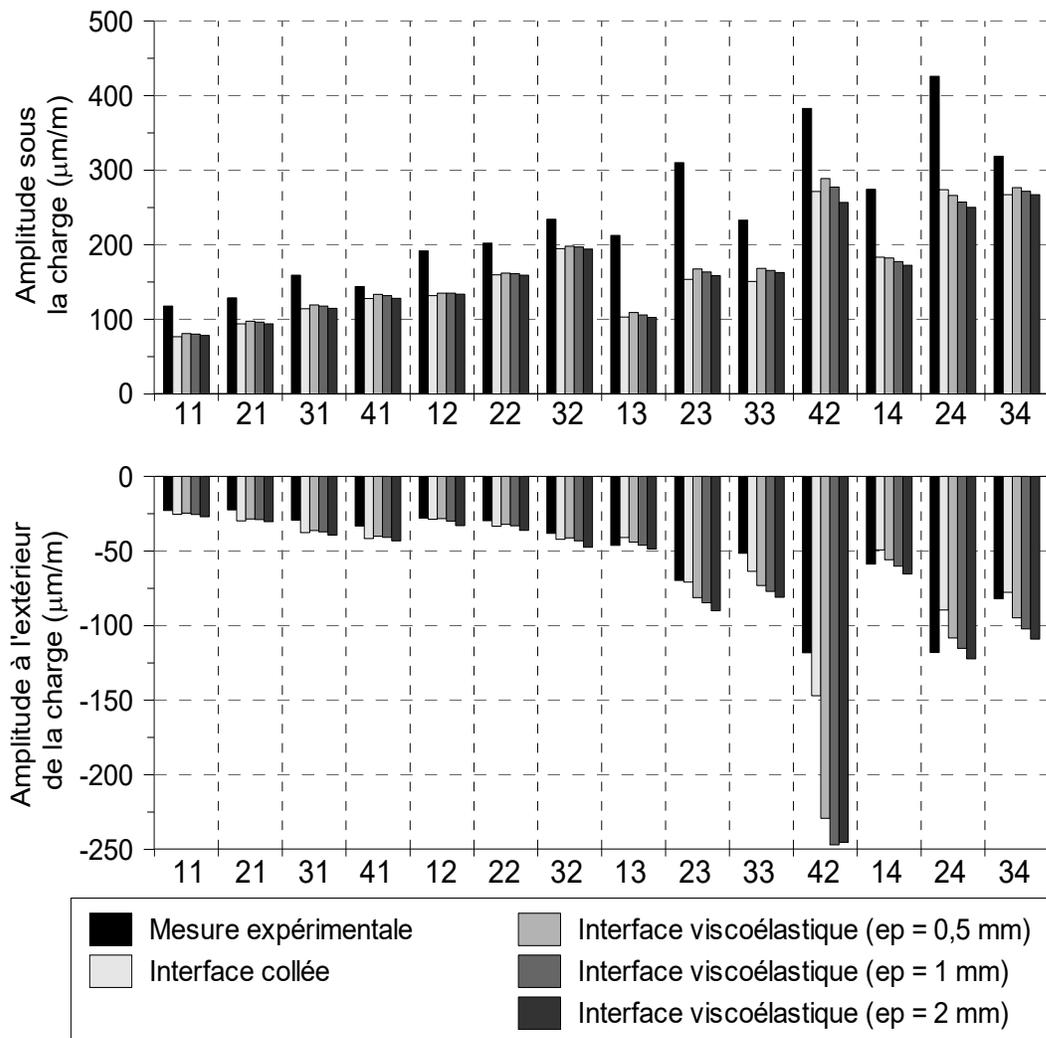
Déformation longitudinale en Z = 125 mm



Cas n°	Écart des amplitudes sous la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	1	8	22	-14	6	28	55	-27	-16	-9	-24	-5	13	32
Modélisation n° 2	7	13	29	-9	14	36	67	-22	-10	1	-20	6	28	52
Modélisation n° 3	10	16	32	-7	18	40	72	-23	-11	1	-19	6	28	54
Modélisation n° 4	11	17	33	-6	21	44	76	-24	-12	1	-20	6	29	55

Cas n°	Écart des amplitudes à l'extérieur de la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-21	-24	-31	-34	-24	-29	-36	-35	-66	-57	-149	-40	-78	-66
Modélisation n° 2	-23	-26	-33	-37	-26	-29	-38	-40	-76	-66	-178	-49	-98	-81
Modélisation n° 3	-24	-27	-35	-39	-28	-31	-40	-43	-80	-70	-188	-53	-105	-88
Modélisation n° 4	-26	-29	-37	-41	-30	-34	-44	-45	-84	-73	-195	-57	-111	-94

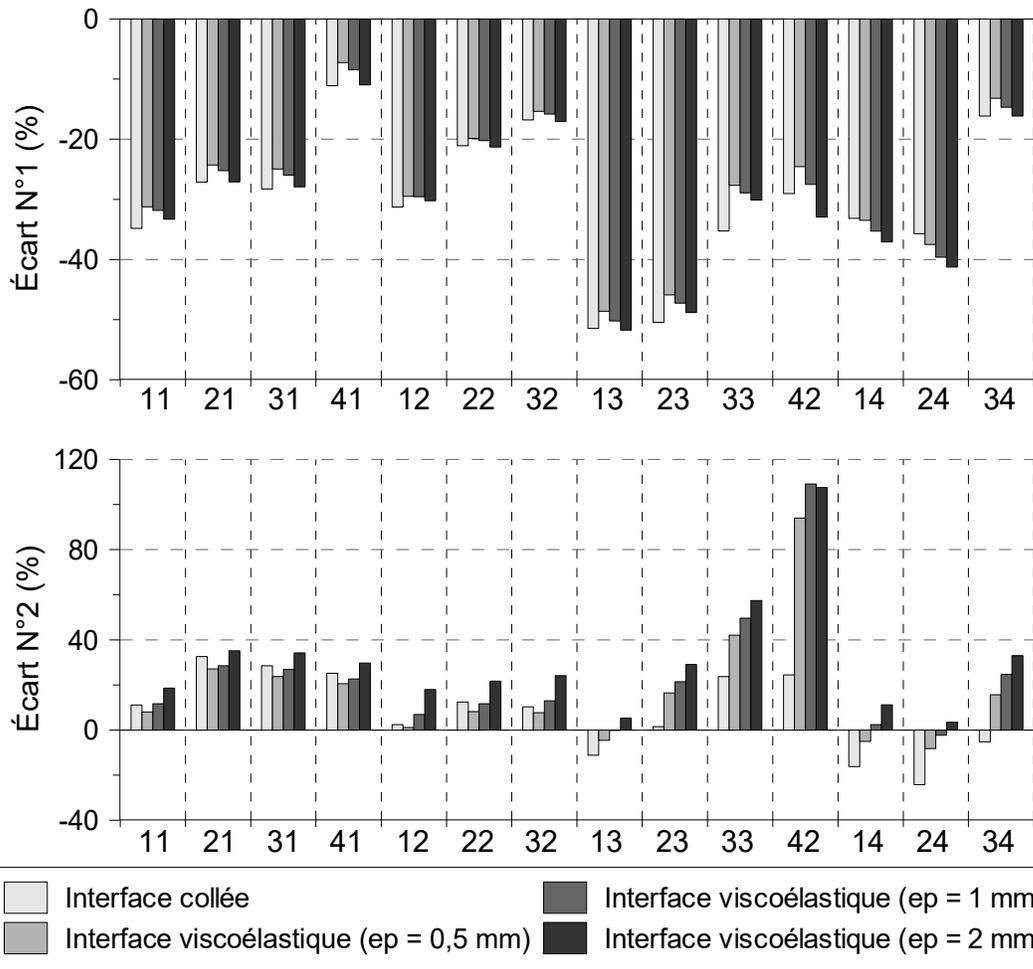
Déformation transversale en Z = 125 mm



Cas n°	Amplitude sous la charge (μm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	118	129	159	144	192	202	234	213	310	233	383	274	426	319
Modélisation n° 1	77	94	114	128	132	160	195	103	154	151	272	183	274	267
Modélisation n° 2	81	98	119	133	135	162	198	109	168	168	289	182	266	277
Modélisation n° 3	80	96	118	132	135	161	197	106	163	166	277	177	257	272
Modélisation n° 4	79	94	115	128	134	159	194	103	159	163	257	172	250	267

Cas n°	Amplitude à l'extérieur de la charge (μm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	-23	-22	-29	-33	-28	-30	-38	-46	-70	-51	-118	-59	-118	-82
Modélisation n° 1	-25	-30	-38	-42	-29	-33	-42	-41	-71	-64	-147	-49	-89	-78
Modélisation n° 2	-25	-29	-36	-40	-28	-32	-41	-44	-81	-73	-229	-56	-108	-95
Modélisation n° 3	-25	-29	-37	-41	-30	-33	-43	-46	-85	-77	-247	-60	-115	-102
Modélisation n° 4	-27	-30	-39	-43	-33	-36	-47	-49	-90	-81	-245	-65	-122	-109

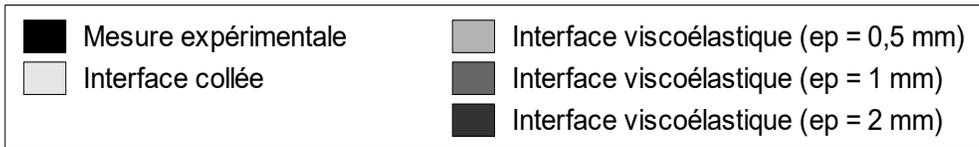
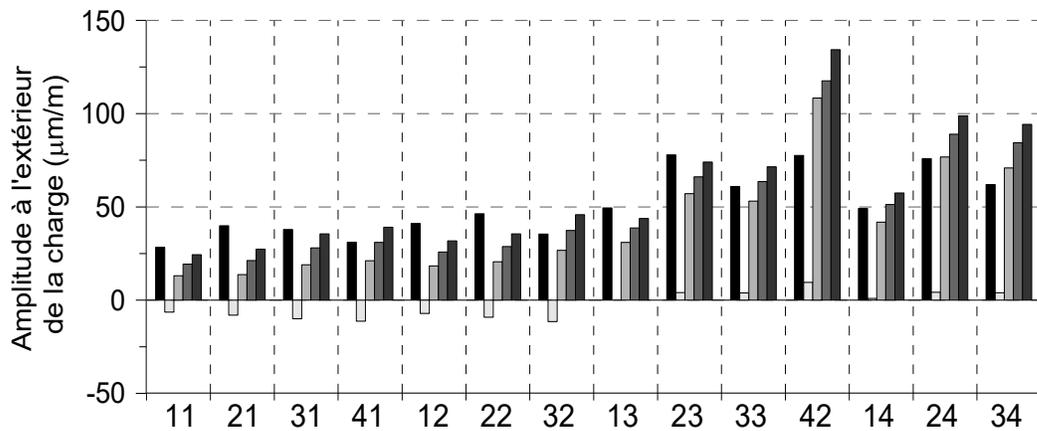
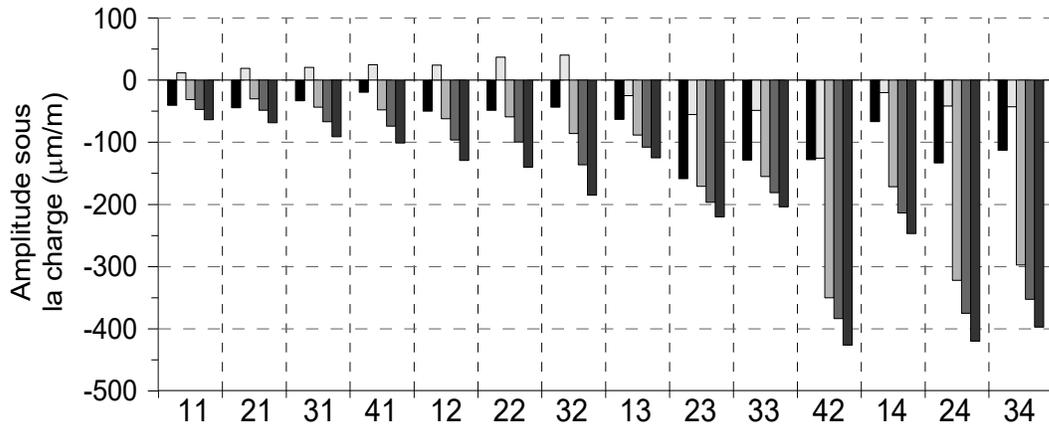
Déformation transversale en Z = 125 mm



Cas n°	Écart des amplitudes sous la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-35	-27	-28	-11	-31	-21	-17	-51	-50	-35	-29	-33	-36	-16
Modélisation n° 2	-31	-24	-25	-7	-29	-20	-15	-49	-46	-28	-25	-33	-38	-13
Modélisation n° 3	-32	-25	-26	-8	-30	-20	-16	-50	-47	-29	-28	-35	-40	-15
Modélisation n° 4	-33	-27	-28	-11	-30	-21	-17	-52	-49	-30	-33	-37	-41	-16

Cas n°	Écart des amplitudes à l'extérieur de la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	11	33	28	25	2	12	10	-11	2	24	24	-16	-24	-5
Modélisation n° 2	8	27	24	21	1	8	8	-5	16	42	94	-5	-8	16
Modélisation n° 3	12	29	27	23	7	12	13	0	21	50	109	2	-2	25
Modélisation n° 4	19	35	34	30	18	22	24	5	29	57	108	11	3	33

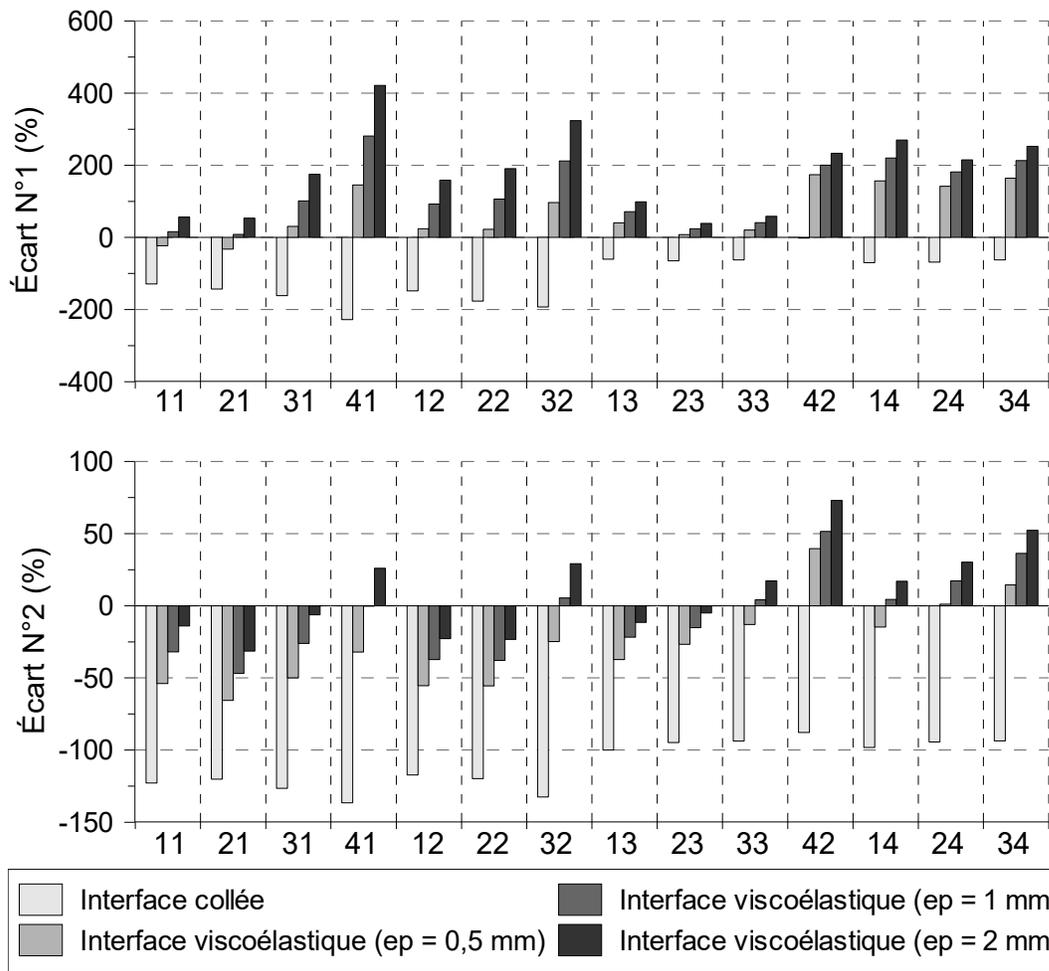
Déformation transversale en Z = 75 mm



Cas n°	Amplitude sous la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	-41	-44	-33	-19	-50	-48	-44	-63	-158	-128	-128	-67	-133	-113
Modélisation n° 1	12	19	20	25	24	37	40	-25	-55	-49	-125	-20	-42	-43
Modélisation n° 2	-31	-30	-43	-48	-62	-59	-86	-88	-171	-155	-350	-171	-322	-297
Modélisation n° 3	-47	-48	-67	-74	-96	-100	-136	-108	-197	-181	-384	-214	-3517	-353
Modélisation n° 4	-63	-68	-91	-101	-129	-140	-185	-125	-220	-204	-426	-247	-420	-397

Cas n°	Amplitude à l'extérieur de la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	28	40	38	31	41	46	35	49	78	61	78	49	76	62
Modélisation n° 1	-6	-8	-10	-11	-7	-9	-12	0	4	4	10	1	4	4
Modélisation n° 2	13	14	19	21	18	21	27	31	57	53	108	42	77	71
Modélisation n° 3	19	21	28	31	26	29	37	39	66	64	118	51	89	84
Modélisation n° 4	24	27	35	39	32	36	46	44	74	71	134	57	99	94

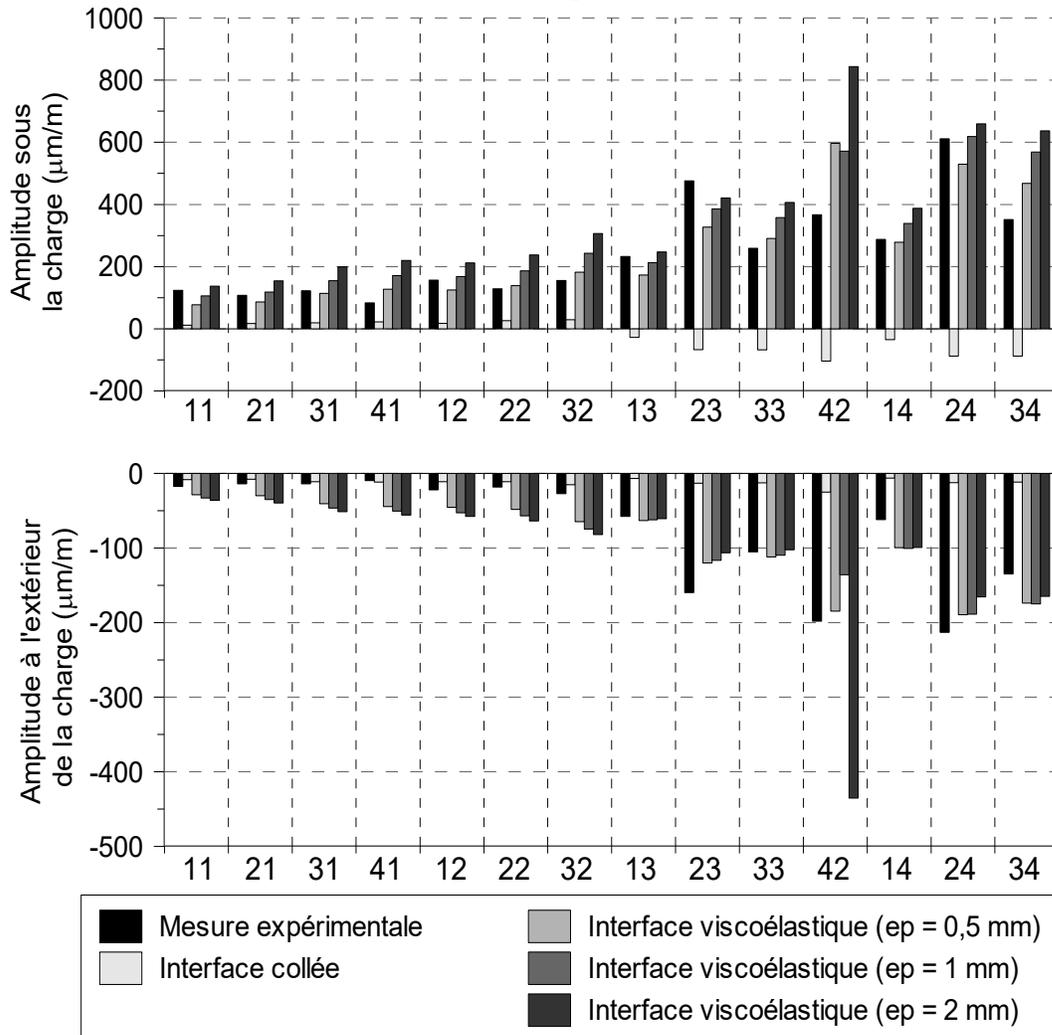
Déformation transversale en Z = 75 mm



Cas n°	Écart des amplitudes sous la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-129	-143	-162	-228	-148	-177	-193	-60	-65	-62	-2	-70	-69	-62
Modélisation n° 2	-23	-33	31	145	24	22	97	41	8	21	174	157	142	164
Modélisation n° 3	16	9	102	281	92	106	212	71	24	41	200	220	182	213
Modélisation n° 4	57	54	1517	421	158	191	324	98	39	59	233	270	215	253

Cas n°	Écart des amplitudes à l'extérieur de la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-123	-120	-127	-137	-117	-120	-133	-100	-95	-94	-88	-98	-94	-94
Modélisation n° 2	-54	-66	-50	-32	-55	-55	-25	-37	-27	-13	40	-15	1	14
Modélisation n° 3	-32	-47	-26	0	-37	-38	5	-22	-15	4	52	4	17	36
Modélisation n° 4	-14	-31	-6	26	-23	-23	29	-11	-5	17	73	17	30	52

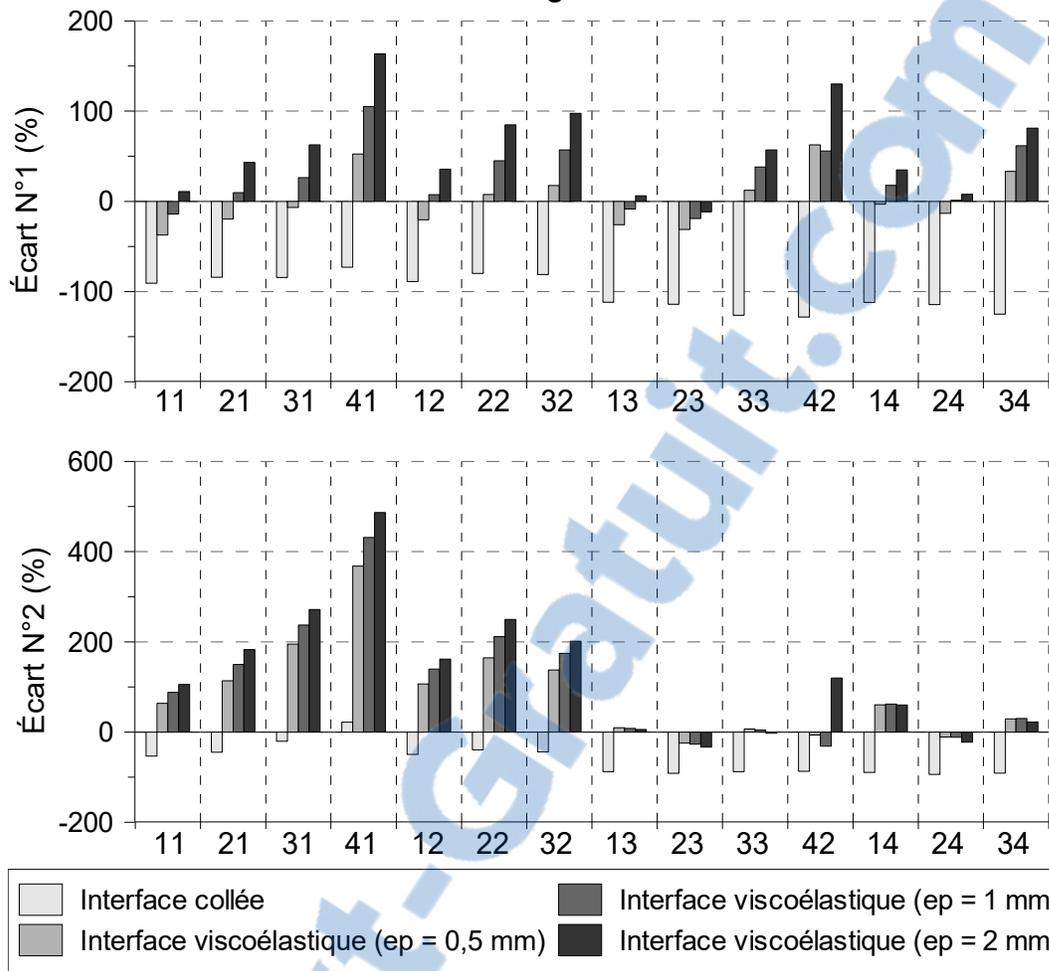
Déformation longitudinale en Z = 65 mm



Cas n°	Amplitude sous la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	123	108	122	84	156	129	155	233	476	259	367	287	611	352
Modélisation n° 1	11	17	19	23	17	26	29	-28	-68	-68	-104	-35	-88	-88
Modélisation n° 2	77	87	114	127	124	139	182	173	327	291	597	278	530	468
Modélisation n° 3	106	118	154	171	168	186	243	213	386	357	572	339	618	568
Modélisation n° 4	137	154	199	220	212	238	306	247	421	407	844	387	659	637

Cas n°	Amplitude à l'extérieur de la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	-18	-14	-14	-10	-22	-18	-27	-58	-160	-105	-198	-62	-213	-135
Modélisation n° 1	-8	-8	-11	-12	-11	-11	-15	-7	-13	-13	-25	-6	-12	-12
Modélisation n° 2	-29	-30	-41	-44	-45	-48	-65	-63	-120	-112	-185	-99	-189	-174
Modélisation n° 3	-33	-35	-47	-50	-53	-57	-517	-62	-117	-110	-136	-100	-189	-1517
Modélisation n° 4	-36	-40	-51	-56	-58	-64	-82	-61	-106	-102	-435	-99	-165	-165

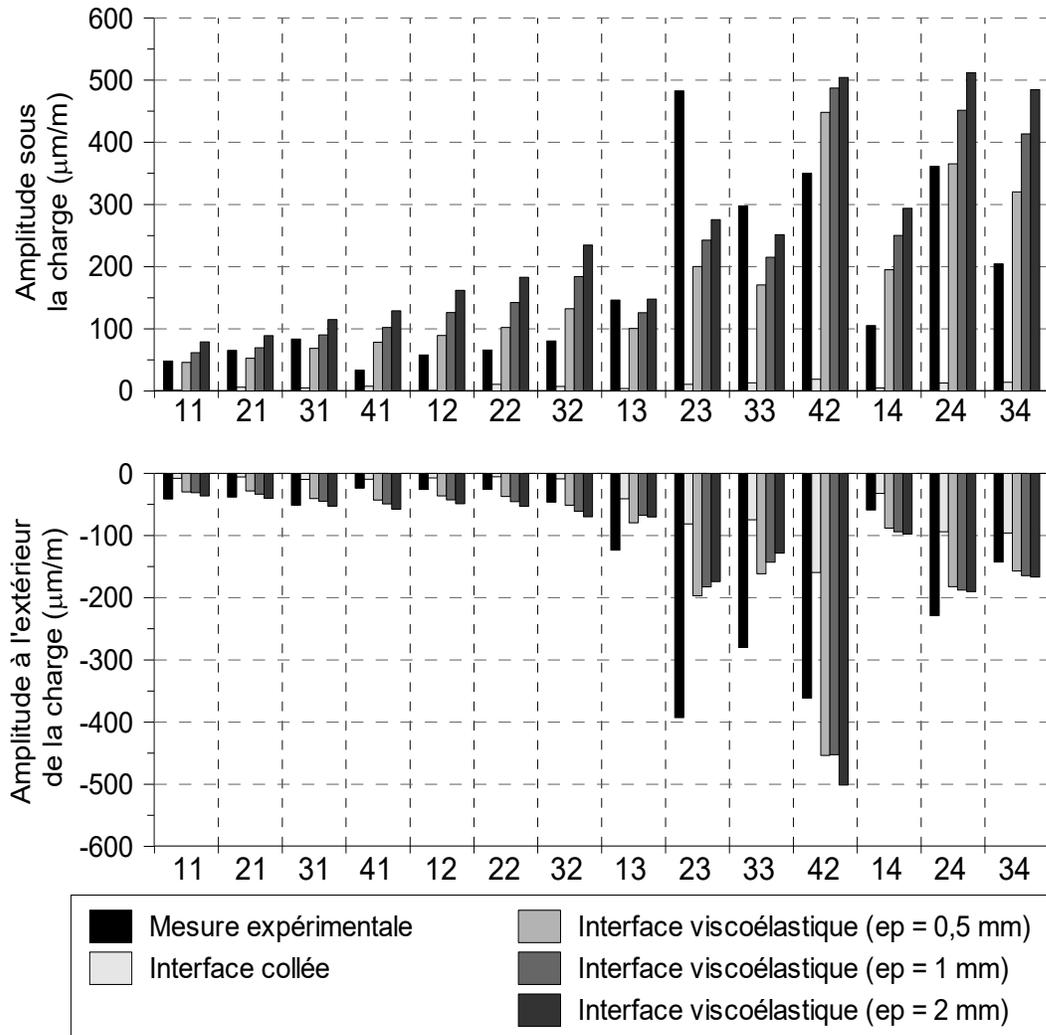
Déformation longitudinale en Z = 65 mm



Cas n°	Écart des amplitudes sous la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-91	-84	-84	-73	-89	-80	-81	-112	-114	-126	-128	-112	-114	-125
Modélisation n° 2	-37	-20	-7	53	-20	8	17	-26	-31	12	63	-3	-13	33
Modélisation n° 3	-14	10	26	105	7	45	57	-9	-19	38	56	18	1	62
Modélisation n° 4	11	43	63	163	36	85	98	6	-12	57	130	35	8	81

Cas n°	Écart des amplitudes à l'extérieur de la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-53	-45	-20	22	-50	-39	-44	-88	-92	-88	-87	-90	-94	-91
Modélisation n° 2	64	114	195	368	107	164	138	10	-25	7	-7	60	-11	29
Modélisation n° 3	88	150	237	432	140	212	1517	8	-27	4	-31	62	-11	30
Modélisation n° 4	105	183	272	487	162	250	202	5	-33	-3	120	60	-22	22

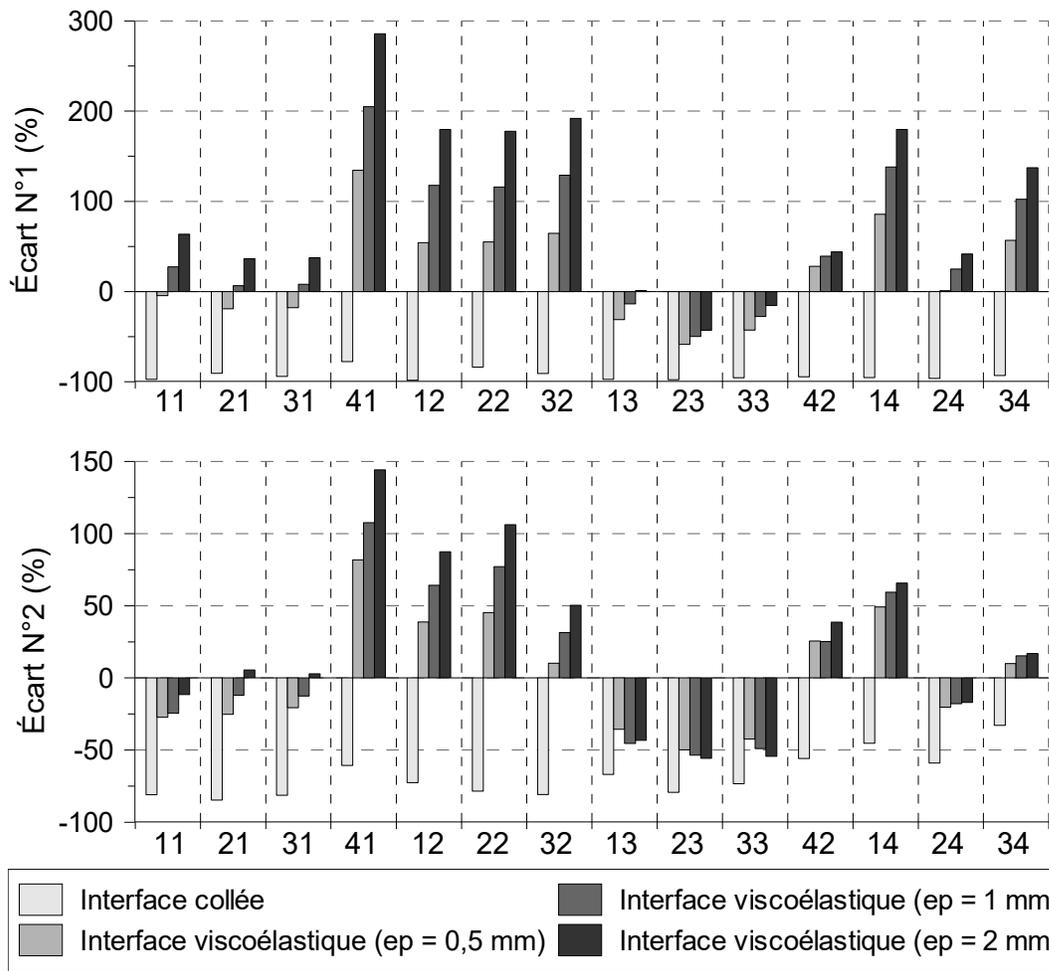
Déformation transversale en Z = 65 mm



Cas n°	Amplitude sous la charge (μm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	48	65	83	33	58	66	80	146	483	298	350	105	362	204
Modélisation n° 1	1	6	5	7	1	11	7	4	11	13	19	5	13	14
Modélisation n° 2	46	53	68	78	89	102	132	101	200	171	448	195	365	320
Modélisation n° 3	61	69	90	102	126	142	184	126	242	215	487	250	452	414
Modélisation n° 4	79	89	115	129	162	183	235	148	276	252	505	294	512	485

Cas n°	Amplitude à l'extérieur de la charge (μm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	-41	-38	-51	-24	-26	-26	-46	-123	-393	-280	-361	-59	-229	-143
Modélisation n° 1	-8	-6	-10	-9	-7	-6	-9	-41	-81	-517	-159	-32	-94	-96
Modélisation n° 2	-30	-28	-41	-43	-36	-37	-51	-79	-197	-161	-454	-88	-182	-157
Modélisation n° 3	-31	-33	-45	-49	-43	-45	-61	-67	-182	-143	-453	-94	-188	-164
Modélisation n° 4	-36	-40	-53	-58	-49	-53	-70	-70	-174	-128	-501	-98	-190	-167

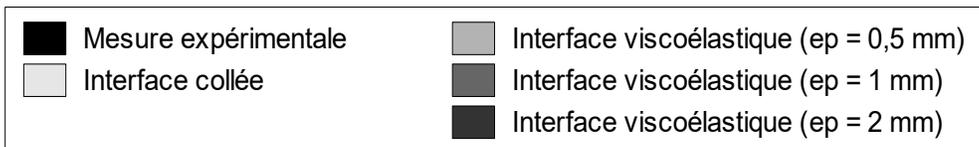
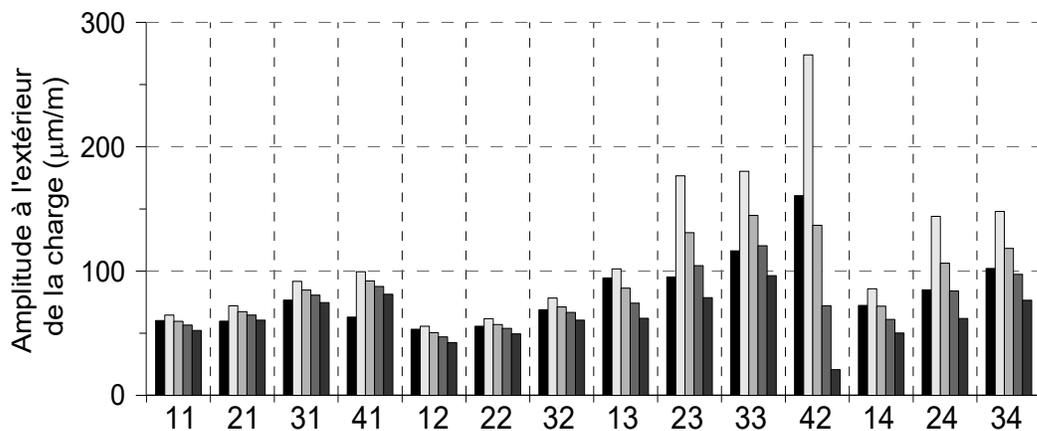
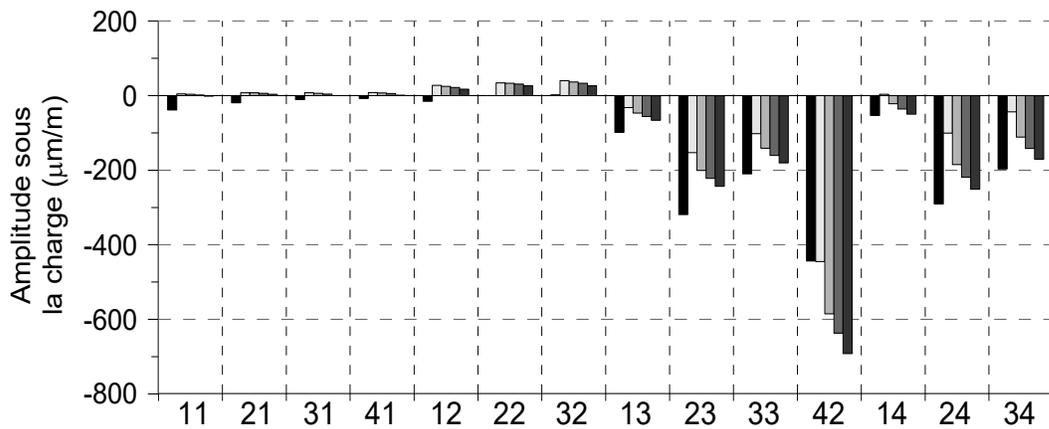
Déformation transversale en Z = 65 mm



Cas n°	Écart des amplitudes sous la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-97	-91	-94	-78	-99	-84	-91	-97	-98	-96	-95	-95	-96	-93
Modélisation n° 2	-5	-19	-18	135	54	55	65	-31	-59	-43	28	86	1	57
Modélisation n° 3	27	6	8	205	118	116	129	-14	-50	-28	39	138	25	102
Modélisation n° 4	63	36	38	286	180	178	192	1	-43	-16	44	180	42	137

Cas n°	Écart des amplitudes à l'extérieur de la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-81	-85	-81	-61	-73	-78	-81	-67	-79	-73	-56	-45	-59	-33
Modélisation n° 2	-27	-25	-21	82	39	45	10	-36	-50	-42	26	49	-20	10
Modélisation n° 3	-24	-12	-13	108	64	77	31	-45	-54	-49	25	59	-18	15
Modélisation n° 4	-12	6	3	144	87	106	50	-43	-56	-54	39	66	-17	17

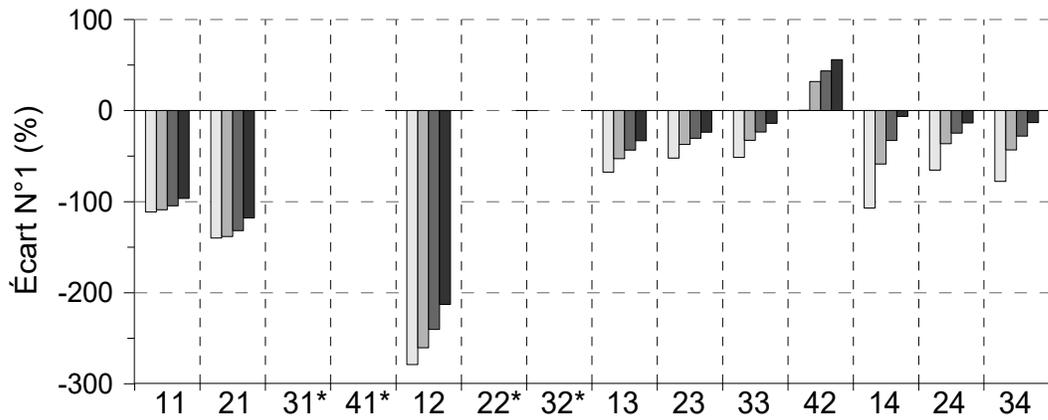
Déformation verticale en Z = 20 mm



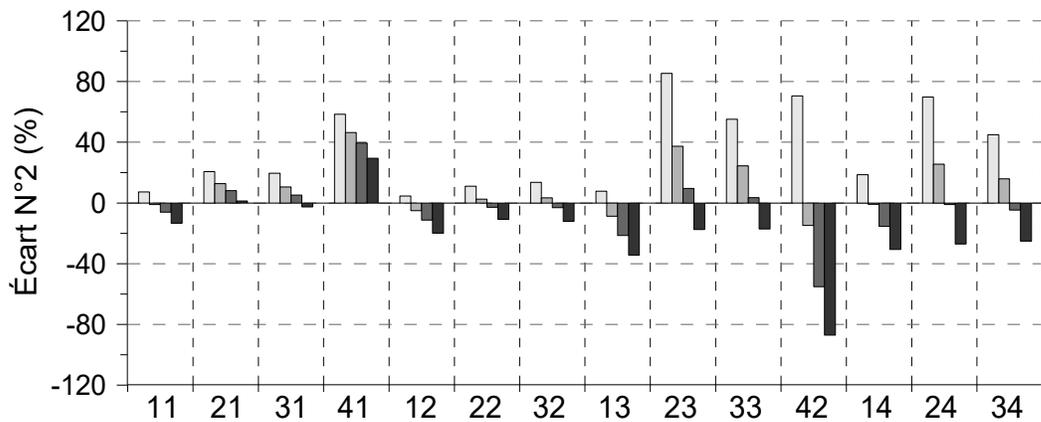
	Amplitude sous la charge (µm/m)													
Cas n°	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	-39	-19	-11	-8	-15	0	2	-99	-319	-210	-444	-53	-290	-197
Modélisation n° 1	4	8	7	8	28	34	40	-32	-153	-102	-445	4	-101	-44
Modélisation n° 2	3	7	6	7	25	33	37	-47	-201	-141	-585	-22	-185	-112
Modélisation n° 3	2	6	4	6	22	31	33	-56	-222	-161	-637	-36	-219	-142
Modélisation n° 4	-1	3	0	1	17	27	26	-66	-243	-180	-692	-50	-251	-171

	Amplitude à l'extérieur de la charge (µm/m)													
Cas n°	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	60	60	77	63	53	56	69	94	95	116	161	72	85	102
Modélisation n° 1	65	72	92	100	56	62	78	102	177	180	274	86	144	148
Modélisation n° 2	60	67	85	92	50	57	71	86	131	145	137	72	106	118
Modélisation n° 3	57	65	81	88	47	54	67	74	104	120	72	61	84	97
Modélisation n° 4	52	60	517	81	43	50	60	62	79	96	21	50	62	76

Déformation verticale en Z = 20 mm



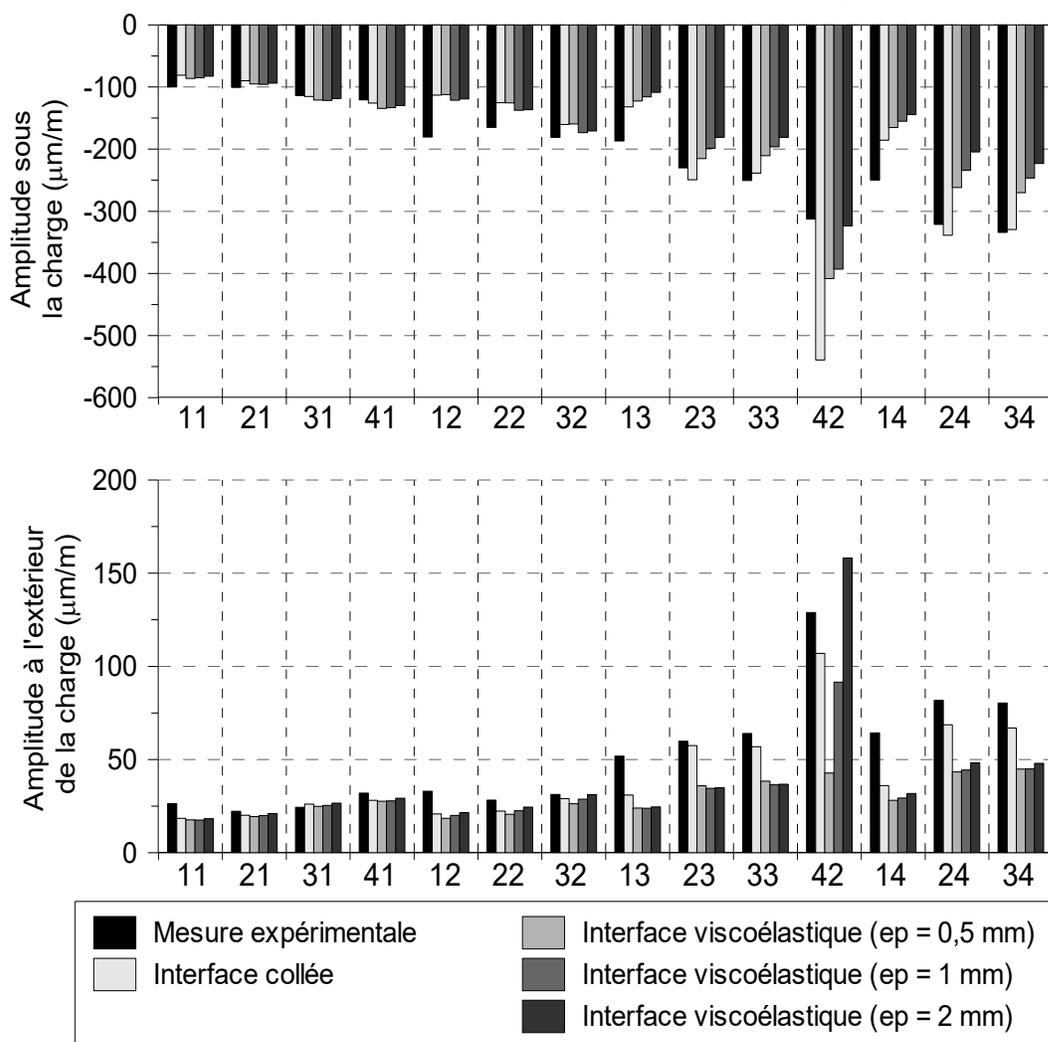
Note * : Pour ces conditions expérimentales l'amplitude des mesures expérimentales est trop faible pour calculer des écarts



	Écart des amplitudes sous la charge (%)													
Cas n°	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-111	-140	-	-	-279	-	-	-68	-52	-51	0	-107	-65	-78
Modélisation n° 2	-109	-138	-	-	-260	-	-	-53	-37	-33	32	-59	-36	-43
Modélisation n° 3	-105	-132	-	-	-240	-	-	-43	-30	-23	44	-33	-25	-28
Modélisation n° 4	-97	-118	-	-	-213	-	-	-33	-24	-14	56	-6	-14	-13

	Écart des amplitudes à l'extérieur de la charge (%)													
Cas n°	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	7	21	20	58	5	11	14	8	85	55	71	19	70	45
Modélisation n° 2	-1	13	11	46	-5	3	3	-9	37	24	-15	-1	25	16
Modélisation n° 3	-6	8	5	39	-11	-3	-3	-21	10	3	-55	-15	-1	-5
Modélisation n° 4	-13	1	-3	29	-20	-11	-12	-34	-17	-17	-87	-31	-27	-25

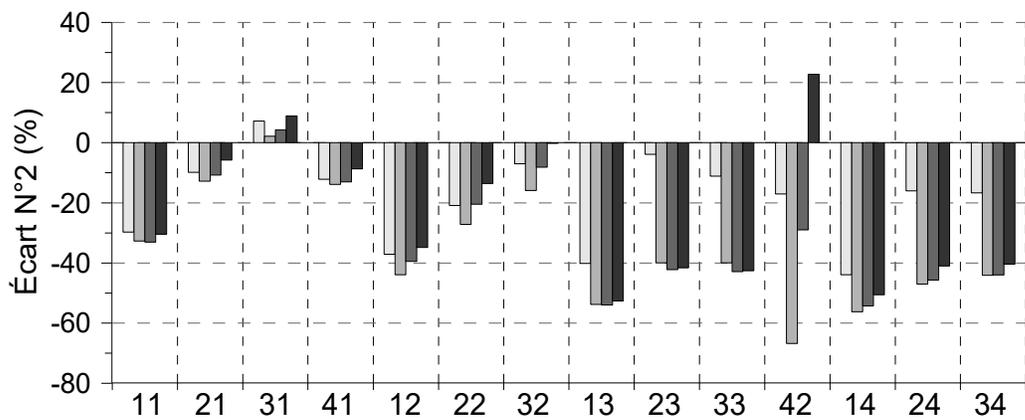
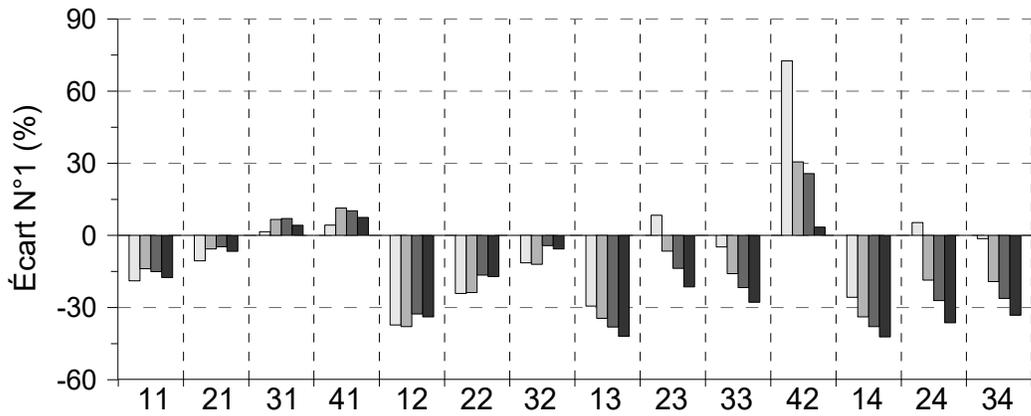
Déformation transversale en Z = 15 mm



Cas n°	Amplitude sous la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	-100	-100	-114	-121	-180	-165	-181	-187	-230	-250	-313	-250	-321	-334
Modélisation n° 1	-81	-90	-115	-126	-113	-125	-160	-132	-249	-238	-540	-186	-338	-329
Modélisation n° 2	-86	-95	-121	-134	-112	-126	-159	-122	-215	-211	-408	-165	-262	-270
Modélisation n° 3	-85	-96	-122	-133	-121	-137	-173	-116	-199	-196	-393	-155	-234	-246
Modélisation n° 4	-82	-94	-118	-130	-119	-137	-171	-108	-181	-181	-323	-144	-204	-223

Cas n°	Amplitude à l'extérieur de la charge (µm/m)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Expérimentale	26	22	24	32	33	28	31	52	60	64	129	64	82	80
Modélisation n° 1	18	20	26	28	21	22	29	31	57	57	107	36	69	67
Modélisation n° 2	18	19	25	28	19	21	26	24	36	38	43	28	43	45
Modélisation n° 3	18	20	25	28	20	22	29	24	35	37	92	29	44	45
Modélisation n° 4	18	21	27	29	22	24	31	25	35	37	158	32	48	48

Déformation transversale en Z = 15 mm



Cas n°	Écart des amplitudes sous la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-19	-11	2	4	-37	-24	-11	-29	8	-5	73	-26	5	-1
Modélisation n° 2	-14	-6	7	11	-38	-24	-12	-34	-7	-16	31	-34	-19	-19
Modélisation n° 3	-15	-5	7	10	-33	-17	-4	-38	-14	-22	26	-38	-27	-26
Modélisation n° 4	-17	-7	4	8	-34	-17	-6	-42	-21	-28	3	-42	-36	-33

Cas n°	Écart des amplitudes à l'extérieur de la charge (%)													
	11	21	31	41	12	22	32	13	23	33	42	14	24	34
Modélisation n° 1	-30	-10	7	-12	-37	-21	-7	-40	-4	-11	-17	-44	-16	-17
Modélisation n° 2	-33	-13	2	-14	-44	-27	-16	-54	-40	-40	-67	-56	-47	-44
Modélisation n° 3	-33	-11	4	-13	-39	-20	-8	-54	-42	-43	-29	-54	-46	-44
Modélisation n° 4	-30	-6	9	-9	-35	-14	0	-53	-42	-43	23	-51	-41	-40