

# DÉFORMATIONS DES COUCHES BITUMINEUSES AU PASSAGE D'UNE CHARGE DE TRAFIC

THÈSE N° 2786 (2003)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

Institut des infrastructures, des ressources et de l'environnement

SECTION DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Jacques PERRET**

ingénieur civil diplômé EPF  
de nationalité suisse et originaire d'Essertines-sur-Yverdon (VD)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A.-G. Dumont, directeur de thèse  
Dr M. Caprez, rapporteur  
Prof. H. Di Benedetto, rapporteur  
Prof. G. Doré, rapporteur  
M. M. Huhtala, rapporteur  
Prof. L. Vuilliet, rapporteur

Lausanne, EPFL  
2003



# Version abrégée

Cette étude se situe dans le contexte des méthodes de dimensionnement des chaussées routières souples. Elle se concentre sur la problématique de la prise en compte des charges de trafic, particulièrement pour les méthodes mécaniques empiriques. Dans ces dernières, les déformations dues aux charges de trafic, déterminées sur la base de modélisations élastiques linéaires des chaussées, servent à l'estimation de la durée de vie de la chaussée.

Les charges de trafic réelles des chaussées sont très diversifiées, tant au niveau de leur intensité que de leur mode d'application. Le présent travail vise à évaluer la pertinence des hypothèses simplificatrices utilisées par les modélisations et à déterminer quels sont les paramètres des charges de trafic qui ont le plus d'influence sur les déformations dans les chaussées souples.

L'étude s'appuie sur un grand nombre de données expérimentales. Des mesures de déformations ont été effectuées dans plusieurs structures routières en faisant varier les paramètres principaux des charges de trafic que sont l'intensité de la charge, la pression de gonflage des pneus et le type de roues. Ces mesures ont par ailleurs été effectuées à différentes températures.

Deux structures, présentant des rigidités contrastées, ont été modélisées selon la méthode française de dimensionnement des chaussées souples. Les déformations horizontales de ces structures ont été étudiées à deux profondeurs : au bas de la couche de base et au bas de la couche de roulement. Les résultats expérimentaux ont été systématiquement comparés avec ceux des modélisations.

Les déformations au bas de la couche de base ont été analysées en terme d'amplitude maximale, ce qui correspond à un des critères de dimensionnement des méthodes mécaniques empiriques, et en terme de signaux obtenus par enregistrement des déformations en un point donné durant le passage d'une charge de trafic.

L'analyse des amplitudes maximales a permis d'évaluer l'influence des paramètres de charge étudiés. Il en résulte des propositions pour en tenir compte dans le calcul du trafic équivalent. L'étude des signaux de déformations a conduit à la définition de grandeurs permettant de caractériser l'évolution des déformations dans le temps. Parmi ces grandeurs, il s'agit principalement des notions de vitesse de déformation et de définition de fréquences permettant de reproduire au mieux l'évolution des déformations avec des courbes sinusoïdales. Ces fréquences sont obtenues à partir de décomposition des signaux en séries de Fourier. Une relation entre la vitesse de la charge et cette fréquence a été définie.

Au bas de la couche de roulement, l'étude n'a porté que sur des signaux de déformations. Des variations surprenantes des déformations horizontales à faible profondeur, qui ont été désignées par le terme « irrégularités », ont été mises en évidence. L'explication de ces « irrégularités » a souligné que les matériaux bitumineux situés à proximité de la surface des chaussées souples sont paradoxalement sollicités plus fortement horizontalement que verticalement. Cette

situation tend à rapprocher le comportement des couches bitumineuses des chaussées souples de celui des dalles.

L'analyse des signaux de déformations horizontales a été complétée par des modélisations viscoélastiques linéaires basées sur le modèle de Huet. Si l'introduction du comportement viscoélastique des couches bitumineuse n'a pas permis de constater une amélioration sensible de la qualité des modélisations, il a en revanche été mis en évidence l'importance de considérer la structure routière dans son ensemble lors de modélisation. Des analyses des contraintes ont souligné l'effet des interactions existant entre des couches ayant des comportements différenciés et l'importance des conditions imposées aux interfaces de ces couches.

Pour finir, l'influence de la répartition réelle des pressions de chargement sur les contraintes et les déformations dans les couches bitumineuse a été évaluée à partir de modélisations élastiques. La variation des conditions d'application de la charge s'est révélée peu déterminante pour le calcul des déformations et des contraintes dans les couches bitumineuses.

**Mots clés :**

Dimensionnement, chaussées routières souples, charges de trafic, modélisation des chaussées, mesures de déformations, analyse de signaux, instrumentation, essais en vraie grandeur, modèles multicouches, enrobés bitumineux, élasticité linéaire, viscoélasticité linéaire

# Abstract

Undertaken in the field of design methods for flexible pavement, the present study focuses on the introduction of traffic loads, applied mainly to mechanistic empirical methods. In such research, strains due to traffic loads - calculated by pavement modeling based on linear elastic theory - are used for the evaluation of the life duration of the pavement.

Real traffic loads on pavement vary significantly according to their intensity as well as their application modes. Our work aims to evaluate the relevance of the simplifying assumptions used in modeling to determine which parameters used in the description of traffic loads have more influence on the strains in flexible pavements.

The study is chiefly based on experimental data. Strain measurements were made on several road structures, varying the main parameters of traffic loads, i. e. load intensity, inflation pressure of the tires and type of wheels. These measurements were carried out at various temperatures.

Two structures featuring contrasted rigidities were modeled according to the French design method for flexible pavement. The horizontal strains exerted on these structures were studied at two depths : the bottom of the base course and the bottom of the wearing course. Then, experimental data were systematically compared with the modeling results.

Strains at the bottom of the base course were both analyzed related to their maximal value - which corresponds to one of the design criteria used in mechanistic empirical methods - and as signals corresponding to the strain recordings in one given point during the passage of a traffic load.

Analysis of maximal values allowed an evaluation of the influence of the studied load parameters and lead on to solutions to include them in calculations for equivalent traffic. The study of strain signals resulted in the definition of values allowing to express strain variations in function of time. The said values apply principally to notions like strain rates and the definition of frequencies that will best model strain variation in time with a sinusoidal curve. Such frequencies are obtained by decompositions in Fourier series. A relation between load speed and frequency has been defined.

At the bottom of the wearing course, the study focused on strain signals only, with strange variations - which have been called « irregularities » - appearing in the horizontal strains at low depth. The scrutiny of these « irregularities » showed that bituminous materials located near to the road surface of flexible pavements are paradoxically more stressed horizontally than vertically. A situation that tends to link the behavior of bituminous layers in flexible pavements to the performance of a slam structure.

Analysis of strain signals was supplemented by linear viscoelastic modeling based on Huet's model. If introducing the viscoelastic behavior of the bituminous layers showed no notable improvement in the quality of modeling, it nevertheless

highlighted the necessity to model the pavement structure as a whole. Stress analysis underlined the effects of interactions between layers following different patterns of behavior and the importance of the interface conditions between these layers.

Finally, the influence of the real vertical load pressure distribution on stress and strain in bituminous layers has been evaluated with elastic modeling. Variation of the loading conditions showed little effects on stress and strain distribution in the bituminous layers.

**Keywords :**

Design, flexible pavements, traffic loads, pavement modeling, strains measurements, signal analysis, instrumentation, full-scale tests, multilayer models, bituminous mixes, linear-elasticity, linear visco-elasticity

# Remerciements

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude. Il n'est évidemment pas possible de citer nommément chacun d'entre eux, cependant il me semble nécessaire de souligner l'apport décisif de certains. Que ceux qui ne font pas partie des « élus » m'en excusent...

En premier lieu, c'est à mon proche entourage que je dédie l'effort que constitue la réalisation d'un tel travail. Je pense bien évidemment à ma femme Monica et à mes enfants, Ivan et Tania. Qu'ils sachent qu'ils sont pour moi une source permanente de motivation et de bonne humeur. Je tiens à y associer mes parents, notamment pour les valeurs qu'ils m'ont transmises, ainsi que mes beaux-parents, Carmen et Jacinto.

Bien des résultats présentés dans ce rapport n'auraient pas été obtenus sans l'aide de mon collègue Mehdi Ould-Hénia, qui fut en permanence mon interlocuteur privilégié pour les aspects scientifiques. Je tiens à lui associer le professeur Hervé di Benedetto pour ses conseils et l'intérêt qu'il a porté à mes travaux durant plus de trois ans. Les quelques analyses statistiques présentées dans ce travail n'y figureraient pas sans l'aide précieuse d'Estelle Martin.

Merci à Matti Huhtala, pour ses conseils concernant l'organisation de mon rapport, à Markus Caprez, Guy Doré et Laurent Vulliet qui ont accepté de lire mon texte et de participer au jury de cette thèse. Je tiens aussi à mentionner ici le professeur Tom Scarpas et son équipe, pour leur excellent accueil à l'université de Delft et la mise à disposition de leur programme d'éléments finis, ainsi que Arthur van Dommelen, du « Road and Hydraulic Engineering Division RHED (DWW) » au Pays-Bas, qui a fourni au LAVOC une licence pour le programme VEROAD.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes collègues du LAVOC, avec des mentions particulières à l'attention de Micaël Tille pour la relecture de mon document, de Jean-Jacques Hefti pour son aide dans le cadre des expériences menées à la Halle-fosse et d'Alexandre Torday pour son sympathique appui dans les moments de doute. Merci également à mes collègues de TRACES pour leur bonne humeur et leur ouverture d'esprit.

Par ailleurs, cette recherche a pu être menée grâce à l'appui de l'Office fédéral des routes, l'Office fédéral de l'éducation et de la science, le département des transports, de l'équipement et de l'environnement du canton du Valais et le département des infrastructures du canton de Vaud. Je tiens également à mentionner l'excellence des moyens mis à ma disposition par l'EPFL en général, et par le LAVOC en particulier.

Je ne saurais clore ces remerciements sans mentionner mon directeur de thèse, le professeur André-Gilles Dumont, pour son enthousiasme et pour la confiance et la liberté qu'il a su m'accorder.

Il ne m'est pas possible de terminer sans exprimer une pensée toute particulière à l'attention de mon père...



# Table des matières

<b>VERSION ABREGEE</b>		<b>A</b>
<b>ABSTRACT</b>		<b>C</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>		<b>E</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b>		<b>G</b>
<b>FIGURES</b>		<b>M</b>
<b>TABLEAUX</b>		<b>S</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>		<b>1</b>
1.1	Contexte .....	1
1.2	Le dimensionnement des chaussées.....	1
1.3	Motivation de l'étude .....	2
1.4	Structure de l'étude .....	4
1.5	Terminologie et convention de signes.....	6
1.5.1	Terminologie	6
1.5.2	Contraintes, déformations et direction	7
1.5.3	Convention de signes et d'intensité de charge	8
<b>2. DIMENSIONNEMENT ET COMPORTEMENT DES CHAUSSEES ROUTIERES</b>		<b>9</b>
2.1	Contenu .....	9
2.2	Les différents types de méthodes de dimensionnement .....	9
2.2.1	Méthode empirique : exemple de la méthode suisse	9
2.2.2	Méthode mécanique empirique	11
2.2.3	Méthode incrémentale	13
2.3	Problématique des charges de trafic .....	14
2.3.1	Le trafic pour le dimensionnement empirique : exemple des normes suisses	15
2.3.2	Lois de puissance pour le trafic équivalent	16
	2.3.2.1 Essieu de référence	16

2.3.2.2	<i>Coefficient de charge (puissance)</i>	17
2.3.2.3	<i>Configuration des essieux</i>	18
2.3.2.4	<i>Technologie des véhicules</i>	19
2.3.3	<b>Le trafic dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement</b>	<b>20</b>
2.3.4	<b>Conditions réelles d'application des charges de trafic</b>	<b>21</b>
2.3.4.1	<i>Forme des empreintes</i>	21
2.3.4.2	<i>Intensité de la pression verticale moyenne</i>	23
2.3.4.3	<i>Répartition de la pression verticale de contact sur la surface de charge</i>	23
2.3.4.4	<i>Efforts horizontaux</i>	25
2.3.4.5	<i>Type de roues</i>	26
2.3.4.6	<i>Vitesse</i>	27
<b>2.4</b>	<b>Le comportement des enrobés bitumineux.....</b>	<b>28</b>
2.4.1	Comportement élastique linéaire	30
2.4.2	Comportement et modèles viscoélastiques linéaires	31
2.4.2.1	<i>Modèle de Kelvin-Voigt</i>	33
2.4.2.2	<i>Modèle de Maxwell</i>	34
2.4.2.3	<i>Modèle d'Huet : modèle à fluage bi-parabolique</i>	34
2.4.3	Comportement en fatigue des enrobés	35
<b>2.5</b>	<b>Modélisation des superstructures routières .....</b>	<b>36</b>
2.5.1	Le modèle multicouche de Burmister	37
2.5.1.1	<i>Conditions aux limites</i>	38
2.5.1.2	<i>Définition de la charge</i>	39
2.5.2	Modélisation élastique d'une chaussée par éléments finis	39
2.5.3	Modélisation viscoélastique linéaire avec un logiciel multicouche	40
<b>2.6</b>	<b>Modèles de performance pour les méthodes mécaniques empiriques.....</b>	<b>40</b>
2.6.1	Critère de fatigue des couches bitumineuses	41
2.6.2	Critère de déformation permanente du sol de fondation	42
2.6.3	Evaluation de l'orniérage des couches bitumineuses	42
2.6.4	Conclusion sur les modèles de performances	43
<b>2.7</b>	<b>Enseignements .....</b>	<b>44</b>
<b>3.</b>	<b>MESURES DE DEFORMATIONS DANS LES CHAUSSEES ROUTIERES SOUPLES</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Mesures de déformations et essais en vraie grandeur .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Campagnes de mesures de déformations sur des structures en vraie grandeur .....</b>	<b>46</b>
3.2.1	Première campagne : Evaluation des enrobés à module élevé (Halle-fosse)	46
3.2.1.1	<i>Description des structures</i>	47
3.2.1.2	<i>Instrumentation et mesures</i>	48
3.2.1.3	<i>Principaux résultats de l'expérience</i>	49
3.2.2	Deuxième campagne : Contribution suisse à l'action COST 333 (Halle-fosse)	49
3.2.2.1	<i>Description de la structure</i>	49
3.2.2.2	<i>Instrumentation et mesures</i>	50
3.2.2.3	<i>Principaux résultats de l'expérience</i>	51
3.2.3	Troisième campagne : Confirmation de la durée de vie d'une superstructure autoroutière (autoroute A9)	51
3.2.3.1	<i>Description des structures</i>	51
3.2.3.2	<i>Instrumentation et mesures</i>	52
3.2.3.3	<i>Principaux résultats de l'expérience</i>	52
3.2.4	Quatrième campagne : Estimation de la durée de vie d'une superstructure après renforcement (autoroute A1)	52
3.2.4.1	<i>Description des structures</i>	53
3.2.4.2	<i>Instrumentation et mesures</i>	53

3.2.4.3	<i>Principaux résultats de l'expérience</i>	53
<b>3.3</b>	<b>Description du dispositif d'essai de la Halle-fosse et conditions expérimentales</b>	<b>54</b>
3.3.1	Simulateur de trafic lourd	54
3.3.2	Jauges de mesure pour les déformations horizontales	55
3.3.3	Acquisition de mesures et détermination des amplitudes maximales	56
3.3.4	Conditions d'essais	60
3.3.4.1	<i>Contrôle de la température</i>	60
3.3.4.2	<i>Contrôle des conditions de charge</i>	60
3.3.4.3	<i>Contrôle de la position de la charge</i>	61
<b>3.4</b>	<b>Description des signaux de déformations expérimentaux dans les couches bitumineuses</b>	<b>61</b>
3.4.1	Déformations horizontales au bas de la couche de base	63
3.4.2	Déformations horizontales au bas de la couche de roulement	64
<b>3.5</b>	<b>Matériaux posés à la Halle-fosse et hypothèses pour les modélisations</b>	<b>66</b>
3.5.1	Matériaux mis en place à la Halle-fosse et propriétés élastiques	67
3.5.1.1	<i>Enrobés bitumineux des couches de base et de roulement</i>	67
3.5.1.2	<i>Matériaux de la couche de fondation</i>	68
3.5.1.3	<i>Matériaux du sol de fondation et fond de la fosse</i>	69
3.5.1.4	<i>Propriétés élastiques des matériaux</i>	69
3.5.2	Modélisation de la charge	69
<b>3.6</b>	<b>Enseignements</b>	<b>70</b>
<b>4.</b>	<b>AMPLITUDES DES DEFORMATIONS HORIZONTALES AU BAS DE LA COUCHE DE BASE</b>	<b>71</b>
<b>4.1</b>	<b>Contenu et démarche</b>	<b>71</b>
<b>4.2</b>	<b>Amplitudes maximales des déformations longitudinales</b>	<b>72</b>
4.2.1	Résultats des mesures et des modélisations	72
4.2.2	Evaluation des amplitudes des mesures	74
4.2.3	Comparaison des amplitudes des mesures et des modélisations	75
4.2.4	Effet de la variation de l'intensité de la charge	79
4.2.5	Effet de la variation de la pression de gonflage	82
4.2.6	Effet du type roues	85
4.2.7	Effet de la température	88
4.2.8	Evaluation statistique de l'influence des paramètres de charge	90
4.2.8.1	<i>Analyse ANOVA globale</i>	92
4.2.8.2	<i>Analyse ANOVA par structure et par température</i>	93
4.2.9	Synthèse des résultats pour les amplitudes des déformations longitudinales	96
<b>4.3</b>	<b>Répartition latérale des déformations maximales longitudinales et transversales</b>	<b>98</b>
4.3.1	Résultats des mesures	98
4.3.2	Comparaison des résultats des mesures et des modélisations	104
<b>4.4</b>	<b>Prise en compte des résultats pour le calcul du trafic équivalent</b>	<b>106</b>
4.4.1	Intensité de la charge	107
4.4.2	Pression de gonflage	109
4.4.3	Type de roues	111

<b>4.5</b>	<b>Enseignements .....</b>	<b>111</b>
<b>5.</b>	<b>SIGNAUX DE DEFORMATIONS AU BAS DE LA COUCHE DE BASE</b>	<b>115</b>
<b>5.1</b>	<b>Contenu et démarche .....</b>	<b>115</b>
<b>5.2</b>	<b>Comparaison de signaux expérimentaux .....</b>	<b>115</b>
5.2.1	Effet de la température	121
5.2.2	Vitesses de déformation des signaux	125
5.2.3	Effet de la température sur les vitesses de déformation des signaux	132
<b>5.3</b>	<b>Modélisation élastique de signaux de déformation et comparaison avec les signaux expérimentaux .....</b>	<b>135</b>
5.3.1	Vitesses de déformation des signaux modélisés et expérimentaux	139
5.3.2	Pics de contraction des signaux longitudinaux	142
5.3.3	Ratio entre les contractions et les extensions des signaux longitudinaux	143
5.3.4	Positions temporelle et spatiale des pics de contraction $c_1$ et $c_2$ par rapport à l'extension maximale $e$	145
<b>5.4</b>	<b>Analyse de signaux expérimentaux par séries de Fourier .....</b>	<b>147</b>
5.4.1	Séries de Fourier et spectre d'amplitude	148
5.4.2	Fréquence unique correspondant au maximum d'amplitude	148
5.4.3	Fréquence unique à partir des vitesses de déformation des signaux	151
5.4.4	Fréquence unique par moyenne pondérée	153
5.4.5	Détermination de fréquence à partir de signaux modélisés	155
5.4.6	Effet de la vitesse de la charge sur les fréquences	156
5.4.7	Synthèse des résultats des analyses par séries de Fourier	160
<b>5.5</b>	<b>Enseignements .....</b>	<b>161</b>
<b>6.</b>	<b>DEFORMATIONS HORIZONTALES AU BAS DE LA COUCHE DE ROULEMENT</b>	<b>163</b>
<b>6.1</b>	<b>Contenu et démarche .....</b>	<b>163</b>
<b>6.2</b>	<b>Comparaison de signaux expérimentaux .....</b>	<b>164</b>
<b>6.3</b>	<b>Modélisation élastique de signaux de déformation et comparaison avec les signaux expérimentaux .....</b>	<b>169</b>
6.3.1	Visualisation des « irrégularités » à partir des modélisations	172
6.3.2	Explication théorique et physique des « irrégularités »	173
<b>6.4</b>	<b>Enseignements .....</b>	<b>177</b>

<b>7.</b>	<b>MODELISATIONS VISCOELASTIQUES LINEAIRES</b>	<b>179</b>
7.1	Contenu et démarche .....	179
7.2	Hypothèses et paramètres viscoélastiques des matériaux.....	179
7.2.1	Signaux de déformations viscoélastiques à partir de contraintes calculées par un modèle élastique	180
7.2.2	Signaux de déformations à partir d'un modèle multicouche permettant d'introduire le comportement viscoélastique	180
7.2.3	Détermination des paramètres pour le modèle de Huet	180
7.3	Signaux au bas de la couche de base.....	181
7.3.1	Comparaison des différentes modélisations	182
7.3.2	Comparaison des contraintes élastiques et viscoélastiques	184
7.3.3	Comparaison des modélisations avec les mesures expérimentales	187
	7.3.3.1 Différences entre les amplitudes maximales longitudinales et transversales	189
	7.3.3.2 Dissymétrie des signaux viscoélastiques	189
7.4	Signaux au bas de la couche de roulement.....	193
7.4.1	Comparaison des différentes modélisations	193
7.4.2	Comparaison des contraintes des différentes modélisations	195
7.4.3	Comparaison des modélisations avec les mesures expérimentales	197
7.5	Enseignements .....	199
<b>8.</b>	<b>EFFETS DE LA DEFINITION DES CONDITIONS DE CHARGE</b>	<b>201</b>
8.1	Contenu et démarche .....	201
8.2	Hypothèses de modélisation .....	202
8.2.1	Genre d'éléments finis	202
8.2.2	Maillage	202
8.2.3	Conditions aux limites	203
8.2.4	Conditions de charge	203
8.3	Evaluation au bas de la couche de base .....	205
8.4	Evaluation en haut des couches bitumineuses .....	207
8.5	Variation des sollicitations en fonction de la profondeur .....	209
8.6	Enseignements .....	213

---

<b>9.</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>215</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>217</b>
<b>11.</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>225</b>
11.1	Equations des contraintes et déplacements du système de Burmister.....	225
11.2	Calendriers des mesures à la Halle-fosse dans le cadre des EME.....	227
11.3	Jauges de mesure de déformations horizontales.....	229
11.4	Essais de module en laboratoire pour les matériaux bitumineux .....	231
	<b>CURRICULUM VITAE</b>	<b>235</b>

# Figures

Figure 1 :	Evolution de la configuration des véhicules lourds en Europe (COST_334 non publié à ce jour)	2
Figure 2 :	Définition des couches d'une chaussée routière (SN_640302)	6
Figure 3 :	Principe de fonctionnement des méthodes de dimensionnement mécaniques empiriques (COST_333 1999)	12
Figure 4 :	Schéma de fonctionnement pour une méthode incrémentale de dimensionnement (COST_333 1999)	13
Figure 5 :	Analyse des résultats de la fissuration lors du projet FORCE (OCDE 1991b)	17
Figure 6 :	"Puissance" obtenue en fonction du degré de fissuration de référence retenu, projet FORCE (OCDE 1991b)	18
Figure 7 :	Empreintes de contact des pneus simples utilisés dans le cadre des expériences de la Halle-fosse pour quatre cas de charge	22
Figure 8 :	Mesures de la répartition des pressions de contact d'un pneu pour différentes conditions de charge (De Beer, Fisher et al. 1997)	24
Figure 9 :	Répartition des efforts transversaux dus à la nature du caoutchouc des pneumatiques (Groenendijk 1998)	25
Figure 10 :	Répartition des efforts transversaux pour des pneus dont la pression de gonflage n'est pas adaptée à la charge (Groenendijk 1998)	25
Figure 11 :	Signal de déformations longitudinal lors du passage à 80 km/h d'un véhicule composé de deux essieux tandem	28
Figure 12 :	Comportement des matériaux bitumineux (Di Benedetto 1990)	29
Figure 13 :	Représentation du modèle de Huet	34
Figure 14 :	Schématisation du modèle de Burmister	37
Figure 15 :	Structures construites à la Halle-fosse pour l'évaluation des enrobés à module élevé (Perret, Dumont et al. 2001)	47
Figure 16 :	Structure construite à la Halle-fosse (Turtschy et Perret 1999)	50
Figure 17 :	Coupe générale de la section "Tunnel" sur l'autoroute A9	51
Figure 18 :	Détail des couches bitumineuses des sections instrumentées sur l'autoroute A9	52
Figure 19 :	Coupe générale des sections instrumentées sur l'autoroute A1	53
Figure 20 :	Coupe des sections instrumentées sur l'autoroute A1, détail des couches en enrobés	53
Figure 21 :	Simulateur de trafic lourd de la Halle-fosse	54
Figure 22 :	Jauges de mesure pour les déformations horizontales type Kyowa et répartition horizontale	55

---

Figure 23 :	Positions latérales par rapport à l'axe du champ pour les mesures de réponses et pour les deux types de roue	56
Figure 24 :	Signaux expérimentaux (quatre passages de la charge) provenant de deux jauges différentes ; déformations longitudinales au bas de la couche de base	57
Figure 25 :	Signal fortement différencié et positionnement horizontal de la jauge ayant servi à sa mesure (expérience COST 333)	58
Figure 26 :	Superposition de deux signaux de déformations fournis par une même jauge pour un même cas de charge si la jauge est abordée selon des directions opposées	58
Figure 27 :	Superposition de deux signaux de déformations fournis par une même jauge pour un même cas de charge si la jauge est abordée selon la même direction	59
Figure 28 :	Détermination des amplitudes de déformations longitudinales à partir des signaux expérimentaux de la Halle-fosse	59
Figure 29 :	Déformée des couches bitumineuses lors du passage d'une roue	62
Figure 30 :	Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de base	63
Figure 31 :	Définition de valeurs caractéristiques des signaux longitudinaux au bas de la couche de base	64
Figure 32 :	Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (30°C)	65
Figure 33 :	Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (5°C)	66
Figure 34 :	Comparaison des déformations longitudinales maximales calculées ou mesurées pour tous les cas de charge	76
Figure 35 :	Comparaison des ratios des déformations pour la charge	81
Figure 36 :	Comparaison des ratios des déformations pour la pression	84
Figure 37 :	Comparaison des ratios des déformations pour le type de roues	87
Figure 38 :	Comparaison des ratios des déformations pour la température	89
Figure 39 :	Comparaison des courbes maîtresses du HMT22s et du EME2	90
Figure 40 :	Signaux de déformations transversales en fonction de la distance latérale au centre d'une roue simple ou des roues jumelées	99
Figure 41 :	Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 5°C, structure de 17 cm	100
Figure 42 :	Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 5°C, structure de 10 cm	100
Figure 43 :	Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 15°C, structure de 17 cm	101
Figure 44 :	Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 15°C, structure de 10 cm	101

---

Figure 45 :	Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 30°C, structure de 17 cm	102
Figure 46 :	Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 30°C, structure de 10 cm	102
Figure 47 :	Diffusion de la charge pour la structure en HMT 22s	104
Figure 48 :	Comparaison des répartitions latérales des déformations maximales au bas de la couche de base obtenues par mesures et par modélisations – structure de 17 cm	105
Figure 49 :	Comparaison des répartitions latérales des déformations maximales au bas de la couche de base obtenues par mesures et par modélisations – structure de 10 cm	105
Figure 50 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base, 5°C - structure de 17 cm	117
Figure 51 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base, 5°C - structure de 10 cm	117
Figure 52 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base, 15°C - structure de 17 cm	118
Figure 53 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base, 15°C - structure de 10 cm	118
Figure 54 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base, 30°C - structure de 17 cm	119
Figure 55 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base, 30°C - structure de 10 cm	119
Figure 56 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base pour différentes températures - structure de 17 cm	122
Figure 57 :	Signaux de déformations au bas de la couche de base pour différentes températures - structure de 10 cm	122
Figure 58 :	Détail des signaux longitudinaux mettant en évidence une position où la déformation ne dépend pas de la température	124
Figure 59 :	Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 5°C - structure de 17 cm	126
Figure 60 :	Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 5°C - structure de 10 cm	126
Figure 61 :	Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 15°C - structure de 17 cm	127
Figure 62 :	Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 15°C - structure de 10 cm	127
Figure 63 :	Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 30°C - structure de 17 cm	128
Figure 64 :	Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 30°C - structure de 10 cm	128
Figure 65 :	Vitesses de déformation de signaux expérimentaux pour différentes températures – structures de 17 cm	133

---

Figure 66 :	Vitesses de déformation de signaux expérimentaux pour différentes températures – structures de 10 cm	133
Figure 67 :	Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm	136
Figure 68 :	Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm	137
Figure 69 :	Détail des signaux longitudinaux modélisés mettant en évidence une position où la déformation ne dépend pas de la température	138
Figure 70 :	Comparaison des vitesses de déformation de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm	140
Figure 71 :	Comparaison des vitesses de déformation de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm	141
Figure 72 :	Comparaison des contractions avant et après le passage de la roue obtenus par mesures et par modélisations	143
Figure 73 :	Comparaison des ratios entre les contractions et les extensions obtenus par mesures et par modélisations	145
Figure 74 :	Comparaison des temps de chargement obtenus par mesures et par modélisations	147
Figure 75 :	Spectres d'amplitude pour les signaux	149
Figure 76 :	Superposition de signaux (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence unique correspondant à l'amplitude maximale	151
Figure 77 :	Spectre d'amplitude pour les vitesses de déformation des signaux	152
Figure 78 :	Superposition de signaux (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence unique obtenue à partir des vitesses de déformation	153
Figure 79 :	Superposition de signaux de déformations (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence correspondant à l'espérance	154
Figure 80 :	Superposition de signaux de déformations (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence obtenue par moyenne pondérée sans tenir compte des fréquences supérieures à 10 Hz	155
Figure 81 :	Spectre des fréquences des signaux enregistrés pour différentes vitesses de déplacement de la charge et pour deux types de roue	156
Figure 82 :	Superposition de signaux de déformations longitudinales avec des courbes sinusoïdales de fréquences tirées de décomposition en séries de Fourier	158
Figure 83 :	Fréquence en fonction de la vitesse de la charge pour diverses structures et divers cas de charge	159

---

Figure 84 :	Ratios entre la vitesse de la charge et la fréquence en fonction de l'épaisseur des couches bitumineuses	160
Figure 85 :	Signaux de déformations au bas de la couche de roulement - structure de 17 cm	164
Figure 86 :	Signaux de déformations au bas de la couche de roulement - structure de 10 cm	165
Figure 87 :	Images « symétriques » de signaux de déformations longitudinales au bas de la couche de roulement sans « irrégularités » et au bas de la couche de base	166
Figure 88 :	Détail et décomposition des « irrégularités » dans la zone centrale d'un signal de déformation longitudinale à la base de la couche de roulement	167
Figure 89 :	Superposition des « irrégularités de signaux longitudinaux pour différentes conditions d'intensité de charge et de pression - structure de 17 cm à 5°C	168
Figure 90 :	Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm	170
Figure 91 :	Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm	171
Figure 92 :	Détail de la modélisation de la zone centrale des signaux de déformation à faible profondeur, structure de 17 cm	173
Figure 93 :	Composantes des contraintes (gauche) et contribution de ces composantes sur les déformations longitudinales (droite)	174
Figure 94 :	Composantes des contraintes (gauche) et contribution de ces composantes sur les déformations longitudinales (droite) à des profondeurs 4 et 5 cm	176
Figure 95 :	Calage entre le modèle de Huet et les résultats des essais en laboratoire (HMT 22s)	181
Figure 96 :	Comparaison des signaux de déformations obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (VEL-EL) et (Veroad)	183
Figure 97 :	Comparaison des signaux de contraintes obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (Veroad)	185
Figure 98 :	Comparaison de signaux de déformations : modélisations élastiques (EL-EL), viscoélastiques (Veroad) et mesures expérimentales (mes)	188
Figure 99 :	Comparaison des vitesses de déformation des signaux : modélisations élastiques (EL-EL), viscoélastiques (Veroad) et mesures expérimentales (mes)	190
Figure 100 :	Comparaison des temps de chargement obtenus par modélisations élastiques et viscoélastiques avec ceux des mesures	192

---

Figure 101 :	Comparaison des signaux de déformations obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (MR Veroad) et (Veroad)	194
Figure 102 :	Comparaison des signaux de contrainte obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (MR Veroad) et (Veroad)	196
Figure 103 :	Comparaison de signaux de déformations : modélisations élastiques (EL-EL), viscoélastiques (MR Veroad) et mesures expérimentales (mes)	198
Figure 104 :	Maillage en trois dimensions de la structure	203
Figure 105 :	Répartition uniforme de la pression verticale de chargement	204
Figure 106 :	Répartition non uniforme de la pression verticale de chargement	204
Figure 107 :	Répartition transversale des charges transversales	205
Figure 108 :	Répartition transversale des contraintes et déformations transversales en haut des couches bitumineuses	209
Figure 109 :	Chemin des contraintes à différentes profondeur dans les couches bitumineuses, situation théorique à 15°C	211
Figure 110 :	Contraintes et déformations d'éléments de matériaux bitumineux situés à différentes profondeurs au droit de la charge	212
Figure 111 :	Jauge de mesure de déformations de type Kyowa	229
Figure 112 :	Dispositif de test en laboratoire des jauges de déformation	229

# Tableaux

Tableau 1 :	Facteurs correcteurs pour le calcul du trafic équivalent	20
Tableau 2 :	Cas de charge pour l'expérience du COST 333	50
Tableau 3 :	Composition des enrobés bitumineux posés à la Halle-fosse	67
Tableau 4 :	Propriétés élastiques des matériaux	69
Tableau 5 :	Mesures et modélisations des déformations longitudinales maximales (microdéformations) au bas de la couche de base - structure de 17 cm	72
Tableau 6 :	Mesures et modélisations des déformations longitudinales maximales (microdéformations) au bas de la couche de base - structure de 10 cm	73
Tableau 7 :	Synthèse des déformations extrêmes pour tous les cas de charge confondus et pour les deux structures	73
Tableau 8 :	Ecarts absolus (microdéformations) et relatifs entre les deux résultats expérimentaux pour les déformations longitudinales - structure de 17 cm	74
Tableau 9 :	Ecarts absolus (microdéformations) et relatifs entre les deux résultats expérimentaux pour les déformations longitudinales - la structure de 10 cm	75
Tableau 10 :	Ecarts absolus (microdéformations) entre les déformations calculées et mesurées - structure de 17 cm	76
Tableau 11 :	Ecarts absolus (microdéformations) entre les déformations calculées et mesurées - structure de 10 cm	77
Tableau 12 :	Ecarts relatifs entre les déformations calculées (référence) et mesurées - structure de 17 cm	77
Tableau 13 :	Ecarts relatifs entre les déformations calculées (référence) et mesurées - structure de 10 cm	78
Tableau 14 :	Ratios des déformations pour la charge - structure de 17 cm	80
Tableau 15 :	Ratios des déformations pour la charge - structure de 10 cm	80
Tableau 16 :	Synthèse qualitative des conséquences d'une augmentation de l'intensité de la charge	82
Tableau 17 :	Ratios des déformations pour la pression - structure de 17 cm	83
Tableau 18 :	Ratios des déformations pour la pression - structure de 10 cm	83
Tableau 19 :	Variation des paramètres pression « p » et rayon « a » dans la fonction de contrainte	84
Tableau 20 :	Synthèse qualitative des conséquences d'une augmentation de la pression de gonflage	85
Tableau 21 :	Ratios des déformations pour le type de roue - structure de 17 cm	86

Tableau 22 :	Ratios des déformations pour le type de roue - structure de 10 cm	86
Tableau 23 :	Synthèse qualitative des conséquences de l'utilisation de différents types de roues	87
Tableau 24 :	Ratios des déformations pour la température - structure de 17 cm	88
Tableau 25 :	Ratios des déformations pour la température - structure de 20 cm	88
Tableau 26 :	Synthèse qualitative des résultats pour l'effet de la température	89
Tableau 27 :	Importance des paramètres et de leurs interactions dans le modèle (p-valeur)	93
Tableau 28 :	Importance des paramètres leurs interactions dans les modèles par structure et par température (p-valeur)	94
Tableau 29 :	Poids des coefficients des paramètres et des interactions	95
Tableau 30 :	« Classement » des paramètres et des interactions	95
Tableau 31 :	Moyennes des ratios des déformations pour la charge - structure	107
Tableau 32 :	Moyennes des ratios des déformations pour la charge – structure et roues	107
Tableau 33 :	Moyennes des ratios des déformations pour la pression - structure	109
Tableau 34 :	Moyennes des ratios des déformations pour la pression - roues	109
Tableau 35 :	Moyennes des ratios des déformations pour le type de roues	111
Tableau 36 :	Moyennes des ratios des déformations pour le type de roues	111
Tableau 37 :	Temps de chargement $t_{ch}$ entre les pics de contraction ( $10^{-3}$ secondes) - structure de 17 cm	123
Tableau 38 :	Temps de chargement $t_{ch}$ entre les pics de contraction ( $10^{-3}$ secondes) - structure de 10 cm	123
Tableau 39 :	Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux longitudinaux - structure de 17 cm (microdéf. par secondes)	129
Tableau 40 :	Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux longitudinaux - structure de 10 cm (microdéf. par secondes)	129
Tableau 41 :	Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux transversaux - la structure de 17 cm (microdéf. par secondes)	130
Tableau 42 :	Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux transversaux - structure de 10 cm (microdéf. par secondes)	130
Tableau 43 :	Moyennes des vitesses de déformation maximales (microdéf. par secondes)	131
Tableau 44 :	Ratio entre les vitesses de déformation maximales avant et après le passage de la charge	131
Tableau 45 :	Amplitudes en microdéformations des pics de contractions $c_1$ avant et $c_2$ après le passage de la roue	142

---

Tableau 46 : Ratios entre les contractions et les extensions des signaux longitudinaux - structure de 17 cm	144
Tableau 47 : Ratios entre les contractions et les extensions des signaux longitudinaux - structure de 10 cm	144
Tableau 48 : Temps t (en millisecondes) et distance d (en cm) entre les pics de déformations - structure de 17 cm	146
Tableau 49 : Temps t ( $10^{-3}$ sec) et distance d (en cm) entre les pics de déformations - structure de 10 cm	146
Tableau 50 : Fréquences (en Hz) correspondant aux amplitudes maximales pour les signaux	150
Tableau 51 : Fréquences (en Hz) correspondant aux amplitudes maximales obtenues à partir des vitesses de déformation des signaux	152
Tableau 52 : Espérances des fréquences (en Hz) pour les signaux	154
Tableau 53 : Espérance des fréquences (en Hz) pour les signaux, sans tenir compte des fréquences supérieures à 10 Hz	155
Tableau 54 : Comparaison des fréquences (en Hz) déterminée à partir de signaux expérimentaux ou modélisés	156
Tableau 55 : Fréquences (en Hz) calculées pour différentes vitesses de déplacement de la charge	157
Tableau 56 : Fréquences et ratios entre la vitesse et la fréquence pour différentes vitesses de déplacement de la charge et pour différentes structures	159
Tableau 57 : Longueurs (en cm) des « irrégularités » (zone 2 à 5) des signaux expérimentaux - structure de 17 cm	168
Tableau 58 : Longueurs des surfaces de contact et longueurs des « irrégularités »	169
Tableau 59 : Paramètres du modèle de Huet pour le HMT 22s et le MR 11	181
Tableau 60 : Amplitudes (en microdéformations) des contractions avant et après le passage de la roue	191
Tableau 61 : Temps t (en millisecondes) et distance d (en cm) entre les pics de déformations, modélisations élastiques et viscoélastiques (Veroad) et résultats expérimentaux	192
Tableau 62 : Définition des cas de charge et valeurs des pressions verticales de chargement	204
Tableau 63 : Effets des conditions d'application de la charge sur les amplitudes maximales des contraintes et des déformations au bas de la couche de base	206
Tableau 64 : Effets des conditions d'application de la charge sur les amplitudes maximales des contraintes et des déformations en haut des couches bitumineuses	207
Tableau 65: Nombre de jauges de déformation fonctionnant en début d'expérience	230



*« Tout cela cependant, le mal de l'âme comme la puissance des mégatonnes, nous vient d'une simple idée : la nature est objective, la vérité de la connaissance ne peut avoir d'autre source que la confrontation systématique de la logique et de l'expérience »*

Jacques MONOD, Le hasard et la nécessité



# 1. Introduction

## 1.1 Contexte

Le dimensionnement des éléments constitutifs des chaussées routières en Suisse est basé sur des règles empiriques tirées d'observations de dégradation de chaussées réelles. Les développements des connaissances dans le domaine des matériaux et dans celui de la modélisation permettent une approche du dimensionnement avec des méthodes basées sur le comportement mécanique des chaussées.

Cependant, la variété des paramètres à considérer, tant pour les sollicitations des matériaux (charge) que pour leur comportement (influence des conditions climatiques et du vieillissement sur les propriétés mécaniques), rend délicate l'utilisation de méthodes purement mécaniques. Les limites des analyses ne permettent pas d'évaluer directement le comportement réel des chaussées et il est encore nécessaire d'avoir recours à des données empiriques pour effectuer cette opération. Ainsi, le dimensionnement des chaussées est une combinaison entre les sollicitations des matériaux constituant les chaussées, obtenues par modélisation, et le comportement de ces matériaux. Ce comportement est obtenu par des essais en laboratoire et des observations à long terme de chaussées réelles. On parle alors de méthodes mécanique empirique ou analytique empirique.

Les sollicitations dépendent fortement des conditions de chargement des chaussées. Le présent travail cherche à évaluer l'effet de ces conditions de chargement sur ces sollicitations, ceci à partir de mesures expérimentales de déformations et de modélisations. Il se limite à l'étude des sollicitations dans les couches bitumineuses des superstructures routières souples.

## 1.2 Le dimensionnement des chaussées

D'un point de vue structurel, une superstructure de route doit résister à diverses sollicitations, notamment celles dues au trafic et elle doit assurer la diffusion des efforts induits par ce même trafic dans le sol de fondation. Ses dimensions dépendent donc principalement de deux données fondamentales que sont le trafic et la capacité portante du sol. Ces paramètres de base pour le dimensionnement interviennent aux deux interfaces de la superstructure, au sommet pour le trafic et au bas pour le sol. Ceci permet d'effectuer une séparation distincte quant au rôle que doivent jouer les couches dans le fonctionnement d'une chaussée. De façon générale, on peut admettre que les couches supérieures, outre leur fonction de confort et de sécurité pour l'utilisateur, ont un rôle de diffusion des efforts de trafic alors que la partie inférieure doit assurer une certaine portance permettant la transmission de ces efforts dans le sol de fondation. Par conséquent, le dimensionnement des couches supérieures est principalement lié à l'intensité du trafic alors que celui des couches inférieures dépend d'abord de la qualité du sol de fondation.

Il n'existe pas actuellement de méthode de dimensionnement purement analytique pour le dimensionnement des chaussées. En effet, en plus des charges de trafic, les infrastructures routières sont soumises à d'autres actions (conditions climatiques, hydrologiques, etc.) influençant leur comportement et qui peuvent parfois s'avérer déterminantes. Il n'est donc pas aisé de représenter l'évolution de certains modes de dégradation (fissuration de fatigue par exemple) ce qui rend difficile l'application de modèles purement analytiques. La tendance actuelle consiste à combiner des calculs analytiques avec des observations empiriques pour tenir compte de ces autres actions. La prise en compte de ces résultats empiriques se fait généralement par l'intermédiaire de coefficient de calage permettant d'adapter les résultats des calculs aux observations in situ.

### 1.3 Motivation de l'étude

Un des deux paramètres de base pour le dimensionnement des superstructures routières est le trafic, plus précisément son agressivité<sup>1</sup>. En plus de l'augmentation générale du trafic<sup>2</sup>, la technologie des véhicules lourds est en constante évolution, notamment en ce qui concerne leur configuration (nombre et groupement des axes des véhicules) et les types de pneumatiques utilisés. En Europe, l'action COST 334 « Effects of wide single tyres and dual tyres » a montré que la tendance est à un remplacement des pneus jumelés par des pneus simples dont les largeurs sont plus importantes. Cette tendance s'observe en particulier sur les roues des remorques et des semi-remorques (Figure 1).

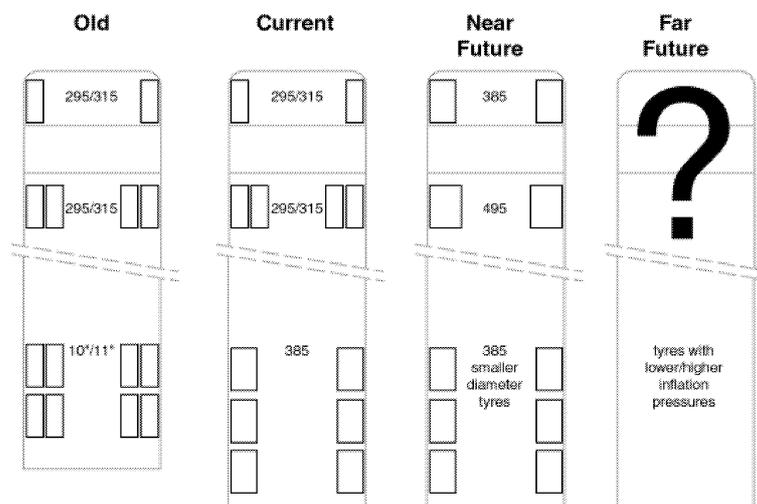


Figure 1 : Evolution de la configuration des véhicules lourds en Europe (COST\_334 non publié à ce jour)

<sup>1</sup> L'agressivité du trafic traduit son potentiel de dégradation des chaussées routières. Elle dépend fortement de l'intensité des charges par essieu

<sup>2</sup> En Suisse, les prestations de transport routier de personnes (voyageurs × km) ou de marchandises (tonnes × km) ont été multipliées par 7 sur une période de 40 ans (Tille 2001)

Ces pneus simples utilisent généralement des pressions de gonflage plus élevées que les pneus jumelés. Ils conduisent à une réduction des surfaces de contact et donc une augmentation de la pression de contact à la surface des chaussées routières. Des mesures des pressions entre les pneus et la surface de roulement ont montré que d'importantes surpressions peuvent être observées en fonction des conditions de chargement. Il est logique de penser que ces modifications (type de pneu et variation des pressions de contact) ont des conséquences sur les sollicitations des superstructures routières, particulièrement dans les premiers centimètres.

Le but initial de ce travail est d'évaluer quelles sont les conséquences des modifications des conditions d'application des charges de trafic sur les déformations et les contraintes au sein des couches bitumineuses d'une superstructure routière souple<sup>3</sup>. Il cherche notamment à évaluer dans quelle mesure les modélisations élastiques linéaires, utilisées pour le dimensionnement mécanique empirique des chaussées, sont à même de rendre compte de ces modifications. Pour réaliser cette évaluation, des déformations issues de mesures expérimentales effectuées sur des structures routières pour diverses charges de trafic sont comparées avec les déformations pouvant être obtenues par des modélisations. Comme les valeurs de dimensionnement correspondent généralement à des valeurs uniques de déformations (amplitudes maximales), ce sont elles qui sont utilisées pour l'évaluation détaillée de cette problématique.

Toutefois, la prise en compte d'une valeur unique de déformation, l'extension maximale au bas des couches bitumineuses, ne donne qu'une vision très restreinte de l'effet des conditions de chargement sur les sollicitations des chaussées. Le cadre de l'étude a donc été étendu à la répartition spatiale et temporelle de ces déformations. Cette thématique a été abordée à partir de signaux<sup>4</sup> de déformations pour lesquelles d'autres grandeurs pouvant permettre de caractériser les sollicitations dans les matériaux bitumineux ont été définies : vitesse de variation des déformations, alternance entre les contractions et compressions, ratio entre les valeurs maximales, fréquence des sollicitations. Ces analyses ne sont pas centrées uniquement sur la problématique de la charge, mais aussi sur des comparaisons avec les conditions de sollicitations utilisées en laboratoire (fréquences, amplitudes, vitesses des sollicitations).

---

<sup>3</sup> Une chaussée routière souple est constituée de différentes couches d'enrobés bitumineux. Les chaussées rigides ou semi-rigides ne sont pas abordées dans le cadre de ce travail

<sup>4</sup> On entend par signaux l'ensemble des déformations enregistrées durant le passage d'une charge de trafic

## 1.4 Structure de l'étude

Après un premier chapitre consacré à une introduction générale, l'étude débute concrètement au chapitre 2, « *Dimensionnement et comportement des chaussées routières* », avec une présentation de diverses méthodes de dimensionnement des chaussées. Cette présentation a pour but de clairement situer ce travail dans le cadre de cette thématique du dimensionnement. Une partie importante de ce chapitre est dédiée à la problématique de la prise en compte des charges de trafic qui est au centre de ce travail. Il s'ensuit une description du comportement des enrobés bitumineux et des principaux modèles utilisés dans le cadre des méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement.

Le chapitre 3, « *Mesures de déformations dans les chaussées routières souples* », commence par une description des **expériences** au cours desquelles les mesures utilisées dans ce travail ont été réalisées. Les conditions expérimentales de la Halle-fosse, installation d'**essais en vraie grandeur** de l'EPFL où l'essentiel des mesures utilisées dans le cadre de ce travail ont été réalisées, y sont décrites. Le chapitre se poursuit par des considérations sur la forme générale des signaux de déformations dans les couches bitumineuses. Il se termine par une description des matériaux mis en place pour l'expérience servant de support principal à ce travail. Cette description inclut également les hypothèses retenues pour les modélisations élastiques en ce qui concerne les propriétés des matériaux et la modélisation de la charge.

Le chapitre 4, « *Amplitudes des déformations horizontales au bas de la couche de base* », étudie les valeurs de ces amplitudes pour deux des structures en vraie grandeur construites à la Halle-fosse. Les analyses portent aussi bien sur les résultats des mesures expérimentales que sur ceux de modélisations élastiques des structures. Elles se concentrent d'abord sur les **amplitudes maximales des déformations** longitudinales et sont centrées sur l'effet des variations de conditions de chargement sur les amplitudes maximales. Elles évaluent également l'effet des variations de température. La suite de l'analyse porte sur la répartition transversale des déformations maximales tant longitudinales que transversales. Ce chapitre s'achève par des propositions pour prendre en compte les variations des conditions de chargement dans les calculs de trafic équivalent.

Le chapitre 5, « *Signaux de déformations au bas de la couche de base* », étudie des signaux qui permettent de considérer la **variation des déformations** en un point donné durant le passage d'une charge de trafic. Les signaux analysés proviennent aussi bien de mesures que de modélisations élastiques linéaires des structures. Le chapitre est complété par des décompositions en série de Fourier visant à déterminer des fréquences utilisables pour les essais en laboratoire sur les matériaux bitumineux afin de se rapprocher au mieux des sollicitations réelles.

Le chapitre 6, « *Déformations horizontales au bas de la couche de roulement* », s'intéresse aux déformations horizontales à faible profondeur, soit à une profondeur de 3 cm qui correspond au bas de la couche de roulement. Les analyses portent sur des signaux de déformation obtenus par mesures et par modélisation. Ces analyses portent sur les mêmes structures que celles analysées au chapitre 4 et 5 et elles se

concentrent particulièrement sur **l'évolution des déformations juste au-dessous la charge**.

Le chapitre 7, « Modélisations viscoélastiques linéaires », introduit le **comportement viscoélastique des matériaux bitumineux** dans les modélisations des structures. Ces calculs sont effectués sur la base du modèle de Huet. Deux approches différentes sont abordées et les modélisations concernent des signaux de déformations durant le passage d'une charge. Les résultats des modélisations sont comparés avec des signaux obtenus par modélisations élastiques linéaires et avec des signaux expérimentaux. Les signaux étudiés concernent les déformations au bas de la couche de base et au bas de la couche de roulement pour la plus épaisse des deux structures de la Halle-fosse étudiées dans les chapitres précédents. Les analyses concernent également l'évolution des contraintes durant le passage de la charge.

Le chapitre 8, « Effets de la définition des conditions de charge », étudie l'effet des variations des conditions d'application des charges sur les contraintes et les déformations calculées à partir d'un comportement élastique. Il consiste à appliquer différentes hypothèses pour la **répartition des pressions de contact** exercée par le pneu sur la chaussée, ceci pour un même chargement en termes d'intensité de la charge et de pression de gonflage des pneus. Les effets sont étudiés à deux profondeurs, soit au bas de la couche de base et en surface. Le chapitre se termine par des considérations sur les variations des sollicitations agissant sur les matériaux bitumineux en fonction de la profondeur où ils se trouvent dans la chaussée.

Le chapitre 9 contient les **conclusions** de la thèse et ses principaux enseignements. Il propose également quelques pistes pour des recherches futures dans les domaines abordés par ce travail de thèse.

Tous les chapitres sont ordonnés selon une systématique similaire. Ils commencent par une présentation de leur contenu et de la démarche qui y est adoptée, et se terminent par des **enseignements** qui sont la synthèse de ce qui peut être dégagé des analyses réalisées. Cette méthode permet d'ajouter progressivement les différents éléments aboutissant aux conclusions générales exprimées dans le chapitre 9.

A l'exception du chapitre 8 qui traite d'un cas purement théorique, tous les chapitres consacrés aux déformations dans les couches bitumineuses font référence à un grand nombre de résultats expérimentaux qui sont, soit étudiés isolément, soit comparés avec des résultats provenant de modélisations. Leur acquisition a nécessité de développer une méthodologie expérimentale originale. Ces **données expérimentales** constituent une part importante de ce travail de thèse.

## 1.5 Terminologie et convention de signes

Afin de simplifier la compréhension de ce travail, il est nécessaire de définir clairement les termes principaux qui y seront utilisés. Ces termes concernent la nomenclature routière ainsi que les contraintes et les déformations. D'autre part, la convention de signes adoptée pour ce travail doit être définie de même que la définition des charges.

### 1.5.1 Terminologie

Concernant les couches des chaussées routières, la nomenclature provient de la terminologie internationale édictée par l'Association Mondiale de la Route (AIPCR) avec une adaptation au contexte helvétique (SN\_640302). Cette nomenclature n'est pas donnée ici dans son entier et seuls les termes utiles dans le cadre de ce travail sont donnés, avec leur traduction anglaise. Seules les couches constitutives d'une chaussée souple sont présentées ici (Figure 2).

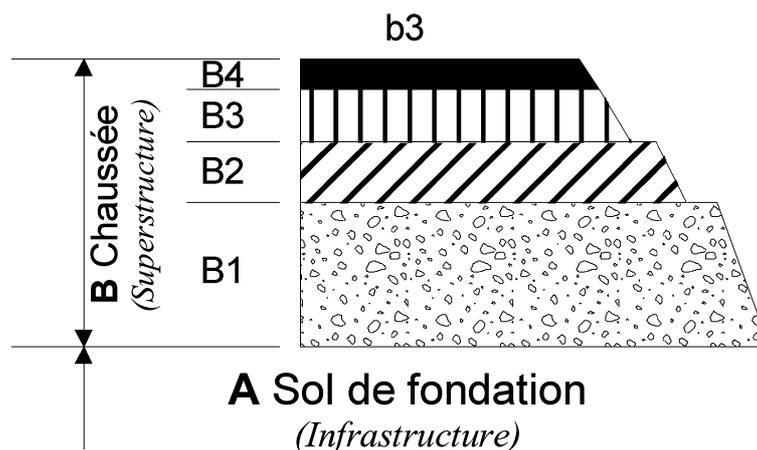


Figure 2 : Définition des couches d'une chaussée routière (SN\_640302)

**Surface de roulement (b3) :** Face supérieure de la couche de roulement et de la chaussée (road surface)

**Couche de roulement (B4) :** Couche supérieure de la couche de surface en contact avec les pneumatiques (wearing course)

**Couche de liaison (B3) :** Couche assurant la liaison entre la couche de roulement et la couche de base (base course)

**Couche de surface (B3+B4) :** Partie supérieure de la chaussée : couche de liaison et couche de roulement (Surfacing)

**Couche de base (B2) :** Couche située sous la couche de surface (road base)

**Couche de fondation (B1) :** Couche située sous la couche de base (subbase)

### 1.5.2 Contraintes, déformations et direction

Dans l'ensemble de ce travail, il est fréquemment fait appel à des contraintes et des déformations unidimensionnelles, ceci selon trois directions perpendiculaires. La terminologie suivante est adoptée pour ces trois composantes :

**Longitudinal :** direction horizontale correspondant au sens de circulation des charges de trafic

**Transversal :** direction horizontale perpendiculaire au sens de circulation des charges de trafic

**Vertical :** direction perpendiculaire à la surface de roulement

La terminologie suivante est utilisée pour les contraintes :

**Traction :** contraintes tendant à augmenter la longueur de l'élément sur lequel elles sont appliquées (en anglais, tensile stress)

**Compression :** contraintes tendant à diminuer la longueur de l'élément sur lequel elles sont appliquées (en anglais, compressive stress)

Les déformations sont désignées par les termes suivants :

**Extension :** déformations conduisant à un allongement de la matière (en anglais, tensile strain)

**Contraction :** déformations conduisant à un raccourcissement de la matière (en anglais, compressive strain)

Il sera souvent nécessaire de situer des éléments par rapport au point central de la charge. Le mot **milieu** sera utilisé pour positionner les points dans le sens **longitudinal** et le mot **centre** pour les positionner dans le sens **transversal**.

Sauf mention spécifique, les comportements **élastique linéaire** et **viscoélastique linéaire** ne seront généralement désignés que par **élastique**, respectivement **viscoélastique**, la linéarité étant toujours sous-entendue.

### 1.5.3 Convention de signes et d'intensité de charge

Le système de mesure utilisé pour les acquisitions de signaux de déformations a été calibré de façon à ce que les **extensions** correspondent à des **valeurs négatives** et les **contractions** à des **valeurs positives**. Afin de simplifier l'analyse des résultats, cette convention de signe est appliquée tout au long de ce travail, tant pour les résultats des mesures que pour ceux des calculs. Par similitude, cette convention s'applique également pour les contraintes où les **tractions** correspondent à des **valeurs négatives** et les **compressions** à des **valeurs positives**.<sup>5</sup>

L'**intensité de la charge** correspond toujours à la **charge de l'axe**. En d'autres termes et à titre d'exemple, une charge de 8 to correspond à deux charges de 4 to appliquées sur deux roues simples ou sur quatre roues jumelées.

---

<sup>5</sup> Cette convention correspond à celle utilisée en mécanique des sols

## 2. Dimensionnement et comportement des chaussées routières

### 2.1 Contenu

Ce chapitre présente tout d'abord les caractéristiques de différents types de méthodes de dimensionnement des chaussées routières<sup>6</sup>. Il se poursuit par une présentation de la problématique des charges de trafic et de la façon dont celles-ci sont considérées dans les diverses méthodes de dimensionnement. Ensuite, une description du comportement des matériaux bitumineux et des modèles existants pour la modélisation des chaussées routières est entreprise. Le chapitre se termine par une présentation de quelques modèles dits de performance qui permettent d'évaluer le comportement à long terme des chaussées à partir des résultats de modélisation des chaussées.

### 2.2 Les différents types de méthodes de dimensionnement

Ce chapitre contient la description et les principes de trois différents types de méthodes de dimensionnement :

- méthode empirique
- méthode mécanique empirique (ou analytique empirique)
- méthode incrémentale.

Si les deux premières méthodes sont largement utilisées actuellement, la troisième est en fait une proposition émise par un groupe d'experts européens sur les principes qui devraient être appliqués pour appliquer une méthode correspondant au mieux à l'évolution réelle des chaussées durant leur utilisation.

#### 2.2.1 Méthode empirique : exemple de la méthode suisse

Les méthodes empiriques de dimensionnement font appel exclusivement à des expériences comparant le comportement à long terme de diverses structures pour différentes conditions climatiques et de trafic. Des essais en vraie grandeur (test de structures réelles sous des conditions réalistes de trafic et de climat) apportent également de nombreuses informations nécessaires pour la mise en place des

---

<sup>6</sup> Le dimensionnement d'une chaussée routière consiste à déterminer les épaisseurs des différentes couches la constituant de façon à ce que la chaussée puisse répondre aux sollicitations qu'elle doit subir pendant une période définie, appelée durée de vie

règles empiriques de dimensionnement. La méthode de dimensionnement définie par les normes routières suisses éditées par la VSS<sup>7</sup> est un exemple représentatif des méthodes empiriques.

Cette méthode se base sur les résultats de l'AASHTO Road Test<sup>8</sup> (AASHTO 1986) dont les normes suisses sont issues. Durant cet essai, un grand nombre de structures routières de conceptions différentes ont été sollicitées par des véhicules présentant différentes configurations de charge (intensité et nombre d'axes par essieu). Une grande part de l'exploitation des résultats a été effectuée en terme d'équivalence, tant en ce qui concerne les charges de trafic par la notion de trafic équivalent, que les matériaux des chaussées, par la notion de valeurs de portance (a). Ces dernières, combinées avec les épaisseurs des couches, servent à quantifier globalement la capacité portante d'une chaussée par sa valeur SN (Structural Number).

Le dimensionnement des chaussées routières en Suisse est défini par la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN\_640324). Il nécessite que les deux données fondamentales définies précédemment (trafic et sol) soient ramenées dans des classes de trafic et des classes de portance du sol d'infrastructure.

Les classes de trafic pondéral  $T_i$  sont déterminées à partir du trafic pondéral équivalent calculé selon la norme « Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent » (SN\_640320). Les classes de trafic sont au nombre de 6, allant de T1 pour un trafic très léger à T6 pour un trafic extrêmement lourd. Des explications plus détaillées concernant le calcul du trafic équivalent sont donnés ultérieurement (cf. § 2.3).

Les classes de portance sont au nombre de 5, allant de S0 pour une portance très faible à S4 pour une portance très élevée. Les sols de classe S0 n'entrent pas dans le dimensionnement traditionnel des chaussées : ils doivent être améliorés ou faire l'objet d'une étude particulière. Les classes de portance sont définies dans la norme « Sols, essais - essai de plaque  $M_E$  et  $E_v$  » (SN\_670317) et la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN\_640324) à partir d'un des paramètres suivants :

- module  $M_{E1}$  (en  $\text{kN/m}^2$ ) selon (SN\_670317)
- module  $E_{v1}$  (en  $\text{kN/m}^2$ ) selon (SN\_670317)
- coefficient CBR (en %) selon (SN\_670316) et (SN\_670320)
- module de réaction de Westergaard (en  $\text{MN/m}^3$ ) selon (SN\_670319).

---

<sup>7</sup> Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Union suisse des professionnels de la route

<sup>8</sup> Essai en vraie grandeur sur piste d'essai réalisé aux Etats-Unis de 1958 à 1960, AASHTO : American Association of State Highway and Transportation Officials

Pour le dimensionnement des chaussées souples et semi-rigides, la norme fixe une valeur SN nécessaire pour des classes de trafic et de portance définies. La valeur SN effective d'une superstructure se calcule de la manière suivante :

$$SN = \sum_i^n a_i \cdot D_i \quad \text{Eq. 1}$$

avec :

- $a_i$  = valeur de la portance équivalente d'un cm d'un matériau i par rapport à la valeur d'une grave ronde, prise comme matériaux de référence (-)
- $D_i$  = épaisseur de la couche du matériau i dans la superstructure (cm)

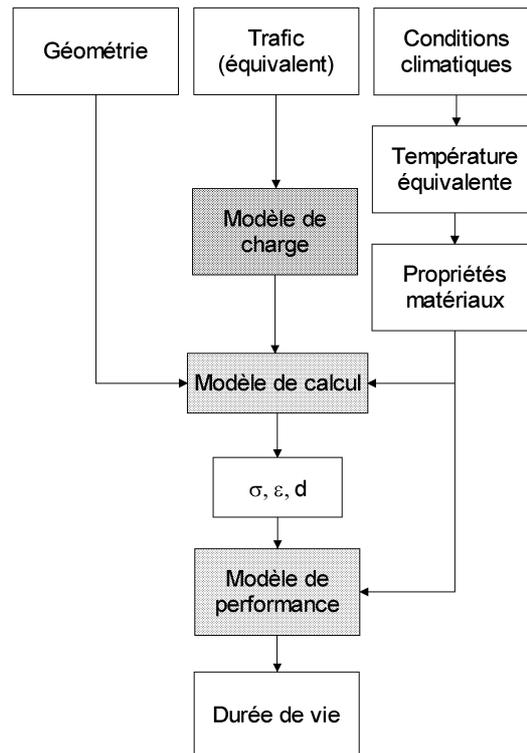
Un catalogue des structures a été établi sur ce principe et est proposé dans la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN\_640324).

### 2.2.2 Méthode mécanique empirique

Ces méthodes font partiellement appel à une approche analytique qui est complétée par des données empiriques. Décrites dans le rapport final de l'action COST 333 intitulée « Development of New Bituminous Pavement Design Method » (COST\_333 1999) ou dans « Pavement Analysis and Design » (Huang 1993), elles procèdent généralement en deux étapes :

- détermination des sollicitations dans une superstructure sous l'effet d'une charge définie de trafic
- mise en relation de ces sollicitations avec certaines dégradations des chaussées.

En plus du modèle pour la charge de référence, cette décomposition permet de distinguer les deux types de modèles de comportement des matériaux auxquels elles ont généralement recours : des modèles de calcul (ou de réponses) et des modèles dits de performances (Figure 3).



**Figure 3 : Principe de fonctionnement des méthodes de dimensionnement mécaniques empiriques (COST\_333 1999)**

Le modèle de charge est au centre de ce travail. Il consiste à donner une image aussi réaliste de la charge induite par une roue dans les chaussées routière. Ce sujet est abordé dans le détail par la suite (cf. § 2.3).

Les modèles de calcul permettent d'obtenir la réponse immédiate d'une chaussée, en termes de contraintes et déformations, sous l'effet d'une charge et dans des conditions bien définies. Ils nécessitent la définition de paramètres pour décrire la structure (géométrie et lois de comportement) et les conditions de chargement (intensité de la charge, pression de contact, etc.). Ils fournissent des résultats théoriques correspondant aux hypothèses retenues pour la modélisation. Dans la plupart des cas, ces modèles se basent sur un comportement élastique des matériaux, mais rien ne s'oppose à l'utilisation d'autres types comportement.

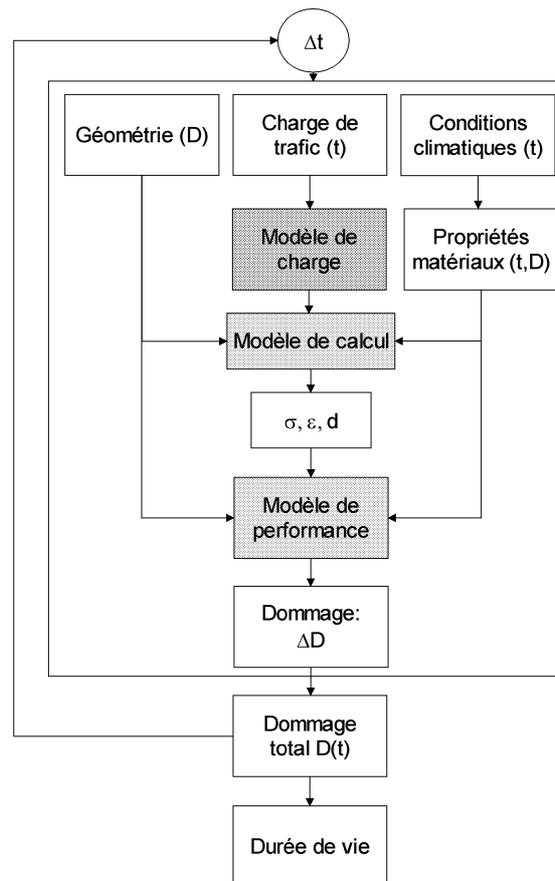
Les modèles de performance relient les états de sollicitations issus des modèles de calcul avec les dégradations des chaussées. Ils sont généralement obtenus en combinant des résultats d'essais en laboratoire avec l'observation du comportement réel de chaussées. Ils permettent d'exprimer le nombre de cycles d'une sollicitation donnée qu'une chaussée est à même de supporter avant de présenter une dégradation jugée inadmissible.

Ces deux types de modèles dépendent d'un même et unique phénomène : le comportement des matériaux bitumineux et ne sont en principe pas indépendants. L'existence d'une séparation de ceux-ci dans les méthodes de dimensionnement provient généralement de la prise en compte de données empiriques dans les modèles de performance.

Etant donné que les normes routières suisses ne proposent pas de méthodes mécaniques empiriques, les hypothèses retenues pour cette étude seront tirées de la méthode française de dimensionnement des chaussées décrite dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » (SETRA-LCPC 1994).

### 2.2.3 Méthode incrémentale

Au niveau européen, un projet de fonctionnement pour une méthode incrémentale a été proposé (Figure 4).



**Figure 4 :** Schéma de fonctionnement pour une méthode incrémentale de dimensionnement (COST\_333 1999)

Cette méthode envisage d'étudier l'évolution d'une chaussée dans le temps (t) en cumulant l'effet, exprimé en terme de dommage (D), de chacune des sollicitations induites par les charges de trafic. Une telle méthode doit permettre de limiter, voir de supprimer, l'importance des données empiriques dans le domaine du dimensionnement des chaussées routières. Cette démarche prévoit de tenir compte de l'effet d'une sollicitation non seulement sur l'état de la chaussée (géométrie), mais également sur l'évolution des propriétés des matériaux en fonction du dommage subi. Elle doit également intégrer l'effet des variations de température et les données réelles de trafic sans avoir recours à la notion de trafic équivalent. La mise en place d'une telle méthode s'avère cependant très complexe à cause des nombreuses interactions entre les phénomènes pris en compte. Ainsi, pour chaque nouvelle charge de trafic agissant à l'instant  $t_i$ , il s'agit de déterminer un supplément de

dommage en tenant compte non seulement de l'influence des conditions climatiques sur les propriétés des matériaux à cet instant  $t_i$ , mais également des dommages déjà subis par la structure.

L'intérêt d'une telle méthode réside dans la possibilité de suivre l'évolution d'une chaussée au cours du temps : outre une estimation de sa durée de vie, il serait possible d'évaluer son état structurel à tout instant. Cette évaluation permettrait d'introduire la notion de cycle de vie d'une structure routière pour des analyses économiques prenant en compte les investissements, les coûts d'exploitation et les coûts d'entretien.

Toutefois, une telle démarche nécessite un nombre très important de données (trafic, climat, lien entre les deux, etc.) qui sont difficilement disponibles. D'autre part, les études sur l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux routiers en fonction de l'historique de leurs sollicitations ne sont pas encore à même de fournir des lois de comportement utilisables, rendant actuellement impossible la mise en place d'une telle méthode.

Cette démarche nécessite donc encore de nombreux efforts de recherches. Des propositions récentes ont montré qu'il est possible d'introduire, dans la cadre de méthodes mécaniques empiriques, des notions de variabilités des facteurs intervenant dans le dimensionnement des chaussées. Ces travaux proposent que les dégradations mécaniques des matériaux puissent également être incluses dans cette notion de variabilité (Kim et Buch 2003).

### 2.3 Problématique des charges de trafic

Les sollicitations mécaniques prises en compte pour le dimensionnement des chaussées proviennent des charges de trafic. Notons qu'elles peuvent avoir d'autres origines, en rapport avec les conditions climatiques ou hydrogéologiques, mais ces aspects ne sont pas abordés dans le cadre du présent travail. Le trafic est décomposé en deux catégories : trafic léger ou trafic lourd. La distinction se fait en général à partir de considérations légales ou techniques qui conduisent à une limite de la charge totale des véhicules. A titre d'exemple, le trafic lourd pris en compte en Suisse comprend l'ensemble des véhicules dont le poids total est supérieur à 3,5 to et est donc essentiellement composé de camions, dont les silhouettes (nombre et type d'essieux) sont extrêmement variables, et de bus. En raison de l'effet quasi insignifiant du trafic léger, seul le trafic lourd est pris en compte pour le dimensionnement des structures routières<sup>9</sup>.

La plupart des méthodes de dimensionnement, y compris les méthodes mécaniques empiriques, utilisent la notion de trafic équivalent qui permet d'exprimer l'effet d'une multitude de charges différentes à partir d'une charge de référence. Une excellente description de la notion de facteur d'équivalence est donnée au premier chapitre de « Handbook of Vehicle-Road Interaction » (Cebon 1999).

---

<sup>9</sup> Comme ordre de grandeur, on admet que le passage d'un seul camion correspond aux passages d'environ 10'000 voitures

### 2.3.1 Le trafic pour le dimensionnement empirique : exemple des normes suisses

L'essai AASHTO a permis d'exprimer l'effet d'une charge d'essieu donnée en fonction d'une charge de référence et d'établir de la sorte des coefficients d'équivalences entre divers chargements. Cette démarche a conduit à la définition de la notion d'« essieux équivalents » (en anglais ESAL : Equivalent Standard Axle Load) largement utilisée dans le domaine de la construction routière. Cette notion est à la base des classes de trafic définies dans les normes suisses. Les coefficients d'équivalence correspondent au rapport entre le nombre de charges d'intensité  $P_i$  et le nombre de charges de degré  $P_{\text{réf}}$  aboutissant une dégradation similaire d'une chaussée. La charge de référence pour l'essai AASHTO était de 18'000 Lb (8,16 to) et c'est encore elle qui est utilisée en Suisse.

Dans sa procédure de base, la norme « Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent » (SN\_640320) donne les coefficients d'équivalence permettant d'exprimer le trafic en nombre d'essieux équivalents. Ces coefficients tiennent compte du type de chaussée (souple ou rigide) et du type d'essieu (simple, tandem ou tridem) des véhicules lourds. Cette procédure nécessite des pesages détaillés des véhicules, fournissant la charge et le type de chacun des essieux. Si ces données ne sont pas disponibles, la norme propose trois méthodes d'estimation basées sur des analyses de trafics enregistrés sur des autoroutes suisses par des stations de pesage en marche, stations WIM<sup>10</sup> (COST\_323 1998). Ces méthodes sont applicables à partir de données de trafic plus générales, telles que des relevés visuels, des comptages ou des statistiques, et pour différents types de routes.

Les normes suisses ne prévoient aucune autre analyse du trafic que celle aboutissant au trafic équivalent. Cette méthode implique une simplification considérable de la prise en compte des charges de trafic puisqu'elle fait correspondre une combinaison de charges à une combinaison de processus de dégradation des chaussées. Pour les tables de coefficients d'équivalence issues de l'essai AASHTO, les analyses n'ont pas porté sur l'influence des charges vis-à-vis de divers modes de dégradations des chaussées, mais en se basant essentiellement sur un indice global d'état d'une chaussée, le PSI (Present Serviceability Index).

---

<sup>10</sup> Weigh-in-motion, en français pesage en marche

Selon cette méthode, les dégradations des chaussées routières dépendent uniquement de l'intensité des charges par essieu, du type d'essieu et du type de structure. Elle ne permet donc pas de prendre en compte des facteurs influençant de façon déterminante les dégradations des chaussées, parmi lesquels :

- l'ordre d'application des charges : une charge isolée de forte intensité peut provoquer une brusque dégradation de la chaussée la rendant beaucoup plus sensible aux charges suivantes, mêmes si ces dernières sont peu importantes
- la température lors de l'application des charges : les phénomènes de fatigue et d'orniérage sont extrêmement sensibles à ce paramètre
- la vitesse des véhicules qui influence considérablement le développement des déformations permanentes dans les matériaux bitumineux
- la variation des types de pneumatique (pneus jumelés ou simples) et de leur pression de gonflage.

Des méthodes de calcul pour le trafic équivalent ont été développées en s'inspirant directement l'essai AASHTO ou d'autres résultats d'essais en vraie grandeur ou encore à partir de calculs analytiques. Certaines méthodes permettent d'introduire quelques-uns des paramètres mentionnés ci-dessus.

### 2.3.2 Lois de puissance pour le trafic équivalent

Des études des résultats de l'essai AASHTO ont montré qu'une bonne approximation des coefficients d'équivalence peut être obtenue par la formule suivante :

$$K_i = \left( \frac{P_i}{P_{\text{réf}}} \right)^\alpha \quad \text{Eq. 2}$$

avec :

- $K_i$  = coefficients d'équivalence (nombre d'essieux standards équivalents pour une charge  $P_i$ )
- $P_i$  = charge d'un essieu  $i$
- $P_{\text{réf}}$  = charge de l'essieu standard de référence
- $\alpha$  = coefficient de charge ou « puissance »

#### 2.3.2.1 Essieu de référence

Ce genre de formule est largement utilisé pour obtenir des équivalences de charge, mais l'essieu de référence varie avec les pays : la Suisse utilise un essieu de 8,16 to (venant de l'essai AASHTO), la France un essieu de 13 to (limite de charge légale des essieux simples moteur), les Pays-Bas 10 to. La tendance générale actuelle va vers l'utilisation d'un essieu de 11,5 to qui correspond à la limite légale de charge d'un essieu simple moteur admise par l'Union Européenne. L'essieu de référence choisi modifie évidemment le nombre d'essieux équivalents obtenus pour un trafic donné et il est donc nécessaire que la méthode de dimensionnement soit en accord avec la charge de référence utilisée.

### 2.3.2.2 Coefficient de charge (puissance)

Le coefficient de charge  $\alpha$  dépend du type de structure étudiée : pour les chaussées souples, une valeur de 4 donne de bons résultats alors qu'il faut aller jusqu'à des valeurs de 12 pour des structures rigides. Les nombreuses études sur le sujet proposent diverses valeurs pour la puissance, comprises entre 2 et 6 (chaussées souples) et entre 8 et 33 (chaussées composites ou rigides) (Cebon 1999). De façon générale, on observe que la puissance augmente avec la rigidité de la chaussée.

A partir de données expérimentales, il est possible d'évaluer la puissance en déterminant la puissance à appliquer au rapport de deux charges pour obtenir le rapport entre le nombre de cycles nécessaires pour aboutir à un même degré de dégradation :

$$\left(\frac{P_x}{P_y}\right)^\alpha = \frac{N_y}{N_x} \quad \text{Eq. 3}$$

avec :

- $P_x$  = essieu chargé à x tonnes
- $P_y$  = essieu chargé à y tonnes
- $N_x$  = nombre essieux  $P_x$  pour un état de dégradation défini
- $N_y$  = nombre essieux  $P_y$  pour un état de dégradation défini
- $\alpha$  = coefficient de charge (à déterminer)

Un exemple, à partir de données issues de l'essai en vraie grandeur FORCE (OCDE 1991b) et basé sur l'analyse du degré de fissuration, est présenté sur les figures suivantes. La Figure 5 illustre les puissances obtenues pour différents pourcentages de fissuration et pour une charge d'essieu passant de 10 à 11,5 to.

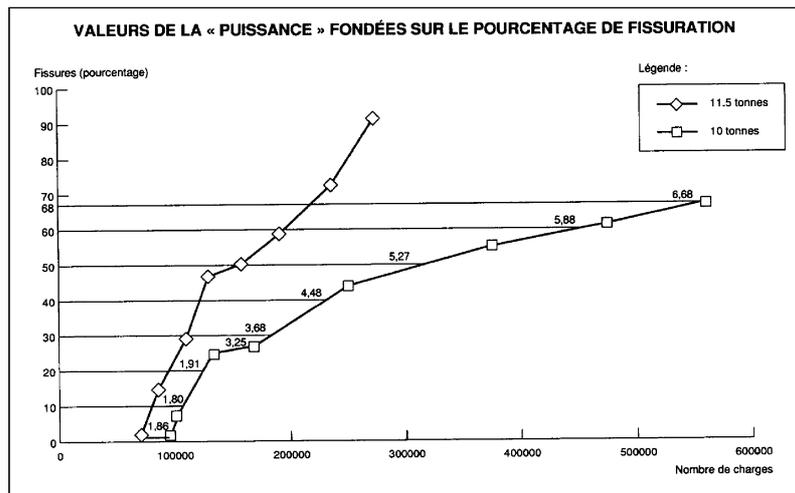


Figure 5 : Analyse des résultats de la fissuration lors du projet FORCE (OCDE 1991b)

La Figure 6 montre que la puissance augmente avec le taux de fissuration retenu pour l'analyse, ce qui signifie que plus la structure est endommagée, plus l'effet des fortes charges est important.

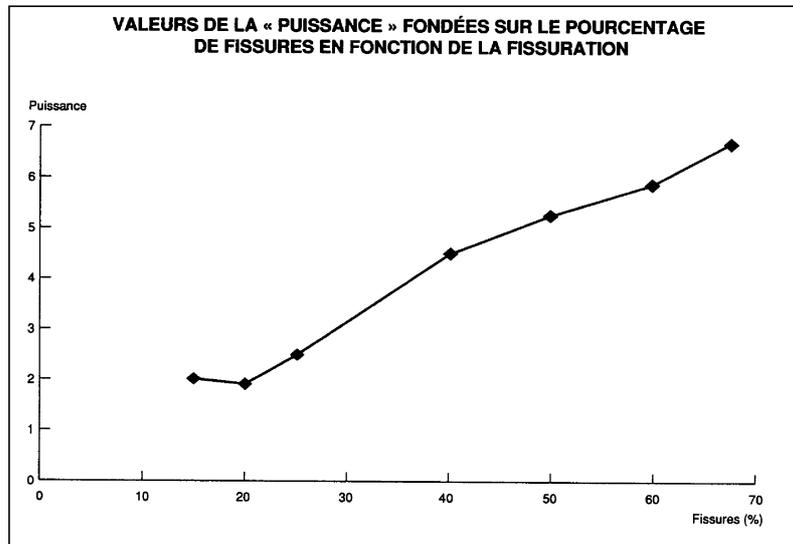


Figure 6 : "Puissance" obtenue en fonction du degré de fissuration de référence retenu, projet FORCE (OCDE 1991b)

### 2.3.2.3 Configuration des essieux

La simple loi de puissance (Eq. 2, page 16) ne tient pas compte de la configuration du nombre d'axes des essieux (simple, tandem, tridem). Il est connu, notamment à partir de l'essai AASHTO, que l'effet d'un essieu formé de plusieurs axes n'est pas égal à la somme des axes isolés. Pour tenir compte de ce phénomène, on applique des coefficients de correction à la loi de la puissance. Ces coefficients peuvent être appliqués directement sur le rapport des charges déjà élevé à la puissance ou sur le rapport des charges avant de l'élever à la puissance. La méthode française pour le dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC 1994) utilise la formule suivante :

$$A_i = K \cdot \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \quad \text{Eq. 4}$$

avec (selon la notation française) :

- $A_i$  = agressivité d'un essieu (selon la définition française)
- $P_i$  = charge d'un axe d'un essieu  $i$
- $P_0$  = charge de l'essieu standard de référence (pour la France,  $P_0 = 13\text{to}$ )
- $K$  = coefficient d'essieux
- $\alpha$  = coefficient de charge, souvent appelé « puissance »

Les valeurs de puissance utilisées sont de  $\alpha = 5$  pour les structures souples et bitumineuses et de  $\alpha = 12$  pour les structures semi-rigides ou en béton<sup>11</sup>.

Les coefficients K existent pour trois catégories d'essieux et dépendent des structures :

- Essieu simple : 1 (structure souple ou rigide)
- Essieu tandem : entre 0,75 (souple) et 12 (rigide)
- Essieu tridem : entre 1,1 (souple) et 113 (rigide)

Les valeurs de ces coefficients ont été déterminées par calculs pour obtenir des équivalences en regard des critères de dimensionnement retenus dans la méthode française. Par ailleurs, et comme pour la méthode de base des normes suisses, cette procédure nécessite de disposer d'une décomposition fine des données de trafic, puisque les seules charges par essieu ne sont pas suffisantes, mais qu'il faut également connaître la répartition entre les divers types d'essieu.

#### 2.3.2.4 Technologie des véhicules

La technologie des véhicules a des conséquences non négligeables sur la dégradation des chaussées : l'utilisation de pneus simples en lieu et place des jumelages ou les nouveaux types de suspension ont une influence sur le calcul des charges équivalentes de trafic. Sur la base de travaux de Eisenmann, l'OCDE a proposé une formule définissant le dommage avec des coefficients tenant compte des facteurs relatifs à la technologie des véhicules et à leur configuration (Eisenmann 1975) (OCDE 1983) :

$$D_i = \left( k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{P_i}{P_{ref}} \right)^\alpha \quad \text{Eq. 5}$$

avec (notation selon l'OCDE) :

$D_i$	=	dommage causé par un essieu (selon la définition OCDE)
$P_i$	=	charge totale d'un essieu i
$P_{ref}$	=	charge de l'essieu standard
$k_1$	=	coefficient pour le type d'essieux
$k_2$	=	coefficient pour le type de pneu
$k_3$	=	coefficient pour le type de suspension
$\alpha$	=	coefficient de charge, également appelé « puissance » les matériaux bitumineux

<sup>11</sup> A noter que ces puissances de 5 et 12 correspondent aux pentes de fatigue données dans la méthode française de dimensionnement pour les matériaux bitumineux, respectivement pour les matériaux aux liants hydrauliques (SETRA-LCPC 1994)

Les facteurs intervenant dans cette formule dépendent du type de structure pour lesquelles le trafic doit être calculé. Pour des structures souples, les valeurs suivantes sont proposées, définies pour des écartements des axes des essieux tandem et tridem compris entre 1,35 et 1,50 m (Tableau 1) :

**Tableau 1 : Facteurs correcteurs pour le calcul du trafic équivalent**

Facteurs	Caractéristiques	Valeurs
$\alpha$	Puissance	4
$k_1$	Essieu simple	1.0
	Essieu tandem	0.6
	Essieu tridem	0.45
$k_2$	Roues jumelées standards	1.0
	Roues simples standards	1.3
	Roues simples super-larges	1.2
$k_3$	Suspensions traditionnelles	1.0
	Suspensions à air	0.95

### 2.3.3 Le trafic dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement

Ces méthodes utilisent fréquemment la notion de trafic équivalent pour un essieu de référence donné. Cet essieu de référence est modélisé et sert de charge pour le calcul des contraintes et des déformations dans la superstructure. Ces grandeurs permettent de déterminer le nombre d'essieux de référence que la structure peut supporter. Ce résultat est comparé au trafic équivalent prévu pour la structure à dimensionner.

Lorsque le dimensionnement mécanique empirique se base sur un comportement élastique des matériaux, la charge servant au calcul des sollicitations est définie par trois paramètres, lesquels sont liés entre eux, la définition la valeur de deux d'entre eux impliquant la valeur du troisième :

- intensité totale
- pression de contact
- surface de contact

Les modèles multicouches basés sur la théorie de Burmister (cf. § 2.5.1) impliquent l'utilisation d'une surface circulaire chargée avec une pression constante, les surfaces étant définies par l'intermédiaire de leur rayon. Grâce à la linéarité du comportement des matériaux, il est possible de modéliser des roues jumelées, voir des essieux tandem ou tridem, en répartissant la charge sur plusieurs surfaces et en sommant leurs contributions. Toujours en vertu de la linéarité des matériaux, il est possible de définir des surfaces de chargement et des répartitions des pressions verticales plus complexes (Mante, Molenaar et al. 1995). Cette possibilité est à ce jour peu utilisée dans le cadre du dimensionnement des chaussées, malgré

l'existence de logiciel permettant cette procédure sans recourir à de nombreux calculs séparés (Balay 1998).

#### 2.3.4 Conditions réelles d'application des charges de trafic

Concrètement, les charges de trafic sont appliquées sur les chaussées par les pneumatiques qui exercent des efforts sur la surface de contact. La répartition des pressions de contact entre la chaussée et les pneumatiques dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels :

- intensité de la charge
- pression de gonflage du pneumatique
- type de pneumatique (profil, simple ou jumelés, marques, etc.)
- vitesse du véhicule

Les facteurs mentionnés ci-dessus ont des conséquences sur les charges de trafic, en particulier sur la forme des empreintes, sur la répartition et l'intensité des pressions de contact et sur l'introduction d'efforts horizontaux. Il est important que les modélisations reproduisent au mieux les conséquences de ces facteurs.

##### 2.3.4.1 Forme des empreintes

Huhtala a montré par des mesures que pour des très faibles charges les empreintes peuvent être considérées comme circulaires. Toutefois, ces conditions de chargement ne sont pas très réalistes. Par contre, une augmentation de la charge avec une pression constante conduit à un allongement des empreintes alors que leur largeur demeure quasi constante, aboutissant à une forme rectangulaire. Des analyses de signaux de déformations sur des structures de faible épaisseur lui ont permis de mettre en évidence cet allongement des empreintes (Huhtala, Pihlajmäki et al. 1997).

Les nombreuses mesures effectuées avec le système VRSPTA<sup>12</sup> développé en Afrique du Sud (De Beer, Fisher et al. 1997), ont confirmé que les empreintes ont une largeur quasiment constante, égale à celle de la bande de roulement du pneumatique, qui ne dépend ni de la charge ni de la pression de gonflage. Ce phénomène peut être expliqué par la grande rigidité latérale des pneumatiques qui s'oppose à leur déformation dans cette direction (Blab 1999). Concernant la longueur des empreintes, Blab montre qu'elle dépend de la rigidité longitudinale des pneumatiques et par conséquent du type de pneumatique. Les mesures des empreintes ont montré que pour certains pneus la longueur est supérieure à la largeur, avec des ratios largeur/longueur compris entre 0,55 et 0,65. Ceci conduit à conclure que les surfaces de charge pour ces types de pneus doivent être rectangulaires. En revanche, pour les pneus larges (en anglais « wide base »), le ratio largeur/longueur varie assez fortement en fonction de l'intensité de la charge et de la pression de gonflage. Toutefois, il est noté que si les pneumatiques sont

---

<sup>12</sup> Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array ; ce système permet la mesure des pressions de contact réelles (verticales, longitudinales et transversales) sous les pneumatiques

chargés et gonflés selon les recommandations des fournisseurs, le ratio est en moyenne de 1, ce qui signifie que, dans ces conditions, les empreintes ont une forme carrée.

Compte tenu des constats cités ci-dessus et en admettant que la pression de contact demeure constante, une augmentation de la charge se traduit uniquement par un accroissement de la longueur de l'empreinte, théoriquement proportionnel à celui de la charge. Des mesures d'empreintes ont été effectuées sur les pneus simples utilisés lors d'un essai en vraie grandeur à l'EPFL (cf. § 3.2.1).

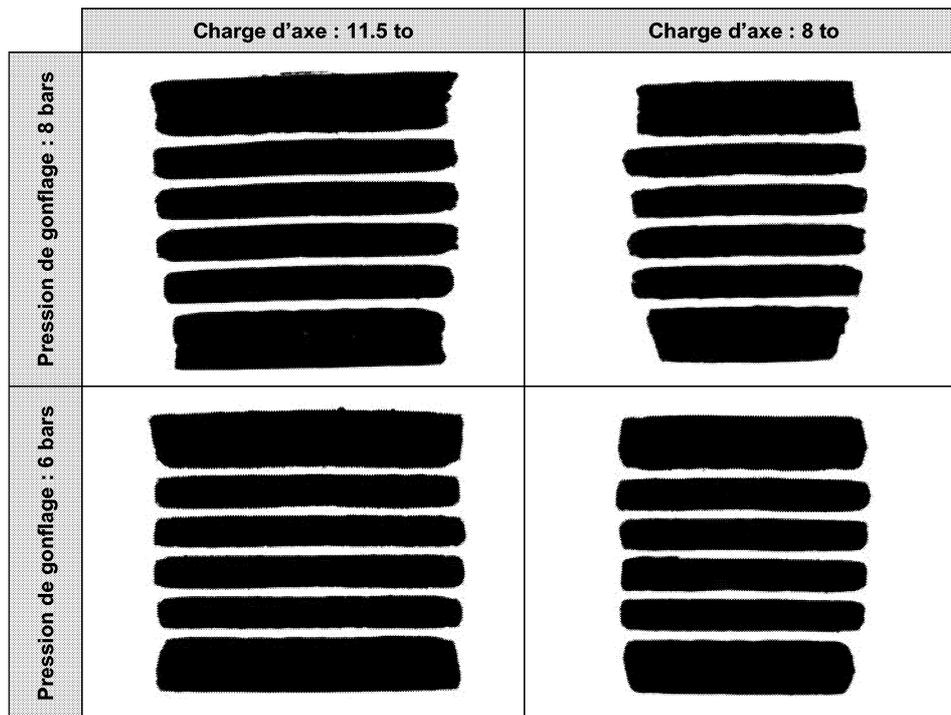


Figure 7 : Empreintes de contact des pneus simples utilisés dans le cadre des expériences de la Halle-fosse pour quatre cas de charge

Ces empreintes confirment les observations mentionnées précédemment, à savoir des empreintes s'allongeant sous l'effet d'une augmentation de la charge. Dans les faits, l'allongement des empreintes n'est pas directement proportionnel à l'augmentation de la charge, ce qui s'explique probablement par la rigidité non négligeable du pneu dans la direction longitudinale. D'autre part, on observe que pour la charge de 8 to, les empreintes sont plus larges que longues, alors qu'elles sont pratiquement carrées pour la charge de 11,5 to avec 6 bars.

Si une augmentation de charge à pression constante se traduit essentiellement par un allongement des surfaces réelles de contact, il n'en est pas de même pour les modélisations utilisant une surface circulaire. Dans ce cas, on observe une augmentation du rayon de la surface qui se traduit par une augmentation des dimensions longitudinale et transversale.

### 2.3.4.2 Intensité de la pression verticale moyenne

L'hypothèse la plus souvent retenue pour la pression verticale de contact consiste à l'admettre comme égale à la pression de gonflage des pneus. Elle est alors appliquée sur une surface circulaire de façon à ce que son intégrale soit égale à la charge verticale totale. Une autre méthode, nécessitant toutefois de disposer d'empreintes de pneus, consiste à diviser la charge totale par la surface réelle de contact et de déterminer ainsi la pression moyenne qui est appliquée sur une surface circulaire.

Dans son analyse des mesures de pressions de contact effectuées avec le VRSPTA, Blab note que la pression moyenne réelle de contact dépend essentiellement de trois paramètres qui sont le type de pneu, la charge appliquée et la pression de gonflage (Blab 1999). Il propose des formules intégrant ces trois paramètres pour déterminer la valeur de la pression moyenne verticale<sup>13</sup>.

Blab a étudié le ratio exprimant le rapport entre la pression moyenne de contact sur la surface et la pression de gonflage des pneus. Sur l'ensemble des mesures, ce ratio est généralement inférieur à 1, ce qui signifie que la pression verticale de contact moyenne réelle est inférieure à celle de gonflage. Des ratios supérieurs à 1 ont été obtenus, mais uniquement pour des pneus faiblement gonflés. Pour l'ensemble des pneus, le ratio tend à diminuer lorsque la pression de gonflage des pneus augmente.

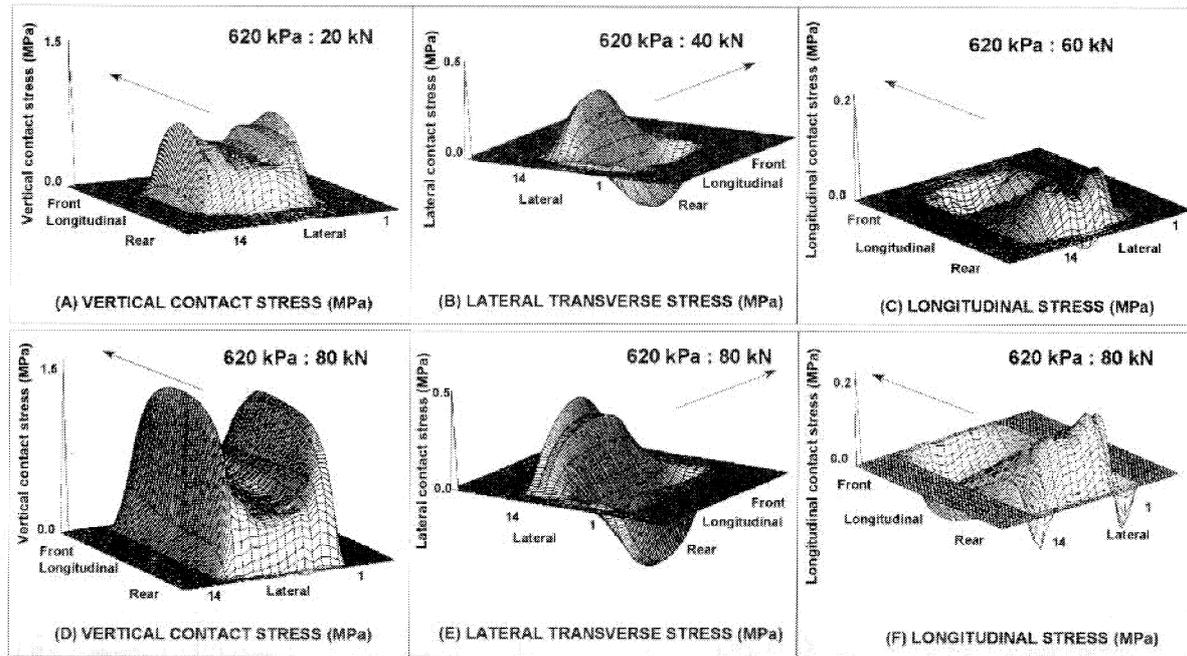
### 2.3.4.3 Répartition de la pression verticale de contact sur la surface de charge

La répartition des pressions de contact dépend principalement du type de pneumatique (technologie et marque), de la charge appliquée et de la pression de gonflage. En 1989, Yap signale que des pneus sous-gonflés et surchargés entraînent des augmentations des pressions dans les bords alors qu'un sur-gonflage tend à concentrer les pressions maximales au centre (Yap 1989).

Des informations précieuses, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, ont été obtenues sur la répartition réelle des pressions de contact des pneumatiques grâce aux mesures du système de mesure VRSPTA développé par De Beer (Figure 8). Ces mesures ont confirmé l'essentiel des observations faites par Yap : des pneus surchargés et sous-gonflés induisent des surpressions verticales dans les bords, alors que le sur-gonflage aboutit à une répartition relativement uniforme de la pression, quand bien même les valeurs maximales sont mesurées au centre des pneumatiques.

---

<sup>13</sup> A noter que les surfaces de contact utilisées pour le calcul de la pression moyenne verticale sont des surfaces brutes, ce qui signifie qu'elles incluent les vides entre les profils des pneumatiques



**Figure 8 :** Mesures de la répartition des pressions de contact d'un pneu pour différentes conditions de charge (De Beer, Fisher et al. 1997)

D'autres mesures effectuées avec le VRSPATA ont confirmé que ces répartitions dépendent des dimensions et de la conception des pneumatiques mais aussi de la marque (Mante, Molenaar et al. 1995), (Blab 1999).

Les analyses effectuées par De Beer et Blab proposent de différencier la valeur de la pression verticale sur les bords des pneumatiques  $q_e$  (e pour edge) et celle sur le centre  $q_c$  (c pour centre). Les mesures montrent que, pour des pneus simples, la zone centrale correspond à environ 60% de la largeur alors que les 40% restant se divisent entre les deux bords<sup>14</sup>. La pression  $q_e$  sur les bords des pneumatiques dépend essentiellement de la charge alors que la pression sur le centre  $q_c$  dépend aussi de la pression de gonflage. Par ailleurs, Blab propose d'utiliser un facteur  $\alpha$  de distribution de la charge. Ce facteur exprime le ratio entre la force totale exercée sur le centre du pneu et celle appliquée sur les bords. Il propose aussi des formules pour le calcul de  $\alpha$ . Sur la base d'un grand nombre de mesures effectuées avec le système VRSPATA, Blab a également mis au point un logiciel permettant de définir des charges utilisables dans le cadre de programme d'éléments finis (Blab et Tarvey 2000).

Ces résultats montrent qu'il est possible de déterminer des répartitions non uniformes théoriques de la pression verticale satisfaisantes pour des modélisations visant à évaluer leur effet.

<sup>14</sup> Ces proportions sont en accord avec le profil de la plupart des pneus simples : sur les empreintes des pneus de Halle-fosse (Figure 7, page 22), la largeur des deux bandes extérieures correspond environ au 40 % de la largeur totale

#### 2.3.4.4 Efforts horizontaux

Yap a mis en évidence l'existence d'efforts transversaux et longitudinaux sur la surface de contact (Yap 1989), ce que les mesures du VRSPTA ont confirmé (cf. Figure 8, page 24). Il est possible d'obtenir dans la littérature des ratios entre les valeurs maximales mesurées pour les efforts verticaux, transversaux et longitudinaux. A titre d'exemple et sur la base de mesures effectuées avec le VRSPTA, les valeurs de 10/3.6/1.4 (De Beer, Fisher et al. 1997) et de 10/3/1 (Mante, Molenaar et al. 1995) ont été proposées. L'ensemble des mesures actuellement disponibles ayant été effectuées sur des pneus montés sur des essieux non-moteurs, la résultante des charges horizontales mesurées est toujours nulle.

Toujours à partir de mesures du VRSPTA, Groenendijk propose de décomposer les efforts transversaux en deux contributions ayant des origines différentes (Groenendijk 1998). La première est formée de contraintes de cisaillement localisées dans les zones de contact du pneumatique et dirigées vers l'extérieur de ces zones (schéma en zigzag selon la Figure 9).

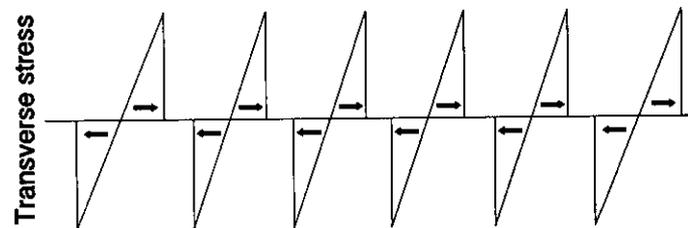


Figure 9 : Répartition des efforts transversaux dus à la nature du caoutchouc des pneumatiques (Groenendijk 1998)

Elles sont dues à la nature du caoutchouc des pneumatiques qui subit une importante compression verticale et tend à vouloir s'étendre latéralement en raison de la valeur élevée de son coefficient de Poisson, créant ainsi des forces de friction à l'interface entre le pneumatique et le revêtement. L'effet de ces efforts, qui agissent très localement dans les zones immédiates de contact entre la chaussée et les pneumatiques, n'est pas abordé dans le cadre de ce travail.

La seconde contribution pour les efforts transversaux se compose de contraintes de cisaillement réparties sur l'ensemble de la surface de contact et qui sont dirigées soit vers le centre soit vers l'extérieur, ceci en fonction de la relation entre la charge et la pression de gonflage des pneumatiques (Figure 10).

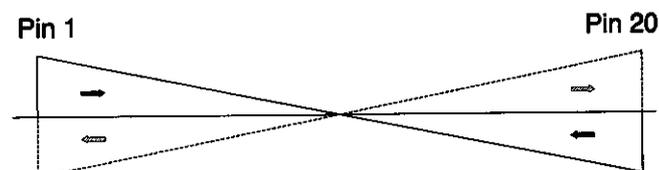


Figure 10 : Répartition des efforts transversaux pour des pneus dont la pression de gonflage n'est pas adaptée à la charge (Groenendijk 1998)

Ces contraintes apparaissent lorsqu'il y a une différence significative entre les pressions de gonflage et de contact, soit dans le cas de pneu sous-gonflé et surchargé soit dans le cas contraire, à savoir un pneu sur-gonflé et sous-charge. Elles s'orientent vers le centre dans le premier cas et vers l'extérieur dans le second.

Ces contraintes sont dues aux bords rigides des pneus qui influencent non seulement la répartition des pressions verticales (cf. § 2.3.4.2 et 2.3.4.3), mais induisent également ces efforts transversaux en poussant ou en tirant sur les bords des pneus.

Quant aux efforts longitudinaux, mesurés avec le VRSPTA uniquement sur des essieux non-moteurs, ils sont les moins importants et trouvent certainement leur origine, comme les premiers efforts transversaux décrits, dans la nature de la gomme des pneumatiques. Pour les pneus des essieux moteurs, il est probable que des composantes longitudinales plus importantes existent et qu'elles puissent avoir des conséquences sur les sollicitations à faible profondeur. Toutefois, en raison du manque de données existant concernant ces efforts liés à la motricité, cette problématique n'est pas abordée dans le cadre de cette étude.

#### 2.3.4.5 Type de roues

L'effet du type de roues concerne généralement les différences pouvant être observées entre des roues simples ou des roues jumelées. Si on ne fait généralement pas de différences entre les divers types de roues jumelées<sup>15</sup>, il existe un grand nombre de pneus différents pour les roues simples. Les largeurs des bandes de roulement peuvent quasiment aller du simple au double.

Ces pneus simples sont généralement considérés comme plus dommageable pour les chaussées routières en raison de l'augmentation des pressions de contact qu'ils engendrent. Cette augmentation est le résultat d'une augmentation globale des pressions de gonflement utilisées pour ce genre de pneus et de la réduction de leur surface de contact. En raison de leur largeur totale supérieure, les empreintes des roues jumelées sont généralement plus courtes que celles des roues simples.

Concernant les types de roues, il convient de mentionner l'existence d'une revue bibliographique des différences observées entre l'utilisation de roues simples ou jumelées (Groenendijk 1999). Les résultats qui y sont présentés confirment la plus grande agressivité des pneus simples.

Il a été signalé que le type de pneu peut être pris en compte dans certaines méthodes de calcul du trafic équivalent (cf. Eq. 5, page 19). Il peut également être modélisé sans grande difficulté dans le cadre de calculs linéaires en appliquant deux surfaces de chargement pour les roues jumelées.

---

<sup>15</sup> Elles ont des dimensions relativement standardisées, notamment en ce qui concerne leur largeur

#### 2.3.4.6 Vitesse

La vitesse de la charge n'a pas d'influence directe sur les modélisations admettant un comportement élastique des matériaux. En revanche, le choix du module retenu pour les matériaux bitumineux dépend de la fréquence de sollicitation utilisée lors des essais. La fréquence à utiliser est liée à la vitesse à laquelle la charge se déplace, une augmentation de la vitesse conduisant à une augmentation de la fréquence à utiliser. Toutefois, il n'existe que peu d'études mettant en relation ces deux grandeurs. Dans le logiciel de formulation PRADO (Francken 1997) édité par le CRR, la relation suivante est proposée :

$$f(\text{Hz}) = 0,45 \cdot V(\text{km/h}) \quad \text{Eq. 6}$$

Il n'est pas rare que la fréquence à utiliser pour le dimensionnement soit fixée dans le cadre de la méthode de dimensionnement. A titre d'exemple, la méthode française impose d'utiliser les modules déterminés à partir d'essais en laboratoire effectués avec des sollicitations de 10 Hz.

Des méthodes pour définir au mieux la forme des sollicitations pour s'approcher des sollicitations réelles dans les chaussées sont récapitulées dans « Pavement Analysis and Design » (Huang 1993). Ces méthodes utilisent plutôt la notion de « temps de chargement » (inversement proportionnel à la fréquence) et elles présentent toute la vitesse comme étant le principal paramètre influençant cette grandeur. Certaines relations incluent également la profondeur dans la structure comme paramètre pouvant influencer les temps de chargement (Brown 1973). Toutefois, il apparaît d'importantes différences entre les méthodes proposées et ces dernières ne sont pas à même de définir des valeurs pour les fréquences à utiliser lors des essais en laboratoire.

La vitesse de la charge joue également un rôle non négligeable sur l'évaluation de la résistance des matériaux bitumineux à la fatigue et à l'orniérage. Comme pour le module, elle intervient, par l'intermédiaire de la fréquence, dans la détermination en laboratoire de la résistance à la fatigue. D'un autre côté, il est unanimement reconnu que le développement des ornières dans les matériaux bitumineux dépend fortement de la vitesse d'application des charges : plus les charges sont appliquées lentement, plus l'orniérage est important<sup>16</sup>.

En plus de ces problèmes en rapport avec les temps d'application des charges, la vitesse influence encore les temps de repos entre les charges. Par comparaison avec les essais en laboratoire qui utilisent essentiellement des sollicitations périodiques sans aucun temps de repos, les charges de trafic sont appliquées selon des répartitions temporelles aléatoires dépendant de la distance entre les véhicules, de leur type (distance entre les axes) et de leurs vitesses de déplacement. Pour les chaussées routières, les temps de repos entre les charges sont en général sensiblement supérieurs aux temps de chargement. Dans ces conditions, il a été démontré que « l'insertion de périodes de repos accroît la durée de vie en fatigue ; la

---

<sup>16</sup> A titre d'exemple, dans des situations impliquant des vitesses réduites, voir des chargements statiques (places de parc, zones à proximité des feux de signalisation), même des faibles charges peuvent conduire à des déformations permanentes très importantes

durée des périodes de repos a une forte influence sur cet accroissement quel que soit le mode de sollicitation » (Francken 1979).

Si les distances entre les véhicules conduisent généralement à des temps de repos importants, il n'en va pas de même dans le cas d'essieux comportant plusieurs axes (essieu tandem ou tridem). Dans cette situation et pour des vitesses suffisamment élevées, les sollicitations induites par les différents axes peuvent se cumuler et devenir plus néfastes pour les chaussées vis-à-vis de leur résistance à la fatigue. Cette situation peut être illustrée à partir de signaux de déformation enregistré lors du passage à 80 km/h d'un véhicule comprenant des essieux tandem à l'avant et à l'arrière (Figure 11).

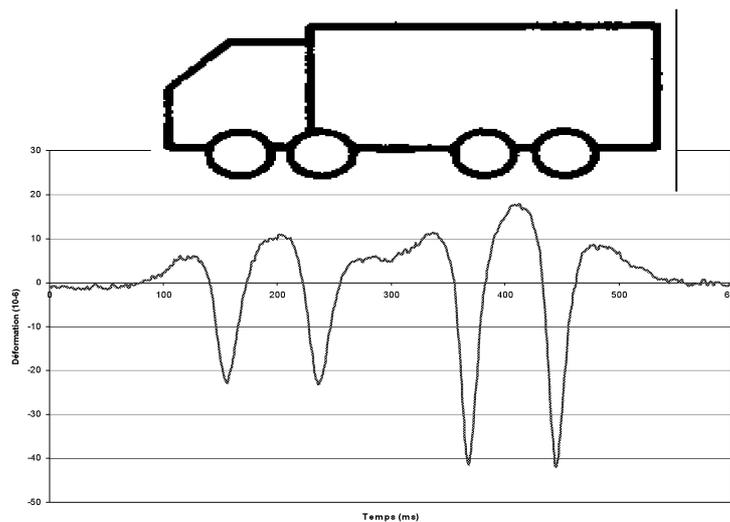


Figure 11 : Signal de déformations longitudinal lors du passage à 80 km/h d'un véhicule composé de deux essieux tandem

Si les amplitudes des extensions maximales sont relativement similaires pour les axes des deux essieux tandem, dont la charge est similaire, on observe en revanche que les contractions enregistrées entre les axes ne sont pas nulles, illustrant ainsi l'effet de superposition des charges.

## 2.4 Le comportement des enrobés bitumineux

Un enrobé bitumineux est un mélange homogène constitué à chaud de granulats minéraux et de liant bitumineux (bitume, bitume-polymère,...). Le terme « béton bitumineux » désigne également ce mélange dans la nomenclature européenne (Dumont, Di Benedetto et al. 2002).

En préambule, il est intéressant de citer le professeur Huet concernant le comportement des matériaux en général (Huet 1998) :

*« Il nous faut éviter ce préjugé, et nous persuader une fois pour toute, que tout matériau peut manifester tous les types de comportement, l'un ne semblant éventuellement l'emporter sur les autres que lorsque certaines conditions particulières sont remplies ».*

Ce constat est particulièrement applicable au comportement des matériaux bitumineux pour lesquels la prédominance d'un comportement dépend de l'amplitude des déformations et du nombre de cycles de chargement comme le montre la Figure 12 proposée par Di Benedetto (Di Benedetto 1990) :

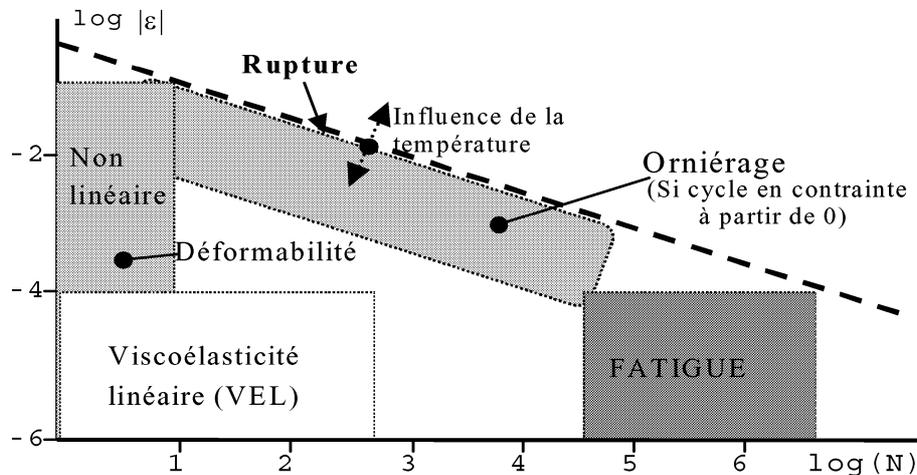


Figure 12 : Comportement des matériaux bitumineux (Di Benedetto 1990)

Une description détaillée du comportement des enrobés bitumineux est donnée dans la thèse de Chantal de La Roche (De La Roche 1996) qui constate que « *dans la littérature, les matériaux bitumineux sont généralement considérés comme étant homogènes, isotropes, viscoélastiques, linéaires et thermosusceptibles* ».

Bien que la composition des mélanges bitumineux en fasse en réalité un matériau hétérogène, l'hypothèse d'homogénéité macroscopique à l'échelle d'une chaussée peut être admise. De façon similaire et même si la mise en place des mélanges bitumineux sur les chaussées est susceptible de créer une certaine anisotropie des couches, l'hypothèse d'isotropie peut être admise dans le cadre des calculs de dimensionnement à l'échelle d'une chaussée.

Le comportement viscoélastique provient des propriétés des liants bitumineux. Il varie considérablement selon la vitesse d'application des charges : si elles sont appliquées très rapidement, le comportement est pratiquement élastique alors qu'en cas d'application très lente, le comportement est à prédominance fluide visqueux.

L'hypothèse de linéarité - retenue pour des déformations inférieures à 100 microdéformations selon le schéma de di Benedetto - implique la validité du principe de superposition de Boltzmann qui peut être exprimé en disant que « *La réponse d'un matériau à une sollicitation composée d'un certain nombre de sollicitations élémentaires est la somme des réponses à chacune de ces sollicitations élémentaires* » (De La Roche 1996) et (Salençon 1983).

Bien que le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux soit unanimement reconnu, les méthodes de dimensionnement mécaniques empiriques utilisent généralement un comportement élastique pour le calcul des sollicitations dans les chaussées (COST\_333 1999). Afin de demeurer aussi proche que possible de ces méthodes, l'essentiel des travaux de modélisation effectués dans le cadre de ce travail utilise donc un comportement élastique. Le comportement viscoélastique ne

sera utilisé que pour obtenir une meilleure description de signaux de déformations mesurés dans les matériaux bitumineux de superstructures routières souples.

#### 2.4.1 Comportement élastique linéaire

Ce chapitre est basé sur l'ouvrage « Analyse des structures et milieux continus - Mécanique des structures » (Frey 1994).

La loi de Hooke, qui est à la base de la description du comportement élastique linéaire, dit que « le déplacement est proportionnel à la force agissante »

$$F = k \cdot u \quad \text{Eq. 7}$$

avec :

- F = force agissante
- k = constante de proportionnalité
- u = déplacement

Si Hooke pensait que sa loi dépendait de la géométrie et du matériau de la pièce testée, il apparaîtra plus tard que seul le matériau importe et que la loi de Hooke peut être formulée de la manière suivante pour un cas unidimensionnel :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Eq. 8}$$

avec :

- $\sigma$  = contrainte normale
- E = module d'élasticité ou module de Young du matériau
- $\varepsilon$  = déformation linéaire

La loi de Hooke a été établie pour un comportement unidimensionnel et a été généralisée pour les systèmes à trois dimensions. Dans cette situation, deux paramètres sont nécessaires pour définir le comportement des matériaux : ce sont en général le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson  $\nu$ <sup>17</sup>. La loi de Hooke tridimensionnelle pour des matériaux isotropes est similaire à celle unidimensionnelle : elle relie les contraintes et les déformations par l'intermédiaire d'un module, mais sous forme matricielle :

---

<sup>17</sup> Il est également possible d'utiliser le module de glissement G, qui permet une simplification de la relation pour les efforts et déformations de cisaillement, et qui peut être déterminé à partir de E et de  $\nu$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 9}$$

Une définition plus physique du comportement élastique est donnée dans l'ouvrage « Mécanique des matériaux solides » (Lemaître et Chaboche 1988) :

« Les déformations élastiques se situent au niveau atomique, l'effet macroscopique constaté est le résultat des variations des espaces inter-atomiques nécessaires pour équilibrer les sollicitations extérieures, ainsi que de mouvements réversibles de dislocations. Ces modifications géométriques sont essentiellement réversibles. Dans une déformation élastique pure, la configuration initiale des atomes est retrouvée après cessation de la sollicitation ».

Cette définition met en évidence une propriété fondamentale du comportement élastique linéaire : la réversibilité. D'autre part, ce comportement se caractérise par un diagramme force-déplacement (ou effort-déformation) unique ne dépendant pas du mode de chargement (vitesse, amplitude, etc.). Ce comportement est observé indépendamment du fait que la sollicitation appliquée soit une force ou un déplacement.

#### 2.4.2 Comportement et modèles viscoélastiques linéaires

La description du comportement et des modèles viscoélastiques linéaires de base s'inspire principalement du livre « Initiation à la rhéologie » (Couarraze et Grossiord 1991). Le comportement visqueux d'un matériau se caractérise par un décalage temporel entre l'application d'une sollicitation et la réponse qui s'en suit. Il est viscoélastique si la réponse s'annule entièrement (après un certain temps) lorsque la sollicitation est supprimée.

Le comportement purement visqueux est généralement schématisé par un amortisseur, qui met en relation l'état de contrainte avec la variation de la déformation dans le temps (t) selon l'équation suivante, appelée équation du liquide visqueux newtonien :

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{Eq. 10}$$

avec :

- $\sigma$  = contrainte normale
- $\eta$  = coefficient de viscosité
- $\varepsilon$  = déformation linéaire

Le comportement viscoélastique linéaire peut être caractérisé à l'aide du module complexe. Ce dernier est « *le nombre complexe défini comme le rapport entre l'amplitude complexe de la contrainte sinusoïdale de pulsation appliquée au matériau  $\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$  et l'amplitude complexe de la déformation sinusoïdale qui en résulte en régime établi. Compte tenu du caractère viscoélastique du matériau, la déformation accuse un retard sur la contrainte se traduisant par un angle de déphasage  $\varphi$  entre les deux signaux :  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$  » (De La Roche 1996).*

La notion de module complexe permet de généraliser aux matériaux viscoélastiques les lois de comportement mécaniques en principe réservées aux seuls corps élastiques. Il est ainsi possible de définir le comportement viscoélastique linéaire à partir de la relation :

$$\sigma^* = E^* \cdot \varepsilon^* \quad \text{Eq. 11}$$

Le module complexe peut être décomposé en sa partie réelle, le module d'élasticité dynamique  $E_1$ , et sa partie imaginaire, le module de perte  $E_2$  :

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad \text{Eq. 12}$$

Le module complexe varie avec la température et la fréquence. Il existe plusieurs méthodes pour représenter les résultats des essais. Une première, basée sur des courbes isothermes, consiste à présenter la norme du module complexe en fonction de la fréquence pour une température donnée. Elle permet de juger de la susceptibilité cinétique du mélange. Selon un principe similaire aux courbes isothermes, il est possible de représenter les courbes isochrones en inversant les paramètres de fréquence et de température. Cette représentation permet de juger de la susceptibilité thermique du mélange.

Partant des courbes isothermes, et en se basant le principe d'équivalence temps-température (Huet 1965), il est possible d'obtenir, pour une température de référence, une courbe unique pour le module en fonction de la fréquence : cette courbe est appelée la courbe maîtresse. Elle permet d'obtenir des valeurs de la norme du module complexe pour des fréquences inaccessibles aux conditions d'essais en laboratoire.

Ces représentations ne permettent toutefois pas de juger du comportement visqueux des mélanges puisqu'elles n'utilisent que la norme du module complexe, mais ne donnent aucune idée de sa répartition entre parties réelles et imaginaires. La courbe dans le plan de Cole et Cole consiste à décomposer le module complexe entre sa partie réelle  $E_1$ , portée en abscisse et sa partie imaginaire  $E_2$ , portée en ordonnée. La courbe dans l'espace de Black consiste à représenter le logarithme de la norme du module complexe  $E^*$  en relation avec l'angle de phase.

Ces représentations sont caractéristiques du comportement viscoélastique linéaire des matériaux et peuvent être utilisées pour le calage de modèles de comportement rhéologique des matériaux<sup>18</sup>.

Le comportement du solide parfait (cf. § 2.4.1), schématisé par un ressort, et celui du liquide visqueux newtonien (cf. § 2.4.2), schématisé par un amortisseur, sont les deux comportements viscoélastiques linéaires les plus élémentaires. Le comportement viscoélastique linéaire est souvent décrit en combinant ces deux comportements par l'intermédiaire de ressorts et d'amortisseurs, associés soit en parallèle soit en série.

Ces combinaisons aboutissent aux deux modèles viscoélastiques les plus connus, le solide de Kelvin-Voigt et le liquide de Maxwell. Ces modèles, lorsqu'ils sont généralisés, permettent de décrire le comportement viscoélastique des matériaux, mais généralement pour des plages limitées de fréquence et de température. Ceci signifie qu'ils ne sont pas à même de reproduire l'intégralité des courbes de module complexe dans le plan de Cole-Cole ou dans celui de Black. Par ailleurs, ces modèles nécessitent en général la détermination d'un grand nombre de paramètres, fonction du nombre de ressorts et d'amortisseurs combinés.

Huet a proposé un modèle qui permet de reproduire, à partir d'un nombre limité de paramètres, les courbes de module complexe dans leur ensemble, c'est à dire indépendamment de la fréquence et de la température (Huet 1965). C'est ce modèle qui sera utilisé dans ce travail, une fois par l'intermédiaire d'un modèle multicouche puis par une méthode originale basée sur un premier calcul élastique des contraintes.

#### 2.4.2.1 Modèle de Kelvin-Voigt

Il est obtenu par la combinaison en parallèle d'un ressort et d'un amortisseur. Dans cette situation, la contrainte est égale à la somme des contraintes des deux éléments et les déformations des deux éléments sont égales. L'équation rhéologique du solide Kelvin-Voigt est la suivante :

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{Eq. 13}$$

En raison du ressort placé en parallèle, ce modèle n'est pas en mesure de modéliser des déformations permanentes. Ce modèle présente une élasticité qui peut être qualifiée de différée, puisque le retour à la position d'origine du système après suppression de la sollicitation nécessite un certain temps. Le modèle de Kelvin-Voigt dit généralisé est obtenu par la combinaison en série d'un modèle de Maxwell et d'un certain nombre de modèle de Kelvin-Voigt.

---

<sup>18</sup> L'évaluation du module complexe dans le cadre cette étude se fera conformément à la méthode française de dimensionnement (SETRA-LCPC 1994) et (NF\_P98-260-2), c'est-à-dire à partir d'essai en laboratoire sur des éprouvettes trapézoïdales

### 2.4.2.2 Modèle de Maxwell

Il est obtenu par la combinaison en série d'un ressort et d'un amortisseur. Dans cette situation, la déformation est égale à la somme des déformations des deux éléments et les contraintes des deux éléments sont égales. L'équation rhéologique du liquide Maxwell est la suivante :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \quad \text{Eq. 14}$$

Contrairement au modèle de Kelvin-Voigt, et en raison de l'amortisseur placé en série, ce modèle est en mesure de modéliser des déformations permanentes. Ce modèle présente une élasticité partielle puisque seul le ressort retrouve sa position d'origine après suppression de la sollicitation, une déformation résiduelle demeurant dans l'amortisseur. Le modèle de Maxwell dit généralisé est obtenu par la combinaison en parallèle de plusieurs modèles de Maxwell.

### 2.4.2.3 Modèle d'Huet : modèle à fluage bi-parabolique

Ce modèle est au centre du travail de thèse de Huet et sa description détaillée ainsi que celle de la démarche qui a conduit à sa mise en place peuvent être consulté dans « Etude, par une méthode d'impédance, du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés » (Huet 1965). La description simplifiée de ce modèle est inspirée de la thèse de Chantal de La Roche (De La Roche 1996).

Le modèle de Huet est un modèle analogique composé de trois éléments en série, soit un ressort de rigidité  $E_{inf}$  et deux amortisseurs à fluage parabolique de paramètres  $k$  et  $h$  (Figure 13).

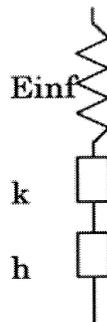


Figure 13 : Représentation du modèle de Huet

Le module complexe du système s'exprime à partir des paramètres du modèle sous la forme suivante :

$$E^*(\omega) = \frac{E_{inf}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad \text{Eq. 15}$$

avec :

- $\omega$  = pulsation
- $\tau$  = paramètre ayant la dimension d'un temps et qui s'apparente à un temps de retardation dont la valeur varie avec la température
- $h, k, \delta$  = paramètres des éléments paraboliques du modèle, ils vérifient pour les bitumes et les enrobés  $0 < k < h < 1$
- $E_{inf}$  = module instantané du modèle, obtenu lorsque  $\omega\tau \rightarrow \infty$  soit pour les fréquences élevées ou les températures basses.

L'identification de ce modèle a été effectuée à l'aide de la représentation du module complexe dans le plan de Cole et Cole, par analogie avec les travaux de ces auteurs sur les variations de la constante diélectrique d'un corps en fonction de la fréquence.

La détermination des paramètres  $E_{inf}$ ,  $h$ ,  $k$  et  $\delta$  se fait graphiquement en ajustant dans le plan Cole-Cole la courbe théorique du modèle avec celle des résultats expérimentaux. Une fois ces paramètres déterminés, la variation de  $\tau$  en fonction de la température est également obtenue graphiquement en calant les courbes isothermes du modèle sur celles obtenues expérimentalement. Ces calages peuvent aisément être réalisés à partir d'un tableur courant (feuille de calcul et graphiques Excel).

Le modèle de Huet ne permet pas une très bonne représentation des faibles modules (hautes températures ou basse fréquence). Il a été complété par Sayegh par l'adjonction en parallèle d'un ressort de très faible rigidité (Sayegh 1965). L'introduction de ce ressort n'étant nécessaire que pour les faibles valeurs de module, il ne sera pas introduit dans les calculs qui sont effectués dans des conditions (température et fréquence) pour lesquelles le modèle de Huet donne des résultats tout à fait satisfaisants.

#### 2.4.3 Comportement en fatigue des enrobés

La Figure 12 (cf. page 29) montre que le phénomène de fatigue des enrobés apparaît lors de l'application d'un grand nombre de chargement de faible amplitude. Les chaussées routières sont effectivement soumises à un grand nombre de sollicitations dues aux charges de trafic pouvant conduire à une fatigue des matériaux bitumineux et à l'apparition de fissures.

L'évaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux à partir d'essais en laboratoire est décrite dans (Di Benedetto et de La Roche 1998) et dans (De La Roche 1996). La résistance à la fatigue d'un matériau est caractérisée par une courbe représentant la durée de vie, exprimée en nombre de cycles  $N$ , en fonction des amplitudes de la contrainte ( $\sigma$ ) ou de la déformation ( $\varepsilon$ ) appliquée.

Cette courbe, appelée courbe de Wohler, est caractérisée, en coordonnées log-log, par une droite suivant une relation du type :

$$\sigma = A \cdot N^{-b} \text{ ou } \varepsilon = A \cdot N^{-b} \quad \text{Eq. 16}$$

Pour les enrobés bitumineux, les paramètres A et b caractéristiques de la courbe de Wöhler sont généralement obtenus à partir d'essais en laboratoire. Ils peuvent également être déterminés, sur la base de leur composition, à partir de formules empiriques (Francken 1997). Pour les matériaux bitumineux, la « droite de fatigue » est caractérisée par sa pente b et la valeur de A est appelée  $\varepsilon_6$ . Elle correspond à la déformation à appliquer durant l'essai de fatigue pour obtenir une rupture après un million ( $10^6$ ) de cycles. La loi de fatigue prend alors la forme suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_6 \cdot N^{-b} \quad \text{Eq. 17}$$

L'évaluation de la résistance à la fatigue dans le cadre de la méthode française de dimensionnement se fait sur des éprouvettes trapézoïdales identiques à celles utilisées pour la détermination du module complexe (SETRA-LCPC 1994) et (NF\_P98-261-1).

## 2.5 Modélisation des superstructures routières

La modélisation des chaussées routières se fait généralement en admettant une décomposition de la superstructure en couche successive d'épaisseur constante. Chaque couche est composée d'un matériau différent suivant un comportement défini selon des propriétés mécaniques propres. En plus de la définition des comportements de chaque matériau, la modélisation implique des choix supplémentaires pour les conditions aux limites (y compris les conditions d'interfaces entre les couches) et pour la définition de la charge. Trois types de modélisations ont été effectués dans le cadre de ce travail :

- la plupart des calculs élastiques sont effectués avec des logiciels basés sur la théorie de Burmister présentée ci-après. Ces calculs sont faits avec une modélisation de la charge conforme aux hypothèses de Burmister et en prenant la pression de contact égale à celle de gonflage des pneumatiques.
- des modélisations introduisant un comportement viscoélastique des matériaux bitumineux ont été réalisées pour un cas de charge de référence afin de juger des apports de l'introduction de ce comportement sur la modélisation de signaux de déformation (cf. § 3.4).
- finalement, des calculs par éléments finis, basés sur un comportement élastique des matériaux, ont été faits pour une charge de référence. Ils ont comme but l'évaluation de l'effet d'une définition des charges de trafic selon des hypothèses plus élaborées pour la répartition des pressions (pression non-uniforme, variation des surfaces de contact, charges transversales).

### 2.5.1 Le modèle multicouche de Burmister

Burmister a traité le problème général d'une structure de  $n$  couches sollicitée par une charge circulaire uniformément répartie, selon le schéma suivant :

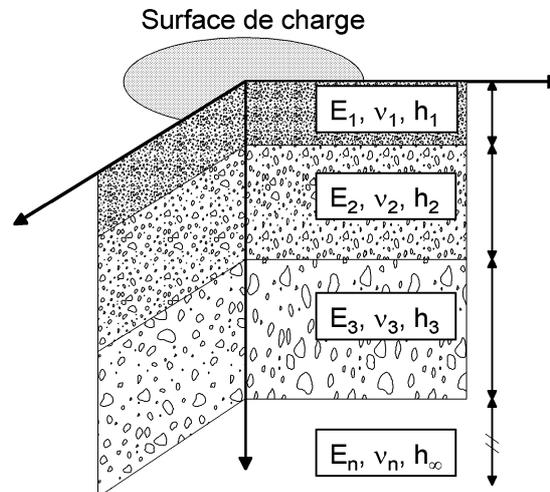


Figure 14 : Schématisation du modèle de Burmister

Ce modèle est à la base des modèles dits multicouches généralement utilisés dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement et repose sur les hypothèses suivantes :

- la charge est introduite par une pression uniforme appliquée sur une surface circulaire de rayon  $a$
- chaque couche est constituée d'un matériau homogène, isotrope, suivant un comportement élastique linéaire
- les couches sont infinies en plan
- la couche la plus profonde a une épaisseur infinie
- les interfaces entre les couches sont collées, partiellement collées ou libres.

Chaque couche est définie par trois paramètres : son épaisseur  $h$ , son module d'élasticité  $E$  et son coefficient de Poisson  $\nu$ . De plus, il est possible d'introduire différentes conditions aux interfaces entre les couches, allant d'un collage parfait (déplacement identiques des deux couches) à un glissement total entre les couches (déplacement libre d'une couche par rapport à l'autre).

Compte tenu de ses caractéristiques, un tel modèle s'applique donc particulièrement bien pour la modélisation des chaussées routières.

Les contraintes et les déplacements dans un tel modèle sont déterminés à partir de la fonction de contrainte suivante (Van Cauwelaert 1995) :

$$\varphi_i = pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{mz} - zD_i e^{-mz}] dm \quad \text{Eq. 18}$$

avec :

- a = rayon de la surface de chargement
- p = pression de chargement uniformément répartie
- r = distance radiale en coordonnées cylindriques
- z = profondeur
- $A_i, B_i, C_i, D_i$  = paramètres inconnus déterminés par les conditions aux limites
- $J_0$  = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0
- $J_1$  = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1
- m = paramètre d'intégration

Le détail des équations pour le calcul des contraintes et des déplacements obtenues à partir est donné en annexe 11.1.

### 2.5.1.1 Conditions aux limites

Pour un système de n couches, les paramètres  $A_i, B_i, C_i$  et  $D_i$  sont au nombre de  $4n$  et il convient donc de fixer autant de conditions aux limites. En surface, on a deux conditions en contraintes :

- $\sigma_z = p$  pour  $r < a$  et  $\sigma_z = 0$  pour  $r > a$
- et  $\tau_{rz} = 0$  pour  $r > 0$

A une profondeur infinie, les contraintes et les déplacements sont nuls ce qui implique que les coefficients  $A_n$  et  $C_n$  de la  $n^{\text{ième}}$  et dernière couches sont égal à 0.

Compte tenu de ces premières conditions, il reste  $4(n-1)$  conditions à définir, soit 4 pour chacune des  $n-1$  interfaces définies. Dans un premier temps, on admet que les couches restent en contact permanent sous l'effet de la charge, ce qui se traduit en égalisant sur chaque interface :

- les contraintes verticales  $\sigma_z$
- les contraintes de cisaillement  $\tau_{rz}$
- les déplacements verticaux w.

Une quatrième condition est obtenue à partir des conditions de collage horizontales admises entre les différentes couches. Les cas extrêmes sont un collage parfait, qui se traduit en égalisant les déplacements horizontaux u sur chaque interface et un glissement complet, qui se traduit par des contraintes de cisaillement nulles aux

interfaces. Cette récapitulation des conditions aux limites montre qu'elles se répartissent entre des conditions en contraintes et des conditions en déformations.

### 2.5.1.2 Définition de la charge

Le modèle de Burmister admettant un comportement élastique linéaire des matériaux, il est possible de calculer les sollicitations induites par des roues jumelées en cumulant les sollicitations induites par deux cercles espacés conformément à la géométrie du jumelage. En plus du type de roue, la charge doit être définie par la pression verticale et le rayon de la surface de contact. L'hypothèse communément retenue consiste à admettre que la pression de contact est égale à la pression de gonflage du pneumatique et que le rayon de la surface se calcule à partir de l'intensité totale de la charge<sup>19</sup>.

La fonction de contrainte servant au calcul des contraintes et des déplacements n'utilise que deux paramètres pour décrire la charge : la pression verticale ( $p$ ) et le rayon ( $a$ ) de la surface sur laquelle elle agit. L'équation de base, et par suite toutes celles utilisées pour le calcul des contraintes et déplacements, montre que les résultats sont directement proportionnels à la valeur de la pression  $p$ , mais qu'il n'existe pas de relation directe avec le rayon  $a$  de la surface sur laquelle la charge verticale est appliquée, puisque ce rayon intervient dans le calcul de la fonction de Bessel à l'intérieur de l'intégrale. La relation de proportionnalité entre les résultats des calculs et la pression de contact ne fait qu'exprimer le principe de linéarité du comportement des matériaux.

### 2.5.2 Modélisation élastique d'une chaussée par éléments finis

La présentation de la méthode des éléments finis fait l'objet de nombreux ouvrages, par exemple « Analyse des structures et des milieux continus : méthode des éléments finis » (Frey 2001). Elle n'est pas détaillée ici en raison de sa complexité et de l'utilisation qui en est faite dans le cadre de ce travail. En effet, l'utilisation des éléments finis ne se justifie que pour permettre une définition plus fine de la charge (forme de la surface de chargement, répartition des pressions verticales, charges horizontales, etc.).

Les modélisations de cette étude ont été effectuées avec le programme CAPA 3D (Scarpas 1998) de l'université de Delft (Pays-Bas). Une comparaison des résultats de ce programme avec ceux obtenus par des logiciels basés sur le système multicouche de Burmister a été menée dans le cadre d'un projet européen de recherche (AMADEUS 2000). Il en est résulté que, pour des modélisations élastiques, CAPA 3D fournit des résultats identiques à ceux des modèles multicouches.

---

<sup>19</sup> C'est notamment le cas du logiciel Noah dans lequel la charge est définie à partir de trois paramètres : types de roues (y compris l'espace entre les pneus en cas de jumelage), l'intensité de la charge et la pression de contact

### 2.5.3 Modélisation viscoélastique linéaire avec un logiciel multicouche

En plus des calculs élastiques selon le modèle de Burmister, le logiciel Veroad<sup>20</sup> permet d'effectuer des calculs viscoélastiques en se basant sur la théorie des multicouches (Hopman, Nilsson et al. 1997) et (Hopman 2000). Le modèle viscoélastique de Huet-Sayegh a récemment été introduit et validé par comparaison avec des résultats obtenus sur la base d'un modèle de Burger (Nilsson, Hopman et al. 2002). Les hypothèses pour la modélisation de la structure sont similaires à celle d'un modèle multicouche basé sur la théorie de Burmister, à la différence près que les matériaux peuvent suivre un comportement viscoélastique. Les hypothèses de modélisation des charges sont identiques à celles du modèle de Burmister, à la différence près qu'il est nécessaire d'introduire la vitesse de déplacement de la charge.

## 2.6 Modèles de performance pour les méthodes mécaniques empiriques

Le rapport (COST\_333 1999) propose une liste non exhaustive des mécanismes de dégradation des chaussées en Europe selon l'ordre de leur fréquence d'apparition :

1. orniérage des couches bitumineuses
2. fissuration depuis la surface
3. défaut de l'uni longitudinal
4. perte d'adhérence
5. fissures longitudinales dans la trace des roues
6. fissures par le bas de la couche de base
7. fissuration généralisée en surface
8. arrachement des matériaux
9. orniérage dans les couches de fondation
10. gonflement du au gel
11. fissurations dues aux basses températures

---

<sup>20</sup> Visco Elastic ROad Analysis – Delft

Dans bien des cas, il n'existe pas de modèle mettant ces mécanismes en relation avec l'état de sollicitation des couches d'une superstructure. Les méthodes mécaniques empiriques ne prennent généralement en compte que deux d'entre eux, soit :

- la fissuration par fatigue des couches liées (aux liants bitumineux ou hydrauliques) soumises aux extensions ou aux tractions engendrées par les charges de trafic. Ce type de fissuration est censé se développer par le bas des couches et se propager vers le haut
- la déformation permanente des couches de fondation (orniérage structurel).

pour lesquels on impose respectivement :

- une limitation des déformations horizontales (extension) au bas des couches liées
- une limitation des déformations verticales (contraction) au sommet du sol de fondation.

Pour certaines dégradations jugées importantes (voir liste des dégradations), il n'existe pas de méthodes d'évaluation ou d'estimation permettant leur prise en compte dans les méthodes de dimensionnement. C'est notamment le cas pour l'évaluation des ornières dans les couches bitumineuses, présentés comme le plus fréquemment rencontré en Europe. Toutefois, il existe des modèles, essentiellement fondés sur des essais en laboratoire, qui permettent d'évaluer le développement des ornières dans les couches bitumineuses.

### 2.6.1 Critère de fatigue des couches bitumineuses

Lors du passage d'une charge, des extensions sont enregistrées au bas des couches de base en matériaux bitumineux (cf. § 3.4). Dans le cadre des méthodes mécaniques empiriques, il est admis que la répétition de ces extensions conduit à un phénomène de fatigue, lequel se traduit par l'apparition de fissures au bas des couches bitumineuses. Ces fissures sont alors sensées se propager vers le haut de la chaussée, conduisant à sa ruine<sup>21</sup>.

Ce critère, propre à la majorité des méthodes recensées en Europe (COST\_333 1999), propose de comparer la déformation horizontale maximale (extension) appliquée au bas des couches bitumineuses avec la résistance à la fatigue des matériaux déterminée en laboratoire (cf. § 2.4.3). Afin de tenir compte de la différence entre les résultats obtenus en laboratoire et le comportement in situ des matériaux, des coefficients de calage ou de correction sont appliqués. Le nombre de charge de trafic pouvant être subies par la chaussées sont alors obtenues à partir de formules similaire à celles utilisées pour définir la résistance à la fatigue (cf. Eq. 17 page 36).

---

<sup>21</sup> Il convient de signaler que ce schéma d'initialisation et de propagation des fissures dans les couches bitumineuses est assez théorique et que la plupart des fissures observées sur des chaussées réelles semblent plutôt s'initialiser par le haut des couches bitumineuses

Pour les matériaux bitumineux, la pente  $b$  de la courbe de Wohler est voisine de 0,2, ce qui signifie que les durées de vie, exprimées par l'intermédiaire du nombre de cycles  $N$ , varient avec la puissance 5 des déformations calculées. En d'autres termes, une variation de l'ordre de 10% des déformations calculées entraîne une variation de  $(1,1)^5$  des durées de vie, soit plus de 60%. Cela signifie que des variations à priori peu importantes des déformations calculées dans les matériaux bitumineux peuvent conduire à des erreurs considérables, ceci quelle que soit la valeur retenue pour  $\varepsilon_6$ .

### 2.6.2 Critère de déformation permanente du sol de fondation

Pour se prémunir contre ce genre de dégradation, les méthodes mécaniques empiriques imposent une limitation de la déformation élastique verticale  $\varepsilon_z$  au sommet du sol de fondation. Cette valeur est mise en relation avec le nombre  $N$  de charges de trafic selon des formules présentant la forme suivante :

$$N = A\varepsilon_z^{-c} \quad \text{Eq. 19}$$

Les valeurs des paramètres  $A$  et  $c$  sont obtenues par régression et varient d'une méthode à l'autre. La valeur de  $c$  est généralement comprise entre 3,5 et 4,5 quelle que soit la méthode envisagée. Le présent travail étant focalisé sur les états de contrainte et de déformation dans les matériaux bitumineux, ce critère n'y est pas étudié.

### 2.6.3 Evaluation de l'orniérage des couches bitumineuses

D'un point de vue du dimensionnement des chaussées, l'évaluation du comportement à l'orniérage d'un enrobé bitumineux se fait généralement à partir d'essai d'orniérage en laboratoire (NF\_P98-253-1). Cet essai permet d'évaluer qualitativement la sensibilité d'un mélange vis-à-vis des déformations permanentes, mais sans donner de prévision quantitative de son comportement in-situ.

Quoique reconnu comme étant l'un des principaux mécanismes de dégradation des chaussées, il existe peu de relations simples permettant de prédire le développement des ornières dans les couches bitumineuses d'une chaussée routière. Des modèles de calcul, généralement basés sur la théorie des éléments finis et des lois de comportement complexes (viscoélasticité non-linéaire, viscoplasticité, etc.), proposent des solutions prometteuses (Hua et White 2000), (Erkens, Liu et al. 2000) et (Long et Monismith 2002). Toutefois, ces modèles sont encore réservés au domaine de la recherche et ils sont difficilement applicables dans le cadre du dimensionnement des chaussées. Ces modèles ne séparent pas les modèles de réponse de ceux de performance. En revanche, ils souffrent souvent de la difficulté à définir les valeurs des paramètres décrivant le comportement des matériaux.

Une méthode d'estimation des profondeurs d'ornières dans les matériaux bitumineux de chaussées réelles a été proposée par Francken du CRR<sup>22</sup> et a été validée sur un cas réel (Francken 1977a), (Francken 1977b) et (Francken 1987).

---

<sup>22</sup> Centre de Recherches Routières

Cette loi est issue de l'analyse des résultats d'un grand nombre d'essais triaxiaux dynamiques et permet de déterminer une déformation plastique  $\varepsilon_p$  en fonction du nombre de charges appliquées  $N$  selon la relation suivante :

$$\varepsilon_p = A \cdot N^{\frac{1}{4}} \quad \text{Eq. 20}$$

dans laquelle :

$$A = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2 \cdot E_p(V, T)} \cdot \left[ \frac{1}{450 \cdot V} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{Eq. 21}$$

avec :

- $V$  = vitesse du véhicule [km/h]
- $T$  = température [°C]
- $E_p$  = module de déformation permanente dépendant de la vitesse et de la température
- $\sigma_h$  et  $\sigma_v$  = contraintes principales horizontales et verticales sous l'effet d'une charge

En observant la relation donnée pour le calcul de  $A$ , il apparaît que les déformations permanentes dépendent notamment du cisaillement maximum, pris en compte par l'intermédiaire de la différence entre les contraintes principales verticales et horizontales au sein des couches bitumineuses.

Une fois obtenue la déformation permanente pour chacune des couches, il est possible de la transformer en un déplacement total en surface pour  $i$  couches par la formule :

$$u_{\text{perm}} = \sum_i h_i \cdot \varepsilon_{pi} \quad \text{Eq. 22}$$

avec :

- $u_{\text{perm}}$  = ornière
- $h_i$  = épaisseur de la couche  $i$
- $\varepsilon_{pi}$  = déformation permanente de la couche  $i$

#### 2.6.4 Conclusion sur les modèles de performances

Les deux critères de dimensionnement retenus par la majorité des méthodes mécaniques empiriques associent une déformation calculée au nombre de cycles que la structure est à même de supporter. En observant les relations utilisées (cf. § 2.6.1 et 2.6.2), il apparaît qu'elles utilisent des lois de puissance et que cette dernière est généralement comprise entre 4 et 5. Il en est de même de la relation proposée pour l'évaluation des ornières dans les couches bitumineuses (cf. § 2.6.3). Il n'est dès lors pas étonnant que des valeurs comprises entre 4 et 5 soient également utilisées dans les méthodes de calcul du trafic équivalent pour les chaussées souples (cf. § 2.3.2).

Etant donné les relations de puissance généralement utilisées entre les déformations et les nombres des modèles de performances, il est possible d'établir de façon très simple une relation entre les états de contraintes et les dégradations des chaussées bitumineuses. Les conséquences des variations des conditions de chargement peuvent être aisément évaluées à partir des variations qu'elles induisent sur les états de contraintes dans les chaussées.

## 2.7 Enseignements

Les méthodes de dimensionnement mécaniques empiriques se basent sur des valeurs calculées des déformations<sup>23</sup> dans les chaussées. Ces déformations sont mises en relation avec des modèles décrivant les dégradations des chaussées. Ces modèles intègrent des données empiriques et la plupart d'entre eux sont basés des **lois de puissance**.

La forte hétérogénéité des charges de trafic appliquées sur les chaussées routières se traduit notamment par des variations des paramètres suivants :

- intensité de la charge
- pression de contact entre les pneus et la surface de roulement
- type de pneus.

Compte tenu des lois de puissance utilisées pour le dimensionnement des chaussées, l'effet sur les déformations des variations des paramètres pris en compte dans la description du trafic doit principalement être évalué en terme de **variations relatives** de ces déformations.

D'autre part, les variations des paramètres de charge précités influencent également la forme des empreintes de contact des pneumatiques ainsi que la répartition des efforts appliqués sur les surfaces de roulement.

Les modélisations des chaussées routières utilisées dans le cadre des méthodes de dimensionnement de type mécaniques empiriques impliquent nécessairement des hypothèses simplificatrices. La comparaison des résultats obtenus par ces modélisations avec des données expérimentales est indispensable pour évaluer l'influence réelle des hypothèses retenues.

---

<sup>23</sup> Ou des contraintes pour des structures rigides ou semi-rigides

# 3. Mesures de déformations dans les chaussées routières souples

## 3.1 Mesures de déformations et essais en vraie grandeur

Les réponses utilisées dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement proviennent de modélisations impliquant de nombreuses hypothèses simplificatrices pour la description de la charge et de la structure. Il est indispensable que ces calculs soient validés par des mesures effectuées sur des structures ayant des dimensions réelles et soumises à des charges réelles.

De telles mesures peuvent être obtenues par la construction des structures dans des installations prévues spécialement à cet effet. Ces structures sont alors instrumentées de façon à obtenir des mesures de différentes grandeurs telles que déformations, déplacements, contraintes, etc. On parle alors généralement d'essais en vraie grandeur. Une autre méthode consiste à instrumenter, lors de leur réalisation ou de leur renforcement, des chaussées réellement en service.

Les mesures utilisées dans le cadre de ce travail proviennent d'essais en vraie grandeur réalisés à l'EPFL et de structures réelles sur des autoroutes. Les mesures des déformations dans les couches bitumineuses ont généralement été faites au bas des couches de base. Les mesures effectuées dans le cadre des essais en vraie grandeur présentent l'avantage que de nombreux paramètres influençant les déformations des couches bitumineuses sont maîtrisés, permettant d'effectuer des comparaisons en faisant varier ces paramètres.

Ce chapitre, consacré à la description de la partie expérimentale de ce travail, commence par la présentation des expériences ayant servi de cadre aux campagnes de mesures<sup>24</sup>. Ces présentations concernent les structures instrumentées, le type d'instrumentation et les principaux résultats auxquels les expériences ont donné lieu, en dehors du cadre de ce travail de thèse. L'installation d'essai en vraie grandeur de la Halle-fosse de l'EPFL est ensuite décrite, puisque c'est là que la plupart des mesures utilisées dans cette étude ont été réalisées. Une description générale de la forme des signaux de déformations mesurés dans les couches bitumineuses est ensuite donnée, avec la définition de certaines valeurs caractéristiques de ces signaux. Ce chapitre se conclut par la description des matériaux mis en place dans les structures sur lesquelles des mesures ont été exploitées. Les propriétés élastiques linéaires des matériaux utilisées pour les modélisations y sont également données.

---

<sup>24</sup> Le but premier de ces expériences ne concernait pas l'effet des charges sur les déformations dans les couches bitumineuses et les mesures de déformations n'étaient qu'un aspect parmi d'autres de ces expériences

### 3.2 Campagnes de mesures de déformations sur des structures en vraie grandeur

Quatre expériences ayant donné lieu à des mesures de déformation dans les couches bitumineuses sont présentées dans le cadre de ce travail. Même si l'essentiel des travaux qui suivent se concentre sur une seule d'entre elles, ces campagnes de mesures, et les analyses qui en ont découlé, ont permis d'acquérir de nombreux enseignements dans le domaine des acquisitions de mesures de déformations dans les couches bitumineuses ainsi que dans celui des modélisations élastiques des superstructures routières.

Deux de ces expériences ont été effectuées dans la Halle-fosse (Halle d'essai en vraie grandeur de l'EPFL) alors que les deux autres concernent des sections d'autoroutes qui ont été instrumentées. Les deux expériences de la Halle-fosse présentent l'avantage d'avoir été réalisées dans des conditions où les principaux paramètres influençant les déformations d'une chaussée, en l'occurrence la température des couches bitumineuses et les conditions de chargement, sont entièrement contrôlés. En revanche, en raison de la taille réduite de l'installation, les charges ne peuvent pas circuler à des vitesses correspondant à la réalité et les mesures ont été faites à une vitesse théorique constante de 12 km/h. Pour les mesures sur les autoroutes, la situation est inverse puisqu'il a été possible d'effectuer des mesures à des vitesses plus élevées, alors que le contrôle de la charge et surtout celui de la température des couches bitumineuses n'était pas total.

Parallèlement aux mesures de réponses effectuées dans le cadre de ces projets, des essais pour caractériser les matériaux ont été réalisés. Ces essais servent de référence pour le choix des propriétés mécaniques utilisées pour les modélisations.

#### 3.2.1 Première campagne : Evaluation des enrobés à module élevé (Halle-fosse)

Cette expérience est en relation avec le mandat de recherche 20/96 financé par l'OFROU<sup>25</sup>. Ce mandat avait pour but d'évaluer le comportement mécanique d'enrobé à module élevé par des essais en laboratoire et par la réalisation d'un essai en vraie grandeur, ceci afin de préparer leur introduction dans les normes routières suisses. Les résultats détaillés de cette recherche, y compris la description complète des expériences en vraie grandeur, sont disponibles dans un rapport (Perret, Dumont et al. 2001).

La première partie de l'expérience consistait à effectuer des mesures de réponses pour différentes conditions de chargements et diverses températures.<sup>26</sup> Deux intensités de charge et trois pressions de gonflage des pneumatiques ont été retenues et appliquées sur des pneus simples et sur des pneus jumelés. Les températures de référence étaient de -5°C, 5°C, 15°C et 30°C. Les mesures ont été effectuées après une phase de stabilisation d'environ 3000 passages et selon les calendriers donnés en annexe 11.1. Les mesures ont nécessité l'application d'environ 15'000 charges sur chacune des structures. Ce nombre limité de charge

---

<sup>25</sup> Office fédéral des routes

<sup>26</sup> On entend par réponses les déformations instantanées mesurées au passage d'une charge

permet d'admettre que les structures n'ont pas été endommagées durant les mesures de réponse.

La seconde partie visait à évaluer la résistance des couches de base vis-à-vis de l'orniérage en appliquant un grand nombre de charges sur les sections dans des conditions de température particulièrement défavorables (50°C). Cette expérience a été menée pour un seul cas de charge et n'est pas analysée dans ce travail.

### 3.2.1.1 Description des structures

Trois structures différentes ont été testées (Figure 15).

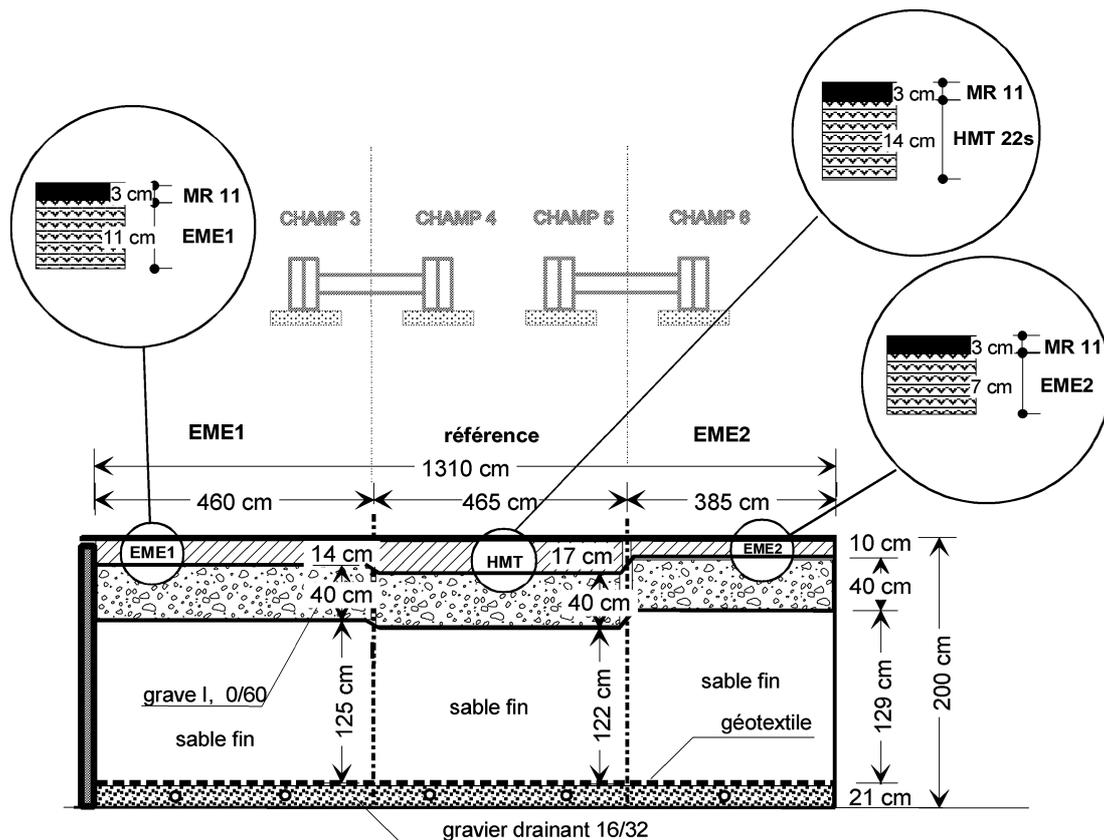


Figure 15 : Structures construites à la Halle-fosse pour l'évaluation des enrobés à module élevé (Perret, Dumont et al. 2001)

où :

- MR 11 = macro rugueux 11 selon (SN\_640435), couche de roulement
- EME = enrobé à module élevé (type 1 ou 2), couche de base
- HMT 22s = enrobé à chaud pour couche de base selon (SN\_640431), couche de base
- Grave I = grave de qualité I 0/60 mm selon (SN\_670120), couche de fondation
- Sable fin = sable 0/2 mm lavé, sol de fondation.

Ces structures ne se différencient que par les épaisseurs et le type de matériaux bitumineux de la couche de base. En revanche, elles ont toutes une même couche de roulement de 3 cm en MR11.

Une section de référence, correspondant à une structure T4-S2 selon la norme (SN\_640324), a été construite avec une couche de base de 14 cm en HMT 22s, l'épaisseur totale des couches bitumineuses étant donc de 17 cm. De part et d'autre de cette section, de façon à pouvoir tester simultanément deux champs différents avec l'axe du simulateur de trafic de la Halle-fosse, deux sections utilisant des enrobés à module élevé (EME) différents comme couche de base ont été construites. Le premier EME, désigné comme type 1 (EME1), favorise la résistance à l'orniérage alors que le second, désigné comme type 2 (EME2), privilégie la résistance à la fatigue. La structure utilisant une couche de base en EME1 présente une épaisseur totale de 14 cm (11+3) alors que celle en EME2 est de 10 cm (7+3). Les couches bitumineuses reposent sur 40 cm de grave I servant de couche de fondation alors que la fosse a été remplie de sable pour remplacer le sol de fondation.

### 3.2.1.2 Instrumentation et mesures

L'instrumentation des champs a notamment permis des mesures de déformations dans les couches bitumineuses au bas des couches de base (soit à des profondeurs absolues variables selon le champ) et à l'interface entre la couche de base et celle de roulement (soit à une profondeur constante de 3 cm quelque soit le champ). Une série de 8 jauges de mesure a été installée à chacune de ces profondeurs. Le détail de cette instrumentation est donné ultérieurement (cf. § 3.3.2).

Les mesures ont été faites en faisant varier trois paramètres des charges de trafic, soit :

1. l'intensité de la charge appliquée sur la chaussée :
  - $P_1 = 8$  tonnes : charge de l'essieu de référence émanant de l'essai AASHO et utilisé actuellement en Suisse (8,16 t)
  - $P_2 = 11,5$  tonnes : charge de l'essieu normalisé européen
2. la pression de gonflage des pneumatiques :
  - trois valeurs de pressions ont été choisies, soit 6, 7 et 8 bars<sup>27</sup>.
3. le type de roue :
  - roues jumelées : Michelin 295/80R22.5 XDA 4TL
  - roue simple (ou super single) : Michelin 385/65R22.5 ENERGY XTA TL

---

<sup>27</sup> Il convient de signaler que ces pressions sont relativement faibles en comparaison de celles utilisées réellement. Toutefois, l'équipement d'air comprimé à disposition dans la halle d'essai ne permettait pas d'atteindre des pressions supérieures

La combinaison de ces paramètres aboutit à 12 cas de charge différents qui permettent d'étudier séparément les trois paramètres de chargement. Des déformations ont été mesurées pour trois températures (5°C, 15°C et 30°C).

### 3.2.1.3 Principaux résultats de l'expérience

En plus de résultats concernant la formulation des enrobés à module élevé (à partir d'essais en laboratoire), cette expérience a permis de déterminer des coefficients d'équivalence entre les matériaux pour les couches de base utilisés en Suisse et les EME. Les mesures de déformations et de déplacement sur les structures en vraie grandeur ont montré que la concordance avec les modélisations basées sur un comportement élastique est assez variable : si les déformations horizontales dans les couches bitumineuses sont très proches, il n'en est pas de même pour les déformations verticales dans les matériaux non-liés. Dans ce dernier cas, si les valeurs absolues des mesures et des modélisations ne concordent pas, il faut signaler que les variations relatives des déformations suite à des modifications des conditions d'expérience (température ou charge) sont similaires. Ce sont principalement des résultats de cette expérience qui sont analysés dans ce travail.

### 3.2.2 Deuxième campagne : Contribution suisse à l'action COST 333 (Halle-fosse)

Cette expérience est une contribution suisse, financée par l'OFES<sup>28</sup>, à une action de coopération scientifique et technique européenne (COST\_333 1999). Elle a principalement fourni des mesures de déformations et de déplacements pour valider les modélisations servant de base aux méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement.

Lors de la première partie de l'expérience, des mesures de réponses (déformations ou déplacement sous l'effet du passage d'une charge) ont été effectuées pour différentes conditions de charge et de températures allant de -10°C à +30°C. La seconde partie de l'expérience, menée à une température de 15°C, consistait à soumettre la structure à un grand nombre de charges afin d'obtenir une rupture par fatigue des couches bitumineuses. Bien que cette seconde partie d'expérience ait été menée jusqu'à un nombre de cycles largement supérieur à la durée de vie estimée, aucune détérioration significative n'a été relevée. L'expérience a dû être interrompue à la suite d'un problème mécanique de l'installation en vraie grandeur. La description détaillée de l'expérience est donnée dans un rapport (Turtschy et Perret 1999).

#### 3.2.2.1 Description de la structure

Cette section a été construite en même temps que celles pour l'évaluation des enrobés à haut module. Elle présente une structure similaire et ne se différencie que par la couche de base (Figure 16).

---

<sup>28</sup> Office fédéral de l'éducation et de la science

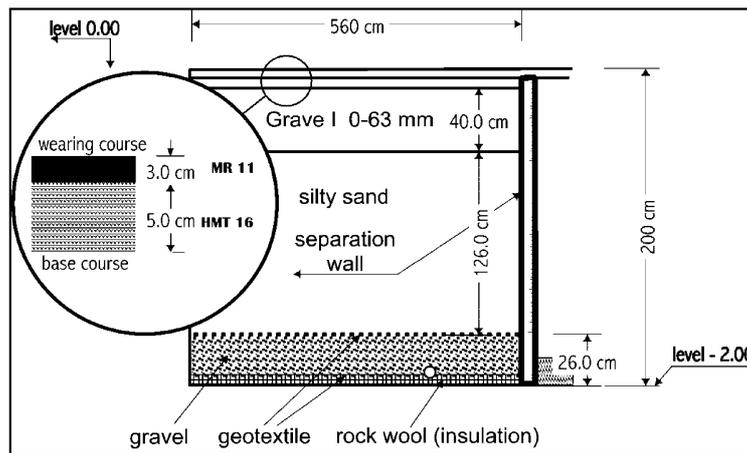


Figure 16 : Structure construite à la Halle-fosse (Turtschy et Perret 1999)

L'épaisseur totale des couches bitumineuses de la structure testée était de seulement 8 cm (5+3), choix dicté par le souhait d'obtenir une rupture par fatigue après un nombre relativement peu élevé de cycles lors de la seconde partie de l'expérience. La seconde couche bitumineuse est composée de HMT 16S selon (SN\_640431) alors que le reste de la chaussée est identique à ce qui a été présenté pour les enrobés à haut module.

### 3.2.2.2 Instrumentation et mesures

L'instrumentation des couches bitumineuses de cette section est similaire à celle pour les enrobés à module élevé, avec là aussi des jauges placées à l'interface des deux couches bitumineuses et au bas de la couche de base. Les cas de charge présentés dans le Tableau 2 ont été appliqués pour des températures comprises entre  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $30^{\circ}\text{C}$ , par échelon de  $10^{\circ}\text{C}$ . Conformément aux recommandations des fournisseurs, les pressions utilisées pour les roues jumelées étaient dans l'ensemble plus faibles que celles retenues pour les roues simples.

Tableau 2 : Cas de charge pour l'expérience du COST 333

Roues jumelées		Roue simple	
Pression (bars)	Charge (to)	Pression (bars)	Charge (to)
6.5	8.0	8.0	8.0
6.5	10.0	8.0	10.0
6.5	11.5	8.0	11.5
7.5	11.5	8.0	13.0
7.5	13.0	9.0	10.0
8.5	11.5	9.0	11.5
8.5	13.0	9.0	13.0

Les températures de référence pour chaque série de mesures étaient également relevées à 3 cm de profondeur dans les couches bitumineuses (bas de la couche de roulement).

### 3.2.2.3 Principaux résultats de l'expérience

Le résultat principal de cette expérience est la création d'une banque de données de mesures de déformations et de déplacements dans une structure souple, et ceci pour de nombreux cas de charge et pour différentes conditions de température.

Ces mesures ont été utilisées dans le cadre du projet de recherche européen AMADEUS<sup>29</sup> (AMADEUS 2000) et dans le cadre d'une thèse de doctorat menée en rapport avec l'action consacrée à l'utilisation des matériaux non liés dans la construction routière (Mayoraz 2002) et (COST\_337 2001).

### 3.2.3 Troisième campagne : Confirmation de la durée de vie d'une superstructure autoroutière (autoroute A9)

Ces mesures ont été effectuées dans le cadre d'un mandat financé par le département des transports, de l'équipement et de l'environnement (DTEE) du canton du Valais. Ce projet visait à confirmer la durée de vie d'une section de chaussée proposée comme variante par une entreprise en se basant sur des mesures in situ des déformations au bas des couches bitumineuses. Il faisait suite à un premier mandat dans lequel le LAVOC avait validé la variante d'entreprise sur la base de calcul théorique. Les résultats détaillés de ce mandat, y compris la description complète de l'instrumentation et les résultats des essais en laboratoire, sont disponibles dans un rapport (Perret 2001b).

#### 3.2.3.1 Description des structures

Deux sections ont été instrumentées pour ce mandat, une en plein air à l'entrée de la tranchée couverte de Sierre-ouest (Crête-Plane Alusuisse), appelée « Entrée tunnel », et l'autre à l'abri des intempéries dans cette même tranchée, appelée « Tunnel ». Ces deux sections ont des structures qui ne se différencient que par leurs couches de fondation (Figure 17).

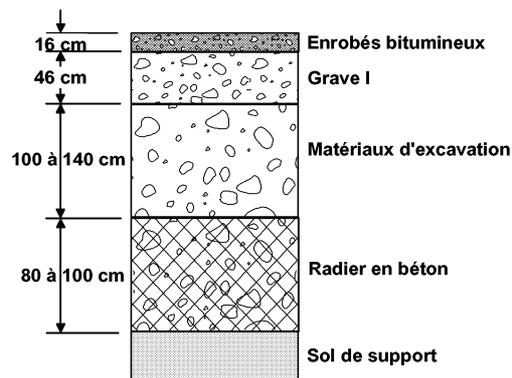


Figure 17 : Coupe générale de la section "Tunnel" sur l'autoroute A9

<sup>29</sup> Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures

Pour la section « Entrée tunnel », les trois couches de fondation (Grave I, Matériaux d'excavation et Radier en béton) sont remplacées par une seule couche de Grave I de 100 cm d'épaisseur. La structure des couches bitumineuses est identique pour les deux sections (Figure 18).

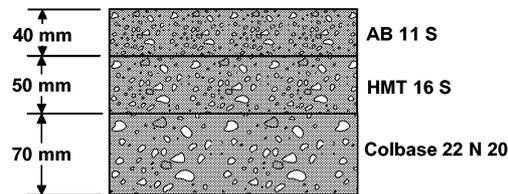


Figure 18 : Détail des couches bitumineuses des sections instrumentées sur l'autoroute A9

### 3.2.3.2 Instrumentation et mesures

Des jauges de déformations longitudinales ont été installées au bas des couches bitumineuses. Afin d'obtenir une image du bassin des déformations à proximité de la charge, ces jauges ont été réparties transversalement sur une largeur d'environ 1 m autour d'un axe théorique de passage des roues des poids lourds.

Des mesures ont été effectuées avec deux types de véhicules (2 et 4 axes) équipés de pneus simples et de jumelages. Le second véhicule a eu deux chargements différents, ce qui conduit à un total de trois cas de charge. La vitesse des véhicules lors des mesures était comprise entre 30 et 80 km/h. De plus, quelques mesures ont été faites en cours de construction de la chaussée, lorsque l'ensemble des couches bitumineuses n'avait pas été mis en place.

### 3.2.3.3 Principaux résultats de l'expérience

Cette étude a permis de confirmer l'estimation des durées de vie effectuée avant la réalisation de la chaussée. Par ailleurs, la corrélation entre les amplitudes maximales obtenues à partir des mesures in situ et celles résultant des modélisations élastiques est très satisfaisante pour les déformations longitudinales au bas des couches bitumineuses. Enfin, la durée de vie des structures obtenue à partir des mesures in situ et des essais de matériaux en laboratoire est supérieure à celle établie sur la base des hypothèses de la méthode française de dimensionnement.

### 3.2.4 Quatrième campagne : Estimation de la durée de vie d'une superstructure après renforcement (autoroute A1)

Ces mesures ont été financées par un mandat attribué au LAVOC par le département des infrastructures du canton de Vaud. Ce projet visait à estimer la durée de vie d'une section de chaussée renforcée en se basant sur des mesures in situ des déformations. Les sections instrumentées sont situées sur l'autoroute A 1 entre Lausanne et Morges, à la hauteur de Lonay. Les résultats détaillés de ce mandat, y compris la description complète de l'instrumentation et les résultats des essais en laboratoire, sont disponibles dans un rapport (Perret 2001a).

### 3.2.4.1 Description des structures

Deux sections ont été instrumentées pour ce mandat, une dans chacune des directions de l'autoroute. Ces sections ont la même structure qui se compose de cinq couches distinctes (Figure 19 et Figure 20).

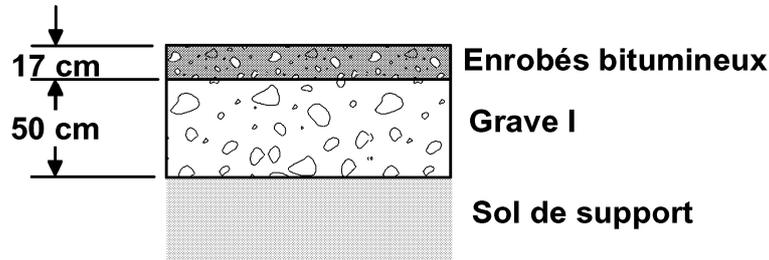


Figure 19 : Coupe générale des sections instrumentées sur l'autoroute A1

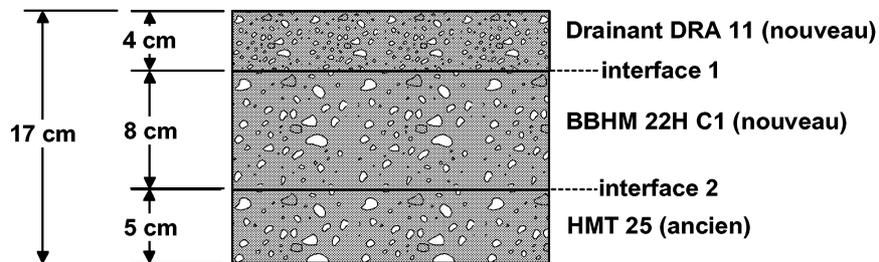


Figure 20 : Coupe des sections instrumentées sur l'autoroute A1, détail des couches en enrobés

### 3.2.4.2 Instrumentation et mesures

Des jauges de déformations ont été installées au bas de la nouvelle couche bitumineuse en BBHM 22H. Comme pour les mesures sur la A9 et pour les mêmes raisons, les jauges ont été réparties transversalement sur une largeur d'environ 1 m sur une section et sur un peu plus de 1,5 m sur l'autre section.

Les mesures ont été effectuées lors du calibrage d'une station WIM située à proximité de la section instrumentée. La charge totale du véhicule et sa répartition entre les différents axes sont demeurées constantes pour l'ensemble des mesures. La vitesse du véhicule (env. 80 km/h) était approximativement la même pour chaque mesure. La température des couches bitumineuses durant les mesures était relevée toutes les 15 minutes.

### 3.2.4.3 Principaux résultats de l'expérience

Les durées de vie obtenues à partir des mesures in situ tendent à confirmer l'efficacité de la variante de renforcement mise en place sur cette autoroute. Cette expérience montre encore que la corrélation entre les amplitudes maximales mesurées in situ et celles obtenues par modélisation élastique est très satisfaisante pour les déformations longitudinales au bas de la couche de renforcement. Comme pour l'expérience précédente (autoroute A9), les résultats obtenus montrent que la méthode française donne des durées de vie inférieures à celles obtenues à partir des mesures in situ.

### 3.3 Description du dispositif d'essai de la Halle-fosse et conditions expérimentales

Le dispositif d'essai de la Halle-fosse existe depuis de nombreuses années et il a été le cadre de plusieurs essais en vraie grandeur visant à tester des superstructures routières dans des conditions particulières (Pigois, Dumont et al. 1983), (Pigois, Ullidtz et al. 1989), et (Dumont, Sahli et al. 1994).

L'essentiel de ce travail se rapporte à des mesures effectuées dans le cadre de l'expérience d'évaluation du comportement des enrobés à haut module (cf. § 3.2.1). Il est par conséquent nécessaire de décrire plus dans le détail les conditions d'essais, les acquisitions de mesures de réponses et leur dépouillement et les procédures de contrôle mises en place.

#### 3.3.1 Simulateur de trafic lourd

Le simulateur de trafic lourd équipant la Halle-fosse est constitué d'un essieu de camion et permet de reproduire aussi fidèlement que possible les charges appliquées aux chaussées routières par le trafic lourd. L'essieu est monté sur un rail de guidage rectiligne et suit un mouvement de type alternatif (Figure 21).

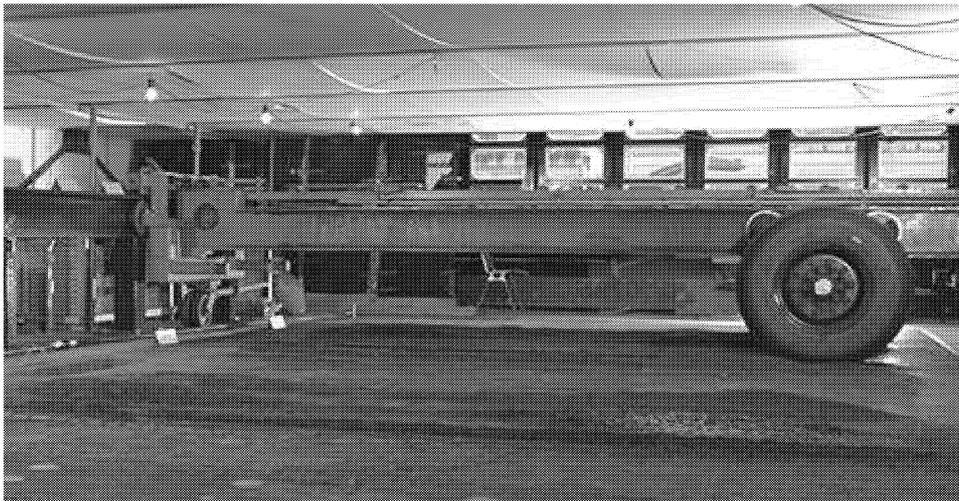


Figure 21: Simulateur de trafic lourd de la Halle-fosse

Les principales caractéristiques du simulateur sont les suivantes :

- charge de l'essieu : max. 130 kN
- roues jumelées ou simples
- vitesse de déplacement : max. 12 km/h
- déplacement transversal : max.  $\pm 40$  cm
- longueur totale de roulement : 4 m, dont 2m à vitesse constante
- fréquence : jusqu'à 2000 passages/heure

### 3.3.2 Jauges de mesure pour les déformations horizontales

Ces jauges ont été installées au bas des couches bitumineuses et au bas de la couche de roulement. Ce sont des jauges de contrainte de type Kyowa qui sont spécialement préparées par le LAVOC avec des barrettes métalliques fixées aux extrémités afin d'assurer une bonne liaison entre la jauge et les matériaux bitumineux (Figure 22 et annexe 11.3). Elles servent à mesurer les déformations horizontales dans les enrobés bitumineux et ont été disposées de façon à obtenir des mesures longitudinales et transversales (Figure 22).

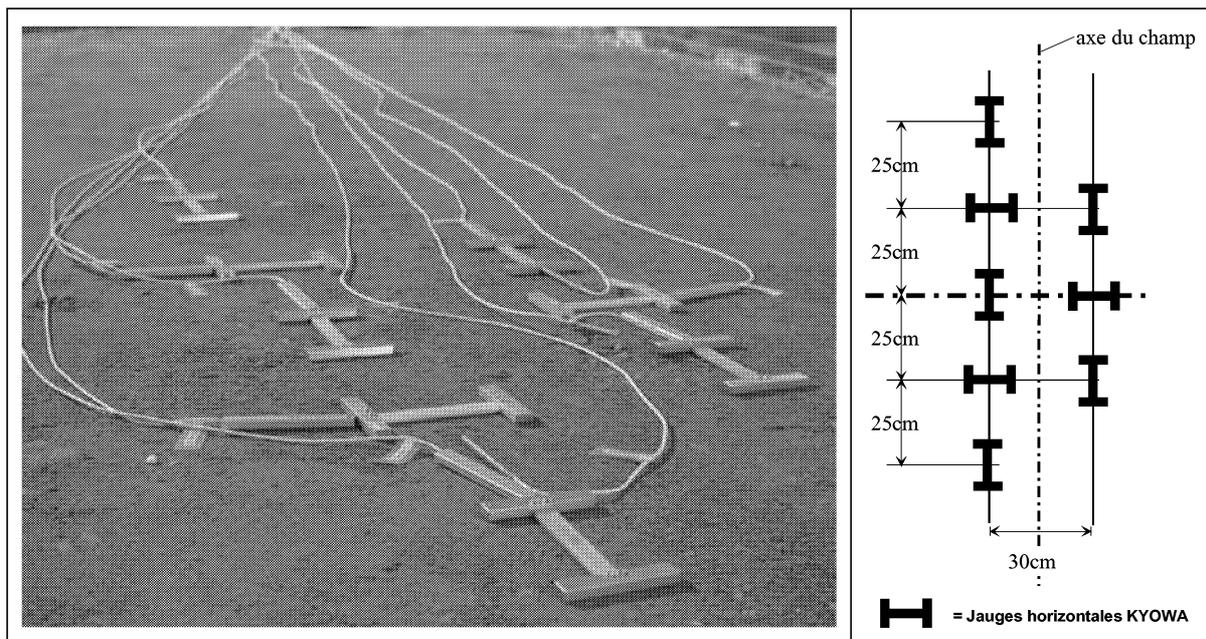
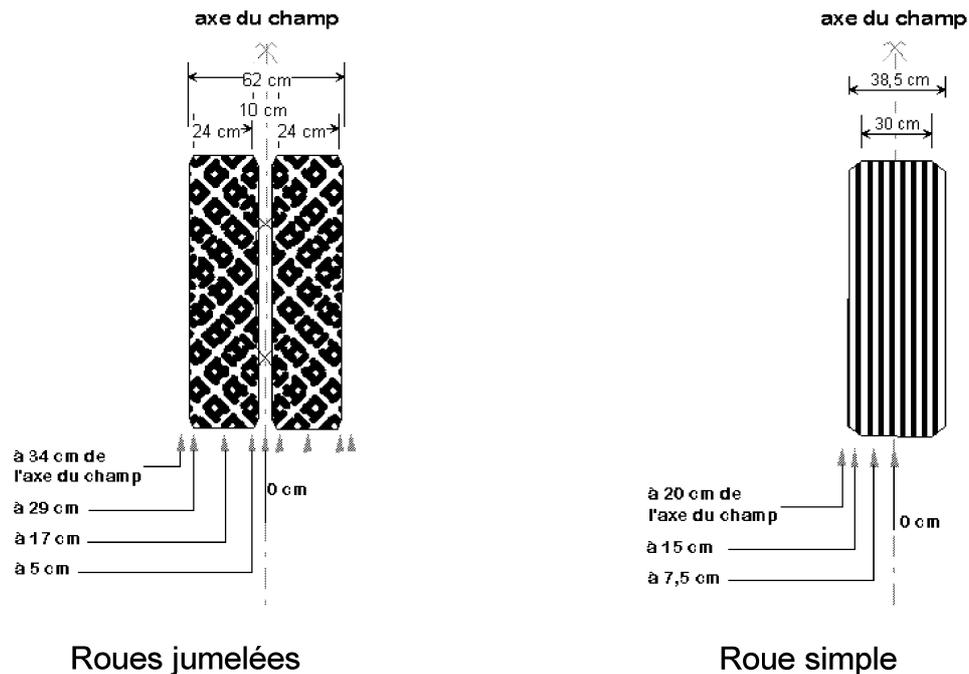


Figure 22: Jauges de mesure pour les déformations horizontales type Kyowa et répartition horizontale

Plusieurs expériences internationales en vraie grandeur, (OCDE 1985), (Dumont et Scazziga 1985) et (OCDE 1991a), au sein desquelles le LAVOC a joué un rôle particulièrement actif, ont été effectuées pour évaluer les méthodes de mesures des déformations dans les matériaux bitumineux des chaussées souples. Ces jauges y ont été évaluées et leur comportement a été jugé globalement très satisfaisant.

De plus, elles ont été testées en laboratoire au cours du projet afin de s'assurer de leur fiabilité avant la mise en place (Van Dommelen 1998). Ce test consistait à solliciter une jauge avec des conditions de déplacement clairement définies et mesurables (flèche d'une poutre simple) à partir desquelles il est possible de calculer les déformations au milieu de la poutre par une simple relation géométrique ne faisant pas intervenir les propriétés des matériaux. Les résultats de ce test se sont révélés parfaitement concluants, l'adéquation entre les mesures de la jauge et les déformations calculées à partir de la flèche étant quasiment parfaite (écart maximal de 3,8 %).

Pour chacun des cas de charge et afin d'avoir une vision de la répartition latérale des déformations, les mesures ont été effectuées en changeant la position latérale du simulateur de trafic. Ces positions latérales ont été différenciées pour les deux types de pneus : neuf positions latérales ont été définies dans le cas des roues jumelées et sept pour les roues simples (Figure 23).



**Figure 23 :** Positions latérales par rapport à l'axe du champ pour les mesures de réponses et pour les deux types de roue

### 3.3.3 Acquisition de mesures et détermination des amplitudes maximales

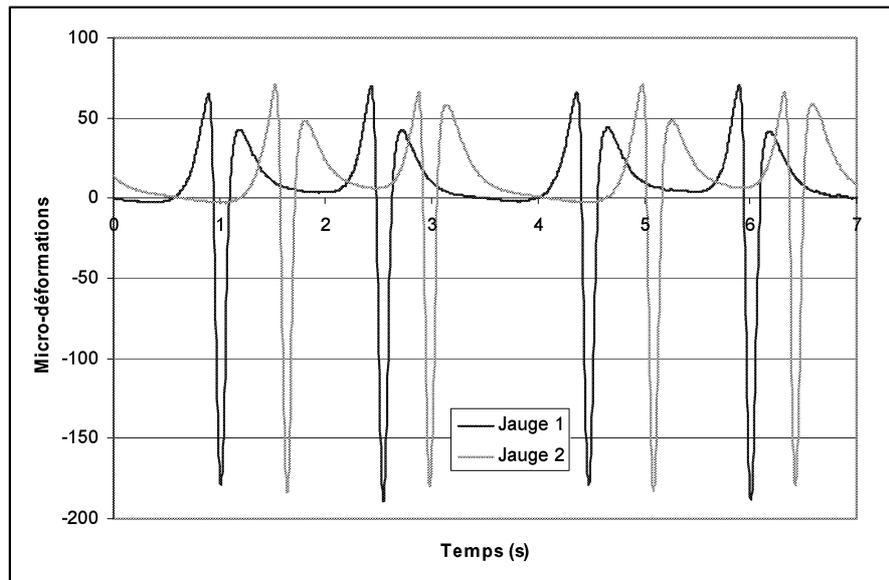
La lecture des différentes jauges se fait à l'aide d'un système d'acquisition de données présentant deux modules séparés pouvant être contrôlés par un seul logiciel. Le premier module permet de lire toutes les jauges de déformations alors que le second enregistre les mesures de température.

Les signaux transmis par les jauges de déformations lors du passage des charges ont été enregistrés selon une fréquence de 150 Hz. Compte tenu de la vitesse maximale théorique du simulateur (environ 12 km/h), cette fréquence correspond à des écarts maximaux de 2 cm environ entre les points de mesures. La durée d'une acquisition de données<sup>30</sup> a été fixée à 7,5 secondes couvrant ainsi deux allers-retours du simulateur et permettant l'enregistrement de quatre signaux pour chaque capteur et chaque mesure. Cette situation implique qu'une jauge fournit quatre signaux complets pour chaque mesure et chaque position.

La disposition de l'instrumentation fait que les déformations en un point donné peuvent avoir été mesurées par différentes jauges<sup>31</sup> dont les résultats ne sont forcément pas systématiquement égaux (Figure 24).

<sup>30</sup> On entend par données, les acquisitions de mesures correspondant à un cas de charge appliqué pour une position latérale et une température

<sup>31</sup> Dans le meilleur des cas, trois jauges compte tenu des pertes et des limites du système d'acquisition (cf. annexe 11.3)

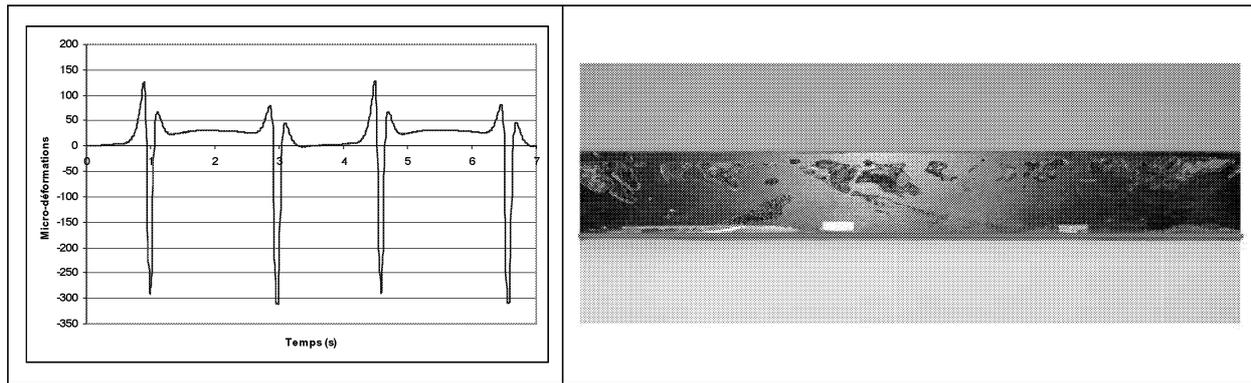


**Figure 24 :** Signaux expérimentaux (quatre passages de la charge) provenant de deux jauges différentes ; déformations longitudinales au bas de la couche de base

Sur cette figure, le premier et le troisième signal sont obtenus avec la charge circulant dans une direction alors que le deuxième et le quatrième sont obtenus avec un mouvement dans l'autre direction.

Au premier abord, les déformations enregistrées par ces deux jauges sont très similaires, confirmant de la sorte la qualité et la fiabilité du système de mesure. Toutefois, de légères différences peuvent être notées entre ces deux signaux. Si les déformations enregistrées par la jauge 1 lors du passage de la charge ne varient presque pas selon la direction de circulation, il n'en va pas de même pour la jauge 2. Dans ce cas, les valeurs des contractions enregistrées avant et après le passage de la roue diffèrent selon la direction de déplacement de la roue et les retours à la position zéro entre les passages de la charge ne sont pas non plus parfaitement identiques. Dans ces situations, lorsque plusieurs jauges étaient disponibles pour une même mesure, le choix s'est porté sur celle fournissant des signaux aussi semblables que possibles dans les deux directions.

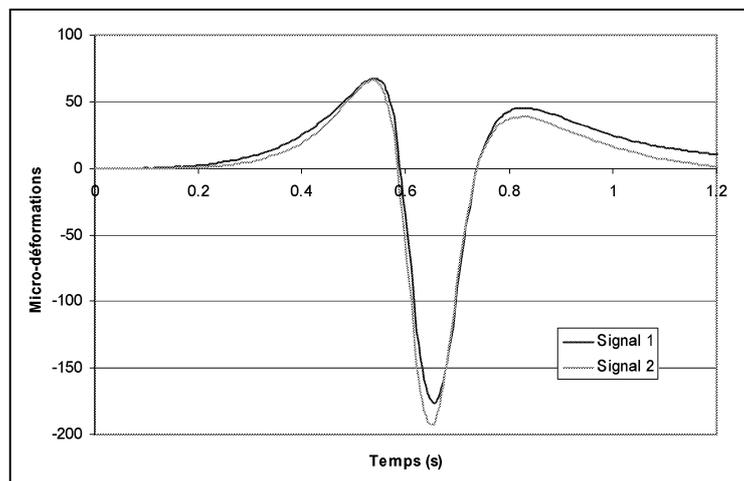
Des irrégularités de ce genre (variation des pics de contraction et des retours à zéro) ont également été observées lors de l'expérience du COST 333 (cf. § 3.2.4) et elles ont pu être expliquées par le fait que la jauge de mesure n'est pas exactement positionnée horizontalement. Lors du démontage de cette expérience, une jauge présentant des signaux fortement différenciés a été récupérée et il s'est avéré qu'elle n'était pas parfaitement horizontale (Figure 25).



**Figure 25 : Signal fortement différencié et positionnement horizontal de la jauge ayant servi à sa mesure (expérience COST 333)**

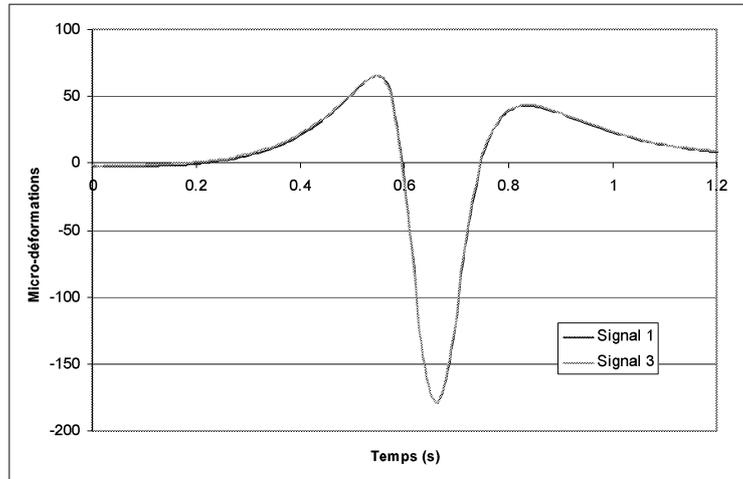
Il est très délicat de garantir une parfaite horizontalité des jauges de mesure, notamment en raison des inévitables mouvements qu'elles subissent durant la pose des matériaux bitumineux. De ce point de vue, il est intéressant de disposer de mesures dans les deux directions : Cette situation permet de détecter des éventuels défauts de positionnement. Une mesure dans une seule direction avec une jauge mal positionnée risque de conduire à des interprétations erronées des signaux, notamment pour ce qui est du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, qui se caractérise notamment par des différences entre les contractions enregistrées avant et après le passage de la charge.

Malgré cette première sélection et même pour une jauge donnant des signaux pouvant être admis comme réguliers selon les deux directions (jauge 1 de la Figure 24), les mesures obtenues selon les deux directions de déplacement de la charge ne sont jamais parfaitement identiques (Figure 26).



**Figure 26 : Superposition de deux signaux de déformations fournis par une même jauge pour un même cas de charge si la jauge est abordée selon des directions opposées**

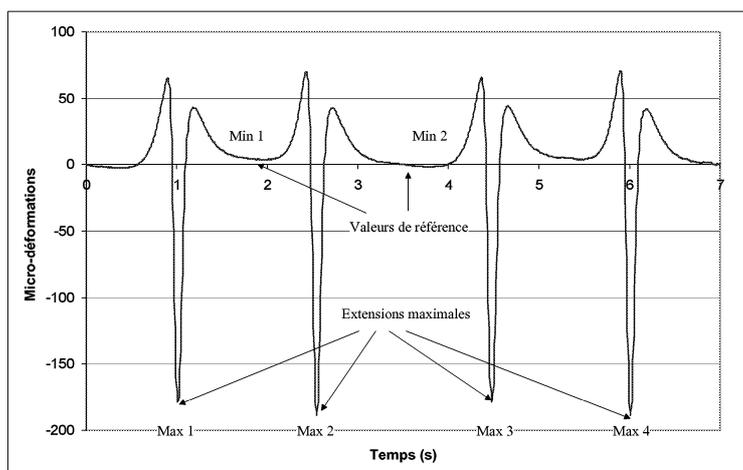
En revanche, la répétitivité des mesures est quasiment parfaite pour deux signaux différents correspondant à une même direction de mesure (Figure 27).



**Figure 27 : Superposition de deux signaux de déformations fournis par une même jauge pour un même cas de charge si la jauge est abordée selon la même direction**

Ces observations prouvent que malgré une grande qualité de mesures, il n'est pas aisé de définir une valeur unique correspondant à l'amplitude maximale de déformation. C'est pourtant une valeur unique de déformation au bas de la couche de base qui est utilisée comme principal critère de dimensionnement dans les méthodes mécaniques empiriques.

Partant de ces constats, une procédure informatisée pour la détermination des amplitudes maximales a été instaurée à l'aide d'un logiciel développé au LAVOC dans le cadre de la contribution suisse au projet COST 333 (Turtschy et Perret 1999). Elle vise à obtenir des valeurs extrêmes (maximum et minimum) des amplitudes. Pour chaque signal, des valeurs spécifiques ont été automatiquement extraites (Figure 28.).



**Figure 28 : Détermination des amplitudes de déformations longitudinales à partir des signaux expérimentaux de la Halle-fosse**

A partir des quatre extensions maximales (Max 1 à 4) et des deux valeurs de référence (Min 1 et 2), il est possible de définir des amplitudes maximales et minimales en utilisant les valeurs extrêmes obtenues pour chaque position. L'amplitude maximale est obtenue en utilisant le maximum des maximums et le minimum des minimums alors que l'amplitude minimale s'obtient à partir du minimum des maximums et du maximum des minimums.

### 3.3.4 Conditions d'essais

Le principal avantage de l'installation de la Halle-fosse est que la plupart des paramètres influençant les mesures de déformation dans les couches bitumineuses (température, intensité de la charge, pression des pneumatiques et types de roue) peuvent être contrôlés.

#### 3.3.4.1 Contrôle de la température

Le contrôle de la température est possible grâce à la construction d'une tente autour du simulateur de trafic.

Un système calorifique permet de réguler et contrôler la température aussi bien en surface qu'au fond de la fosse<sup>32</sup>. La mise en température des structures s'est faite par propulsion d'air chaud à l'intérieur de la tente, donc par la surface, ce qui conduit à une distribution non uniforme de la température dans les couches. En plus de la température ambiante de l'air, le relevé des températures est effectué à chacune des interfaces des structures. Ces températures ont été systématiquement relevées dans des fiches d'essai au début et à la fin des mesures pour chaque cas de charge. Par ailleurs, en cours d'expérience, des mesures toutes les 30 secondes permettaient de limiter les variations.

La température de référence est prise au bas de la couche de roulement, soit à une profondeur de 3 cm pour toutes les sections. Cependant, les températures ont légèrement varié au cours des expériences et le système de mise en température implique des légères différences entre les valeurs au sommet et au bas des couches bitumineuses. Toutefois, ces variations et ces différences sont toujours restées inférieures à 3°C, permettant d'admettre une valeur uniforme et constante de la température pour les matériaux bitumineux.

#### 3.3.4.2 Contrôle des conditions de charge

En plus du choix du type de pneu, la mise en charge implique la vérification de l'intensité de la charge de l'essieu ainsi que celle de la pression de gonflage des pneumatiques. L'installation permettant l'application de la charge (système hydraulique) a été étalonnée en début d'expérience alors que la pression des pneumatiques était contrôlée par un manomètre de précision. Une procédure systématique pour la mise en charge et comprenant des contrôles au début et à la fin de chaque expérience a été appliquée. L'intensité de la charge et les pressions des pneumatiques ont été relevées dans les fiches d'essai déjà mentionnées dans le

---

<sup>32</sup> Il n'y a pas eu de régulation de la température par le fond de la fosse

cadre du contrôle de la température. Les contrôles ainsi mis en place n'ont révélé aucun dysfonctionnement dans l'application de la charge.

#### 3.3.4.3 Contrôle de la position de la charge

Il a été signalé que les mesures ont été effectuées pour différentes positions latérales de la charge (cf. § 3.2.1.2). Par ailleurs, les jauges dans les couches bitumineuses ont été légèrement déplacées transversalement lors de la construction des sections, rendant incertaine leur position réelle. Ces déplacements n'ont pas été identiques pour toutes les profondeurs ni pour tous les champs<sup>33</sup>. Des mesures ont été faites pour déterminer la position réelle des jauges, mais ces positions ont une précision d'environ 2 cm. De plus, un contrôle systématique et exact de la position transversale du simulateur de trafic lors de l'application des charges n'est pas possible. En effet, le positionnement latéral n'est assuré qu'à une seule extrémité du simulateur et sa mise en place se fait visuellement. La précision est ici de l'ordre du centimètre.

D'autre part, il convient de signaler qu'aucun contrôle de la position longitudinale de la roue pendant les mesures n'est installé à la Halle-fosse. La position exacte de la charge lorsque le maximum d'amplitude est mesuré n'est pas connue. Compte tenu du comportement visqueux des matériaux bitumineux, il doit exister un décalage temporel entre l'application de la charge et son effet en terme de déformation qui fait que le milieu de la charge ne se trouve pas forcément au droit du point de mesure lorsque l'amplitude maximale est enregistrée.

### 3.4 Description des signaux de déformations expérimentaux dans les couches bitumineuses

Afin de faciliter l'analyse des résultats expérimentaux, il est nécessaire de faire quelques remarques préliminaires concernant la forme générale des signaux enregistrés lors du passage d'une charge. Ces remarques concernent les signaux de déformations horizontales au bas de la couche de base et ceux au bas de la couche de roulement. Dans les deux cas, la forme générale des signaux de déformations se distingue selon la direction longitudinale ou transversale dans laquelle les mesures sont effectuées. Pour comprendre l'allure générale des signaux, il est utile d'avoir une idée de la déformée des couches bitumineuses durant le passage d'une charge de trafic (Figure 29).

---

<sup>33</sup> Pour des raisons organisationnelles, la pose des matériaux bitumineux n'a pas pu être effectuée systématiquement selon la même direction, impliquant ces mouvements différenciés

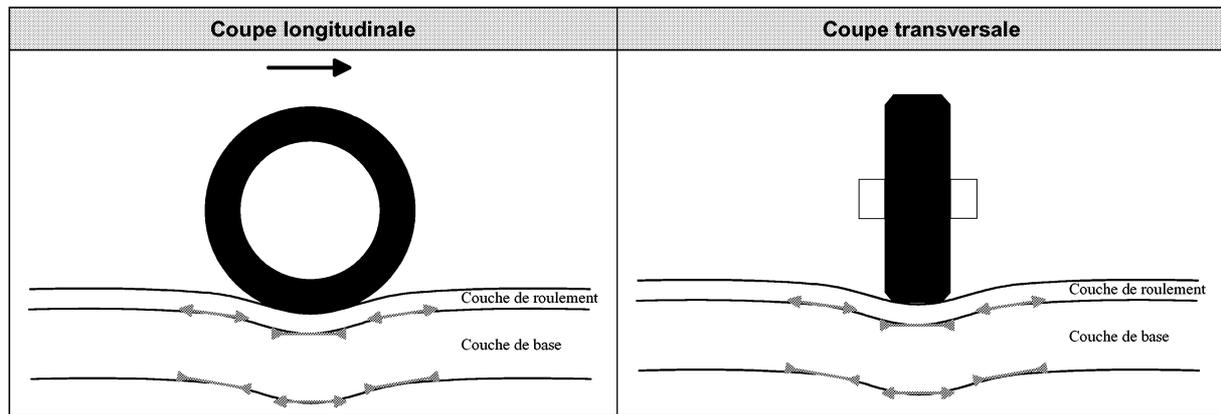


Figure 29 : Déformée des couches bitumineuses lors du passage d'une roue

Ces déformées permettent d'anticiper l'allure générale des signaux de déformations longitudinaux et transversaux en fonction du déplacement de la charge.

L'image de gauche montre que les matériaux subissent des déformations longitudinales alternant entre contraction et extension durant le passage de la charge. Cette alternance existe quelles que soient la position latérale et la profondeur de mesure envisagée<sup>34</sup>. De plus, selon la profondeur, l'alternance se fera toujours dans le même ordre, soit :

- au bas de la couche de roulement : extension – contraction – extension
- au bas de la couche de base : contraction – extension – contraction.

De son côté, l'image de droite montre qu'il n'y a pas d'alternance des déformations transversales durant le passage de la charge : les matériaux sont toujours soit en contraction, soit en extension. Ils sont en contraction ou en extension selon la position du point de mesure, tant latéralement (position par rapport au centre de la charge) que verticalement (profondeur dans les couches bitumineuses). En simplifiant, il est possible de résumer de la façon suivante :

- au bas de la couche de roulement : contraction dans la zone sous la charge et extension en dehors de cette zone
- au bas de la couche de base : extension dans la zone sous la charge et contraction en dehors de cette zone.

Passées ces considérations générales, il est nécessaire de séparer les signaux de déformations en fonction de la profondeur. Les signaux retenus pour ce qui suit correspondent à des mesures effectuées au centre de la charge. L'évolution de ces signaux en fonction de la position latérale sera abordée ultérieurement (cf. § 4.3)

<sup>34</sup> Il est utile ici de proposer une analogie avec les déformations d'une poutre encadrée soumise à une charge ponctuelle : la fibre inférieure est tendue au droit de la charge (alors que la fibre supérieure est contractée) et cette situation s'inverse au-delà des points d'inflexion situés de part et d'autre de la charge

### 3.4.1 Déformations horizontales au bas de la couche de base

La forme générale des signaux de déformations au bas des couches de base n'est pas influencée par la température et les signaux présentés correspondent à une température de 30°C (Figure 30).

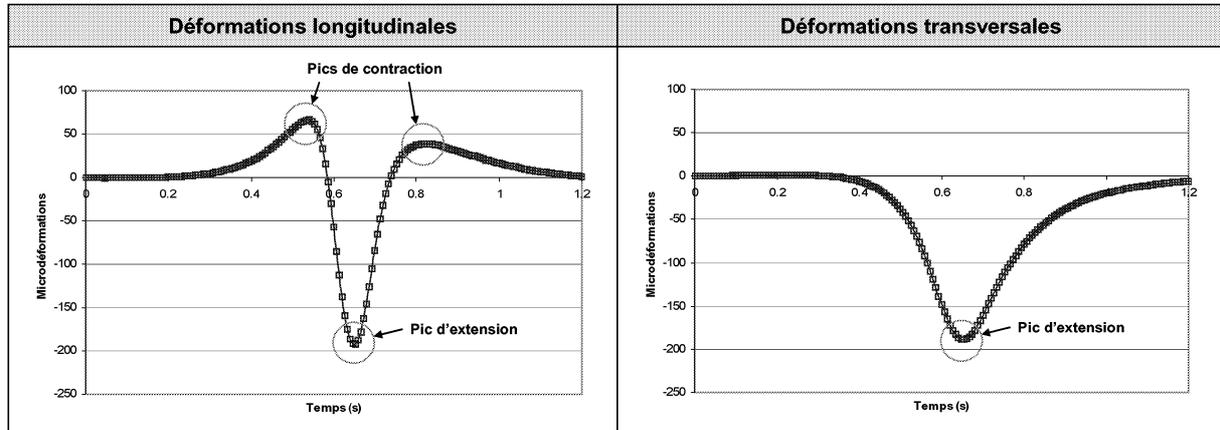
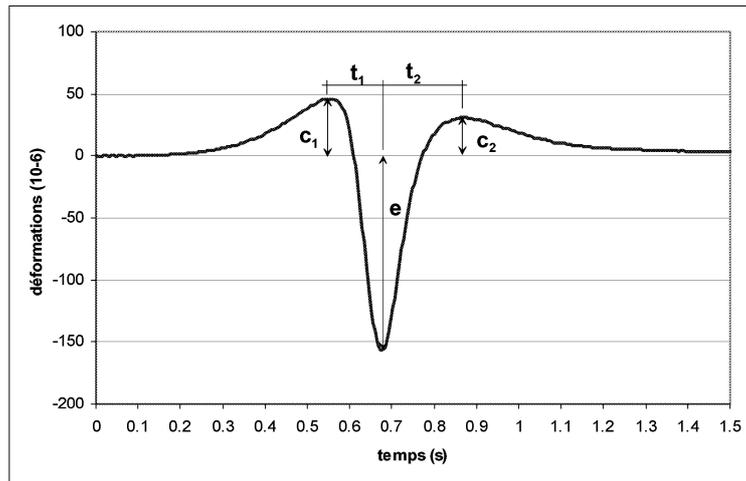


Figure 30 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de base

Comme escompté à partir des déformées (Figure 29), les sollicitations longitudinales et transversales se différencient principalement par le fait que les premières présentent une alternance des déformations lors du passage de la charge. Cette alternance se traduit sur les signaux par les pics de contraction visibles sur l'image de gauche. En revanche, les secondes sont uniquement en extension. Par ailleurs, tous les signaux présentent une nette dissymétrie des courbes de part et d'autre des pics d'extension. Cette dissymétrie traduit le comportement viscoélastique des enrobés bitumineux. De plus, pour les mesures longitudinales, le pic de contraction avant le passage de la charge est plus important que celui après son passage. Il semble encore que les signaux transversaux indiquent une faible extension résiduelle après le passage de la charge.

Lors des analyses de signaux longitudinaux, les amplitudes des pics et leurs coordonnées temporelles seront utilisées à de nombreuses reprises, notamment par l'intermédiaire de ratios entre ces grandeurs. Ils seront désignés de la façon suivante (Figure 31).



**Figure 31 : Définition de valeurs caractéristiques des signaux longitudinaux au bas de la couche de base**

On définit les grandeurs suivantes :

- e = pic d'extension
- c<sub>1</sub> = pic de compression avant la charge
- c<sub>2</sub> = pic de compression après la charge
- t<sub>1</sub> = temps d'extension
- t<sub>2</sub> = temps de contraction
- t<sub>ch</sub> = temps de chargement, avec t<sub>ch</sub> = t<sub>1</sub> + t<sub>2</sub>

### 3.4.2 Déformations horizontales au bas de la couche de roulement

Pour les signaux au bas de la couche de roulement et par analogie avec ce qui a été observé jusque là, il semble logique que les signaux soient des images relativement symétriques de celles obtenues au bas des couches bitumineuses. Si tel est le cas, les signaux longitudinaux doivent présenter des extensions avant et après le passage de la charge alors qu'une importante contraction doit être visualisée lors du passage de la charge. Pour les signaux transversaux, on peut s'attendre à une simple contraction. Toutefois, la visualisation des signaux au bas de la couche de roulement montre que ce n'est que partiellement le cas (Figure 32).

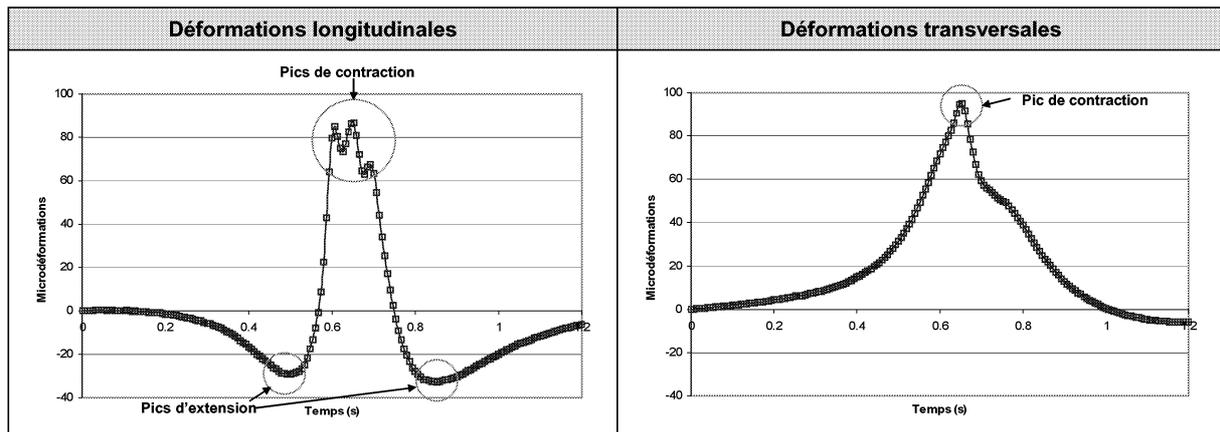


Figure 32 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (30°C)

Sur les signaux longitudinaux, les extensions escomptées avant et après le passage de la roue sont bel et bien présentes. En revanche, on observe que la zone de contraction ne présente pas un seul pic clairement défini, mais plutôt une zone avec des « irrégularités » qui semblent indiquer la présence de trois pics de contraction. Les signaux transversaux donnent en revanche une image relativement conforme à celle attendue, avec un seul pic clairement marqué. Toutefois, le signal semble également indiquer des « irrégularités » (variations de déformations étonnantes), surtout après ce pic.

Si le comportement viscoélastique se traduit à nouveau par une dissymétrie des signaux, celle-ci n'est pas similaire à celle observée au bas des couches, puisque l'extension mesurée avant le passage de la charge est inférieure à celle mesurée après. D'autre part, le passage de la charge semble se traduire par la présence de déformations résiduelles en traction. Si ces observations concernant la visibilité du comportement viscoélastique sont valables pour toutes les mesures à 30°C, elles ne sont pas entièrement similaires pour d'autres températures, comme le montrent des signaux enregistrés à 5°C (Figure 33)<sup>35</sup>.

<sup>35</sup> Les signaux mesurés à 15°C sont similaires à ceux de 5°C

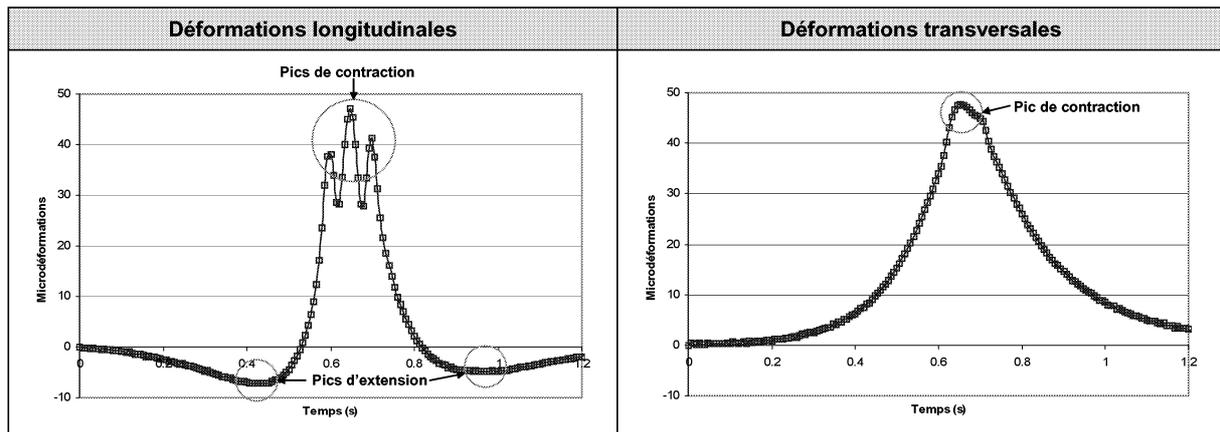


Figure 33 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (5°C)

Si cette figure confirme la présence des trois pics sur le signal longitudinal et des variations étonnantes des déformations sur le transversal, elles donnent en revanche une image moins surprenante des effets de la viscosité avec une extension supérieure avant le passage de la roue et une contraction résiduelle sur le signal transversal. Comme pour les déformations au bas des couches bitumineuses, ces divers aspects sont traités lors de l'analyse des signaux expérimentaux au bas de la couche de roulement (cf. § 5).

### 3.5 Matériaux posés à la Halle-fosse et hypothèses pour les modélisations

Lorsqu'on dispose de données expérimentales, une des méthodes les plus utilisées dans le domaine de la construction routière pour déterminer les paramètres décrivant le comportement des matériaux, est d'avoir recours au procédé du calcul inverse, en anglais « backcalculation » (Ullidtz 1998). Cette procédure consiste à chercher quelles sont les valeurs pour des paramètres qui conduisent à la meilleure estimation des mesures à disposition. Cette procédure a été rigoureusement écartée du cadre de ce travail. Il a été décidé de n'utiliser que des résultats d'essais en laboratoire ou des hypothèses<sup>36</sup> issues de méthodes de dimensionnement mécaniques empiriques. Une seule dérogation à ce principe a été faite dans le cadre des calculs viscoélastiques, lorsque des données de laboratoire n'étaient que partielles<sup>37</sup>. Les valeurs des paramètres utilisées dans les modélisations n'ont jamais été modifiées dans le but d'accorder leurs résultats avec ceux des mesures expérimentales.

Les hypothèses retenues dans cette étude pour les modélisations sont conformes aux recommandations de la méthode française de dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC 1994). Ces hypothèses concernent principalement les conditions de collage entre les couches - admises comme étant parfaitement collées entre elles - et les propriétés élastiques des matériaux pour les diverses couches.

<sup>36</sup> Ces hypothèses concernent notamment les matériaux non liés dont le comportement est admis élastique linéaire avec des valeurs limites et relatives de modules

<sup>37</sup> Non enregistrement des angles de phase lors d'un essai de module complexe

### 3.5.1 Matériaux mis en place à la Halle-fosse et propriétés élastiques

Les deux structures en vraie grandeur de la Halle-fosse se différencient par l'épaisseur et la composition de leur couche de base (cf. § 3.2.1).

#### 3.5.1.1 Enrobés bitumineux des couches de base et de roulement

Les enrobés bitumineux ont les compositions suivantes :

**Tableau 3 : Composition des enrobés bitumineux posés à la Halle-fosse**

		MR 11	HMT 22s	EME2
Composition de l'enrobé	Liant / enrobé [%]	5,83	4.13	5.70
	# 0.09	9,1	6.9	9.4
	# 2.8	28,4	29.8	37.8
	# 5.6	32,2	43.7	54.7
	#11.2	99,0	66.4	77.1
	# 16.0	100,0	83.3	89.5
	# 22.4	-	96.5	97.4
Essai Marshall	HM [%]	6,6	5.8	2.5
	SM [kN]	6,0	12.7	15.1
	FM [mm]	3,1	2.3	4.3
Essai à la PCG	Compacité à 1 giration [%]		78.1	82.7
	Compacité à 120 girations [%]		94.8	97.5
	Pente [-]		3.5	3.1
Liants	Type	Colflex N55	B 80/100	Mixelf 10/20
	Temp. A&B, °C	55,7	47,8	64,7
	Indice de pénétration IP	0,2	-0,3	-0,3
	Point de Fraass, °C	-16	-19	-8
	Pénétration, 1/10mm	50	89	18

Les matériaux pour les essais en laboratoire ont été prélevés de la manière suivante :

- couche de base en HMT 22s ou en EME2 : éprouvettes découpées directement dans des plaques prélevées sur les sections instrumentées
- couche de roulement en MR 11 : matériaux prélevés lors de la pose puis réchauffés en laboratoire pour confectionner les éprouvettes.

La méthode française recommande de choisir le module des matériaux bitumineux sur la base d'essais de module complexe sur éprouvette trapézoïdale : les valeurs des modules utilisés dans cette étude sont issues des résultats de cet essai en laboratoire (NF\_P98-260-2). Les résultats détaillés de ces essais sont donnés en annexe 11.4.

Le module complexe des enrobés bitumineux dépend de la fréquence et de la température (cf. § 2.4.2). Si le choix de cette dernière est relativement aisé dans le cadre des expériences en vraie grandeur à la Halle-fosse, la définition de la

fréquence est plus délicate compte tenu que, contrairement à celles utilisées lors d'essais en laboratoire, les sollicitations réellement subies par les chaussées ne sont pas périodiques et qu'il n'est donc pas aisé de leur associer une fréquence. Pour contourner cette difficulté, il est généralement admis que la fréquence dépend de la vitesse de passage de la charge. Cependant, les études concernant les relations entre ces deux valeurs sont peu nombreuses. Dans le logiciel de formulation PRADO (Francken 1997) édité par le CRR, la relation suivante est utilisée :

$$f(\text{Hz}) = 0,45 \cdot V(\text{km/h})$$

avec :

f = fréquence (Hz)

V = vitesse (km/h)

D'un autre côté, il est à noter que la méthode française de dimensionnement impose d'utiliser la valeur du module complexe à 10 Hz pour les calculs élastiques des contraintes et déformations.

Les essais de module complexe réalisés sur les matériaux prélevés à la Halle-fosse ont été effectués pour des températures comprises entre - 10 et 45°C par intervalles de 5°C et pour des fréquences variant de 8 à 50 Hz. La vitesse théorique de déplacement des charges à la Halle-fosse est de 12 km/h, ce qui compte tenu de la formule du CRR conduit à une fréquence légèrement inférieure à 6 Hz.

### 3.5.1.2 Matériaux de la couche de fondation

La couche de fondation est composée de 40 cm de grave I 0/60 selon (SN\_670120). Pour les modules des matériaux non liés, la méthode française donne une valeur limite supérieure de 360 MPa. De plus et pour tenir grossièrement compte de la non linéarité de ces matériaux, elle propose de décomposer la couche de fondation en plusieurs couches dont les modules vont en augmentant lorsqu'on approche de la surface. Le comportement de ces matériaux n'étant pas au centre du travail, on se contentera de cette simplification. Signalons toutefois l'existence de méthodes permettant une meilleure prise en compte du comportement réel des matériaux non liés (Sweere 1990), méthodes qui ne sont toutefois généralement pas prises en compte dans le cadre du dimensionnement.

Une valeur moyenne de 270 MPa pour le module élastique a été évaluée à partir d'essais de plaque. Conformément aux recommandations de la méthode française, cette couche a été divisée en deux sous-couches de 20 cm ayant respectivement des modules de 360 MPa (couche supérieure) et de  $E = 180$  MPa (couche inférieure). Ces valeurs ont été choisies de façon à obtenir une moyenne 270 MPa en tenant compte de la valeur maximale de 360 MPa.

Par ailleurs, les valeurs de module obtenues pour ce matériau par calcul inverse à partir de mesures au FWD (Viagroup 1998) sont situées entre 200 et 360 MPa avec une moyenne à 260 MPa, ce qui correspond bien aux valeurs utilisées.

### 3.5.1.3 Matériaux du sol de fondation et fond de la fosse

Le sol de fondation mis en place à la Halle-fosse est un sable fin 0/2 posé sur le fond en béton de la fosse. Une valeur moyenne pour le module élastique de  $E = 90$  MPa a été évaluée à partir d'essais de plaque. Les valeurs de modules obtenues pour ce matériau par calcul inverse à partir de mesures au FWD sont comprises entre 90 et 150 MPa avec une moyenne de 120 MPa.

### 3.5.1.4 Propriétés élastiques des matériaux

Conformément à la méthode française, les coefficients de poisson de tous les matériaux sont admis égaux à 0,35, à l'exception du béton du fond de fosse pour lequel une valeur de 0,20 est retenue.

Les modules des enrobés bitumineux correspondent à une fréquence de 8 Hz et sont définis en fonction de la température. Les autres matériaux présentent des caractéristiques indépendantes de la température. Les valeurs retenues pour les différents matériaux sont récapitulées dans le Tableau 4.

**Tableau 4 : Propriétés élastiques des matériaux**

Couches	Matériaux	Epaisseur (cm)	Module à 5°C et 8 Hz (MPa)	Module à 15°C et 8 Hz (MPa)	Module à 30°C et 8 Hz (MPa)	Coefficient de poisson (-)
Couche de roulement	MR 11	3	14'700	8'800	2'700	0,35
Couche de base	HMT 22s	14	12'400	7'100	2'300	0,35
Couche de base	EME2	7	19'500	13'700	5'900	0,35
Couche de fondation	Grave (0/60)	2x20	360 (supérieur) et 180 (inférieur)			0,35
Sol de fondation	Sable fin 0/2	143 ou 150	90			0,35
Fond de fosse	Béton	-	20'000			0,20

### 3.5.2 Modélisation de la charge

La modélisation de la charge est faite conformément aux hypothèses du modèle de Burmister, soit à partir d'une surface circulaire chargée par une pression verticale uniforme. La charge est définie à partir de son intensité et de la pression de contact sur la surface de roulement. Le rayon de la surface de contact est calculé à partir de ces deux valeurs. La pression est admise comme égale à celle des pneumatiques. Les pneus simples sont modélisés par une seule surface de contact alors que les jumelages cumulent l'effet de deux surfaces. Dans ce qui suit, cette modélisation de la charge est appelée **modélisation standard**.

### 3.6 Enseignements

Les **résultats expérimentaux** constituent une part essentielle de ce travail de thèse. Les conditions d'essais disponibles à la Halle-fosse présentent des atouts considérables pour les mesures de déformations dans des chaussées routières souples. Le fait de ne disposer que de mesures à faible vitesse est largement compensé par les nombreux autres avantages de l'installation :

- choix et contrôle de la température
- choix et contrôle de l'intensité de la charge
- choix et contrôle de la pression de gonflage des pneus
- choix du type de pneu
- choix des positions latérales des mesures.

Les méthodes de dimensionnement se basent sur des valeurs uniques de déformation obtenues en un point précis, généralement au centre de la charge. Face à l'abondance de ces données, le recours à un traitement automatisé visant à extraire les valeurs de référence utilisées pour le dimensionnement est indispensable et a été appliqué dans le cadre de ce travail. Toutefois, elle ne permet pas d'exclure la **visualisation individuelle des signaux expérimentaux**.

L'utilisation de valeurs expérimentales doit être faite en tenant compte des conditions dans lesquelles elles ont été mesurées. Il convient notamment de s'assurer au mieux de la fiabilité des systèmes de mesure utilisés et de la permanence des conditions d'essais. Les méthodes appliquées dans le cadre des expériences à la Halle-fosse, en particulier la mise en place de **procédures strictes** pour la réalisation des mesures, la superposition de signaux provenant de différentes jauges pour une même mesure et le test en laboratoire de ces jauges, garantissent une grande fiabilité des résultats expérimentaux présentés dans le cadre de ce travail.

De tels résultats expérimentaux sont indispensables à la compréhension du fonctionnement des chaussées routières, tout particulièrement pour **valider les modélisations** utilisées pour le dimensionnement.

Il est important de souligner que toutes les propriétés mécaniques retenues pour les modélisations ont été déterminées à partir d'essais normalisés.

## 4. Amplitudes des déformations horizontales au bas de la couche de base

### 4.1 Contenu et démarche

Ce chapitre est consacré à l'analyse des amplitudes des déformations horizontales au bas de la couche de base. L'étude détaillée de ces déformations à cet endroit de la chaussée est motivée par le fait qu'elles sont utilisées comme critère principal de dimensionnement des méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement. Les analyses qui y sont présentées sont en grande partie orientées selon cette perspective.

Ce chapitre est axé sur l'influence relative des paramètres de charge sur ces déformations et sur la comparaison des résultats des modélisations élastiques<sup>38</sup> avec ceux des mesures expérimentales. Cette analyse comparative concerne deux des trois sections construites à la Halle-fosse dans le cadre du mandat OFROU consacré à l'évaluation des enrobés à module élevé (cf. § 3.2.1). Pour juger d'une éventuelle influence de la rigidité des structures sur les résultats, les analyses portent sur la section la plus épaisse (17 cm en HMT 22s) et sur la plus fine (10 cm en EME2). Les hypothèses et les valeurs des propriétés élastiques des matériaux retenues pour les modélisations ont été définies dans le chapitre précédent (cf. § 3.5). Les modélisations sont effectuées à l'aide du logiciel NOAH (Eckmann 1997), basé sur le modèle de Burmister.

Les amplitudes des déformations horizontales sont abordées selon 2 démarches :

- étude des amplitudes maximales des déformations longitudinales
- étude de la répartition latérale des amplitudes maximales des déformations longitudinales et transversales.

Ces analyses comparatives ont essentiellement trois objectifs :

- évaluer l'influence des paramètres relatifs aux charges de trafic
- juger de l'efficacité du modèle utilisé pour quantifier ou qualifier l'influence de ces paramètres
- proposer des méthodes de prise en compte des paramètres de charge dans l'évaluation de l'agressivité du trafic.

---

<sup>38</sup> Sauf mention contraire, les modélisations effectuées dans ce travail sont toujours basées sur un comportement élastique

## 4.2 Amplitudes maximales des déformations longitudinales

Ces amplitudes correspondent au critère de dimensionnement visant à empêcher la fissuration des couches bitumineuses par le bas (cf. § 2.6.1). L'analyse se limite aux extensions longitudinales qui sont généralement les plus importantes, notamment dans le cas des roues jumelées. Les déformations transversales sont traitées aux chapitres 4.3 et 5.

### 4.2.1 Résultats des mesures et des modélisations

Les amplitudes<sup>39</sup> des signaux expérimentaux ont été déterminées par analyse automatique des signaux (cf. § 3.3.3). Les résultats des différentes positions latérales de mesure ont montré que les valeurs maximales sont situées au centre de la roue simple et à 15 cm du centre des roues jumelées<sup>40</sup>. Les valeurs issues des modélisations ont été déterminées aux mêmes positions (Tableau 5 et Tableau 6).

**Tableau 5 : Mesures et modélisations des déformations longitudinales maximales (microdéformations) au bas de la couche de base - structure de 17 cm**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	11,5 to	-81 -77	-85	-85 -82	-90	-89 -85	-94	-71 -68	-77	-73 -69	-79	-71 -67	-81
	8 to	-67 -64	-67	-69 -66	-70	-70 -68	-73	-55 -52	-57	-56 -53	-58	-56 -53	-59
15°C	11,5 to	-111 -107	-121	-122 -117	-128	-126 -121	-135	-92 -88	-109	-98 -94	-112	-100 -96	-115
	8 to	-95 -91	-96	-101 -97	-102	-102 -98	-106	-75 -72	-81	-78 -74	-83	-77 -74	-85
30°C	11,5 to	-184 -161	-215	-196 -176	-233	-193 -179	-249	-170 -147	-193	-174 -152	-202	-172 -157	-209
	8 to	-158 -140	-180	-175 -167	-192	-165 -152	-203	-138 -117	-148	-140 -117	-154	-135 -118	-158

<sup>39</sup> Les résultats expérimentaux sont présentés dans les colonnes « mes. » du Tableau 5. Les deux résultats correspondent aux valeurs maximales et minimales des amplitudes déterminées par l'analyse automatique des signaux

<sup>40</sup> Approximativement au centre d'une des roues jumelées

**Tableau 6 : Mesures et modélisations des déformations longitudinales maximales (microdéformations) au bas de la couche de base - structure de 10 cm**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	11,5 to	-127 -122	-116	-137 -131	-124	-144 -138	-132	-116 -112	-106	-118 -114	-111	-122 -119	-115
	8 to	-117 -112	-95	-122 -117	-101	-125 -120	-107	-95 -92	-81	-98 -94	-85	-99 -96	-88
15°C	11,5 to	-151 -143	-142	-168 -159	-154	-181 -172	-165	-134 -130	-130	-144 -139	-137	-149 -144	-143
	8 to	-144 -137	-119	-154 -145	-128	-166 -158	-136	-116 -112	-102	-117 -113	-106	-122 -116	-110
30°C	11,5 to	-240 -223	-209	-263 -244	-232	-256 -243	-254	-237 -222	-196	-251 -233	-211	-254 -236	-223
	8 to	-248 -229	-185	-273 -250	-204	-285 -266	-220	-216 -199	-160	-219 -203	-170	-220 -203	-179

On constate que les déformations augmentent lorsque :

- l'intensité de la charge augmente (sauf pour le cas de la structure mince à 30°C)
- la charge est appliquée sur des roues simples
- la pression de gonflage augmente (essentiellement pour les modélisations)
- les déformations mesurées sur la structure de 17 cm sont systématiquement inférieures à celles de la structure de 10 cm.

Ces résultats sont synthétisés par température et par structure, avec les valeurs extrêmes et l'amplitude entre ces valeurs extrêmes (Tableau 7).

**Tableau 7 : Synthèse des déformations extrêmes pour tous les cas de charge confondus et pour les deux structures**

	Structure de 17 cm				Structure de 10 cm			
	Mesures		Modélisation		Mesures		Modélisation	
	Extrêmes	Ecart	Extrêmes	Ecart	Extrêmes	Ecart	Extrêmes	Ecart
5°C	-52 à -89	47	-57 à -94	37	-92 à -144	52	-81 à -132	51
15°C	-72 à -126	54	-81 à -135	54	-112 à -181	69	-102 à -165	63
30°C	-117 à -196	78	-148 à -249	101	-199 à -285	86	-160 à -254	94

Les résultats des modélisations et des mesures mettent clairement en évidence l'effet de la température qui fait augmenter de façon significative les amplitudes, indépendamment des conditions de chargement et du type de structure. On note enfin que les amplitudes calculées à 30°C sont du même ordre de grandeur pour les deux sections, ce que les mesures ne confirment pas.

Le comportement des matériaux bitumineux peut être admis comme linéaire pour des déformations allant jusqu'aux environs de 100 microdéformations (cf. § 2.4). Certaines des amplitudes maximales obtenues, particulièrement celles à 30°C, sont clairement au-delà de cette hypothèse de linéarité.

L'analyse de ces résultats se déroule selon le plan suivant :

- évaluation des résultats des mesures
- évaluation de la concordance entre les mesures et les modélisations par une comparaison des déformations pour tous les cas de charges
- évaluation de l'effet de la variation des conditions de chargement sur les déformations
- évaluation de l'effet de la variation de la température sur les déformations
- évaluation statistique de l'influence relative des conditions de charge.

Cette analyse se termine par une synthèse des résultats.

#### 4.2.2 Evaluation des amplitudes des mesures

Avant de comparer les résultats des mesures avec ceux des modélisations, il est nécessaire d'évaluer les écarts entre les deux résultats expérimentaux ayant été obtenus à partir des analyses automatiques des signaux. Il est intéressant de donner les écarts absolus et les écarts relatifs (par rapport à la valeur maximale) entre les résultats expérimentaux extrêmes (Tableau 8 et Tableau 9).

**Tableau 8 : Ecarts absolus (microdéformations) et relatifs entre les deux résultats expérimentaux pour les déformations longitudinales - structure de 17 cm**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.
5°C	11,5 to	-4	5%	-3	4%	-4	4%	-4	5%	-5	6%	-4	5%
	8 to	-3	4%	-3	4%	-3	4%	-3	5%	-3	5%	-3	5%
15°C	11,5 to	-4	4%	-5	4%	-4	3%	-4	4%	-3	3%	-4	4%
	8 to	-3	3%	-4	3%	-4	4%	-3	4%	-4	6%	-4	5%
30°C	11,5 to	-23	12%	-20	10%	-15	8%	-23	14%	-22	12%	-15	9%
	8 to	-18	12%	-8	5%	-13	8%	-21	15%	-23	16%	-17	13%

**Tableau 9 : Ecarts absolus (microdéformations) et relatifs entre les deux résultats expérimentaux pour les déformations longitudinales - la structure de 10 cm**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.
5°C	11,5 to	-5	4%	-6	4%	-6	4%	-4	3%	-4	4%	-4	3%
	8 to	-5	4%	-4	4%	-5	4%	-3	3%	-4	4%	-3	3%
15°C	11,5 to	-8	5%	-9	5%	-9	5%	-5	3%	-5	3%	-5	3%
	8 to	-7	5%	-8	5%	-9	5%	-4	4%	-4	4%	-5	4%
30°C	11,5 to	-17	7%	-19	7%	-13	5%	-15	6%	-17	7%	-18	7%
	8 to	-19	8%	-23	8%	-19	7%	-17	8%	-17	8%	-17	8%

Pour une température et une structure données, ces écarts restent relativement constants. Les écarts absolus à 5 et 15°C sont du même ordre de grandeur de 3 à 5 microdéformations<sup>41</sup> alors qu'ils sont plus importants à 30°C où ils sont de l'ordre de 20 microdéformations. Ces écarts absolus correspondent à des écarts relatifs de 3 à 6 % pour les deux premières températures et de 8 %, pour la structure de 10 cm, à 15 % pour la structure de 17 cm à 30°C.

Les très faibles écarts enregistrés à 5 et 15°C signifient que les mesures pour ces températures sont très régulières. Il convient d'être un peu plus critique avec les résultats obtenus à 30°C, même si les écarts relatifs restent faibles.

#### 4.2.3 Comparaison des amplitudes des mesures et des modélisations

La comparaison des résultats pour toutes les conditions de chargement et de température est faite en représentant en abscisse les résultats des modélisations et en ordonnée ceux des mesures (Figure 34).

<sup>41</sup> Des écarts légèrement plus importants allant jusqu'à 8 microdéformations sont obtenus sur la structure de 10 cm pour les roues simples

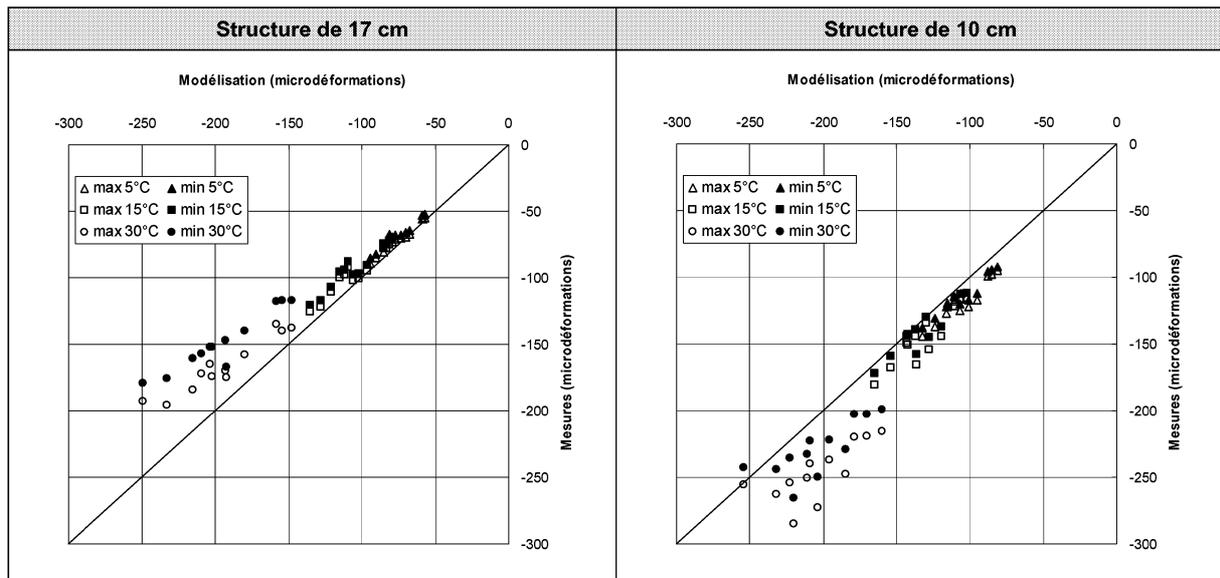


Figure 34 : Comparaison des déformations longitudinales maximales calculées ou mesurées pour tous les cas de charge

Ces figures montrent que la situation diffère selon la structure envisagée. Dans le cas le plus rigide (17 cm), les résultats expérimentaux sont systématiquement inférieurs à ceux des modélisations. La tendance est totalement inverse sur l'autre structure, puisque les résultats expérimentaux sont supérieurs à ceux des modélisations. Par ailleurs, les écarts augmentent avec la température pour les deux structures.

Les écarts avec les modélisations sont calculés à partir des valeurs maximales et minimales des mesures (Tableau 8 et Tableau 9)<sup>42</sup>.

Tableau 10 : Ecarts absolus (microdéformations) entre les déformations calculées et mesurées - structure de 17 cm

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
5°C	11,5 to	5	8	5	8	5	8	6	9	6	10	10	14
	8 to	0	3	1	4	2	5	2	5	3	5	3	6
15°C	11,5 to	10	14	6	11	9	14	17	21	15	18	15	19
	8 to	2	5	1	5	4	8	7	10	5	10	8	11
30°C	11,5 to	30	53	37	57	56	70	23	46	28	50	38	52
	8 to	21	40	17	26	39	51	10	31	14	36	23	40

<sup>42</sup> La première valeur correspond à l'écart avec la valeur maximale de la déformation mesurée, la seconde à l'écart avec la valeur minimale

**Tableau 11 : Ecart absolu (microdéformations) entre les déformations calculées et mesurées - structure de 10 cm**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
5°C	11,5 to	-11	-6	-13	-7	-12	-6	-10	-6	-8	-4	-8	-4
	8 to	-22	-18	-20	-16	-18	-13	-13	-10	-13	-9	-11	-9
15°C	11,5 to	-9	-1	-14	-5	-16	-8	-4	1	-7	-2	-6	-1
	8 to	-25	-18	-26	-18	-31	-22	-14	-10	-11	-6	-11	-6
30°C	11,5 to	-31	-14	-31	-11	-3	11	-41	-26	-40	-23	-31	-13
	8 to	-63	-44	-69	-47	-65	-46	-56	-39	-49	-32	-41	-24

Ces résultats montrent nettement que les écarts absolus augmentent avec la température et que les écarts les plus importants sont de l'ordre de 50 à 60 microdéformations dans le cadre des mesures à 30°C.

Les durées de vie des chaussées sont généralement calculées à partir des déformations dans les couches bitumineuses à partir d'une loi de fatigue (cf. Eq. 17, page 36 et § 2.6.1). Dans ce type de loi, les déformations sont élevées à la puissance 4 ou 5. Il en va par conséquent de même pour les formules permettant le calcul du trafic équivalent (cf. § 2.3.2). Plus que l'exactitude des valeurs absolues des déformations, ce sont les écarts relatifs entre les déformations calculées et celles mesurées qui conduiront à des erreurs conséquentes de l'évaluation des durées de vie et des trafics équivalents. Les écarts relatifs entre les modélisations (pris comme référence) et les mesures ont été synthétisés (Tableau 12 et Tableau 13).

**Tableau 12 : Ecart relatif entre les déformations calculées (référence) et mesurées - structure de 17 cm**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
5°C	11,5 to	-5%	-10%	-5%	-9%	-5%	-9%	-7%	-12%	-7%	-13%	-13%	-17%
	8 to	0%	-4%	-2%	-6%	-3%	-7%	-3%	-8%	-5%	-9%	-5%	-10%
15°C	11,5 to	-8%	-11%	-5%	-9%	-7%	-10%	-15%	-19%	-13%	-16%	-13%	-16%
	8 to	-2%	-5%	-1%	-4%	-4%	-8%	-8%	-12%	-6%	-12%	-9%	-13%
30°C	11,5 to	-14%	-25%	-16%	-24%	-22%	-28%	-12%	-24%	-14%	-25%	-18%	-25%
	8 to	-12%	-22%	-9%	-13%	-19%	-25%	-7%	-21%	-9%	-24%	-14%	-25%

**Tableau 13 : Ecart relatifs entre les déformations calculées (référence) et mesurées - structure de 10 cm**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
5°C	11,5 to	10%	5%	10%	6%	9%	4%	9%	6%	7%	3%	7%	3%
	8 to	23%	18%	20%	16%	17%	12%	17%	13%	15%	11%	13%	10%
15°C	11,5 to	6%	1%	9%	3%	10%	5%	3%	0%	5%	2%	4%	1%
	8 to	21%	15%	20%	14%	23%	16%	14%	10%	10%	6%	10%	5%
30°C	11,5 to	15%	7%	13%	5%	1%	-4%	21%	13%	19%	11%	14%	6%
	8 to	34%	24%	34%	23%	30%	21%	35%	25%	29%	19%	23%	14%

Pour l'ensemble des situations envisagées, les résultats des modélisations sont compris dans une fourchette de l'ordre de 35 % autour des valeurs calculées. Avec une loi de fatigue utilisant une puissance 5, ces écarts de 35 % peuvent conduire à des rapports de durées de vie (en essieux équivalents) allant de 1 à  $(1,35)^5=4.5$ . Il convient encore de signaler que cette fourchette est réduite à 25 % si on admet la mesure la plus favorable pour chaque structure, c'est-à-dire la mesure maximale pour la structure de 17 cm et la valeur minimale pour la structure de 10 cm.

On peut faire les constatations suivantes :

- les écarts les plus importants correspondent à la température la plus élevée
- les écarts dépendent de l'intensité de la charge, mais pas de la même façon selon la structure envisagée : sur la structure la plus épaisse, les écarts sont plus importants pour les charges importantes alors que la tendance est inverse pour la structure la moins épaisse
- ni le type de roue ni les pressions ne jouent un rôle clairement défini sur les écarts.

En plus du fait déjà signalé que les déformations calculées et mesurées se trouvent parfois hors des limites de linéarité des matériaux bitumineux (particulièrement à 30°C), d'autres paramètres importants et déterminants pour le calcul des sollicitations dans les chaussées routières ne sont pas pris en compte par les modélisations : le comportement non linéaire des matériaux de fondation non liés<sup>43</sup> et le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux. De plus, il convient de rappeler que pour les modélisations, les matériaux non liés de la couche de fondation peuvent reprendre des efforts importants en traction et qu'un collage parfait entre les couches de la chaussée est admis.

Le comportement non linéaire des matériaux non liés est sommairement pris en compte dans la méthode française en augmentant la valeur du module de la partie supérieure de la couche de fondation (cf. § 3.5.1.2). Il est admis que le module de ces matériaux augmente avec l'intensité des contraintes auxquelles ils sont soumis.

<sup>43</sup> La différenciation des modules de la couche de base n'est qu'une approximation grossière qui ne tient absolument pas compte des variations réelles des états de contraintes dans cette couche

Ces contraintes sont inversement proportionnelles à la rigidité de la couche bitumineuse. Ainsi, pour une structure donnée, le module utilisé pour la couche de fondation devrait être augmenté quand la température s'élève<sup>44</sup>. Dans le cas de la structure de 17 cm, une augmentation de ce module dans les modélisations diminuerait les écarts avec les résultats expérimentaux, puisqu'elle impliquerait une diminution des déformations calculées. En revanche, le même raisonnement appliqué sur la structure de 10 cm conduirait à un accroissement des écarts entre les modélisations et les mesures. Par conséquent, le fait que les mesures puissent être aussi bien surestimées que sous-estimées selon la structure étudiée oblige à conclure que la seule prise en compte de la non linéarité de la couche de fondation est insuffisante pour améliorer la précision des modélisations pour les deux structures<sup>45</sup>.

Le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux se traduit par une variation de la norme du module complexe, prise en compte par nos modélisations, et par une variation de l'angle de phase, non considérée dans les modélisations élastiques. S'il est à priori délicat de savoir si la prise en compte du déphasage entraînerait une augmentation ou une diminution des déformations calculées, il est en revanche logique de penser que la tendance serait la même pour les deux structures. Par conséquent, et toujours en raison des tendances inverses observées sur les deux structures, il est là aussi improbable que la seule prise en compte du comportement visqueux améliore de façon définitive l'adéquation entre les modélisations et les mesures expérimentales.

Le collage parfait entre les couches associé à la possibilité d'avoir des tractions dans les matériaux non liés tend dans tous les cas à diminuer les déformations au bas de la couche de base. Il est par conséquent une nouvelle fois impossible que la prise en compte de ce seul paramètre permette de diminuer les écarts entre mesures et modélisations.

#### 4.2.4 Effet de la variation de l'intensité de la charge

L'effet de la variation de l'intensité de la charge est évalué à partir des ratios entre les déformations obtenues pour une charge de 11,5 to et celles obtenues pour une charge de 8 to (augmentation de 44 %). Ces ratios sont calculés de la façon suivante :

$$r_{\text{charge}} = \frac{\varepsilon_{11,5\text{to}}}{\varepsilon_{8\text{to}}} \quad \text{Eq. 23}$$

avec :

$r_{\text{charge}}$	= ratio des déformations pour la charge
$\varepsilon_{11,5\text{ to}}$	= déformation pour une charge de 11,5 to
$\varepsilon_{8\text{ to}}$	= déformation pour une charge de 8 to

<sup>44</sup> En raison de la diminution de rigidité des couches bitumineuses

<sup>45</sup> Ceci est d'autant plus vrai que les surestimations des mesures concernent la structure la plus épaisse

Les ratios des mesures sont calculés sur la base des amplitudes maximales (Tableau 14 et Tableau 15).

**Tableau 14 : Ratios des déformations pour la charge - structure de 17 cm**

	Roues simples						Roues jumelées					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,21	1,27	1,24	1,28	1,27	1,29	1,30	1,35	1,32	1,36	1,26	1,36
15°C	1,17	1,25	1,21	1,26	1,23	1,27	1,23	1,34	1,25	1,35	1,29	1,35
30°C	1,16	1,19	1,12	1,21	1,17	1,22	1,23	1,30	1,24	1,31	1,27	1,32

**Tableau 15 : Ratios des déformations pour la charge - structure de 10 cm**

	Roues simples						Roues jumelées					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,09	1,22	1,13	1,23	1,15	1,23	1,22	1,30	1,21	1,30	1,24	1,31
15°C	1,05	1,20	1,09	1,21	1,09	1,21	1,16	1,28	1,23	1,29	1,22	1,29
30°C	0,97	1,13	0,96	1,14	0,90	1,15	1,10	1,23	1,14	1,24	1,16	1,25

Les ratios des déformations sont toujours inférieurs à celui des charges (1,44). L'effet de la variation de la charge est lié à la rigidité de la structure considérée : plus cette rigidité augmente, plus l'effet de la charge est marqué. Ce constat peut être fait par comparaison des résultats des deux structures, mais également, et dans une moindre mesure, à partir des variations de températures. Les mesures et les modélisations montrent cette tendance<sup>46</sup>. Les ratios des roues jumelées sont supérieurs à ceux des roues simples alors que la pression ne joue pas un rôle déterminant.

Concernant les résultats des modélisations, il est possible d'expliquer une part des observations à partir des hypothèses de modélisation de la charge. Avec la modélisation standard, la modification de l'intensité se traduit uniquement par un changement de la surface. On enregistre alors une variation du rayon « a » dans la fonction de contrainte (cf. Eq. 18, page 37) servant de base à la résolution du modèle de Burmister. Ce rayon intervient à deux reprises dans la fonction de contrainte : comme facteur de proportionnalité (à l'extérieur de l'intégrale) et comme paramètre dans la fonction de Bessel d'ordre 1 (dans l'intégrale). Le rapport des rayons utilisés est égal à la racine carrée du rapport des charges : dans le cas présent, la différence de 44 % entre le cas de charge 8 to et celui de 11,5 to correspond à une augmentation de 20 % de ce rayon. Par conséquent, 20 % des variations des déformations s'expliquent directement par la modification du rayon et que le solde provient de l'intégration des fonctions de Bessel<sup>47</sup>. Pour la plupart des cas étudiés, la

<sup>46</sup> Sur la structure de 10cm, pour la température de 30°C et dans le cas d'une roue simple, les mesures indiquent même une diminution des déformations avec l'augmentation de la charge. Cette situation n'est pas confirmée par les modélisations

<sup>47</sup> Cette intégration dépend des conditions aux limites qui sont modifiées par la variation de la surface de contact

variation des déformations est supérieure à celle du rayon. L'intégrale de l'équation de contrainte augmente généralement lorsque « a » augmente. Toutefois, les modélisations à 30°C pour des roues simples empêchent de tirer des conclusions définitives, puisque l'intégrale doit ici diminuer. La variation de l'intégrale ne dépend pas uniquement de « a », mais également de la rigidité de la structure<sup>48</sup>.

Pour juger globalement de la concordance entre les mesures et les modélisations, l'ensemble des résultats est représenté avec en ordonnée les ratios des mesures et en abscisse ceux des modélisations (Figure 35).

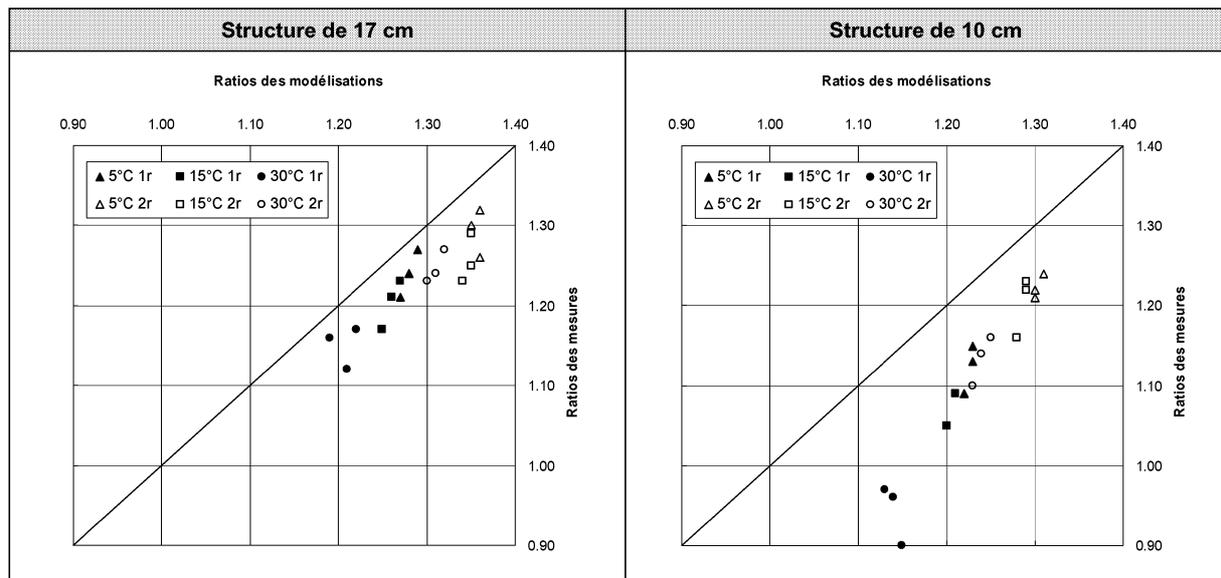


Figure 35 : Comparaison des ratios des déformations pour la charge

Les ratios obtenus par modélisation sont toujours supérieurs à ceux des mesures et le contraste est plus marqué sur la structure fine. Ces résultats montrent une claire relation de proportionnalité entre les résultats des mesures et ceux des modélisations.

Les conséquences, d'un point de vue qualitatif, d'une augmentation de l'intensité de la charge ont été synthétisées en signalant les éventuelles interactions avec d'autres paramètres (Tableau 16).

<sup>48</sup> Il est probable que cette intégrale dépende plus précisément du rapport entre le module de la couche de fondation et celui des couches bitumineuses

**Tableau 16 : Synthèse qualitative des conséquences d'une augmentation de l'intensité de la charge**

Paramètres	Mesures	Modélisations
<b>Général</b>	Augmentation des déformations avec l'augmentation de la charge <sup>49</sup>	Idem, mais pour tous les cas de charge
	Ratios des déformations inférieures au ratio des charges	Idem, mais les augmentations relatives sont toujours supérieures à celles obtenues à partir des mesures
<b>Pression</b>	Influence peu marquée sur les ratios des déformations.	Idem
	Pas de tendance décelable	Très faible augmentation des ratios des déformations lorsque la pression augmente
<b>Type de roue</b>	Les ratios des déformations sont plus importants pour des roues jumelées	Idem
<b>Température</b>	Les ratios des déformations augmentent lorsque la température diminue	Idem
<b>Structure</b>	Les ratios des déformations sont plus importants pour la structure la plus épaisse	Idem
	L'augmentation de la charge peut se traduire par une diminution des déformations maximales pour une structure de faible rigidité (mince à haute température)	L'augmentation de la charge conduit toujours à des augmentations des déformations

#### 4.2.5 Effet de la variation de la pression de gonflage

L'effet de la variation de la pression est évalué à partir des ratios entre les déformations obtenues pour différentes pressions de gonflage. Deux variations ont été retenues, de 6 à 7 bars et de 6 à 8 bars, correspondant à des augmentations relatives et respectives de 17 et 33 %. Ces ratios sont calculés de la façon suivante :

$$r_{\text{pression}} = \frac{\varepsilon_{i\text{bars}}}{\varepsilon_{6\text{bars}}} \quad \text{Eq. 24}$$

avec :

- $r_{\text{pression}}$  = ratio des déformations pour la pression
- $\varepsilon_{i\text{bars}}$  = déformation pour une pression de  $i$  bars,  $i = 7$  ou  $8$
- $\varepsilon_{6\text{bars}}$  = déformation pour une pression de 6 bars

Les ratios des mesures sont calculés sur la base des amplitudes maximales (Tableau 17 et Tableau 18).

<sup>49</sup> Seules les mesures à 30°C pour des roues simples sur la structure de 10 cm contredisent cette tendance générale

**Tableau 17 : Ratios des déformations pour la pression - structure de 17 cm**

		Roues simples				Roues jumelées			
		11,5 to		8 to		11,5 to		8 to	
		6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
5°C	mes.	1,06	1,11	1,03	1,06	1,03	0,99	1,01	1,02
	mod.	1,06	1,10	1,05	1,09	1,03	1,05	1,02	1,04
15°C	mes.	1,10	1,13	1,06	1,07	1,06	1,09	1,05	1,04
	mod.	1,06	1,12	1,05	1,10	1,03	1,06	1,03	1,05
30°C	mes.	1,07	1,05	1,11	1,04	1,02	1,01	1,01	0,98
	mod.	1,09	1,16	1,07	1,13	1,05	1,08	1,04	1,07

**Tableau 18 : Ratios des déformations pour la pression - structure de 10 cm**

		Roues simples				Roues jumelées			
		11,5 to		8 to		11,5 to		8 to	
		6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
5°C	mes.	1,08	1,14	1,04	1,07	1,02	1,06	1,03	1,04
	mod.	1,07	1,14	1,07	1,13	1,05	1,09	1,04	1,08
15°C	mes.	1,11	1,20	1,07	1,16	1,07	1,11	1,01	1,05
	mod.	1,08	1,16	1,08	1,14	1,05	1,10	1,05	1,09
30°C	mes.	1,09	1,07	1,10	1,15	1,06	1,07	1,01	1,02
	mod.	1,11	1,22	1,10	1,19	1,07	1,14	1,06	1,12

Les ratios des déformations sont toujours inférieurs à ceux des pressions<sup>50</sup>. A l'opposé de ce qui a été observé pour la variation de l'intensité de la charge, l'effet de la variation de la pression est plus marqué pour des roues simples que pour des roues jumelées. Il est également légèrement moins marqué pour la structure la plus rigide<sup>51</sup>. Enfin, les ratios sont dans l'ensemble légèrement plus importants pour les fortes charges.

Comme pour la charge, les résultats des modélisations peuvent être partiellement expliqués par les hypothèses de la modélisation standard. A charge constante, une augmentation de la pression entraîne une diminution de la surface de contact, donc du rayon « a ». La fonction de contrainte n'est pas modifiée que par la variation du rayon, mais également par celle de la pression « p », qui n'intervient elle qu'en dehors de l'intégrale<sup>52</sup>. L'augmentation d'une de ces valeurs impliquant la réduction de l'autre, leurs variations se compensent partiellement. Cependant, comme la variation du rayon ne correspond qu'à la racine carrée de celle de la pression, la

<sup>50</sup> Respectivement 1,17 et 1,33 pour des augmentations de la pression de 6 à 7 bars et de 6 à 8 bars

<sup>51</sup> Dans ce dernier cas, les mesures ne confirment pas de façon décisive les modélisations

<sup>52</sup> Compte tenu de l'hypothèse de linéarité, il est logique que la pression soit à l'extérieur de l'intégrale : pour une surface de charge définie, les contraintes et les déformations sont proportionnelles à la pression

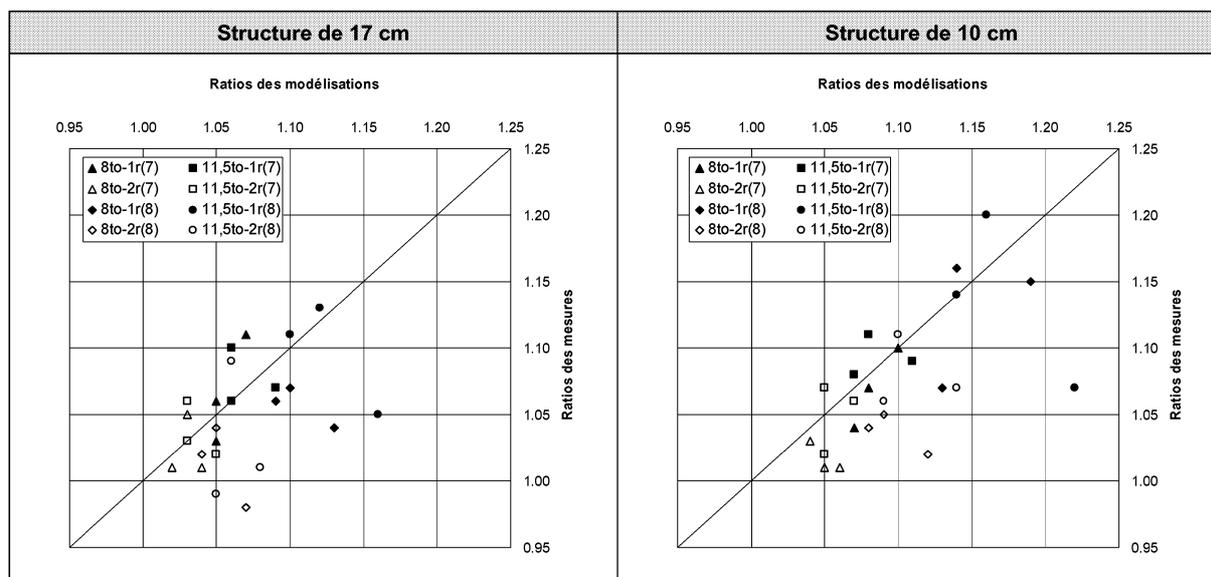
composante « pa » à l'extérieur de l'intégrale suit la tendance dictée par la pression (Tableau 19).

**Tableau 19 : Variation des paramètres pression « p » et rayon « a » dans la fonction de contrainte**

Variation	Pression « p »	Rayon « a »	Pression x rayon « pa »
6 à 7 bars	117 %	93 %	108 %
6 à 8 bars	133 %	87 %	116 %

La variation de la valeur « pa » est généralement plus importante que les ratios des déformations (cf. Tableau 17 et Tableau 18). Par conséquent, comme pour la variation de l'intensité de la charge, l'intégrale de l'équation de contrainte suit la même tendance que la valeur du rayon « a ». Toutefois, là encore, les modélisations à 30°C pour des roues simples empêchent de tirer des conclusions.

Pour juger globalement de la concordance entre les mesures et les modélisations, l'ensemble des résultats est représenté selon la même représentation que pour la charge, soit avec en ordonnée les résultats des mesures et en abscisse ceux des modélisations (Figure 36).



**Figure 36 : Comparaison des ratios des déformations pour la pression<sup>53</sup>**

Contrairement à ceux pour la charge, les ratios des mesures peuvent aussi bien être surestimés que sous-estimés par ceux tirés des modélisations. Les résultats sont sensiblement plus dispersés, mais les ordres de grandeur concordent.

Les conséquences, d'un point de vue qualitatif, d'une augmentation de la pression de gonflage ont été synthétisées en signalant les éventuelles interactions avec d'autres paramètres (Tableau 20).

<sup>53</sup> De 6 à 7 bars désigné par (7) et de 6 à 8 bars désigné par (8)

**Tableau 20 : Synthèse qualitative des conséquences d'une augmentation de la pression de gonflage**

Paramètres	Mesures	Modélisations
<b>Général</b>	Augmentation des déformations avec l'augmentation de la pression <sup>54</sup>	Idem, mais pour tous les cas de charge. Les augmentations sont en moyenne supérieures à celles obtenues à partir des mesures
	Augmentation relative des déformations inférieures à l'augmentation relative de la pression	Idem
<b>Charge</b>	Influence peu marquée sur les variations relatives des déformations.	Idem
	Pas de tendance décelable	Très faible augmentation des variations relatives des déformations lorsque la charge augmente
<b>Type de roue</b>	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour des roues simples	Idem
<b>Température</b>	Peu d'influence sur les variations relatives des déformations.	Idem
	Pas de tendance	Très faible augmentation des variations relatives des déformations lorsque la température augmente
<b>Structure</b>	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour la structure la plus fine	Idem

#### 4.2.6 Effet du type roues

L'effet du type de roues utilisées est évalué à partir des ratios des déformations maximales selon que la charge est appliquée sur des roues simples ou sur des roues jumelées. Ces ratios sont calculés de la façon suivante :

$$r_{\text{roues}} = \frac{\varepsilon_{1\text{roue}}}{\varepsilon_{2\text{roues}}} \quad \text{Eq. 25}$$

avec :

- $r_{\text{roues}}$  = ratio des déformations pour le type de roues
- $\varepsilon_{1\text{roue}}$  = déformation pour une charge appliquée sur des roues simples
- $\varepsilon_{2\text{roues}}$  = déformation pour une charge appliquée sur des roues jumelées

Les ratios des mesures sont calculés sur la base des amplitudes maximales (Tableau 21 et Tableau 22).

<sup>54</sup> Deux mesures à 30°C pour des roues jumelées sur la structure de 17 cm contredisent cette tendance générale.

**Tableau 21 : Ratios des déformations pour le type de roue - structure de 17 cm**

	11,5 to						8 to					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,13	1,10	1,16	1,13	1,26	1,16	1,21	1,17	1,23	1,20	1,25	1,22
15°C	1,21	1,11	1,25	1,14	1,25	1,17	1,27	1,19	1,29	1,22	1,31	1,24
30°C	1,08	1,11	1,13	1,15	1,13	1,19	1,14	1,21	1,25	1,25	1,22	1,29

**Tableau 22 : Ratios des déformations pour le type de roue - structure de 10 cm**

	11,5 to						8 to					
	6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5°C	1,10	1,09	1,16	1,13	1,18	1,15	1,23	1,17	1,24	1,20	1,26	1,22
15°C	1,13	1,09	1,17	1,12	1,22	1,15	1,24	1,17	1,31	1,20	1,37	1,23
30°C	1,01	1,06	1,05	1,10	1,01	1,14	1,15	1,16	1,25	1,20	1,30	1,23

Le passage de roues jumelées à des roues simples engendre des augmentations sensibles des déformations maximales. Les rapports des déformations dépendent de l'intensité de la charge : les augmentations sont de l'ordre de 10 à 20 % pour une charge de 11,5 to et de 20 à 30 % pour une de 8 to. Les modélisations montrent une légère augmentation des rapports des déformations avec la pression de gonflage. En revanche, les effets de la température et du type de structure ne sont pas clairement définis et semblent peu importants.

Avec la modélisation standard, le passage des roues simples à des roues jumelées revient à répartir une même surface de contact sur deux surfaces circulaires séparées. Dans la fonction de contrainte et pour une valeur de pression « p » constante, le rapport des rayons « a » utilisés est de racine de 2. Pour les roues jumelées, la déformation provient donc de cercles de rayons inférieurs, mais dont l'effet doit être cumulé. C'est donc l'écartement des roues jumelées qui assure une meilleure diffusion de la charge dans la structure conduisant à une réduction des amplitudes maximales. Ce raisonnement explique les différences observées selon l'intensité de la charge ou de la pression<sup>55</sup>. A pression constante, les rayons augmentent avec l'intensité de la charge. L'espace entre les bords des deux cercles servant à la modélisation des roues jumelées tend à se réduire. La superposition de l'effet des deux surfaces de charge devient plus importante ce qui rend moins efficaces la diffusion des efforts.

La concordance des résultats des mesures et de ceux des modélisations est toujours effectuée selon le même principe, soit avec en ordonnée les résultats de mesures et en abscisse ceux des modélisations (Figure 37).

<sup>55</sup> Seule la situation d'une variation de charge est expliquée, l'effet d'une variation de la pression pouvant être expliqué de façon similaire

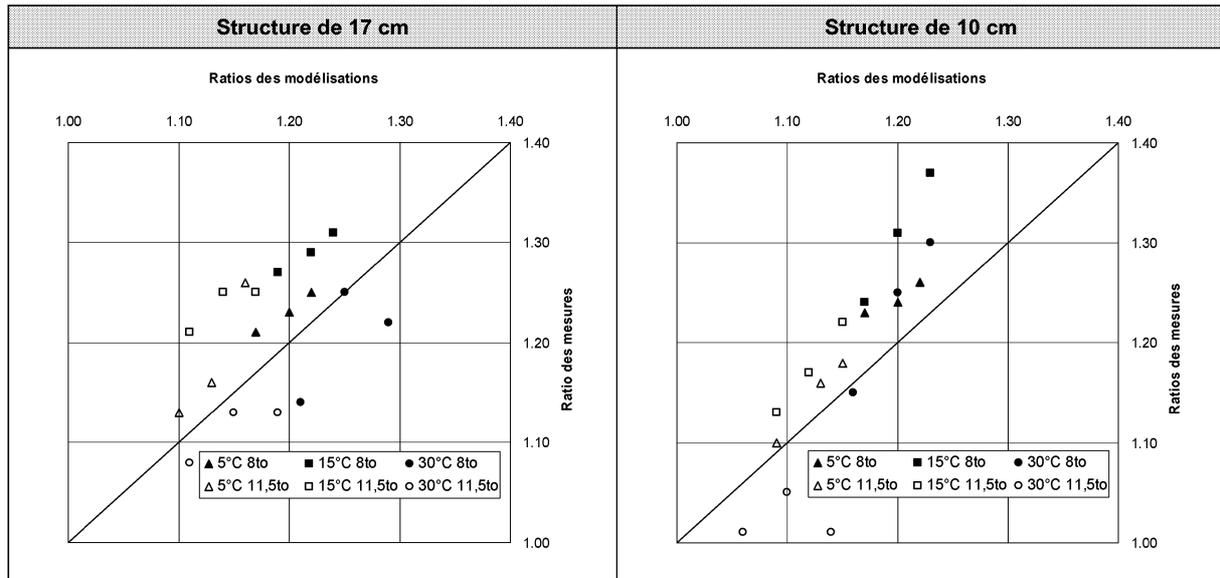


Figure 37 : Comparaison des ratios des déformations pour le type de roues

Dans l'ensemble, les modélisations sous-estiment plutôt les variations par rapport aux mesures puisque la majorité des points sont situés au-dessus de la ligne d'égalité. Elles fournissent néanmoins une très bonne estimation des ordres de grandeur des variations obtenues à partir des mesures.

Les conséquences, d'un point de vue qualitatif, de l'utilisation des différents types de roues ont été synthétisées en signalant les éventuelles interactions avec d'autres paramètres (Tableau 23).

Tableau 23 : Synthèse qualitative des conséquences de l'utilisation de différents types de roues

Paramètres	Mesures	Modélisations
Général	Augmentation des déformations avec des roues simples	Idem. Les augmentations sont généralement inférieures à celles obtenues à partir des mesures
Charge	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour la charge la plus faible	Idem
Pression	Les variations relatives des déformations augmentent lorsque la pression augmente <sup>56</sup>	Idem, mais pour tous les cas de charge
Température	Peu d'influence sur les variations relatives des déformations	Idem
	Pas de tendance	Très faible augmentation des variations relatives des déformations lorsque la température augmente
Structure	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour la structure la plus fine	Idem

<sup>56</sup> Seules deux mesures à 30°C avec une pression de 8 bars contredisent cette tendance

#### 4.2.7 Effet de la température

Dans le cadre des modélisations élastiques, la température est prise en compte par une modification du module. Les pourcentages correspondent aux rapports des déformations pour deux augmentations de température, soit de 5 à 15°C et de 5 à 30°C. Ces rapports sont calculés de la façon suivante :

$$r_{\text{roues}} = \frac{\varepsilon_{Ti}}{\varepsilon_{t5^{\circ}\text{C}}} \quad \text{Eq. 26}$$

avec :

- $r_{\text{température}}$  = ratio des déformations pour la température
- $\varepsilon_{Ti}$  = déformation pour la température  $i$  ( $i = 15^{\circ}\text{C}$  et  $30^{\circ}\text{C}$ )
- $\varepsilon_{t5^{\circ}\text{C}}$  = déformation pour une température  $5^{\circ}\text{C}$

Les résultats des mesures se basent toujours sur les amplitudes maximales. Par ailleurs, une colonne donne les ratios des modules élastiques des couches de base par rapport à la valeur à  $5^{\circ}\text{C}$  (Tableau 24 et Tableau 25).

**Tableau 24 : Ratios des déformations pour la température - structure de 17 cm**

Temp.	Charge	Module	Roue simple						Roues jumelées					
			6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
			mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5° à 15°C	11,5 to	57%	1,38	1,42	1,44	1,43	1,41	1,44	1,29	1,41	1,33	1,42	1,42	1,42
	8 to		1,42	1,44	1,47	1,45	1,44	1,46	1,35	1,42	1,41	1,43	1,37	1,43
5 à 30°C	11,5 to	18%	2,29	2,52	2,31	2,60	2,17	2,65	2,38	2,50	2,36	2,55	2,43	2,58
	8 to		2,37	2,69	2,56	2,75	2,34	2,80	2,51	2,60	2,52	2,63	2,41	2,66

**Tableau 25 : Ratios des déformations pour la température - structure de 20 cm**

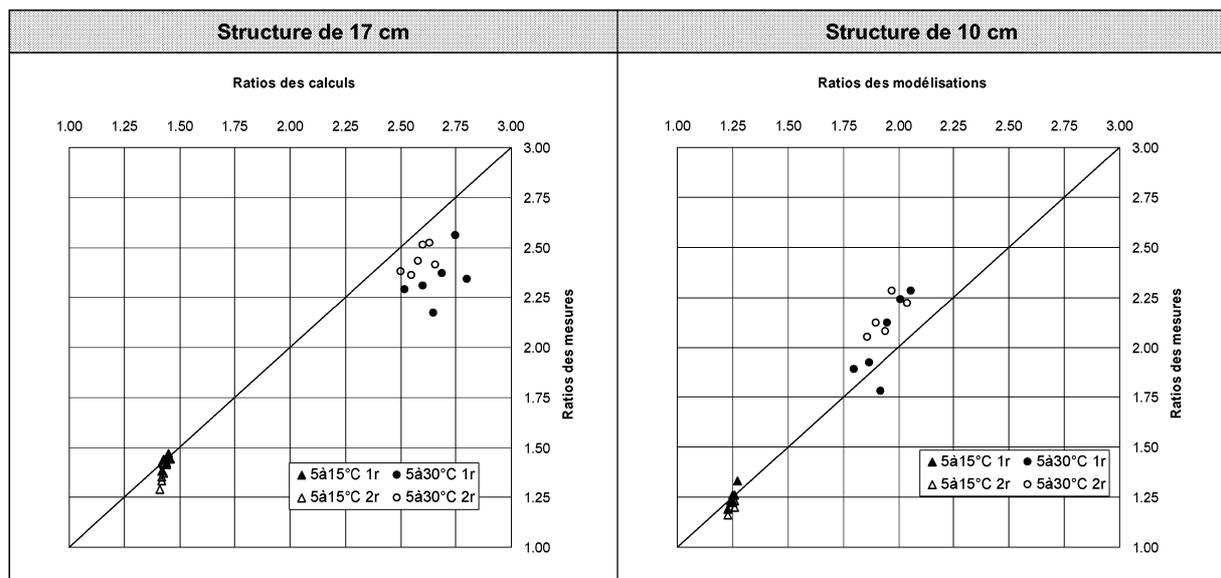
Temp.	Charge	Module	Roue simple						Roues jumelées					
			6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
			mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
5° à 15°C	11,5 to	70%	1,19	1,23	1,23	1,24	1,26	1,25	1,16	1,23	1,22	1,24	1,22	1,25
	8 to		1,23	1,25	1,26	1,26	1,33	1,27	1,22	1,25	1,20	1,26	1,23	1,26
5 à 30°C	11,5 to	30%	1,89	1,80	1,92	1,87	1,78	1,92	2,05	1,86	2,12	1,90	2,08	1,94
	8 to		2,12	1,95	2,24	2,01	2,28	2,06	2,28	1,97	2,24	2,01	2,22	2,04

L'effet de la température n'étant pas au centre de ce travail, les commentaires ne sont donnés que sous forme de synthèse (Tableau 26).

**Tableau 26 : Synthèse qualitative des résultats pour l'effet de la température**

Paramètres	Mesures	Modélisations
<b>Général</b>	Augmentation des déformations avec l'augmentation de la température	Idem
<b>Charge</b>	Les variations relatives des déformations sont plus importantes pour la charge la plus faible	Idem
<b>Pression</b>	Peu d'influence sur les variations relatives des déformations.	Idem
	Pas de tendance	Très faible augmentation des variations relatives des déformations lorsque la température augmente
<b>Type de roue</b>	Très peu d'influence et pas de tendance	Idem
<b>Structure</b>	Les variations relatives des déformations sont moins importantes pour la structure la plus fine	Idem

Afin de juger de la concordance entre les mesures et les modélisations, les ratios sont présentés avec les mesures en ordonnée et les modélisations en abscisse (Figure 38).

**Figure 38 : Comparaison des ratios des déformations pour la température**

Ces figures mettent nettement en évidence l'importance de la température pour le calcul des déformations, puisque ces dernières vont presque jusqu'à tripler lorsque la température passe de 5°C à 30°C pour la structure de 17 cm. Cette augmentation est le résultat d'une réduction d'un facteur 5 du module élastique. La concordance entre les mesures et les modélisations pour les variations relatives des déformations est bonne.

L'effet de la température est sensiblement moins marqué pour la structure de 10 cm en EME2 ce qui peut être expliqué par deux raisons :

- La rigidité des couches bitumineuses de la structure de 17 cm est nettement plus grande que celle de la structure de 10 cm. Les couches bitumineuses de la structure en HMT 22s participent donc de façon plus importante à la reprise des efforts. Pour la structure en EME2, dont la rigidité est moindre, les efforts sont transmis plus directement dans la fondation en grave non liées dont les propriétés ne dépendent pas de la température. Il est par conséquent logique que les variations de module des couches bitumineuses aient plus d'importance si ces couches participent de façon importante à la diffusion des efforts.
- Deuxièmement, comme le montrent les rapports des modules Tableau 25, le module du HMT 22s varie plus fortement en fonction de la température. Cette plus grande susceptibilité thermique est également visible par la superposition des courbes maîtresses - sur laquelle les valeurs des modules retenus pour les modélisations sont marquées en rouge (Figure 39).

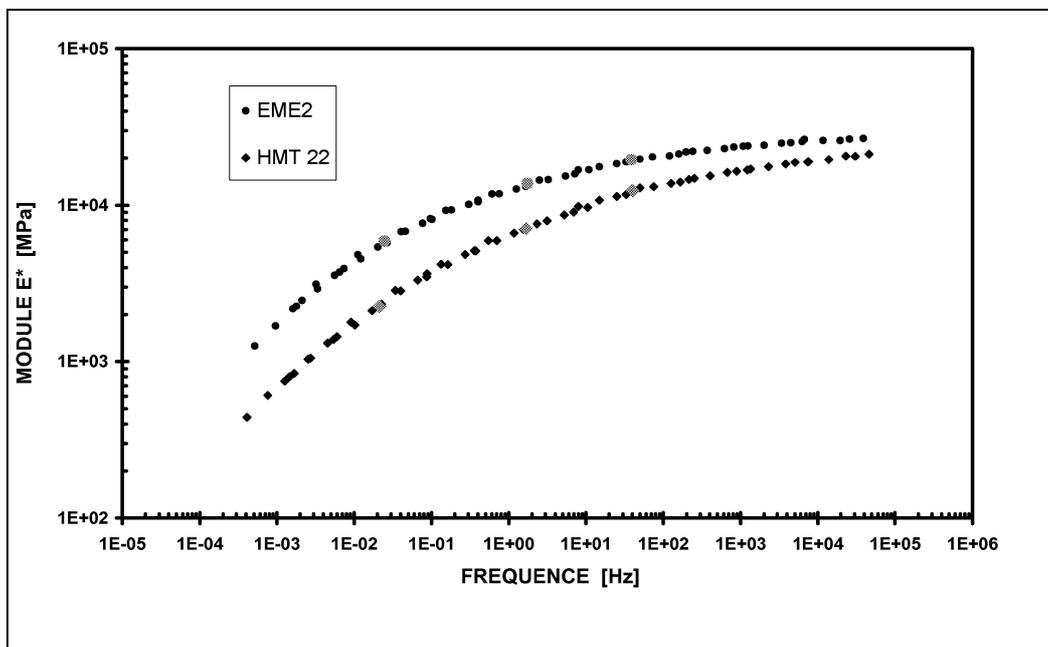


Figure 39 : Comparaison des courbes maîtresses du HMT22s et du EME2

#### 4.2.8 Evaluation statistique de l'influence des paramètres de charge

Les résultats analysés jusqu'ici ont permis d'observer des tendances concernant les influences sur les déformations des paramètres étudiés (température, structure et conditions de charge)<sup>57</sup>. Ces analyses montrent que la température et la rigidité de la structure sont les paramètres influençant le plus les amplitudes maximales des déformations. Par contre, il est plus délicat d'évaluer le poids<sup>58</sup> de chacun des

<sup>57</sup> Une première analyse qualitative de ces interactions a été donnée dans les chapitres précédents

<sup>58</sup> Le terme de poids qualifie l'importance relative d'un paramètre donné vis-à-vis d'autres paramètres

paramètres de charge (intensité, pression et type de roues) et les éventuelles interactions pouvant exister entre eux.

Diverses méthodes statistiques permettent de déterminer quels sont les paramètres influençant le plus les résultats d'une expérience (Schimmerling, Sisson et al. 1998). C'est notamment le cas de la méthode d'analyse de variances, la méthode ANOVA (Morgenthaler 1997). Cette méthode permet d'obtenir un modèle statistique incluant des paramètres expérimentaux pour une série de résultats. Il est également possible d'évaluer les interactions entre ces paramètres expérimentaux.

Le modèle comporte un terme constant et des coefficients correspondant à chaque paramètre (ou à leur interaction) qui font varier les résultats autour terme constant en fonction des valeurs prises par les paramètres. Un modèle incluant deux paramètres<sup>59</sup> expérimentaux sans interaction présente la forme suivante :

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad \text{Eq. 27}$$

avec :

$y_{ij}$	= résultat du modèle pour les paramètres i et j
$\mu$	= moyenne globale (terme constant)
$\alpha_i$	= effets du premier paramètre pour sa valeur i
$\beta_j$	= effets du second paramètre pour sa valeur j
$\varepsilon_{ij}$	= variables aléatoires non corrélées de moyenne nulle et de variance constante

Partant d'un tel modèle, il est possible d'évaluer l'importance de chacun des paramètres ou de leur interaction sur les résultats expérimentaux. En d'autre terme, il est possible de déterminer quels sont les paramètres qui n'influencent pas de façon significative les résultats analysés.

Des analyses ANOVA ont été effectuées tant sur les résultats des mesures que sur ceux des modélisations. Une première analyse a été faite sur toutes les observations<sup>60</sup> en incluant tous les paramètres<sup>61</sup>. Compte tenu de ces premiers résultats, une seconde analyse séparant les observations par structure et par température a été effectuée.

---

<sup>59</sup> L'utilisation du terme paramètres dans le cadre de ce chapitre est propre à notre étude et ne correspond pas à celle utilisée en statistique (Morgenthaler 1997)

<sup>60</sup> On entend par observations tous les résultats provenant soit des mesures soit des modélisations

<sup>61</sup> Trois températures, deux structures et six cas de charge

#### 4.2.8.1 Analyse ANOVA globale

Pour cette première analyse, toutes les observations ont été analysées en tenant compte des cinq paramètres suivants :

- température
- type de structure
- intensité
- pression
- type de roues

Des interactions simples (entre deux paramètres) ont été supposées entre :

- les paramètres de charge (3 interactions)
- la température et chacun des paramètres de charges (3 interactions)
- la structure et chacun des paramètres de charge (3 interactions).

Les coefficients des deux modèles statistiques correspondant respectivement aux mesures et aux modélisations sont donc au nombre de 15, y compris le terme constant.

La qualité des modèles est évaluée à partir des résidus<sup>62</sup> des modèles. Les analyses ANOVA sont fiables si les résidus suivent une distribution normale. Les résidus des deux modèles ont été testés et leur distribution peut être admise comme normale. Ceci signifie qu'il est possible d'utiliser les résultats de l'analyse ANOVA.

De manière générale, un test statistique<sup>63</sup> a été effectué. Il confirme que pour des paramètres fixés, la mesure et la modélisation ne sont pas significativement différents au niveau des moyennes. Toutefois, il convient de se méfier de ce résultat qui ne signifie pas que les mesures et les modélisations sont concordantes pour chaque cas de charge, mais uniquement au niveau des moyennes. Dans le cas présent, cette concordance moyenne s'explique par le fait que les mesures sur la structure de 17 cm sont systématiquement inférieures aux modélisations alors que la situation est inverse pour la structure de 10 cm (cf. Figure 34, page 76).

La nécessité de prendre ou non en compte des paramètres (ou leurs interactions) peut être évaluée par un test statistique. L'hypothèse testée pour chaque paramètre est : "le modèle peut se passer de ce paramètre", c'est à dire, ce paramètre n'est pas important pour expliquer la variation des observations. On rejette l'hypothèse lorsque

---

<sup>62</sup> Les résidus sont les écarts entre les observations et les valeurs du modèle statistique pour un cas de charge donné

<sup>63</sup> Wilcoxon, test non paramétrique ne se basant pas sur une hypothèse de normalité des données

la probabilité (p-valeur) du test est inférieure à 5%. Les paramètres avec une probabilité supérieure à 5% (en rouge) peuvent donc être négligés<sup>64</sup>.

**Tableau 27 : Importance des paramètres et de leurs interactions dans le modèle (p-valeur)**

Paramètres	Mesures	Modélisations
Température	0%	0%
Structure	0%	0%
Intensité	0%	0%
Pression	23%	80%
Roue	0%	0%
Intensité Pression (I-P)	36%	66%
Intensité Roue (I-R)	49%	64%
Roue Pression (R-P)	1%	0%
Température Intensité (T-I)	95%	3%
Température Pression (T-P)	94%	72%
Température Roue (T-R)	62%	6%
Structure Intensité (S-I)	32%	78%
Structure Pression (S-R)	4%	1%
Structure Roue (S-R)	12%	3%

Ces résultats mettent nettement en évidence que la température, la structure, l'intensité et le type de roue sont les paramètres les plus importants. La pression intervient en interaction avec le type de roues et avec la structure.

On note encore que les modélisations retiennent deux interactions que les mesures ne confirment pas, soit entre la température et l'intensité et entre la structure et le type de roue. Il semble logique que les résultats des modélisations créent plus d'interactions que les mesures, puisque ces résultats sont a priori moins aléatoires que ceux des mesures.

#### 4.2.8.2 Analyse ANOVA par structure et par température

Puisque ce travail se focalise essentiellement sur les conditions de charge, des analyses complémentaires n'utilisant que les paramètres de charge ont été effectuées. Compte tenu des résultats de l'analyse ANOVA globale, les observations ont été groupées par structure et par température. Pour ces analyses, le modèle choisi inclut l'effet des trois paramètres de charge étudiés et de leurs interactions. Sept coefficients sont donc nécessaires pour chacun de ces modèles :

- 1 coefficient constant correspondant à la valeur moyenne des déformations
- 3 coefficients correspondant à l'effet de chacun des paramètres
- 3 coefficients correspondant aux interactions entre les paramètres

<sup>64</sup> Ce qui signifie qu'il y a une probabilité de 5% d'avoir rejeté faussement l'hypothèse

Les modèles ont de nouveau été testés à partir de la répartition des résidus. Toutes les distributions des résidus peuvent être admises comme normales, à l'exception de celle du modèle de la structure de 10 cm à 30°C dans le cas des pour les résultats modélisations. L'analyse ANOVA ne peut pas être appliquée pour ce modèle.

La nécessité de prendre ou non en compte des paramètres ou leurs interactions est à nouveau évaluée par la probabilité d'un test statistique (p-valeur). Les paramètres présentant une probabilité supérieure à 5 % (en rouge) peuvent être négligés (Tableau 28).

**Tableau 28 : Importance des paramètres leurs interactions dans les modèles par structure et par température (p-valeur)**

Paramètres	Structure 17 cm						Structure 10 cm					
	5°C		15°C		30°C		5°C		15°C		30°C	
	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
<b>Intensité</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	51%	<sup>65</sup>
<b>Pression</b>	25%	0%	1%	0%	4%	0%	0%	1%	1%	1%	33%	-
<b>Roues</b>	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	54%	-
<b>I-P</b>	75%	8%	6%	7%	28%	6%	4%	10%	4%	6%	28%	-
<b>I-R</b>	92%	9%	60%	6%	4%	3%	9%	40%	19%	29%	41%	-
<b>P-R</b>	27%	2%	8%	2%	6%	2%	0%	0%	0%	0%	14%	-

Ces résultats montrent qu'aucun des paramètres de charge ne peut être négligé pour la détermination des déformations maximales au bas de la couche de base. Seuls les deux résultats des mesures correspondant au cas des rigidités extrêmes (structure de 17 cm à 5°C et structure de 10 cm à 30°C) indiquent que la pression peut être négligée. Parmi ces paramètres, ce sont les probabilités en rapport avec la pression qui sont les plus élevées. Cela signifie que la pression est probablement le paramètre de charge le moins influent. Concernant les interactions entre les paramètres de charge et de façon générale, seules les interactions entre la pression et le type de roue semblent importantes. Pour la structure de 10 cm, les probabilités obtenues pour la température de 30°C montrent qu'aucun paramètre n'est déterminant. Ces résultats ne sont pas pris en compte par la suite.

A partir des résultats obtenus pour les coefficients des modèles, leur poids a été calculé (Tableau 29).

<sup>65</sup> Analyse ANOVA pas fiable

**Tableau 29 : Poids des coefficients des paramètres et des interactions**

Paramètres	Structure 17 cm						Structure 10 cm					
	5°C		15°C		30°C		5°C		15°C		30°C	
	Mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
Intensité	39%	46%	30%	42%	32%	34%	20%	31%	13%	28%	-	-
Pression	13%	18%	23%	19%	17%	24%	29%	22%	29%	21%	-	-
Roues	31%	25%	33%	26%	26%	26%	7%	6%	8%	6%	-	-
I-P	5%	4%	7%	4%	6%	5%	9%	5%	10%	5%	-	-
I-R	0%	1%	0%	2%	5%	3%	2%	1%	1%	1%	-	-
P-R	12%	7%	7%	7%	14%	9%	34%	36%	39%	38%	-	-

Ces résultats permettent d'établir une sorte de « classement » des paramètres et de leurs interactions (Tableau 30).

**Tableau 30 : « Classement » des paramètres et des interactions**

Paramètres	Structure 17 cm						Structure 10 cm					
	5°C		15°C		30°C		5°C		15°C		30°C	
	Mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.	mes.	mod.
Intensité	1	1	2	1	1	1	3	2	3	2	-	-
Pression	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	-	-
Roues	2	2	1	2	2	2	5	4	5	4	-	-
I-P	5	5	4	4	5	5	4	5	4	5	-	-
I-R	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-	-
P-R	4	4	5	5	4	4	1	1	1	1	-	-

Les classements basés sur les résultats des mesures sont similaires à ceux obtenus à partir des modélisations. Ces classements présentent en revanche une nette différence selon la structure. Pour la structure de 17 cm, les paramètres agissent essentiellement de façon indépendante, puisqu'ils occupent systématiquement les trois premières positions, la pression venant toujours en troisième. En revanche sur la structure de 10 cm, il existe une claire interaction entre la pression et le type de roue qui apparaît systématiquement en première position. Cette forte influence de cette interaction se fait au détriment du type de roue, ce qui signifie que ce paramètre demeure important.

Il est à souligner que tous les résultats statistiques présentés ici confirment les commentaires qualitatifs effectués précédemment (cf. Tableau 16 page 82, Tableau 20 page 85 et Tableau 23 page 88).

#### 4.2.9 Synthèse des résultats pour les amplitudes des déformations longitudinales

Il est nécessaire de procéder ici à une première synthèse des résultats obtenus pour les différents paramètres de charge et pour la température.

Pour l'intensité de la charge, il est possible de faire les observations suivantes :

- l'augmentation de l'intensité de la charge conduit généralement<sup>66</sup> à une augmentation des déformations longitudinales
- l'augmentation relative des déformations est toujours inférieure à l'augmentation relative de la charge
- une modélisation simple de la charge, surface circulaire uniformément chargée, donne des tendances similaires à celles obtenues à partir de mesures expérimentales
- les ratios des déformations pour la charge (cf. Eq. 23, page 79) obtenus par modélisation sont toujours supérieurs à ceux tirés des mesures expérimentales.

Pour la pression des pneus, on constate les faits suivants :

- l'augmentation de la pression de gonflage conduit généralement à une augmentation des déformations longitudinales<sup>67</sup>
- l'augmentation relative des déformations est toujours inférieure à l'augmentation relative de la pression
- une modélisation simple de la charge, surface circulaire uniformément chargée, donne des tendances qui ne sont pas systématiquement confirmées par les mesures expérimentales
- les ratios des déformations pour la pression (cf. Eq. 24, page 82) obtenus par modélisation sont généralement supérieurs à ceux tirés des mesures expérimentales.

---

<sup>66</sup> Il faut rappeler que les mesures à 30°C pour des roues simples contredisent cette tendance générale

<sup>67</sup> La tendance est générale selon les modélisations

Pour le type de roues, on remarque que :

- l'utilisation de roues simples à la place de roues jumelées conduit à une augmentation des déformations longitudinales
- une modélisation simple de la charge, surface circulaire uniformément chargée, donne des tendances similaires à celles obtenues à partir de mesures expérimentales
- une modélisation simple de la charge permet d'évaluer quantitativement l'effet d'un changement de la configuration des roues sur les déformations longitudinales maximales
- les ratios des déformations pour le type de roues (cf. Eq. 25, page 85) obtenus par modélisation sont en moyenne légèrement inférieurs à ceux tirés des mesures.

Pour la température, les principaux enseignements sont les suivants :

- la température est le paramètre qui influence le plus les amplitudes des déformations longitudinales
- les modélisations donnent des tendances similaires à celles obtenues à partir de mesures expérimentales.

De plus, sur la base des observations qualitatives et des analyses statistiques, il est possible d'effectuer un classement de l'influence relative des paramètres de charge sur les déformations longitudinales au bas de la couche de base :

1. intensité de la charge
2. type de roue
3. pression

Ce classement est évidemment valable pour les variations de ces paramètres utilisées dans le cadre de cette étude, notamment en ce qui concerne l'effet de l'intensité de la charge et celle de la pression de gonflage. En revanche, il est indépendant de la température et il faut noter que l'effet de la pression est à étudier en interaction avec le type de roue.

### 4.3 Répartition latérale des déformations maximales longitudinales et transversales

Les analyses effectuées jusqu'ici n'ont porté que sur les amplitudes maximales des déformations longitudinales. Il en est ressorti que les modélisations donnent généralement des résultats satisfaisants pour évaluer l'effet des paramètres de charge (intensité, pression et type de roue) et de la température sur ces amplitudes maximales.

La seconde partie de l'étude consiste à analyser les mesures de déformation pour différentes positions latérales (cf. § 3.3.2), afin d'obtenir la répartition des amplitudes maximales en fonction de la distance au centre de la roue<sup>68</sup>. Ce chapitre comprend les résultats des déformations longitudinales et transversales.

L'analyse de la répartition latérale des déformations maximales se fera en deux étapes :

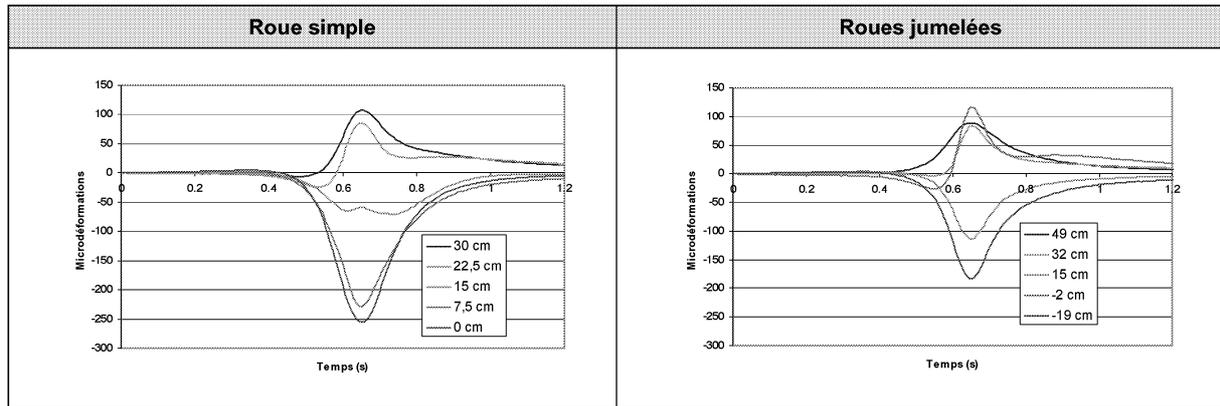
- comparaison des résultats expérimentaux entre eux pour tous les cas de charge, afin d'évaluer l'effet des paramètres de charges
- comparaison des résultats expérimentaux pour un cas de charge avec ceux obtenus par modélisations.

#### 4.3.1 Résultats des mesures

Les déformations maximales au bas de la couche de base sont généralement des extensions, aussi bien longitudinalement que transversalement (cf. § 3.4). Cependant, dans le sens transversal et selon la distance latérale par rapport au centre de la roue, la valeur maximale correspondant au passage de la roue peut être une contraction (voir Figure 29, page 62). Selon leur position latérale, les signaux de déformation ont des allures très différentes (Figure 40).

---

<sup>68</sup> Les positions latérales ne sont pas précises compte tenu que les jauges de mesures ont été déplacées latéralement lors de la construction des sections (cf. § 3.3.4.3)



**Figure 40 : Signaux de déformations transversales en fonction de la distance latérale au centre d'une roue simple ou des roues jumelées**

Pour les roues simples, les déformations passent d'une contraction non négligeable à l'extérieur de la roue (22,5 cm et 30 cm), à environ 7,5 et 15 cm de son bord, à des extensions sous la roue (0, 7,5 et 15 cm). Pour la position à 15 cm qui correspond approximativement au bord de la roue, une légère discontinuité dans le signal fait que l'extension maximale n'est pas obtenue au milieu de la roue. Cette discontinuité est révélatrice du changement de type de sollicitation qui s'effectue lorsque le point de mesure n'est pas situé sous une roue.

Pour les roues jumelées, en plus de contractions mesurées à l'extérieur de la charge (49 et 32 cm), on enregistre toujours une réduction des extensions entre les deux roues. Cette réduction peut même aller jusqu'à l'apparition de contractions comme pour les mesures représentées sur la Figure 40 (position à -2 cm). De plus, certains signaux (à 22,5 cm pour la roue simple et à -2 cm pour les roues jumelées) essentiellement en contraction montrent également une légère extension à l'approche de la charge.

Ces observations rendent périlleuse et parfois erronée une analyse automatique des signaux en termes d'amplitude maximale, puisqu'il faut généralement chercher des extensions, mais parfois aussi des contractions. Les analyses automatiques des signaux pour la détermination des valeurs maximales (cf. § 3.3.3) n'étaient pas à même de tenir compte de cette situation, ce qui signifie que les valeurs des contractions ont été extraites « manuellement ». Les répartitions latérales sont données pour les déformations longitudinales et transversales et pour les deux types de roues et sont groupées par température et par structure (Figure 41 à Figure 46).

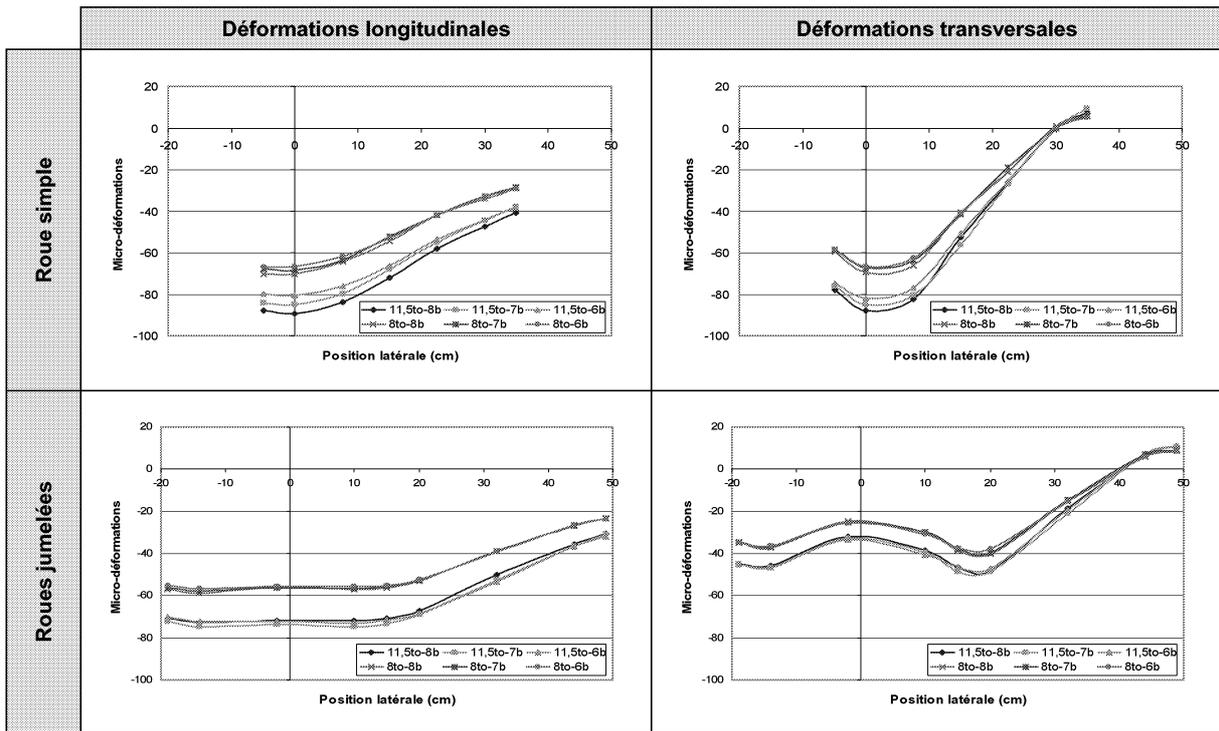


Figure 41 : Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 5°C, structure de 17 cm

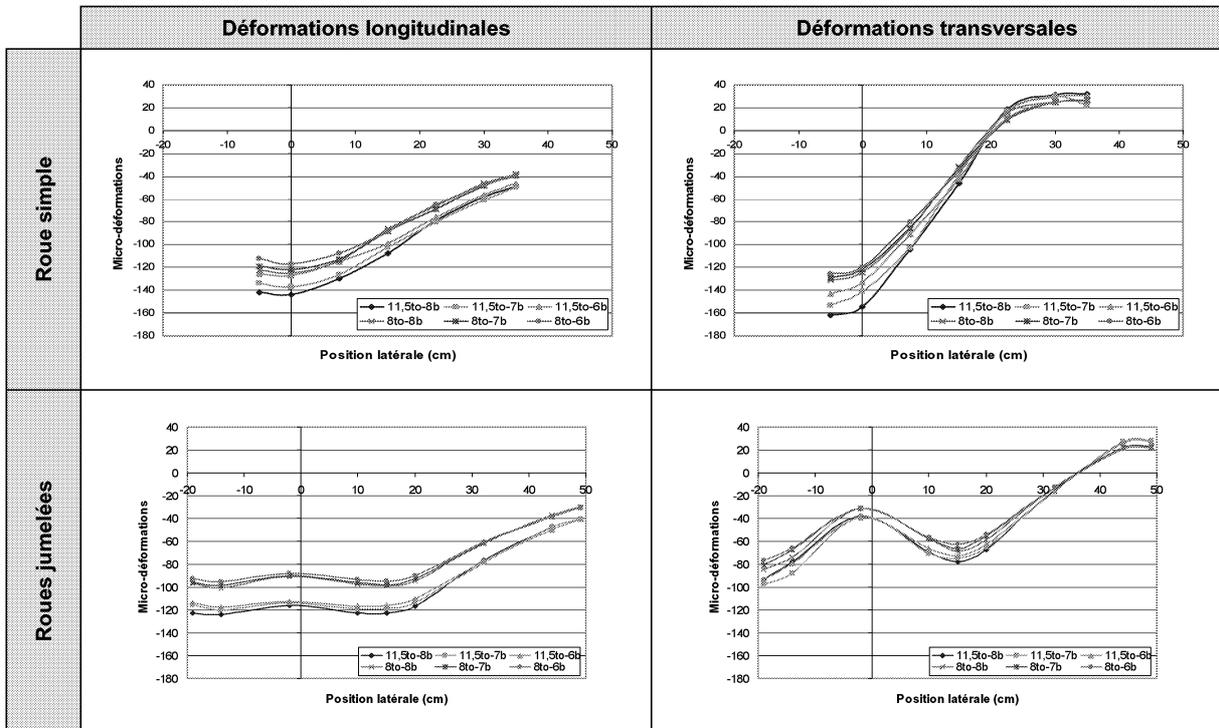


Figure 42 : Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 5°C, structure de 10 cm

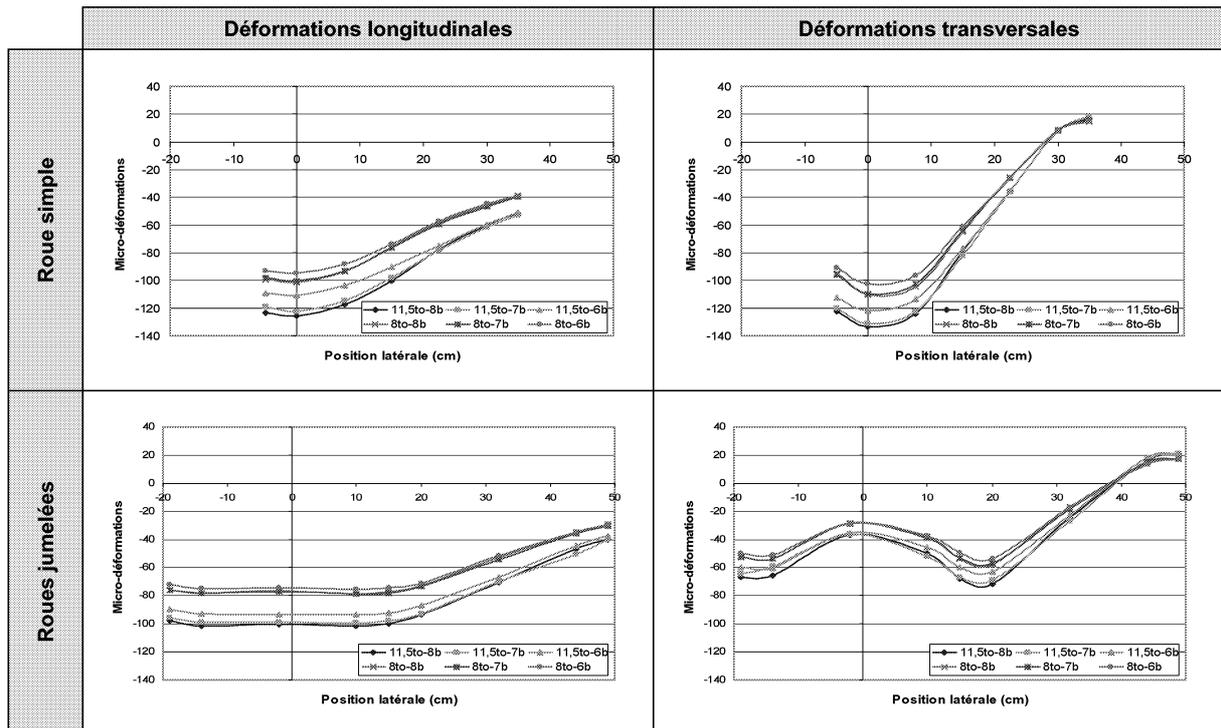


Figure 43 : Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 15°C, structure de 17 cm

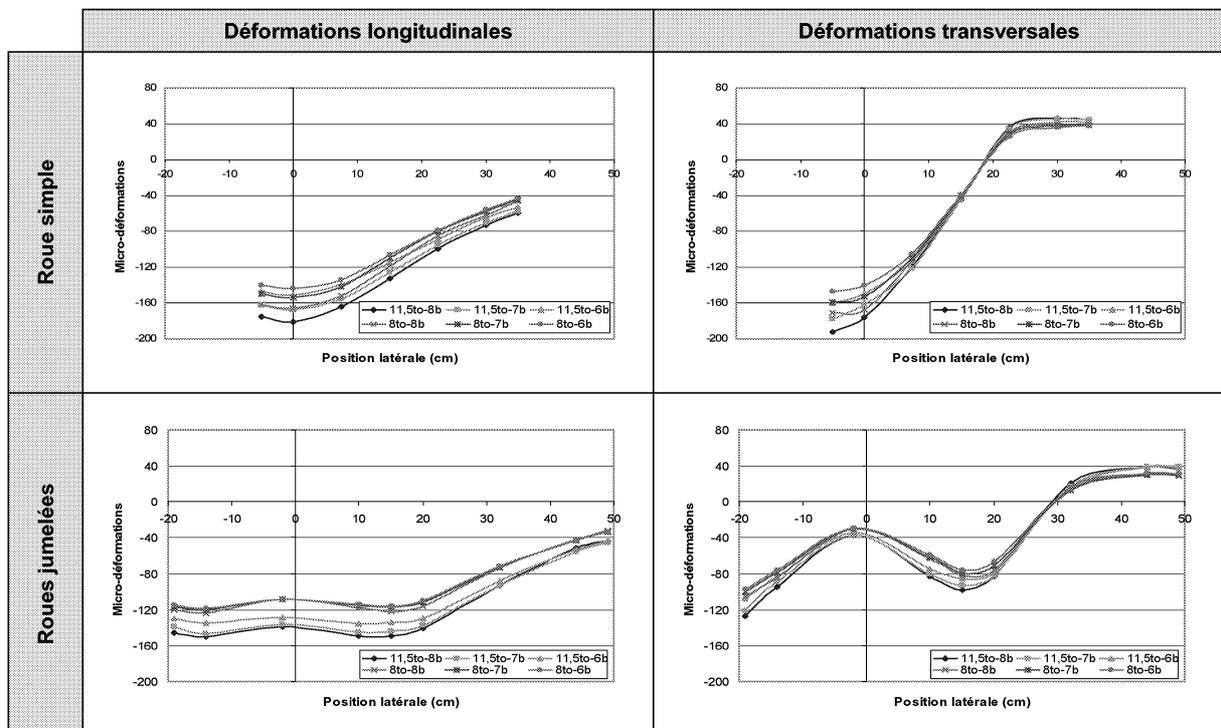


Figure 44 : Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 15°C, structure de 10 cm

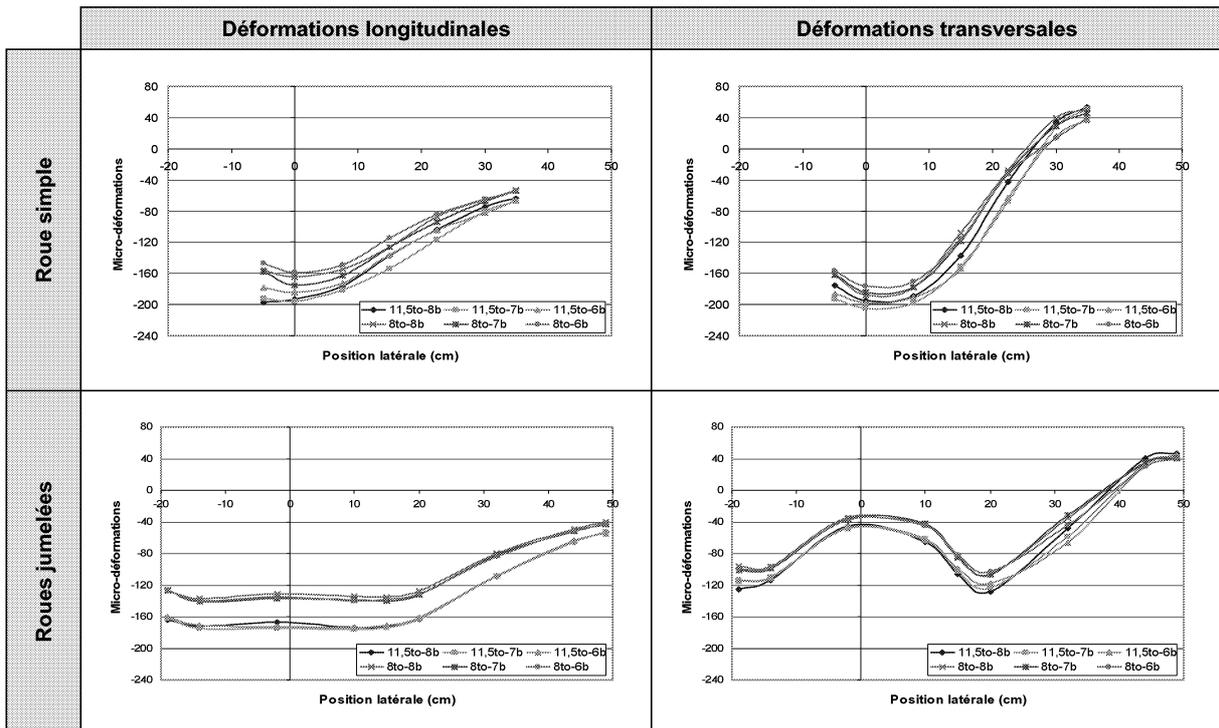


Figure 45 : Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 30°C, structure de 17 cm

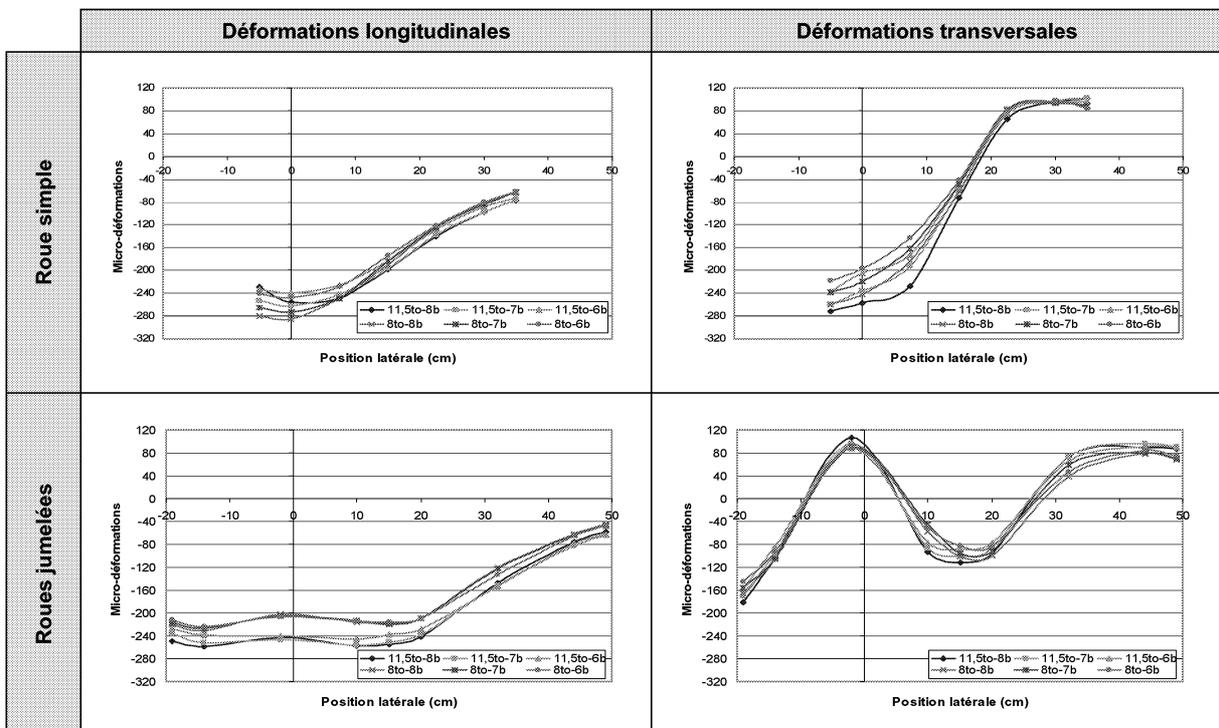


Figure 46 : Répartition latérale des déformations maximales obtenues par mesures au bas de la couche de base 30°C, structure de 10 cm

Dans un premier temps, ces représentations confirment ce qui a été établi par l'étude des amplitudes maximales (cf. § 4.2) : les déformations au bas de la couche de base dépendent essentiellement de l'intensité de la charge et du type de pneumatique mais peu de la pression de gonflage. Pour cette dernière, la tendance que l'on peut observer est que les déformations augmentent généralement avec la pression. D'autre part, l'intensité de la charge influence non seulement les amplitudes maximales, mais l'ensemble du bassin des déformations puisque des écarts sont observés indépendamment de la position. Ceci est particulièrement valable pour les déformations longitudinales.

Concernant le type de roues utilisées, les mesures montrent clairement que les charges sont mieux diffusées dans les chaussées par des roues jumelées que par des roues simples, ceci quelles que soient la structure et la température envisagées :

- les amplitudes maximales sont moins importantes
- la zone d'influence est plus étendue
- l'influence de la pression est légèrement plus marquée pour les roues simples que pour les roues jumelées, même si les variations demeurent peu importantes. Les bassins de déformations sont plus nettement séparés en fonction de l'intensité de la charge.

Pour les roues simples, les mesures obtenues donnent des extensions maximales au centre de la roue sensiblement égales dans les deux directions. Compte tenu que les modélisations élastique donne des amplitudes égales selon les deux directions, cela signifie que les constats faits lors de la comparaison entre les mesures et les modélisations des extensions longitudinales maximales sont aussi valables pour les déformations transversales (cf. § 4.2). En revanche, pour les roues jumelées, les extensions longitudinales sont dans tous les cas nettement supérieures aux transversales. Ceci s'explique par le fait que, longitudinalement, les deux roues cumulent leurs effets alors que, transversalement, ils se compensent.

Sur la structure épaisse et pour les roues jumelées, les amplitudes longitudinales maximales sont quasi constantes sur une largeur d'environ 30 cm de part et d'autre de l'axe du jumelage. Cette largeur correspond approximativement à la zone dans laquelle l'effet des deux roues du jumelage se cumule lorsqu'on admet une diffusion de la charge à 45°.

Dans le cas présent, compte tenu d'une l'épaisseur de 17 cm pour la structure et d'un espace de 10 cm entre les bords intérieurs des pneus, on obtient une largeur théorique de 24 cm (Figure 47).

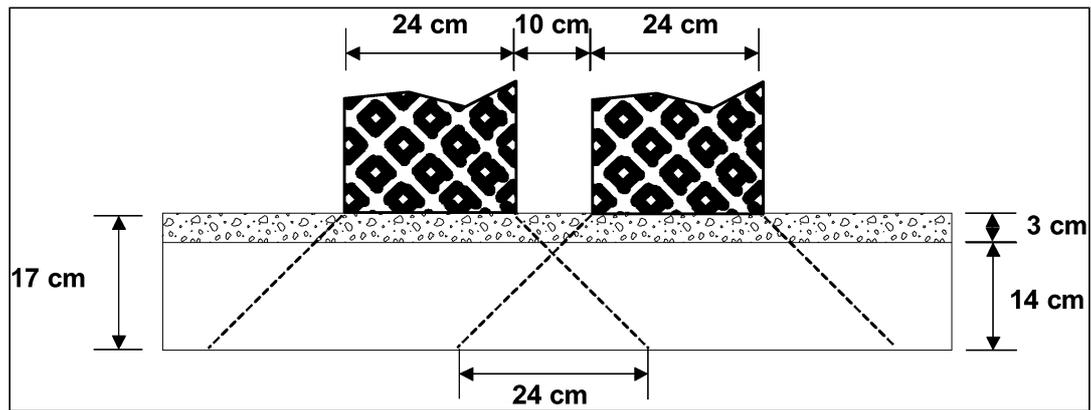


Figure 47 : Diffusion de la charge pour la structure en HMT 22s

En revanche, pour la structure plus fine, l'effet de chacune des roues est visible avec des amplitudes maximales des déformations qui diminuent légèrement au centre des roues. Cela signifie que plus la structure est fine, plus les roues jumelées tendent à se comporter comme deux charges séparées et que les amplitudes maximales doivent alors être cherchées au centre de l'une des deux roues.

Concernant les déformations transversales pour les roues jumelées, une diminution sensible des amplitudes maximales est observée entre les deux roues pour tous les cas de charge et toutes les températures. Cette réduction est plus importante lorsque la structure est moins rigide : dans le cas extrême - pour la structure la moins rigide (10 cm à 30°C) - les mesures signalent même la présence des contractions signalées précédemment (voir Figure 40). Ce phénomène s'explique par le fait que, sous l'effet d'une seule roue, les déformations varient rapidement latéralement et ceci d'autant plus rapidement que la structure est peu rigide.

Dans le cas extrême que constitue la structure de 10 cm à 30°C, il faut souligner que les contractions maximales mesurées entre les roues ont des amplitudes similaires aux extensions maximales mesurées sous les roues. Par ailleurs, les modélisations confirment que les déformations induites à 17 cm par une seule des roues jumelées sont des contractions, expliquant les résultats obtenus expérimentalement (cf. Figure 49, page 105).

#### 4.3.2 Comparaison des résultats des mesures et des modélisations

Cette comparaison est menée sur la base des résultats obtenus pour un seul cas de référence défini par une charge de 11,5to et une pression de 8 bars. Cette charge est appliquée sur les deux types de roues. Les résultats sont donnés sous la forme de superposition des résultats expérimentaux avec ceux tirées des modélisations. La comparaison porte sur les déformations longitudinales et transversales (Figure 48 et Figure 49).

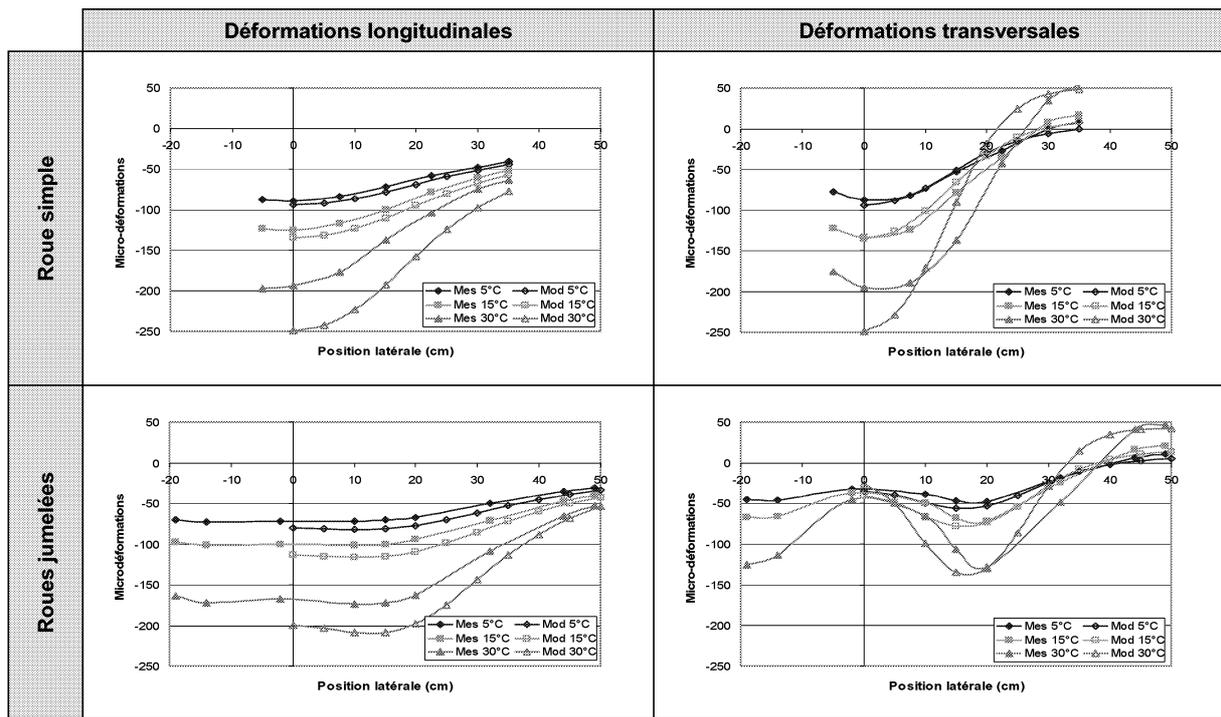


Figure 48 : Comparaison des répartitions latérales des déformations maximales au bas de la couche de base obtenues par mesures et par modélisations – structure de 17 cm

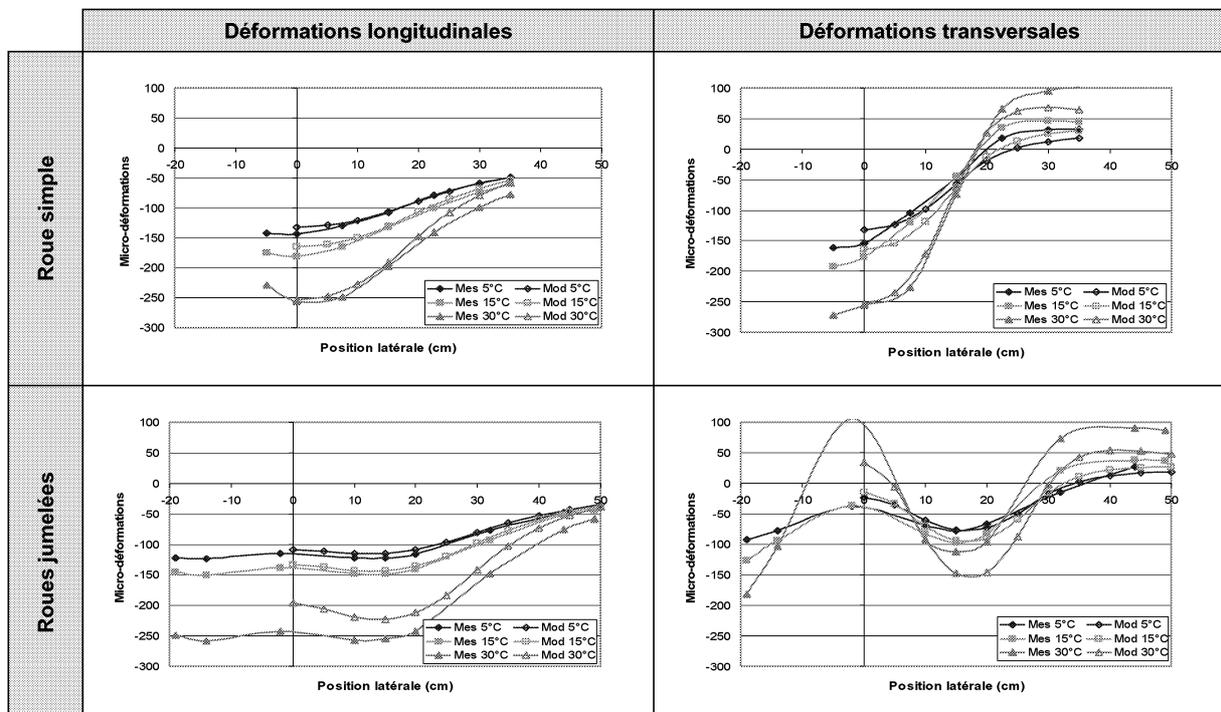


Figure 49 : Comparaison des répartitions latérales des déformations maximales au bas de la couche de base obtenues par mesures et par modélisations – structure de 10 cm

Ces figures confirment encore les observations faites à partir des amplitudes maximales :

- les modélisations surestiment les mesures pour la structure la plus épaisse et les sous-estiment pour la structure la plus mince
- elles donnent de meilleurs résultats à 5 et 15°C qu'à 30°C.

Par ailleurs, il faut souligner que les conséquences des incertitudes quant à la position réelle de la charge par rapport à la jauge de mesure (cf. § 3.3.3) ne semblent pas importantes, puisque les répartitions latérales des amplitudes maximales obtenues par les mesures et celles provenant des modélisations concordent bien. Cette concordance permettra ultérieurement de comparer les signaux de déformation pour une position déterminée (cf. § 5 et 6).

Concernant les déformations transversales, les modélisations confirment l'existence de contraction à faible distance des bords des roues. Ces contractions sont d'autant plus importantes et proches du centre des roues que la structure est peu rigide. Dans l'ensemble, les modélisations sous-estiment l'intensité de ces contractions par rapport aux mesures, ceci d'autant plus que la température est élevée.

Sauf lorsque la structure de 10 cm est sollicitée par un jumelage à une température de 30°C, l'allure générale de la répartition des déformations fournie par les modélisations est conforme à celle obtenue par les mesures. Dans la situation précitée, les résultats expérimentaux sont sensiblement plus contrastés que ceux des modélisations.

#### **4.4 Prise en compte des résultats pour le calcul du trafic équivalent**

Malgré des limites évidentes pour le dimensionnement des chaussées (cf. § 2.3), la notion de trafic équivalent sera encore utilisée durant de nombreuses années, en raison de sa simplicité et de sa faculté de fournir des estimations des trafics circulant sur les routes. Il semble donc nécessaire de pouvoir introduire les résultats expérimentaux et théoriques obtenus dans les méthodes de calcul du trafic équivalent. Afin de conserver le principal avantage du trafic équivalent, sa facilité de calcul, les relations proposées doivent demeurer assez simples et surtout ne pas faire appel à des données de trafic trop détaillées.

La plupart des modèles de performance suivant des lois de type puissance sur la base des déformations (cf. § 2.6), il est raisonnable de conserver la forme de loi de puissance pour le calcul du trafic équivalent. Pour les mêmes raisons, il n'est pas non plus judicieux de chercher à modifier la valeur de la puissance.

En revanche, il convient d'essayer d'introduire les ratios de déformations définis pour les différents paramètres de charge (cf. § 4.2.4 à 4.2.6). Toutefois, il a été montré que certains paramètres de charge ont des effets liés entre eux ou avec la rigidité des structures (épaisseur et température). D'autre part, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont valables pour des variations définies des paramètres de

charge<sup>69</sup>. Par conséquent les formules proposées dans les chapitres qui suivent doivent être comprises comme une tentative d'exploitation des résultats d'une étude particulière et ne doivent pas être généralisées sans autre précaution.

#### 4.4.1 Intensité de la charge

Pour pouvoir tirer des conclusions générales applicables à un calcul simple du trafic équivalent, il est indispensable de calculer des valeurs moyennes pour les ratios. Elles ont été effectuées en groupant les résultats des différentes températures et des différentes pressions de gonflage (Tableau 31 et Tableau 32). Ce choix est notamment fondé sur le fait que ces informations (températures et pressions) sont rarement disponibles à partir des données de trafic<sup>70</sup>.

**Tableau 31 : Moyennes des ratios des déformations pour la charge - structure**

	Structure 17 cm		Structure 10 cm	
	Roues simples	Roues jumelées	Roues simples	Roues jumelées
Mesures	1,20	1,27	1,05 (1,10) <sup>71</sup>	1,19
Modélisations	1,25	1,34	1,19	1,28

**Tableau 32 : Moyennes des ratios des déformations pour la charge – structure et roues**

	Structures		Roues	
	Structure 17 cm	Structure 10 cm	Roues simples	Roues jumelées
Mesures	1,23	1,12 (1,15)	1,12 (1,15)	1,23
Modélisations	1,30	1,23	1,23	1,31

Il a été souligné que le ratio des déformations pour la charge est toujours inférieur à celui de la charge. Selon les résultats moyens, une augmentation de 44 % de la charge conduit à une augmentation de 15 à 25 % des déformations pour des roues simples et de 20 à 30 % pour des roues jumelées. Avec une loi de puissance pour le calcul du trafic équivalent (cf. § 2.3.2), une charge de 11,5 to correspondrait à plus de 6 essieux de 8 to<sup>72</sup>. En revanche, sur la base des ratios de charge des déformations longitudinales, un essieu de 11,5 to correspond à un nombre d'essieu de 8 to compris entre 2 (ratio de 1,15) et 4 (ratio de 1,30). Selon les résultats analysés ici, les lois de puissances utilisant le simple rapport des charges pour le calcul du trafic équivalent pénalisent les charges importantes. Par ailleurs, il n'est pas correct d'admettre une proportionnalité directe entre l'intensité des charges et les

<sup>69</sup> Seulement deux charges et trois pressions

<sup>70</sup> Les types de roue ne sont pas non plus disponibles, mais il est relativement facile de les déduire en fonction des axes des véhicules

<sup>71</sup> Les résultats entre parenthèses ne tiennent pas compte des mesures effectuées à 30 °C sur la structure de 10 cm qui indiquaient une diminution des déformations avec l'augmentation de la charge

<sup>72</sup>  $\left(\frac{11,5}{8}\right)^5 = 6,14$ , alors que  $(1,15)^5 = 2,01$  et  $(1,30)^5 = 3,71$

déformations qu'elles engendrent pour les méthodes mécaniques. Globalement, on peut observer que la variation relative des déformations correspond environ à la moitié de celle de la charge.

En admettant que les durées de vie se calculent à partir de loi de puissance basée sur les déformations, il est possible d'introduire nos résultats dans le calcul du trafic équivalent. Soit  $k_{ch}$  le ratio entre la variation relative de la charge et celle des déformations :

$$k_{ch} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{réf}} = \frac{\Delta P}{P_{réf}} = \frac{P_i - P_{réf}}{P_{réf}} \quad \text{Eq. 28}$$

avec :

$k_{ch}$	= ratio entre l'augmentation relative de la charge et l'augmentation relative des déformations (dans le cas présent, proche de 2)
$\Delta\varepsilon$	= variation entre la déformation obtenue pour une charge $P_i$ et celle obtenue pour la charge $P_{réf}$
$\varepsilon_{réf}$	= déformation obtenue
$P_i$	= charge d'un essieu $i$
$P_{réf}$	= charge de l'essieu standard de référence

On peut calculer le coefficient d'équivalence  $K_i$  de la façon suivante :

$$K_i = \left(1 + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_{réf}}\right)^\alpha = \left(1 + \frac{P_i - P_{réf}}{k_{ch} \cdot P_{réf}}\right)^\alpha = \left(\frac{P_i + P_{réf} \cdot (k_{ch} - 1)}{k_{ch} \cdot P_{réf}}\right)^\alpha \quad \text{Eq. 29}$$

Pour que cette formule puisse être utilisée efficacement, il est évidemment nécessaire que la valeur de  $k_{ch}$  varie peu en fonction de la variation de la charge ou de la structure, ce qui est le cas pour les résultats de cette étude.

#### 4.4.2 Pression de gonflage

Comme pour l'effet de la charge, des valeurs moyennes sont calculées avec les résultats de toutes les températures et toutes les intensités (Tableau 33 et Tableau 34).

**Tableau 33 : Moyennes des ratios des déformations pour la pression - structure**

	Structure 17 cm		Structure 10 cm	
	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
<b>Mesures</b>	1,05	1,05	1,06	1,09
<b>Modélisations</b>	1,05	1,09	1,07	1,13

**Tableau 34 : Moyennes des ratios des déformations pour la pression - roues**

	Roues simples		Roues jumelées	
	6 à 7 bars	6 à 8 bars	6 à 7 bars	6 à 8 bars
<b>Mesures</b>	1,08	1,10	1,03	1,04
<b>Modélisations</b>	1,07	1,14	1,04	1,08

Compte tenu de lois de comportement admettant une puissance de 5, les ratios obtenus conduisent à des nombres de charges pouvant aller jusqu'à doubler. Même si ces variations ne doivent pas être négligées, il faut noter qu'elles demeurent peu importantes comparées à celles calculées à partir des variations de la charge. Cela confirme que la pression réelle des pneumatiques est sensiblement moins importante que l'intensité de la charge.

Si pour l'effet de la charge, les résultats n'étaient pas trop dépendant du type de roues, il n'en est pas de même ici. Sur la base des résultats de notre étude<sup>73</sup>, l'effet de la pression est différencié selon le type de roue : on peut admettre des augmentations relatives des déformations de l'ordre du quart, respectivement de la moitié de l'augmentation relative de la pression selon que la charge est appliquée sur des roues jumelées ou simples.

La prise en compte la pression dans le calcul du trafic équivalent peut se faire par l'intermédiaire d'un nouveau coefficient  $k_4$  tenant compte la pression dans la formule proposée par l'OCDE (cf. Eq. 5, page 19)<sup>74</sup>.

<sup>73</sup> Particulièrement ceux des modélisations

<sup>74</sup> Les travaux de Eisenman, qui sont à la base de cette formule, proposaient déjà l'introduction d'un tel facteur de pression (OCDE 1983) et (Eisenmann 1975)

Selon une méthode similaire à ce qui a été fait pour la charge, on définit un facteur  $k_{pr}$  comme le ratio entre la variation relative de la pression et celle des déformations, pour une roue jumelée :

$$k_{pr} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_{réf}} = \frac{\Delta p}{p_{réf}} = \frac{p_{réelle} - p_{réf}}{p_{réf}} \quad \text{Eq. 30}$$

avec :

- $k_{pr}$  = ratio entre l'augmentation relative de la pression et l'augmentation relative des déformations pour une charge sur des roues jumelées (dans le cas présent égal à environ 4)
- $\Delta \varepsilon$  = variation entre la déformation obtenue pour une pression  $p_{réelle}$  et celle obtenue pour la pression  $p_{réf}$
- $\varepsilon_{réf}$  = déformation avec la pression de la charge de référence
- $p_{réelle}$  = pression réelle de la charge
- $p_{réf}$  = pression de la charge référence

En introduisant un coefficient  $k_r$  pour différencier les résultats selon le type de roues, le coefficient  $k_4$  peut être calculé de la façon suivante :

$$k_4 = 1 + \frac{k_r}{k_{pr}} \left( \frac{p_{réelle}}{p_{réf}} - 1 \right) \quad \text{Eq. 31}$$

où :

- $k_r$  = coefficient de roue (dans le cas présent égal à 2 pour roue simple et à 1 pour des roues jumelées)

Cette formule doit être prise avec beaucoup de précaution, notamment par le fait qu'elle ne tient pas compte de l'effet du type de structure relevé comme non négligeable sur l'effet de la pression (cf. Tableau 20 page 85 et Tableau 33 page 109) : l'effet de la pression est plus marqué sur les structures fines. D'autre part, comme pour la formule proposée pour tenir compte de l'intensité de la charge, il faudrait s'assurer que les coefficient  $k_{pr}$  et  $k_r$  demeurent relativement constants quelles que soient les conditions envisagées (variation de la pression et structure). De plus, il faut rappeler que les mesures et les modélisations utilisées pour arriver à cette proposition correspondent à des pressions dans l'ensemble plus faibles que les pressions réelles des pneus des véhicules lourds, généralement comprises entre 7 et 9 bars (Partanen et Panu 2001).

#### 4.4.3 Type de roues

Comme précédemment, les valeurs moyennes doivent permettre de généraliser les observations à l'ensemble des résultats (Tableau 35 et Tableau 36).

**Tableau 35 : Moyennes des ratios des déformations pour le type de roues**

	Structure 17 cm		Structure 10 cm	
	11,5 to	8 to	11,5 to	8 to
Mesures	1,18	1,24	1,11	1,26
Calculs	1,14	1,22	1,12	1,20

**Tableau 36 : Moyennes des ratios des déformations pour le type de roues**

	Structures		Charge	
	Structure 17 cm	Structure 10 cm	11,5 to	8 to
Mesures	1,21	1,19	1,14	1,25
Calculs	1,18	1,16	1,13	1,21

La formule de l'OCDE (cf. Eq. 5, page 19) pour le calcul du trafic équivalent permet la prise en compte du type de roue par l'intermédiaire du coefficient  $k_2$ , pour lequel une valeur de 1,20 est proposée. De façon générale, les résultats obtenus dans le cadre de ce travail confirment la validité de cette proposition. Il convient néanmoins de signaler que cette valeur tend à diminuer lorsque la charge augmente et est plus faible pour les structures peu épaisses.

## 4.5 Enseignements

Les résultats de ce chapitre sont certainement ceux qui répondent le mieux à la thématique initiale de ce travail de thèse qui consiste à évaluer l'effet des conditions de chargement sur le dimensionnement des chaussées.

Indépendamment des conditions de chargement, les facteurs influençant le plus les déformations dans les couches bitumineuses sont leur épaisseur et leur température, en d'autres termes, la rigidité des structures qui dépend de la combinaison de ces deux facteurs.

Les résultats obtenus, tant par les mesures que par les modélisations, montrent que **tous les paramètres de charge** interviennent sur les amplitudes maximales des déformations horizontales au bas des couches de base. Il est cependant possible de définir une hiérarchie de leur importance :

1. intensité de la charge
2. type de roue
3. pression de gonflage

Si l'ordre exact des deux premiers paramètres est discutable, puisqu'il se base sur une seule et importante augmentation de la charge, il est en revanche indéniable que le paramètre le moins important est la pression. Les résultats des amplitudes mesurées à différentes positions latérales confirment ces observations. Il existe des interactions entre ces différents paramètres et elles sont plus importantes pour la structure mince. L'interaction la plus importante est observée entre le type de roue et la pression de gonflage sur la structure mince<sup>75</sup>. Cette hiérarchie apparaît à partir des résultats des mesures expérimentales et de ceux des modélisations. Selon les résultats des analyses statistiques, les déformations obtenues à partir des modélisations permettent de réaliser une évaluation des variations des conditions de chargement conforme à celle obtenue à partir des résultats expérimentaux.

Les modélisations élastiques des chaussées routières, effectuées selon les principes de la méthode française de dimensionnement et en utilisant des résultats d'essais en laboratoire pour les modules des matériaux bitumineux, fournissent des résultats compris dans une **fourchette de 25 %** autour de ceux des mesures expérimentales. Les écarts les plus importants sont obtenus pour la température la plus élevée, ce qui s'explique sans doute principalement par la prise en compte partielle du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux - diminution globale de la valeur du module complexe, sans distinction entre la partie réelle et la partie imaginaire. Les résultats des modélisations sont systématiquement supérieurs à ceux des mesures expérimentales pour la structure la plus épaisse alors que la tendance est inversée pour la structure la plus fine.

La variation relative de l'intensité de la charge est systématiquement **supérieure** à celle des déformations maximales, autant pour les mesures expérimentales ou que pour celles des modélisations. Comme la détermination du trafic équivalent se base sur le rapport des intensités des charges élevé à une puissance donnée, l'effet des charges importantes est surestimé si on admet que la durée de vie dépend de la déformation maximale au bas de la couche de base. Une modification de la loi pour le calcul du trafic équivalent dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement est proposée.

Les roues simples engendrent des extensions maximales lors du passage de la charge du même ordre de grandeur longitudinalement et transversalement. Ce résultat est logique pour les modélisations compte tenu des hypothèses du modèle de Burmister et est confirmé par les mesures, bien que les empreintes des pneus ne soient pas symétriques.

Les roues jumelées assurent une **meilleure diffusion de la charge** dans les chaussées en réduisant les amplitude des déformations et en élargissant leur zone de diffusion. Elles réduisent par ailleurs considérablement les amplitudes maximales des extensions transversales. Pour des structures de faible rigidité, des contractions transversales au bas de la couche de base peuvent ainsi apparaître entre les deux roues jumelées.

---

<sup>75</sup> Concernant les effets détaillés de chacun des paramètres de charge, le lecteur est prié de se référer à la synthèse donnée précédemment (cf. § 4.2.9)

Les amplitudes maximales des déformations longitudinales sont des extensions quelle que soit la position latérale. En revanche, les amplitudes maximales des déformations transversales correspondent à des extensions ou à des contractions selon la position latérale à laquelle elles sont étudiées.

Il est possible de tenir compte de tous les paramètres de charge dans le calcul du trafic équivalent à partir des déformations au bas de la couche de base pour autant que les dégradations soient admises comme dépendantes du niveau de déformations. Des propositions allant dans ce sens ont été faites.

Concernant les **résultats expérimentaux**, les écarts entre les amplitudes maximales et minimales pouvant être obtenues à partir d'un signal de déformations sont très faibles. Ces écarts sont de l'ordre de 5 % pour les mesures à 5 et 15°C et augmentent jusqu'à 8 ou 15 % pour une température de 30°C.



# 5. Signaux de déformations au bas de la couche de base

## 5.1 Contenu et démarche

Le chapitre précédent était consacré à l'étude des amplitudes des déformations au bas de la couche de base. Ce chapitre étudie les signaux de déformations dans leur ensemble, c'est-à-dire durant le passage de la roue sur la jauge, permettant ainsi d'observer l'évolution des déformations en fonction du temps. Il porte sur les mêmes données expérimentales que le chapitre précédent. L'analyse des signaux se déroule en deux phases :

- comparaison des signaux de déformations expérimentaux pour divers cas de charge
- modélisation de signaux de déformations pour un cas de charge et comparaison avec les signaux expérimentaux.

Ces analyses doivent essentiellement permettre :

- d'évaluer l'influence des paramètres de charge
- de quantifier les variations des déformations durant le passage d'une charge
- de juger de l'efficacité des modélisations pour décrire un signal de déformation complet.

Le chapitre s'achève par des décompositions de signaux en séries de Fourier. Ces décompositions doivent permettre de déterminer des fréquences pour simuler au mieux des signaux expérimentaux à partir d'une sinusoïdale.

## 5.2 Comparaison de signaux expérimentaux

Les signaux représentés sont composés de 200 points de mesures, pris de part et d'autre de l'amplitude maximale de déformation. Compte tenu des variations existant entre les signaux selon la direction dans laquelle la charge se déplace lors de leur enregistrement (cf. § 3.3.3), ils sont sélectionnés de façon à ce que le point de mesure soit toujours approché suivant la même direction. Le choix de cette direction n'a pas posé de problème particulier pour les signaux de la structure de 17 cm qui sont très réguliers. En revanche, la jauge retenue pour la structure de 10 cm fournit des signaux légèrement dissemblables selon la direction. Ces dissemblances se traduisent par des pics d'extension avant et après le passage de la charge qui sont plus ou moins contrastés. Il a été décidé d'utiliser les signaux présentant le plus de contraste entre ces deux pics pour les superpositions. L'importance de ces différences pourra être visualisée au chapitre suivant où des signaux expérimentaux

pris selon les deux directions de déplacement de la charge seront comparés avec des signaux modélisés (cf. Figure 68, page 137).

Les signaux expérimentaux ont été superposés en plaçant 100 points de mesures de part et d'autre des extensions maximales. Les valeurs de la déformation du premier point de mesure sont admises comme étant égales à zéro pour tous les signaux.

Latéralement, les mesures correspondent au centre du pneu pour les roues simples et à 20 cm par rapport au centre des roues jumelées. Ces positions ont été choisies à partir des répartitions latérales des amplitudes maximales (cf. § 4.3) de façon à ce que les signaux soient ceux conduisant aux valeurs maximales des déformations. Par ailleurs, la bonne concordance observée entre les mesures et les modélisations pour la répartition latérale permet la comparaison de signaux pour une position transversale définie, malgré les incertitudes concernant la position de la charge par rapport à la jauge de mesure.

Si le choix pour les roues simples était évident, il n'en est pas de même pour les roues jumelées. Dans ce cas, les amplitudes maximales dans le sens longitudinal et celles dans le sens transversal ne sont pas toujours obtenues à la même position.

Comme pour la répartition latérale des extensions maximales et afin de donner une vision globale de tous les cas de charge étudiés, les signaux ont été superposés pour les trois températures et pour les deux structures (Figure 50 à Figure 55).

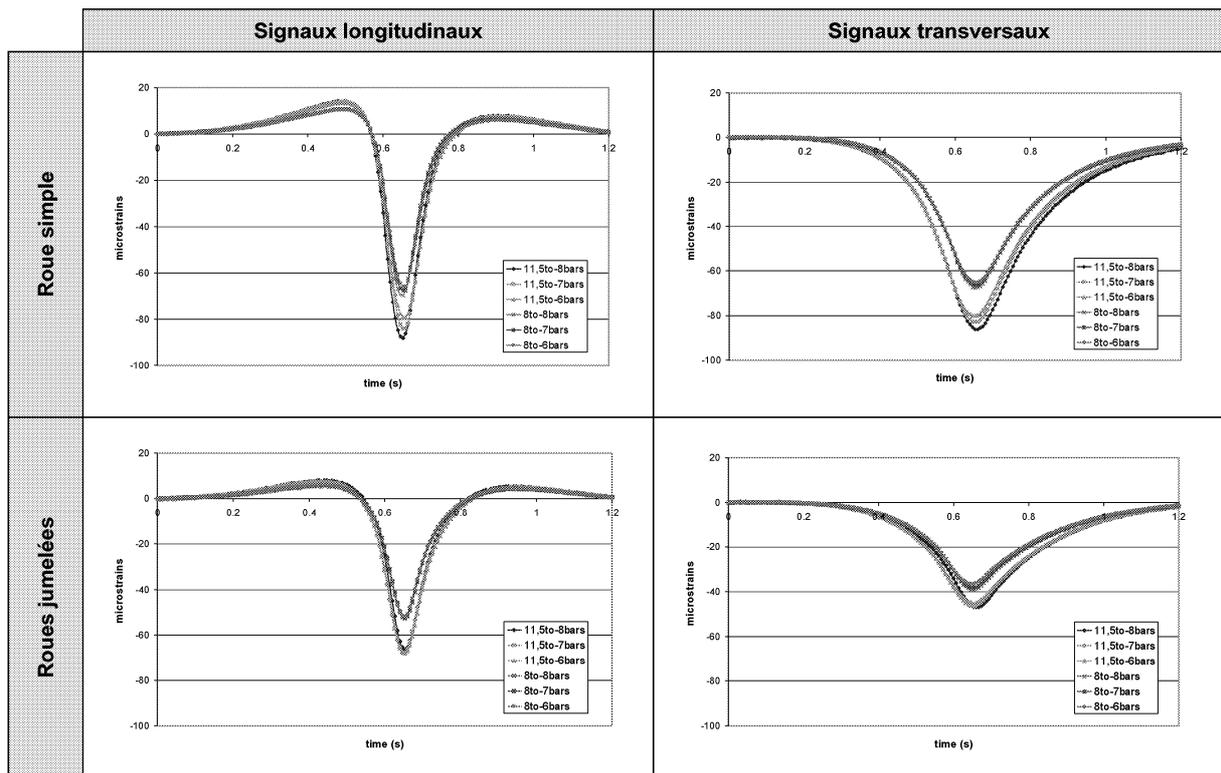


Figure 50 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 5°C - structure de 17 cm

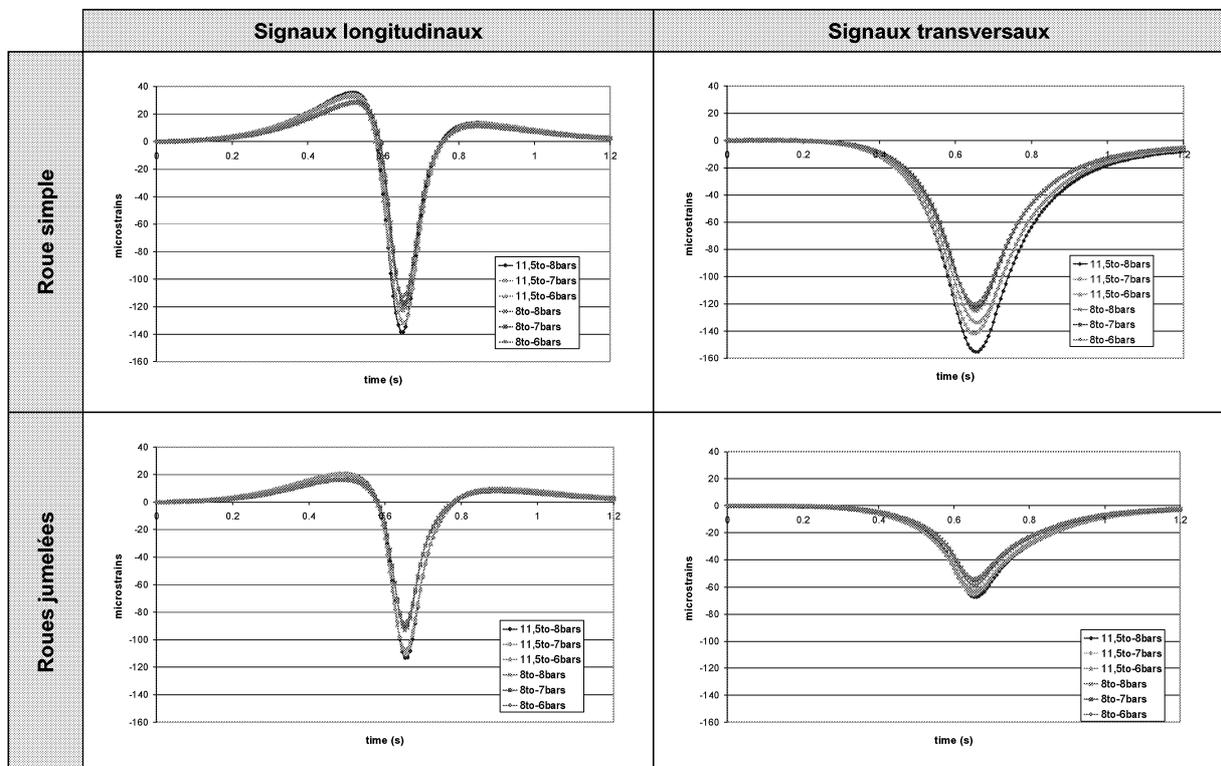


Figure 51 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 5°C - structure de 10 cm

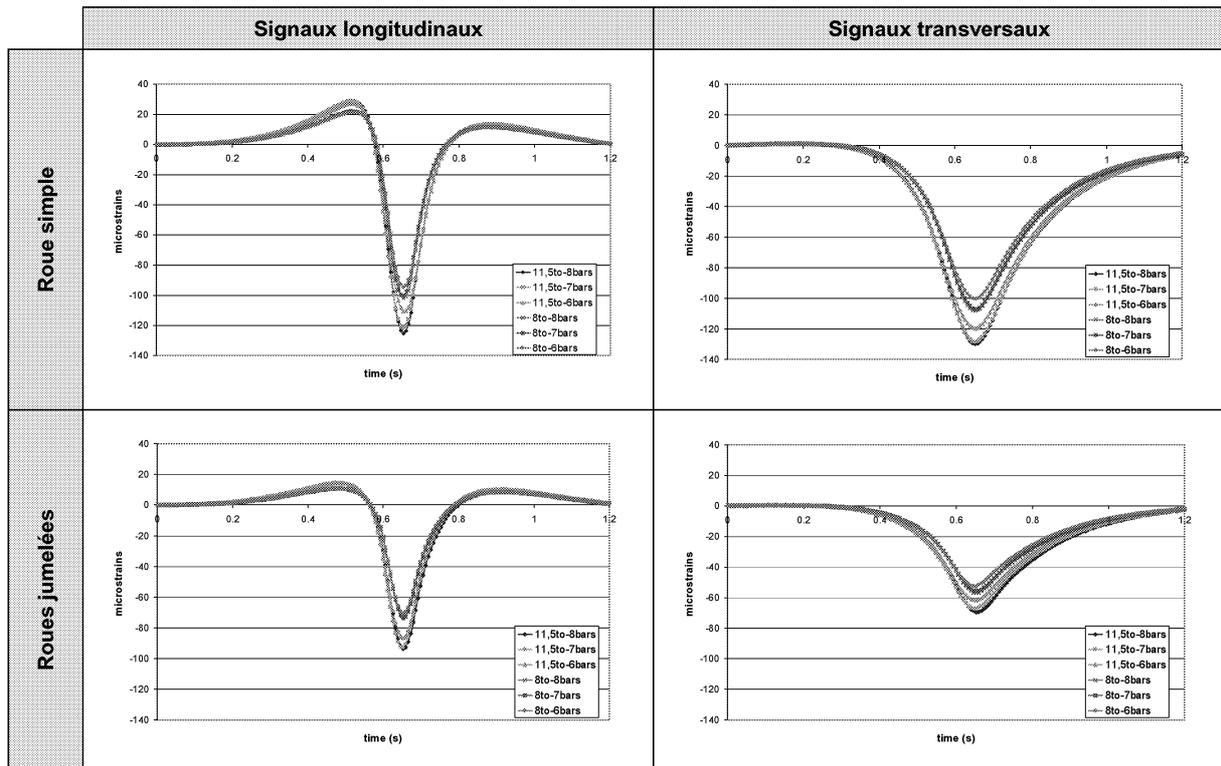


Figure 52 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 15°C - structure de 17 cm

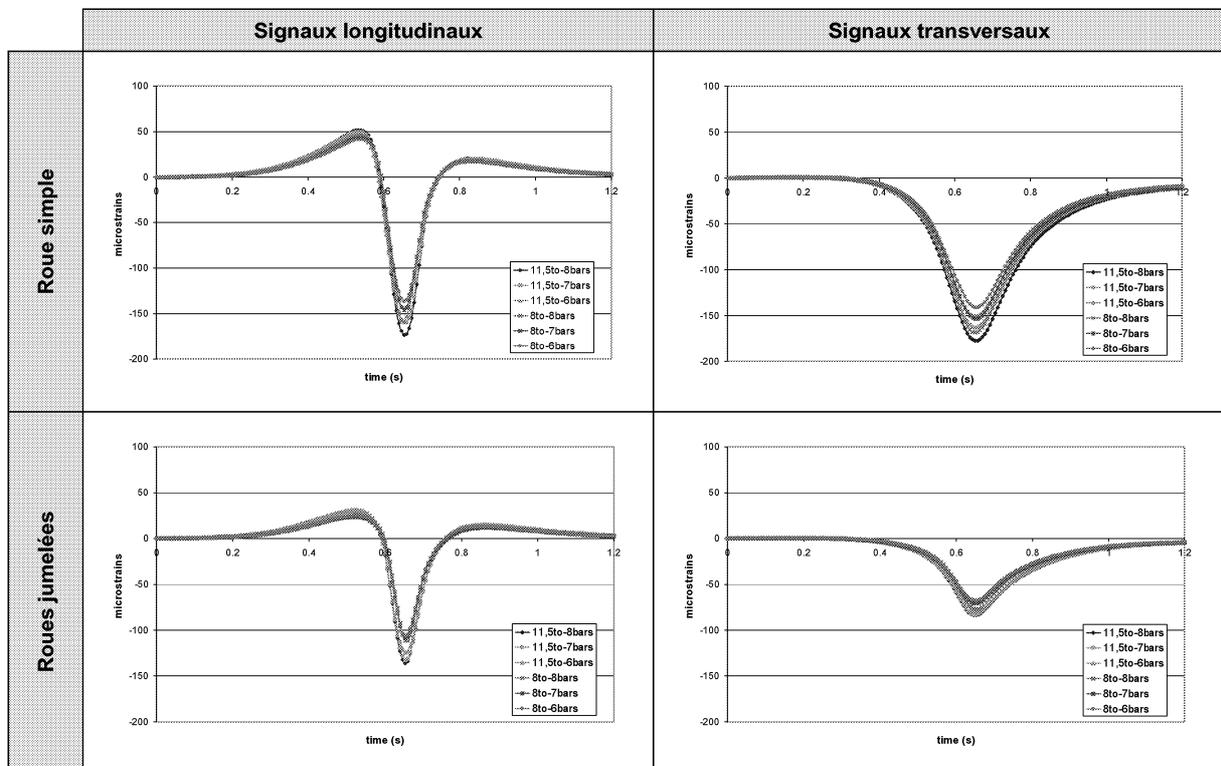


Figure 53 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 15°C - structure de 10 cm

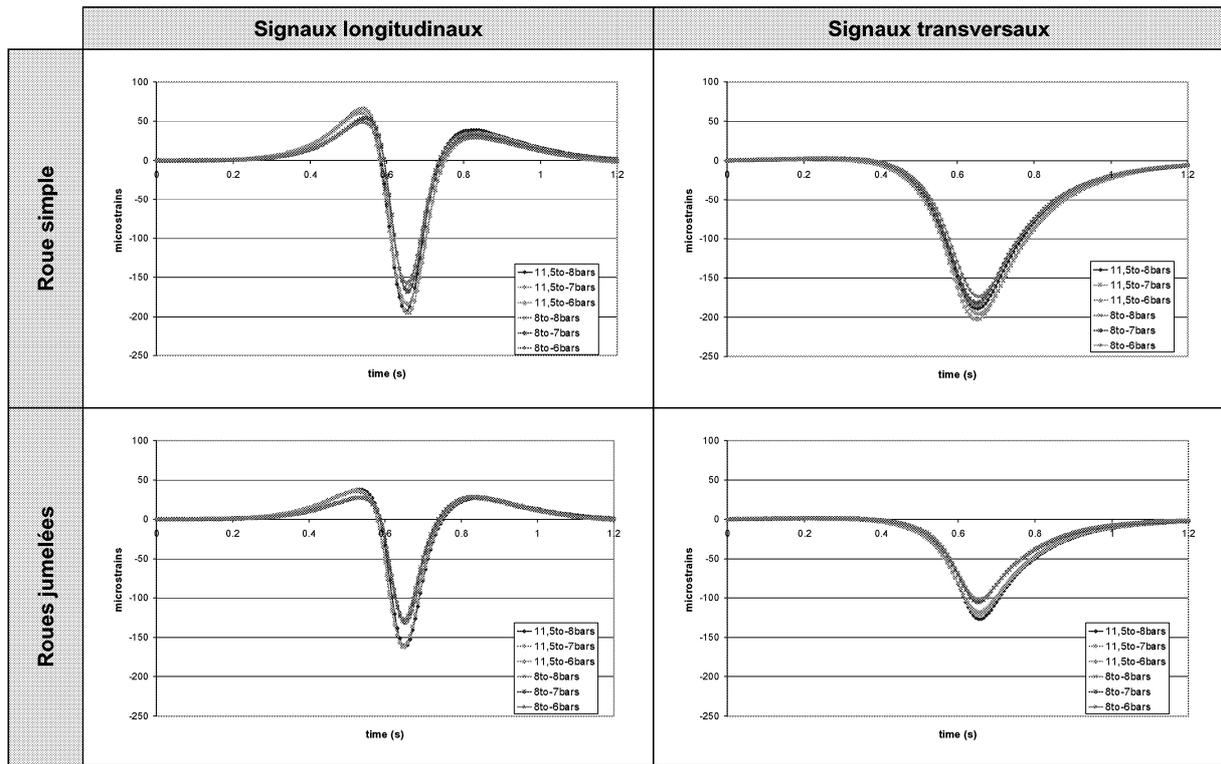


Figure 54 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 30°C - structure de 17 cm

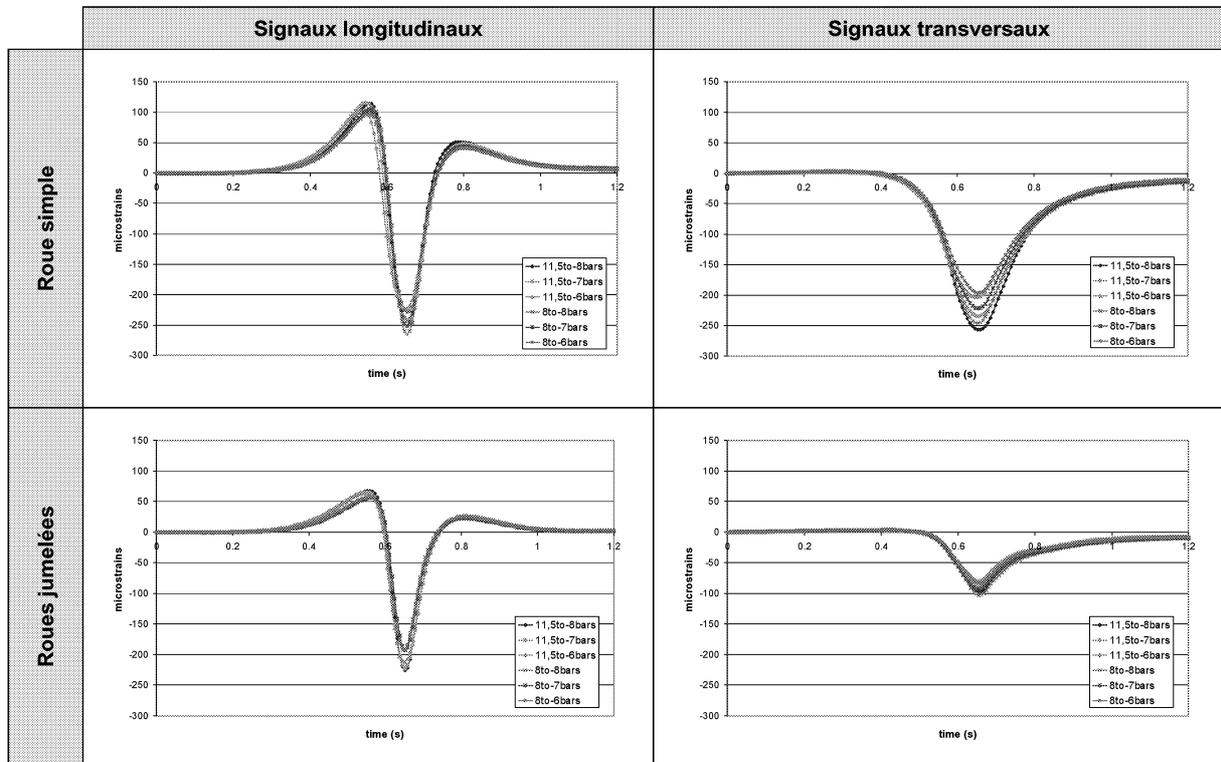


Figure 55 : Signaux de déformations au bas de la couche de base, 30°C - structure de 10 cm

Avant d'analyser ces signaux, on ne peut qu'être frappé par l'extraordinaire régularité des mesures effectuées à la Halle-fosse. En effet, à l'exception de la zone d'extension centrale où les mesures marquent des légères variations en fonction de leur condition de chargement, les signaux se superposent parfaitement. Lors de la sélection effectuée pour que les signaux correspondent tous à la même direction, il était possible de juger de cette direction uniquement grâce à cette parfaite superposition.

Ces figures confirment sur l'ensemble des signaux les observations faites à partir des amplitudes maximales pour l'effet des paramètres de chargement, à savoir :

- prédominance de la charge
- déformations plus importantes avec une roue simple
- faible influence de la pression
- effet marqué de la température
- amplitudes maximales égales selon les deux directions pour les roues simples
- déformations plus faibles transversalement que longitudinalement pour les roues jumelées.

Ces représentations mettent également en évidence le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux. Tant longitudinalement que transversalement, c'est la dissymétrie temporelle des signaux qui révèle le comportement viscoélastique. Cette dissymétrie est particulièrement visible pour les signaux longitudinaux :

- le pic de contraction mesuré à l'approche de la roue est toujours supérieur à celui mesuré après son passage
- la durée entre le pic initial de contraction et l'extension maximale est inférieure à celle entre cette extension maximale et le second pic de contraction.

Cela signifie que la valeur absolue de la vitesse de déformation est supérieure lorsque la roue s'approche du point de mesure que lorsqu'elle s'en éloigne. Ces différences de vitesse de déformation sont aussi visibles sur les signaux transversaux.

Par ailleurs, les images des signaux permettent d'observer des différences importantes selon la direction de mesures. Les déformations longitudinales et transversales se différencient essentiellement par le fait que les premières induisent une alternance des sollicitations durant le passage de la charge (cf. § 3.4.1). Pour les roues simples, cela signifie que si les extensions maximales sont du même ordre de grandeur dans les deux directions, les variations des déformations dans le temps - leurs vitesses de déformation - sont en revanche très différentes. D'autre part, toutes les amplitudes des pics de déformations longitudinales sont plus importantes pour les roues simples que pour les roues jumelées, ce qui induit des vitesses de déformation plus importantes pour le premier type de roues. La température influence naturellement aussi ces vitesses de déformation.

La suite de l'analyse porte sur l'effet de la température sur les signaux de déformations puis sur les vitesses de déformation des signaux. L'influence de la température sur ces dernières est aussi abordée.

### *5.2.1 Effet de la température*

L'effet de la température est étudié pour les mêmes conditions de charge (11,5 to, 8 bars, deux types de pneus) que pour la comparaison des répartitions latérales des déformations maximales (cf. § 4.3.2). Les signaux longitudinaux et transversaux issus des mesures sur les deux structures sont superposés pour les trois températures (Figure 56 et Figure 57).

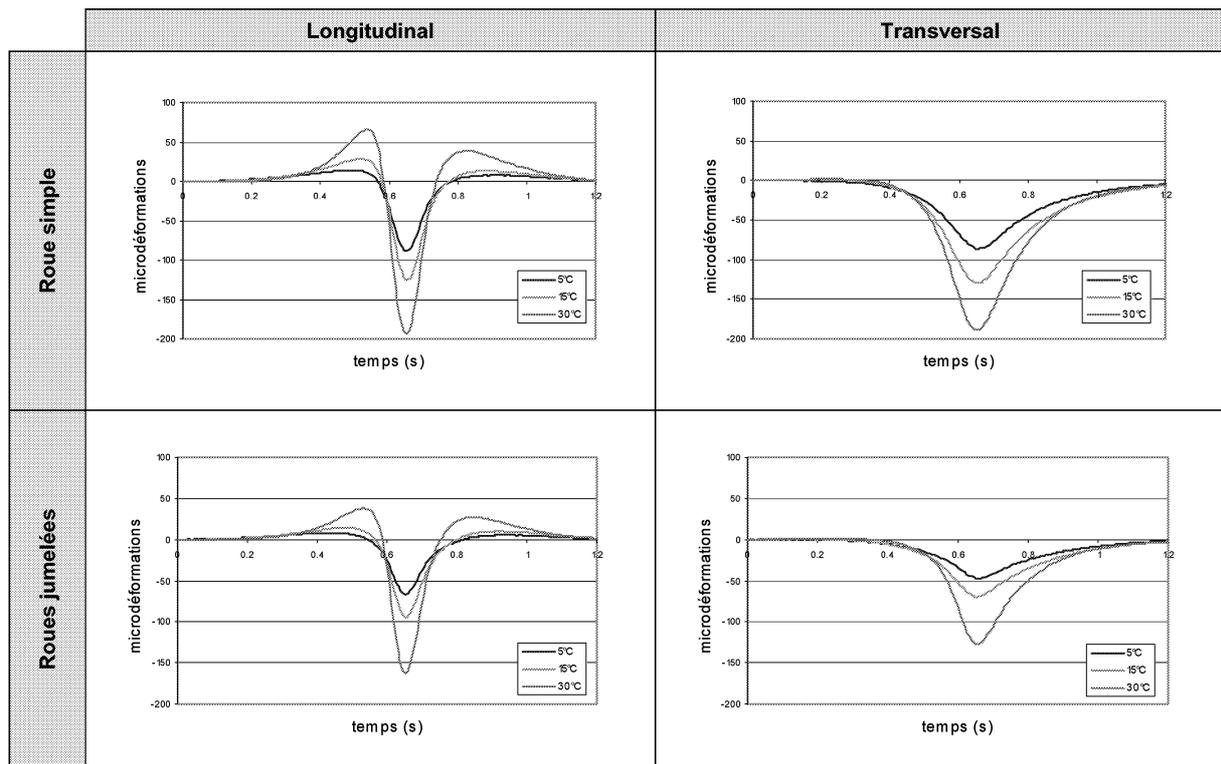


Figure 56 : Signaux de déformations au bas de la couche de base pour différentes températures - structure de 17 cm

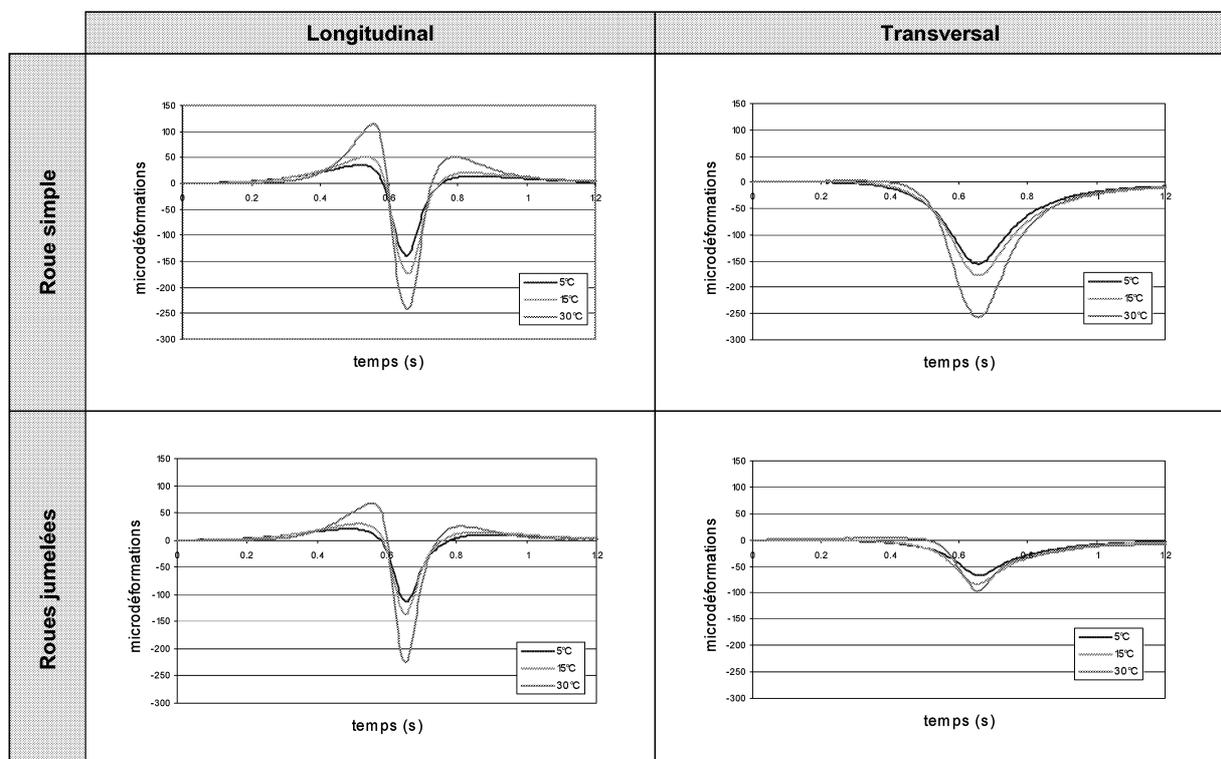


Figure 57 : Signaux de déformations au bas de la couche de base pour différentes températures - structure de 10 cm

Ces superpositions montrent clairement que la température influence non seulement les amplitudes maximales des déformations mais également les valeurs des contractions longitudinales à l'approche de la roue.

Longitudinalement, la zone de diffusion de la charge augmente lorsque la température diminue : les contractions relevées avant ou après le passage de la roue sont plus éloignées l'une de l'autre à basse qu'à haute température. Par conséquent, les extensions enregistrées à haute température ont une amplitude maximale plus importante, mais cette extension dure moins longtemps qu'à basse température.

Cette différence peut être mise en évidence par le temps de chargement  $t_{ch}$  entre les deux pics de contractions (cf. Figure 31, page 64). Afin de juger d'une éventuelle influence des conditions de charge sur ces temps de chargement, ils ont été relevés pour tous les signaux présentés au chapitre précédent (Tableau 37 et Tableau 38).

**Tableau 37 : Temps de chargement  $t_{ch}$  entre les pics de contraction ( $10^{-3}$  secondes) - structure de 17 cm**

		11,5to-8bars	11,5to-7bars	11,5to-6bars	8to-8bars	8to-7bars	8to-6bars	Moyenne
5°C	1r	407	400	427	393	413	420	410
	2r	513	513	527	487	533	527	517
15°C	1r	360	380	380	340	367	373	367
	2r	433	440	433	453	453	440	442
30°C	1r	287	300	307	273	280	293	290
	2r	307	313	313	287	307	300	304

**Tableau 38 : Temps de chargement  $t_{ch}$  entre les pics de contraction ( $10^{-3}$  secondes) - structure de 10 cm**

		11,5to-8bars	11,5to-7bars	11,5to-6bars	8to-8bars	8to-7bars	8to-6bars	Moyenne
5°C	1r	340	340	340	327	327	340	336
	2r	420	407	420	420	407	420	416
15°C	1r	287	313	313	293	293	293	299
	2r	347	333	333	347	333	340	339
30°C	1r	233	260	260	233	240	253	247
	2r	253	260	273	247	253	247	256

Ni l'intensité de la charge ni la pression de gonflage n'influencent significativement les temps de chargement. Ils dépendent en revanche de la rigidité de la structure (température et épaisseur) et du type de roue. Les temps augmentent lorsque la rigidité augmente et ceux du jumelage sont toujours supérieurs à ceux des pneus simples. D'autre part, l'effet du type de pneu est d'autant plus marqué que la structure est rigide.

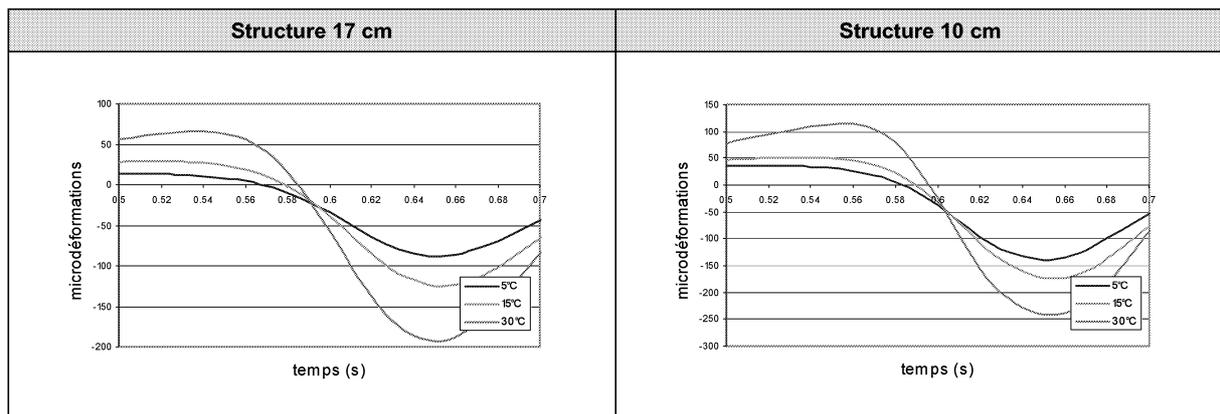
Le fait que les temps (ou les distances entre les pics) augmentent avec la rigidité de la structure est parfaitement logique puisque la zone d'influence d'une charge augmente avec la rigidité de la structure sur laquelle elle s'applique.

En revanche, il est paradoxal que les temps de chargement soient plus courts pour les pneus simples puisque, pour des conditions (intensité et pression) de charge égales, leurs empreintes sont plus longues que celles des pneus jumelés. Cette situation s'explique probablement par l'effet de superposition des roues du jumelage qui étend la zone d'influence de cette configuration.

Il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- les déformations induites par des pneus simples sont plus importantes en terme d'intensité, mais agissent moins longtemps que celles provenant de roues jumelées
- les déformations induites dans une structure peu rigide sont plus importantes en terme d'intensité mais agissent moins longtemps que dans une structure rigide.

Il faut encore signaler qu'en regardant dans le détail les signaux longitudinaux pour les roues simples, on observe qu'il existe une position située avant l'extension maximale pour laquelle la déformation est la même, soit presque nulle, quelle que soit la température<sup>76</sup> (Figure 58).



**Figure 58 : Détail des signaux longitudinaux mettant en évidence une position où la déformation ne dépend pas de la température**

La position de ce point dépend de la structure : sur les signaux présentés ici, il se trouve à environ 19,5 cm sur la structure de 17 cm et à 15,5 sur celle de 10 cm. On observe également cette situation sur les signaux des roues jumelées mais la concordance des points est moins marquée. Il faut encore souligner qu'après le passage de la charge, une situation similaire est observable, mais comme pour les roues jumelées, la concordance n'est pas aussi bonne.

<sup>76</sup> Cette observation est partiellement confirmée par les modélisations (cf. Figure 69, page 138)

### 5.2.2 Vitesses de déformation des signaux

Les vitesses de déformation correspondent aux dérivées des signaux et elles ont été calculées pour tous les signaux de déformations présentés dans le cadre de ce chapitre. Afin de juger de leur évolution durant le passage d'une charge, elles sont d'abord présentées graphiquement en fonction du temps, puis les valeurs extrêmes enregistrées avant et après le passage de la charge sont données dans des tableaux.

Une vision globale de l'ensemble des cas étudiés est donnée par les superpositions des vitesses de déformation obtenues pour les différents cas de charge (Figure 59 à Figure 64).

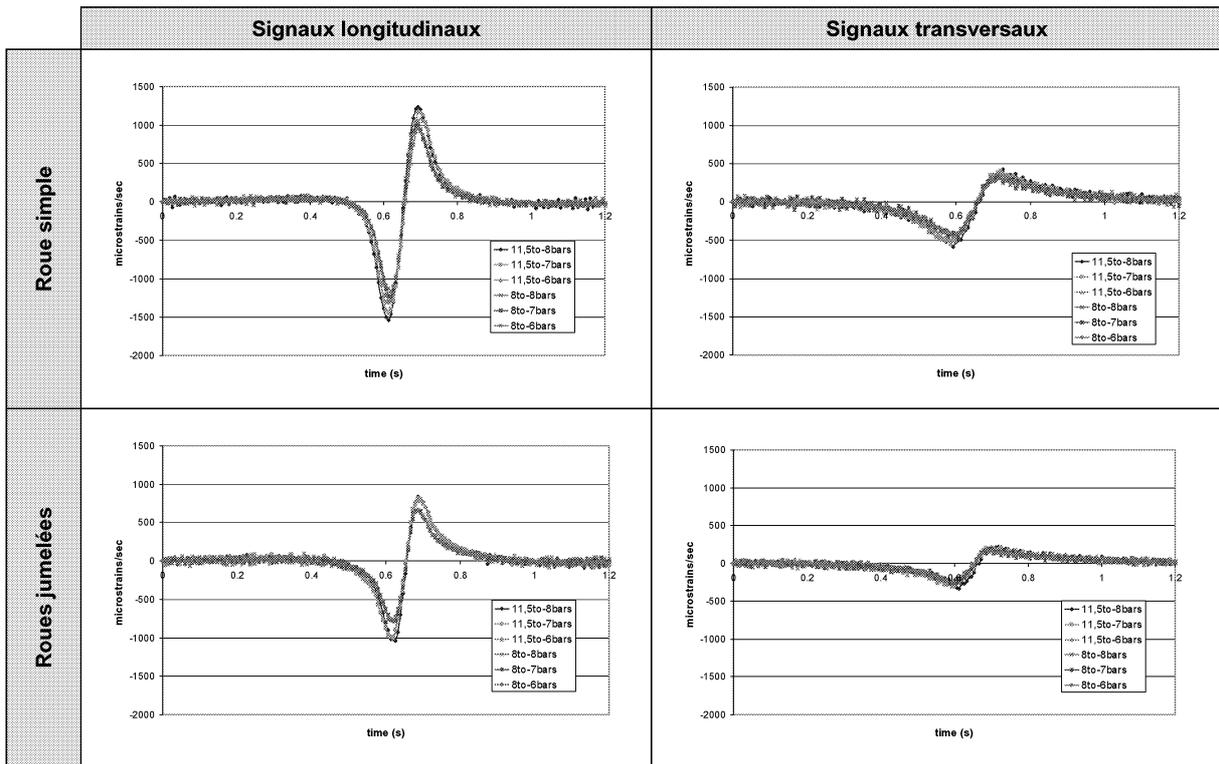


Figure 59 : Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 5°C - structure de 17 cm

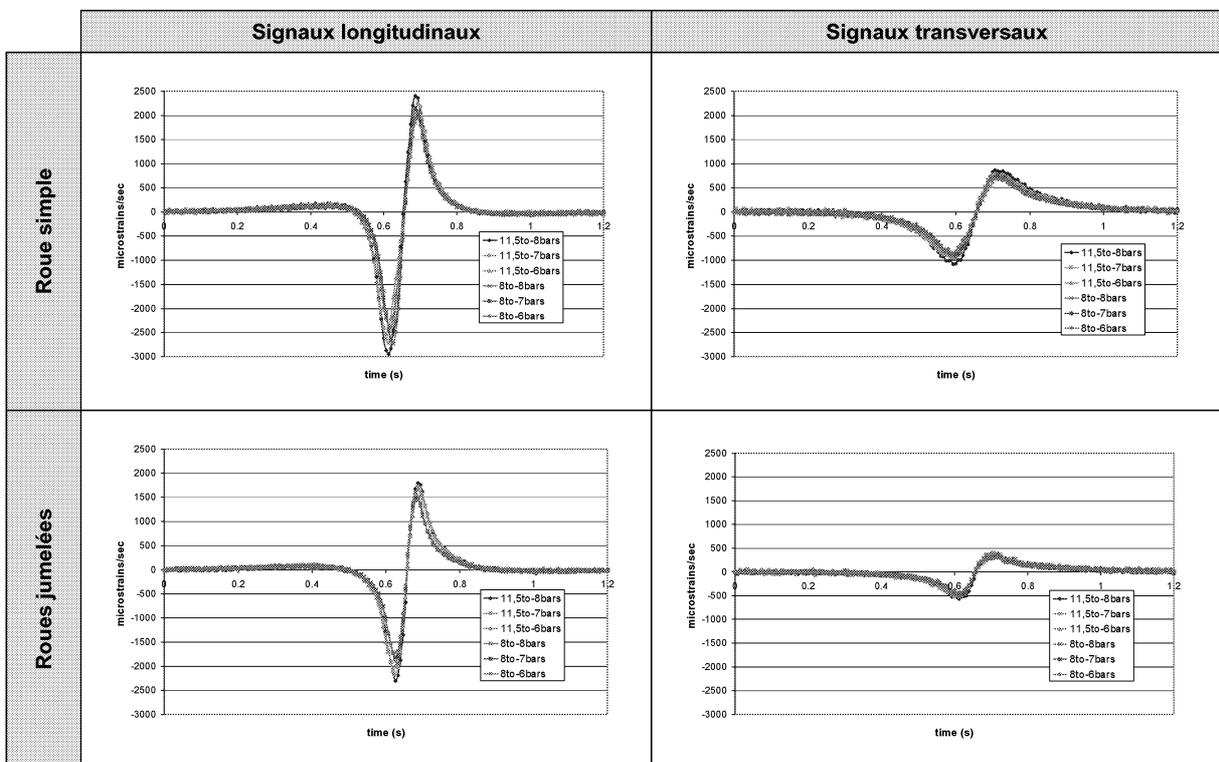


Figure 60 : Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 5°C - structure de 10 cm

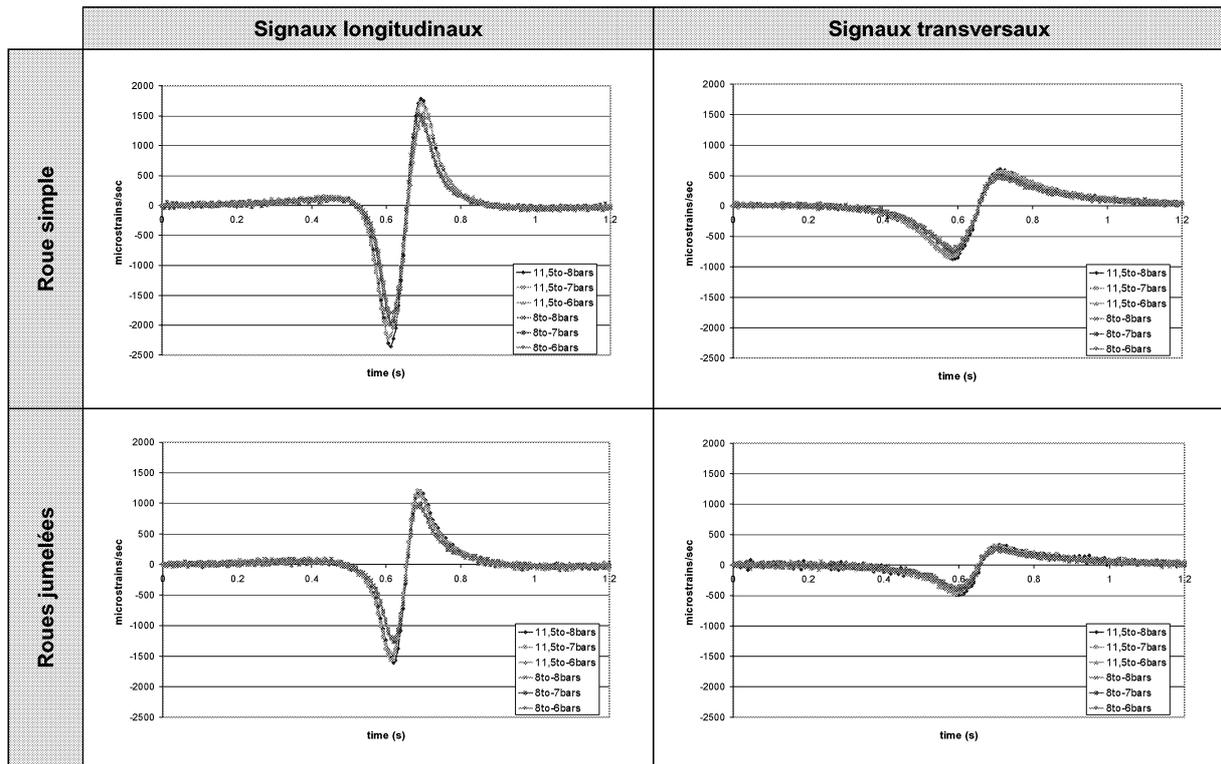


Figure 61 : Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 15°C - structure de 17 cm

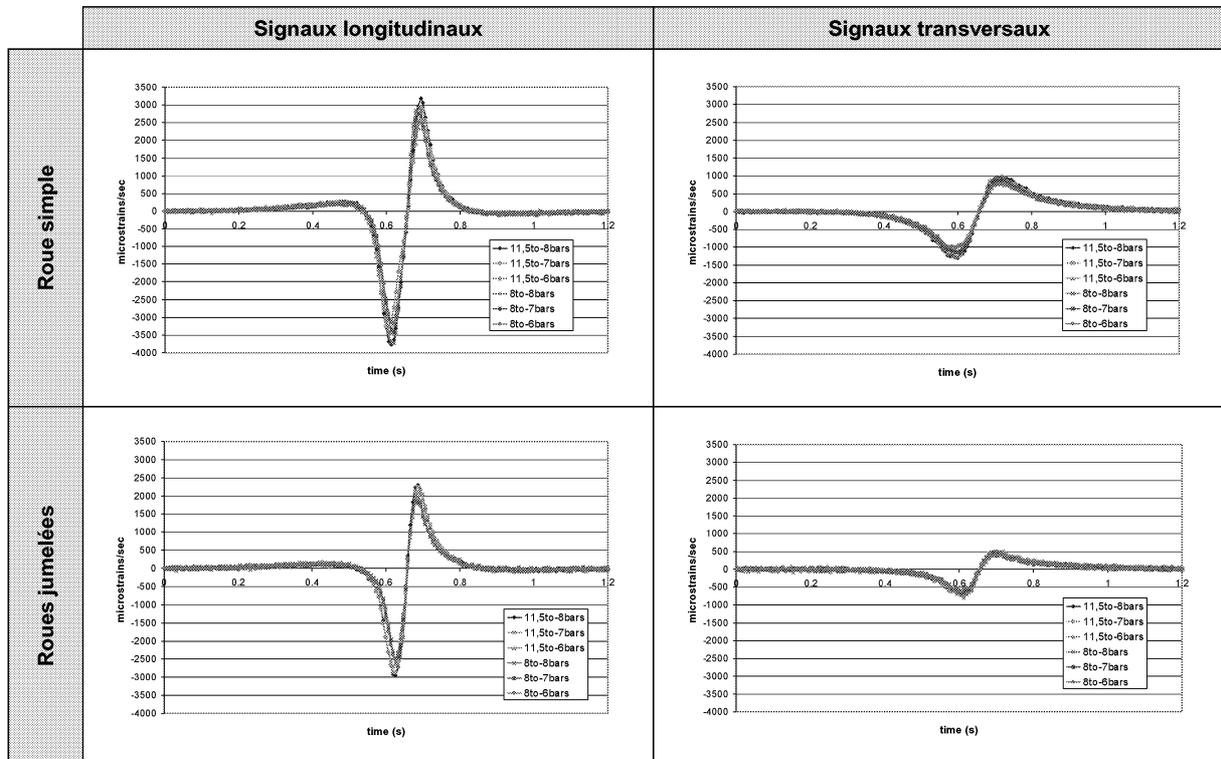


Figure 62 : Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 15°C - structure de 10 cm

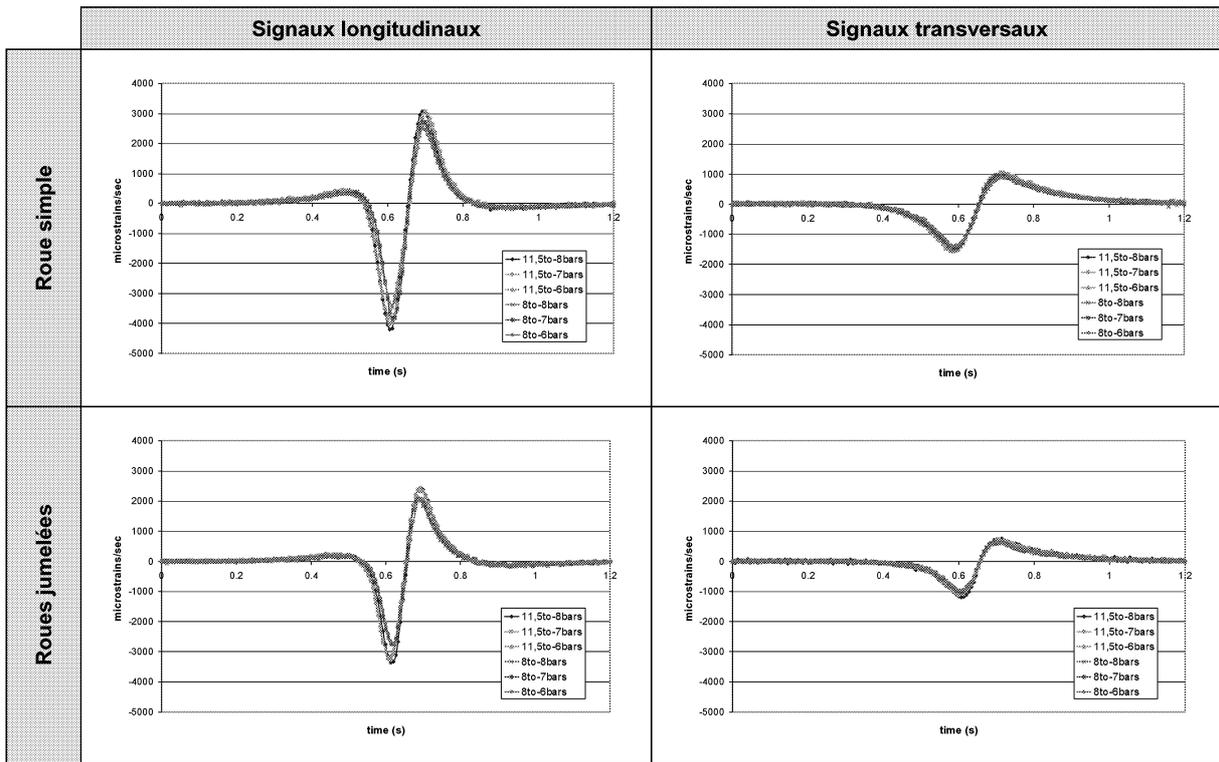


Figure 63 : Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 30°C - structure de 17 cm

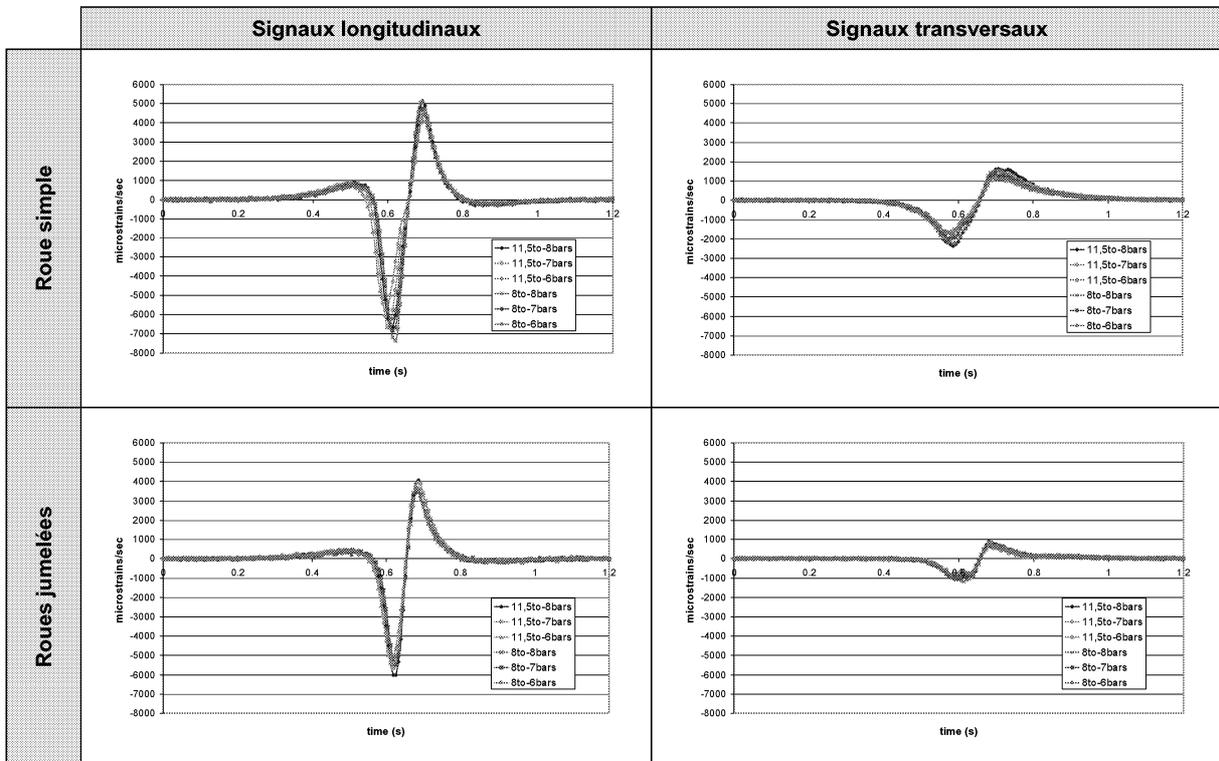


Figure 64 : Vitesses de déformation des signaux au bas de la couche de base, 30°C - structure de 10 cm

Ces figures ne mettent pas en évidence de grandes variations dues à l'intensité de la charge ou la pression de gonflage. Elles montrent en revanche que les vitesses de déformation varient considérablement selon la situation étudiée. La température est indiscutablement le paramètre le plus influent et fait l'objet du prochain chapitre. Ces figures confirment par ailleurs les observations effectuées à partir des signaux :

- valeurs absolues des vitesses de déformation plus importantes avant le passage de la charge qu'après (effet de la viscosité)
- vitesses de déformation nettement supérieures longitudinalement que transversalement
- vitesses de déformation supérieures pour les roues simples.

Les vitesses maximales de déformations avant et après le passage de la charge ont été extraites pour l'ensemble des situations étudiées en les séparant par structure et par direction (Tableau 39 à Tableau 42).

**Tableau 39 : Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux longitudinaux - structure de 17 cm (microdéf. par secondes)**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.
5°C	11,5 to	1308	1086	1446	1164	1539	1236	984	795	1002	816	1035	840
	8 to	1176	957	1236	999	1290	1056	774	660	780	660	786	666
15°C	11,5 to	1977	1554	2226	1713	2355	1779	1464	1134	1572	1209	1614	1200
	8 to	1800	1410	1971	1503	2013	1530	1215	951	1269	999	1266	978
30°C	11,5 to	3687	2739	4026	3075	4200	3072	3159	2349	3273	2424	3366	2445
	8 to	3405	2481	3807	2709	3888	2784	2715	2061	2748	2088	2769	2031

**Tableau 40 : Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux longitudinaux - structure de 10 cm (microdéf. par secondes)**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.
5°C	11,5 to	2538	2079	2721	2247	2943	2409	2061	1662	2181	1728	2313	1794
	8 to	2418	1935	2649	2148	2742	2166	1737	1434	1815	1485	1941	1608
15°C	11,5 to	3246	2652	3468	2949	3771	3189	2709	2109	2868	2244	2943	2295
	8 to	3156	2517	3414	2742	3732	2937	2499	1863	2481	1860	2721	1998
30°C	11,5 to	5722	4170	6675	4635	6672	5119	5248	3681	5673	3930	6006	4062
	8 to	6241	4413	6841	4722	7380	5080	5115	3540	5472	3519	5559	3672

**Tableau 41 : Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux transversaux - la structure de 17 cm (microdéf. par secondes)**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.
5°C	11,5 to	510	393	555	408	588	432	288	201	309	210	336	219
	8 to	447	330	462	324	480	366	252	174	273	192	273	189
15°C	11,5 to	792	531	849	567	873	609	432	279	474	318	495	333
	8 to	708	459	756	504	798	507	381	267	408	273	426	294
30°C	11,5 to	1488	996	1584	1053	1446	1011	1056	669	1125	726	1197	756
	8 to	1395	921	1458	960	1548	984	966	651	1029	645	1029	639

**Tableau 42 : Valeurs maximales des vitesses de déformation des signaux transversaux - structure de 10 cm (microdéf. par secondes)**

		Roues simples						Roues jumelées					
		6 bars		7 bars		8 bars		6 bars		7 bars		8 bars	
		av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.	av.	ap.
5°C	11,5 to	897	735	960	786	1086	864	474	348	516	399	567	396
	8 to	867	690	882	765	948	741	447	312	450	333	531	366
15°C	11,5 to	1080	816	1161	873	1302	966	687	465	723	495	738	474
	8 to	1011	786	1155	873	1311	987	627	417	648	459	807	501
30°C	11,5 to	1692	1290	2001	1494	2370	1632	870	765	957	825	1026	909
	8 to	1755	1152	1998	1413	2241	1557	909	708	1014	678	1161	786

Ces résultats confirment ce que les superpositions des signaux montraient, à savoir que les vitesses maximales de déformations :

- varient principalement avec la température, mais également avec la direction et le type de roues
- dépendent peu de l'intensité de la charge ou de la pression de gonflage
- sont toujours supérieures avant le passage de la charge qu'après.

Compte tenu de la faible importance de la charge et de la pression, ces résultats sont synthétisés à partir de leurs moyennes (Tableau 43).

**Tableau 43 : Moyennes des vitesses de déformation maximales (microdéf. par secondes)**

		Longitudinal				Transversal			
		Roues simples		Roues jumelées		Roues simples		Roues jumelées	
		avant	après	avant	après	avant	après	avant	après
17 cm	5°C	1333	1083	894	740	507	376	289	198
	15°C	2057	1582	1400	1079	796	530	436	294
	30°C	3836	2810	3005	2233	1487	988	1067	681
10 cm	5°C	2669	2164	2008	1619	940	764	498	359
	15°C	3465	2831	2704	2062	1170	884	705	469
	30°C	6589	4690	5512	3734	2010	1423	990	779

Toutes conditions confondues, les vitesses de déformation varient entre plus de 6'000 et moins 200 microdéformations par seconde, soit selon un rapport supérieur à 30. Les valeurs maximales et minimales sont évidemment obtenues pour des directions et des types de roues différents et pour les températures extrêmes. Toutefois, même si on les étudie par direction, les valeurs varient tout de même selon un facteur proche de 10 selon les conditions. Il n'entre pas dans le cadre de ce travail de définir les conséquences que cette très grande variété des vitesses de déformation peut avoir sur la détérioration des chaussées. En revanche, il est certain que la réponse du matériau en terme d'endommagement en dépend. Le potentiel de dommage d'une sollicitation ne dépend pas uniquement de l'amplitude de cette sollicitation, mais de la manière dont elle est appliquée.

Les vitesses maximales avant et après le passage de la roue sont clairement différenciées et cette différence peut être quantifiée par leur ratio (Tableau 44).

**Tableau 44 : Ratio entre les vitesses de déformation maximales avant et après le passage de la charge**

		Longitudinal		Transversal	
		Roues simples	Roues jumelées	Roues simples	Roues jumelées
17 cm	5°C	1.23	1.21	1.35	1.46
	15°C	1.30	1.30	1.50	1.48
	30°C	1.36	1.35	1.51	1.57
10 cm	5°C	1.23	1.24	1.23	1.39
	15°C	1.22	1.31	1.32	1.50
	30°C	1.40	1.48	1.41	1.27

La seule tendance clairement visible est que ces ratios augmentent avec la température. Les vitesses de déformation pouvant être considérées comme révélatrices du comportement visqueux des matériaux bitumineux, ces ratios peuvent servir d'indicateur quantitatif de l'importance du comportement visqueux d'une structure. Plus ce ratio est important, plus la structure suit un comportement visqueux. À l'opposé, un ratio de 1 correspond à un comportement élastique.

Compte tenu que la température est le facteur qui influence le plus les vitesses de déformation, il est donc judicieux de s'intéresser à l'effet qu'elle peut avoir sur les vitesses de déformation.

### *5.2.3 Effet de la température sur les vitesses de déformation des signaux*

L'effet de la température sur les vitesses de déformation des signaux est étudié à partir des mêmes signaux que ceux utilisés au paragraphe 5.2.1. De façon similaire, les vitesses de déformation en fonction du temps sont superposées pour les trois températures (Figure 65 et Figure 66).

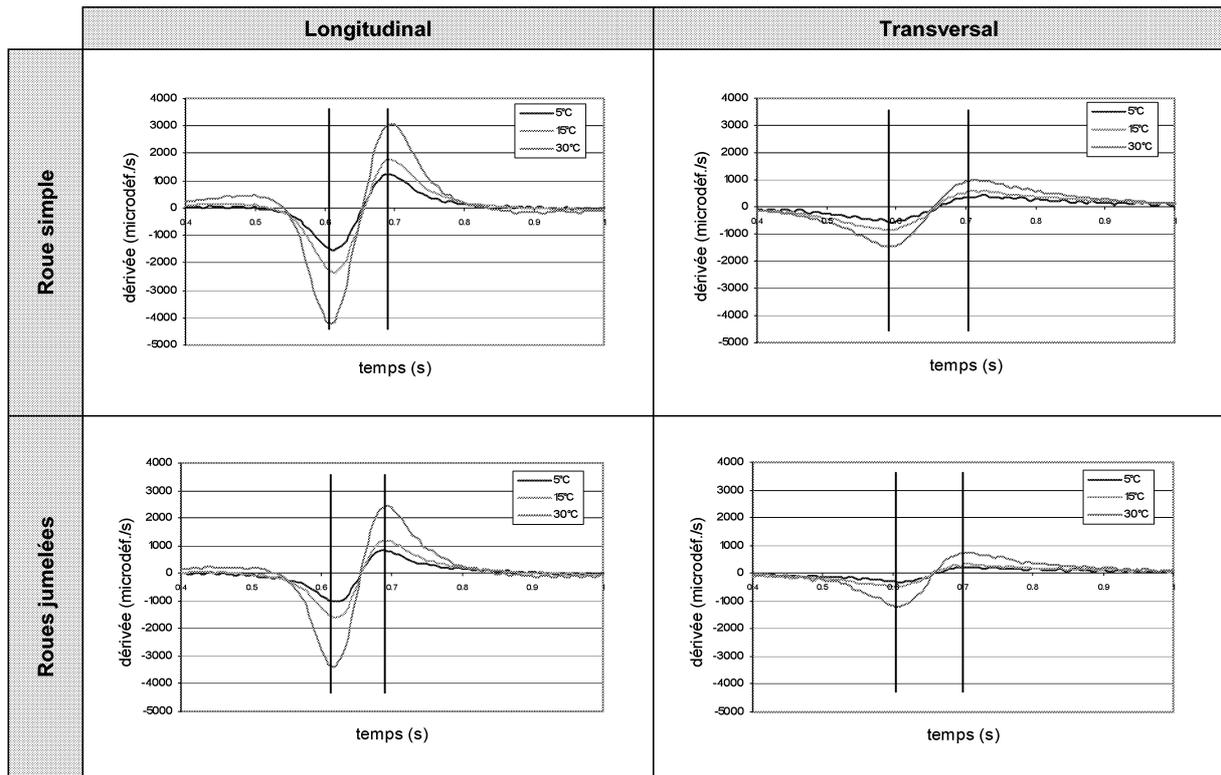


Figure 65 : Vitesses de déformation de signaux expérimentaux pour différentes températures – structures de 17 cm

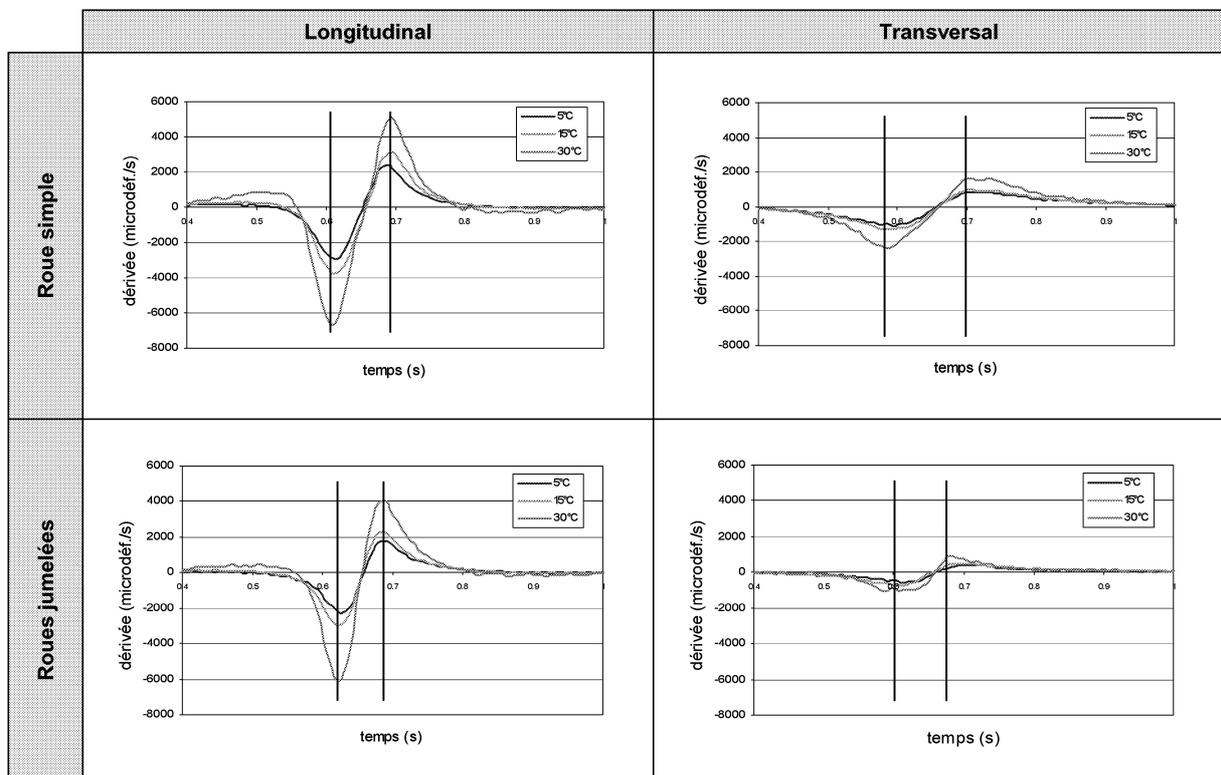


Figure 66 : Vitesses de déformation de signaux expérimentaux pour différentes températures – structures de 10 cm

Conformément aux observations faites sur les signaux, on peut observer que les vitesses de déformation :

- augmentent avec la température
- sont supérieures pour la structure la moins rigide
- sont toujours supérieures pour des pneus simples
- sont supérieures, en valeur absolue, avant le passage de la roue (comportement viscoélastique des matériaux)
- sont nettement plus importantes dans la direction longitudinale.

Ces figures montrent encore que les positions temporelles des vitesses de déformation maximales ne varient que très peu avec la température, mais qu'elles dépendent en revanche du type de pneu et de la direction : l'écart entre les deux valeurs maximales est plus important pour les roues simples et pour les mesures transversales. Elles sont également dépendantes de la structure, mais dans une moindre mesure.

Cette position de la vitesse de déformation maximale indépendante de la température rappelle celle pour laquelle les amplitudes des déformations des signaux ne dépendent pas de la température (Figure 58, page 124). On observe que ces deux positions, celle où la déformation est constante et celle où la vitesse de déformation est maximale, sont très proches. Cependant, aucune explication n'a pu être trouvée pour ce phénomène.

Le grand intérêt des représentations de la Figure 65 et de la Figure 66 est qu'elles concentrent sur une seule image les trois principales grandeurs intervenant dans les essais de module et de résistance à la fatigue des enrobés : l'amplitude de déformations, la fréquence et la température. Dans un essai en flexion alternée et pour une température donnée, les déformations imposées suivent une courbe sinusoïdale selon l'équation suivante :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t \text{ où } \omega = 2\pi f \quad \text{Eq. 32}$$

avec :

- $\varepsilon(t)$  = déformation imposée en fonction du temps
- $\varepsilon_0$  = déformation maximale imposée
- $f$  = fréquence de l'essai

La variation des déformations en fonction du temps (vitesse de déformation) est obtenue par dérivation, soit :

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \varepsilon_0 \omega \cos(\omega t) \quad \text{Eq. 33}$$

Les valeurs maximales de cette fonction dépendent par conséquent de la fréquence, par l'intermédiaire de  $\omega$ , et de l'amplitude maximale de déformation  $\varepsilon_0$ .

Pour les essais de module complexe, les fréquences utilisées sont comprises entre 8 et 50 Hz et les déformations  $\varepsilon_0$  sont de l'ordre de 50 microdéformations. Les vitesses de déformation maximales pour ces essais varient donc entre 2'500 et 15'000 microdéformations par seconde. Dans la méthode française de dimensionnement, les essais de fatigue sont réalisés à 10°C et avec une fréquence de 25 Hz. Les déformations  $\varepsilon_0$  varient entre 100 et 400 microdéformations. Ces valeurs conduisent à des vitesses maximales de déformation comprises entre 15'000 et 60'000 microdéformations par seconde.

Les vitesses de déformation maximales des signaux mesurés à la Halle-fosse sont comprises entre 200 à 6'000 microdéformations par seconde (cf. Tableau 43, page 131). Par rapport à celles des essais en laboratoire, ces valeurs sont relativement faibles. Cela s'explique en partie par la vitesse de la charge peu élevée à laquelle les mesures ont été effectuées.

Des vitesses de déformation maximales ont été déterminées à partir de mesures effectuées sur les autoroutes réelles pour des vitesses de déplacement des charges supérieures (cf. § 3.2.3 et 3.2.4). Dans le cas de la A9, pour des vitesses de véhicules de l'ordre de 50 à 60 km/h et une température d'environ 20°C, on obtient des vitesses maximales de déformations allant jusqu'à 14'000 microdéformations par seconde. Dans le cadre de la A1, où la vitesse du véhicule est de l'ordre de 70 km/h et la température d'environ 25°C, les vitesses de déformation vont jusqu'à 18'000 microdéformations par seconde.

Ces analyses montrent, qu'en terme de vitesse maximale de déformations, les sollicitations utilisées en laboratoire pour la détermination du module correspondent plus ou moins à celles subies réellement par les chaussées. En revanche, les sollicitations des essais de fatigue induisent généralement des vitesses de déformation sensiblement plus importantes que celles in situ.

### **5.3 Modélisation élastique de signaux de déformation et comparaison avec les signaux expérimentaux**

Les signaux expérimentaux ont été obtenus à partir d'une charge mobile pour laquelle les déformations en un point fixe étaient mesurées. Cette situation peut être simulée à partir d'une charge statique pour laquelle les déformations sont calculées à différentes distances. En divisant ces distances par la vitesse à laquelle se déplace la charge, il est possible d'obtenir des signaux de déformations provenant de modélisations basées sur le modèle de Burmister.

Les signaux expérimentaux présentent des légères différences selon la direction dans laquelle la charge se déplace (cf. § 3.3.3). Pour la comparaison, les signaux obtenus selon les deux directions et ceux résultant des modélisations ont été superposés en les centrant sur l'amplitude maximale<sup>77</sup>. Ce centrage suppose que l'amplitude maximale de déformation est enregistrée lorsque le milieu de la roue

---

<sup>77</sup> Aucun système de positionnement de la charge par rapport au capteur n'a été mis en place lors des expériences en vraie grandeur

passer sur la jauge de mesure. Compte tenu du comportement visqueux des matériaux bitumineux, cette hypothèse n'est probablement pas parfaitement correcte. Les résultats présentés correspondent au cas d'une charge de 11,5 to appliquée sur une roue simple gonflée avec une pression de 8 bars.

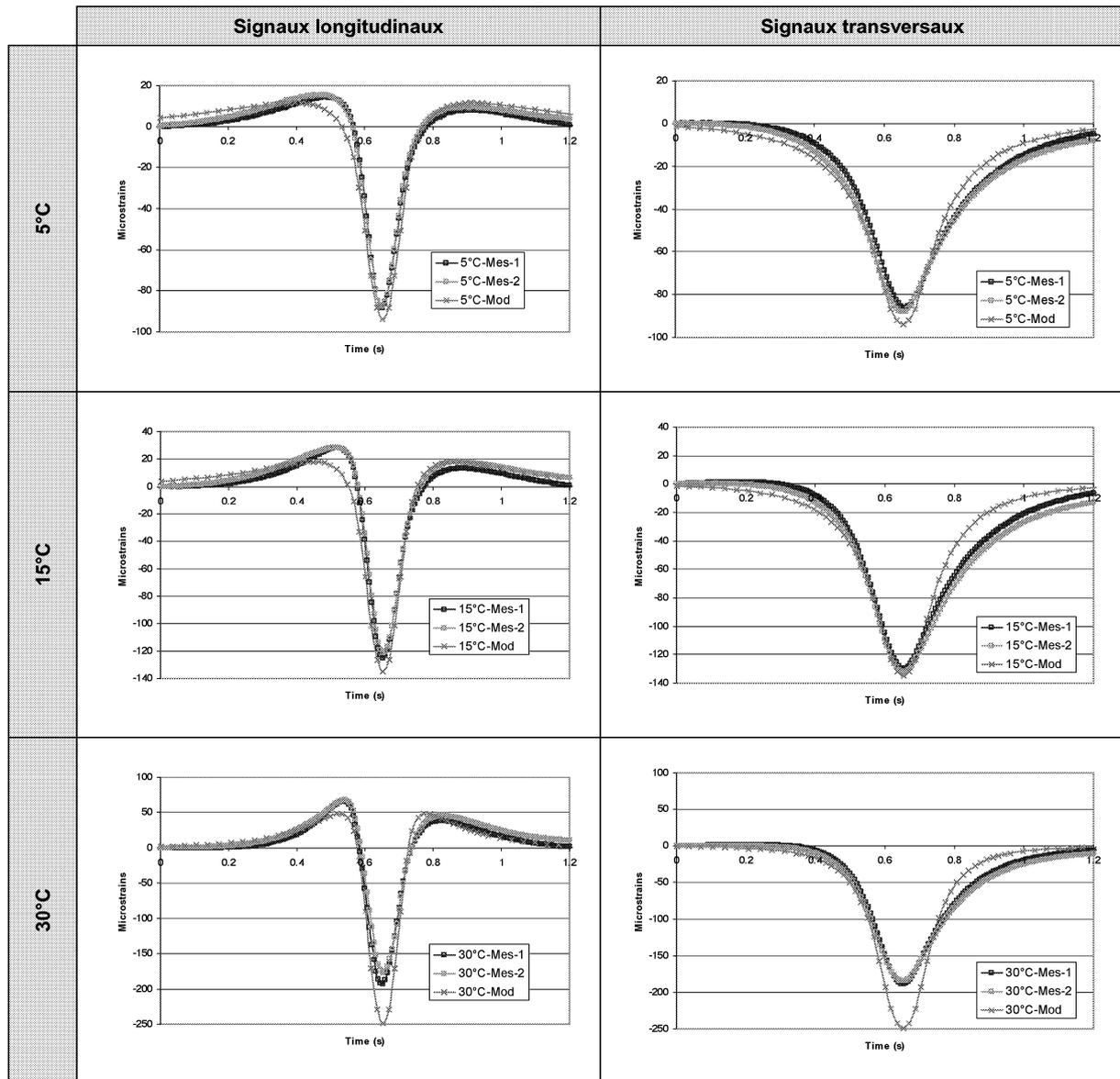


Figure 67 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm

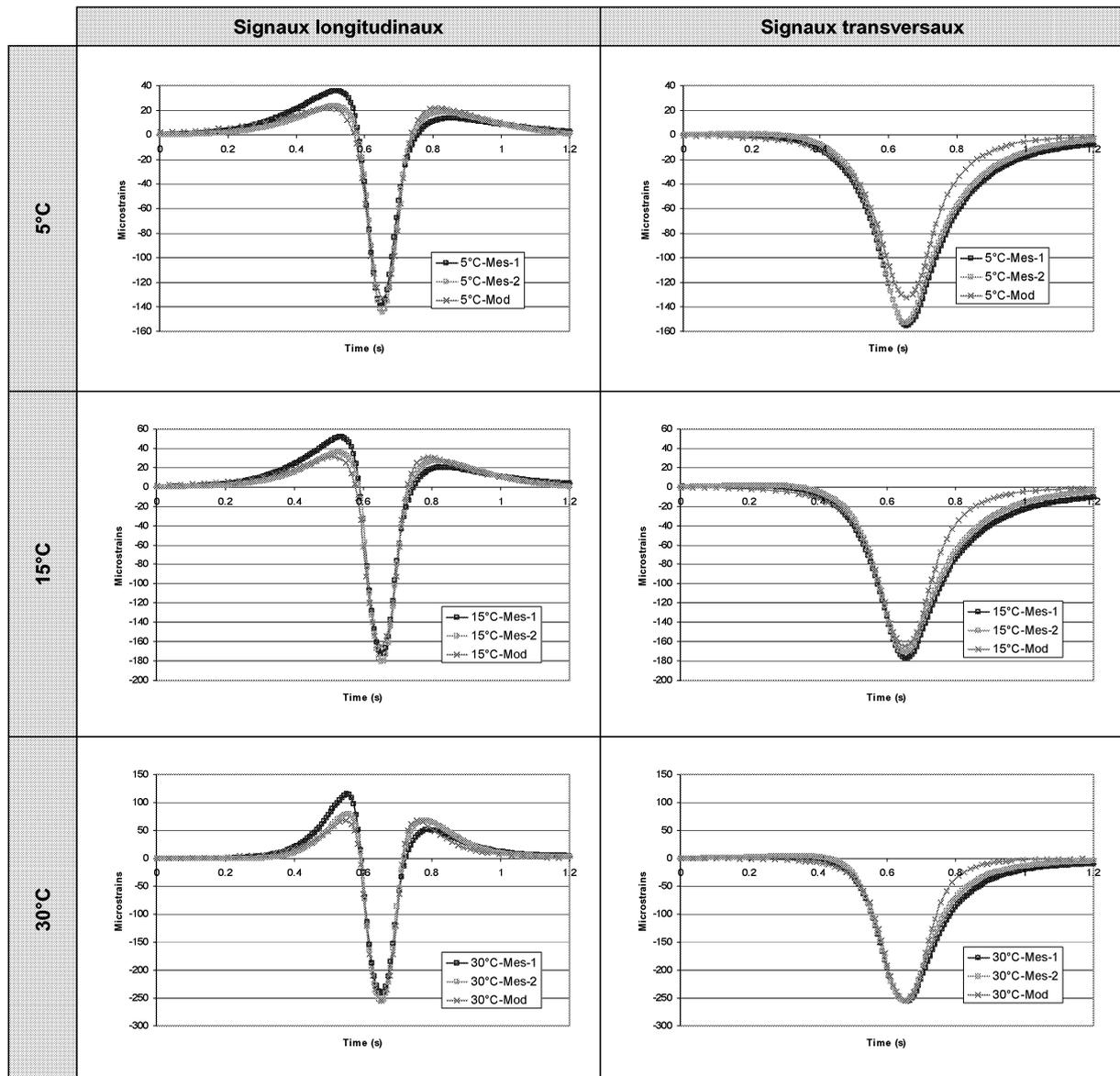


Figure 68 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm

Les signaux expérimentaux ne dépendent que peu de la direction dans laquelle la roue se déplaçait lors des mesures - à l'exception des déformations longitudinales dans la structure de 10 cm où le premier signal est plus dissymétrique que le second<sup>78</sup>. Dans l'ensemble, la forme des signaux est bien rendue par les modélisations élastiques, sans évidemment être en mesure de rendre compte du comportement visqueux des matériaux. Par ailleurs, les amplitudes maximales des déformations longitudinales et transversales obtenues par modélisation sont identiques, ce qui est logique compte tenu des hypothèses des modèles de Burmister.

<sup>78</sup> Cette régularité est le résultat du long travail d'analyse des signaux provenant de différentes jauges de mesure brièvement présenté au § 3.3.3

Les observations suivantes peuvent être faites pour les signaux longitudinaux :

- la modélisation est meilleure pour les extensions que pour les contractions
- la modélisation des zones d'extension est excellente tant en ce qui concerne les amplitudes que la forme générale du signal
- les contractions maximales des signaux expérimentaux sont plus éloignées des extensions maximales que celles obtenues par modélisation. Ceci a pour conséquence que la variation des déformations à l'approche de la charge est mal reproduite.

Pour les signaux transversaux :

- les amplitudes maximales sont aussi bien estimées, à l'exception des mesures à 30°C pour la structure de 17 cm
- la forme générale des zones d'extension n'est pas aussi bien rendue que longitudinalement. La seconde partie des signaux expérimentaux présente une diminution des déformations moins rapide que celle obtenue par modélisation alors que la première partie (augmentation des déformations) correspond nettement mieux
- les signaux expérimentaux sont plus ouverts que ceux des modélisations, particulièrement dans leur seconde partie<sup>79</sup>.

A noter encore que l'existence d'une position pour laquelle les déformations sont égales et presque nulles quelle que soit la température (cf. Figure 58, page 124) est confirmée par les modélisations (Figure 69).

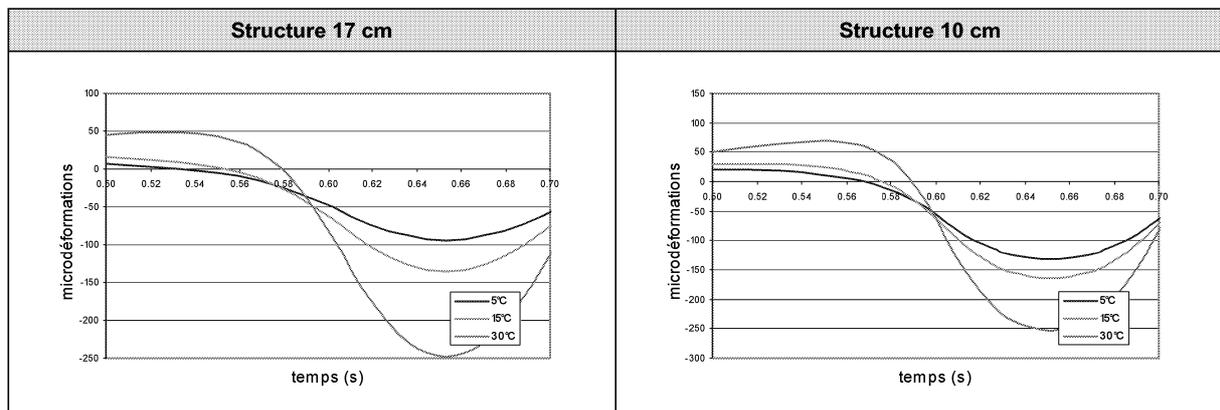


Figure 69 : Détail des signaux longitudinaux modélisés mettant en évidence une position où la déformation ne dépend pas de la température

La concordance est cependant un peu moins bonne et cette position est légèrement plus éloignée de l'extension maximale que celle relevée sur les signaux expérimentaux.

<sup>79</sup> Cette différence est caractéristique du comportement viscoélastique et ne peut bien entendu pas être rendue par des modélisations élastiques

Les observations faites jusqu'ici étaient essentiellement qualitatives. Il est intéressant de pouvoir évaluer plus quantitativement la capacité des modélisations à reproduire les signaux dans leur ensemble. Cette évaluation est faite à partir des grandeurs suivantes :

- vitesses de déformation des signaux longitudinaux et transversaux
- amplitudes maximales des pics contractions des signaux longitudinaux
- ratios entre les amplitudes des pics de contractions et les extensions maximales
- positions spatiales et temporelles des pics de contraction par rapport aux extensions maximales.

### *5.3.1 Vitesses de déformation des signaux modélisés et expérimentaux*

Les vitesses de déformation dépendent fortement de la température et les vitesses obtenues à partir des signaux expérimentaux de la Halle-fosse sont généralement inférieures à celles utilisées lors des essais en laboratoire (cf. § 5.2.3). La comparaison des vitesses de déformation obtenues à partir des signaux de déformation modélisés avec celles issues de signaux expérimentaux (Figure 70 et Figure 71) est un indicateur très pertinent de la qualité générale des modélisations.

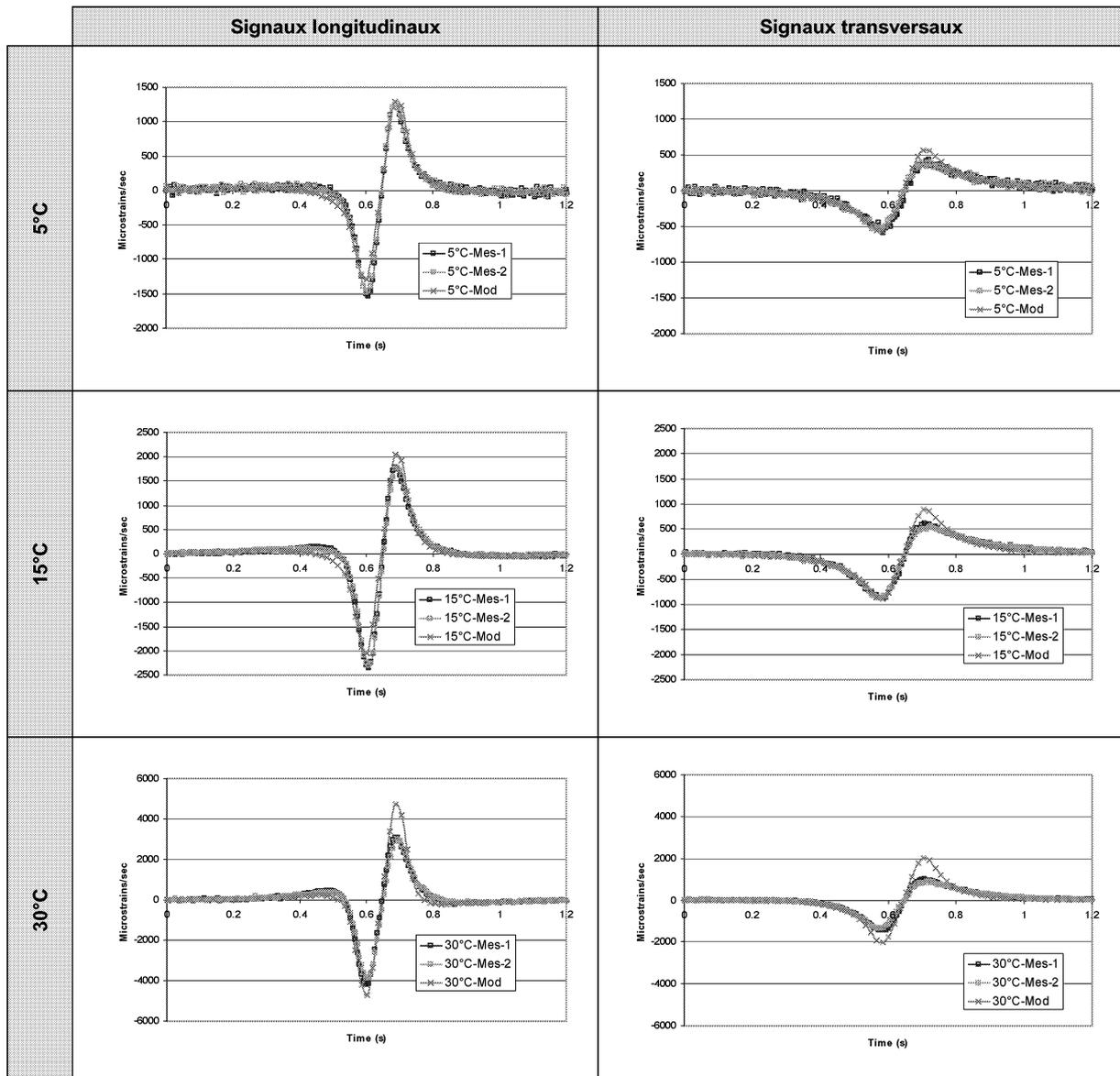


Figure 70 : Comparaison des vitesses de déformation de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm

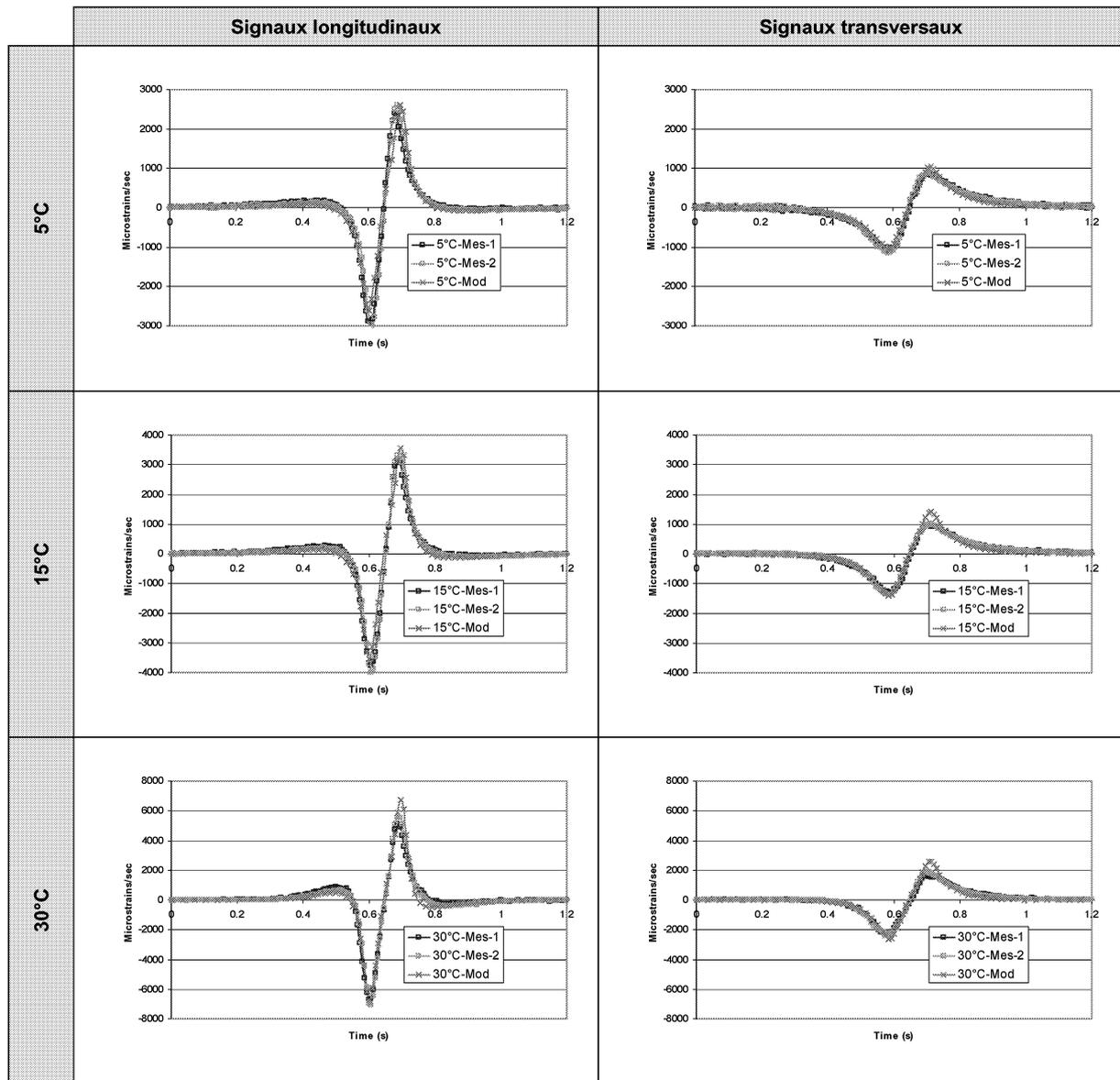


Figure 71 : Comparaison des vitesses de déformation de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm

Ces représentations montrent que :

- les amplitudes des vitesses maximales sont généralement bien évaluées à partir des modélisations élastiques<sup>80</sup>
- les positions des vitesses maximales concordent très bien et ces positions ne dépendent pas de la température, conformément à ce qui a été observé sur les mesures
- les vitesses maximales de déformations après le passage de la charge sont généralement surestimées par les modélisations, particulièrement pour les déformations transversales.

### 5.3.2 Pics de contraction des signaux longitudinaux

Les amplitudes des pics de contraction  $c_1$  et  $c_2$ , correspondant respectivement aux pics avant et après le passage de la roue (cf. Figure 31, page 64), ont été extraites pour les signaux longitudinaux de la Figure 67 et de la Figure 68. Elles sont comparées avec celles obtenues par les modélisations<sup>81</sup> (Tableau 45).

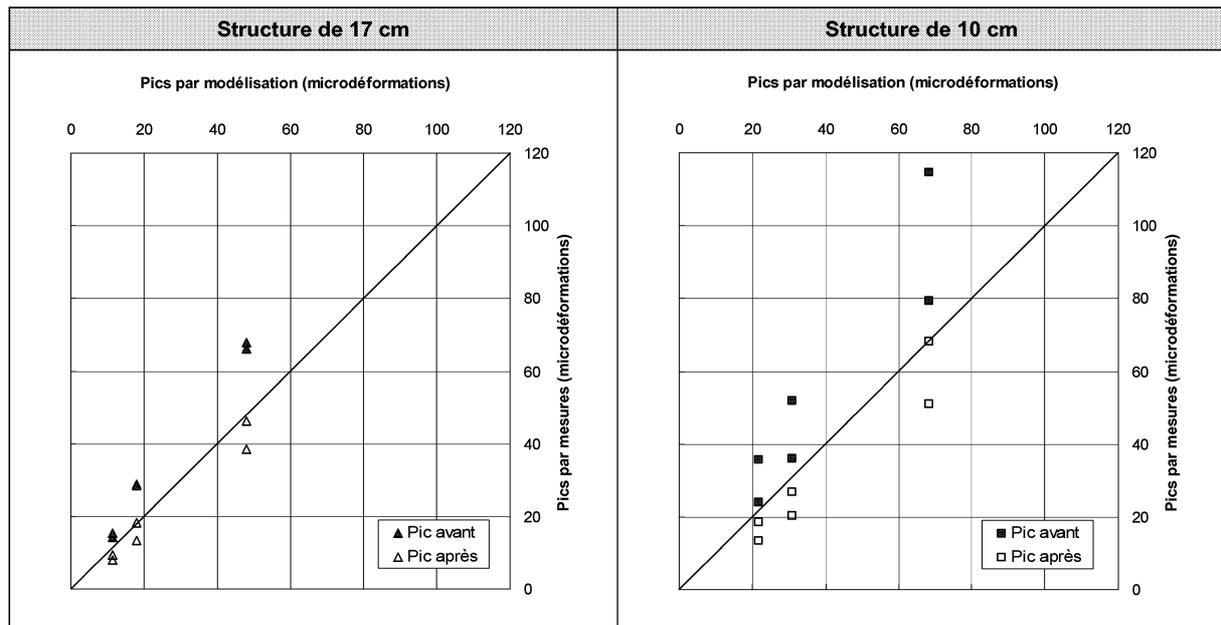
**Tableau 45 : Amplitudes en microdéformations des pics de contractions  $c_1$  avant et  $c_2$  après le passage de la roue**

		Pic mod.	Pics $c_1$ (avant)		Pics $c_2$ (après)	
			Signal 1	Signal 2	Signal 1	Signal 2
17 cm	5°C	11	14	15	8	10
	15°C	18	29	28	13	18
	30°C	48	66	68	39	46
10 cm	5°C	22	36	24	14	18
	15°C	31	52	36	20	27
	30°C	68	115	79	51	68

Ces résultats, avec les deux valeurs expérimentales correspondant aux résultats des signaux selon les deux directions, sont comparés graphiquement avec en abscisse les résultats des modélisations et ceux des mesures en ordonnée (Figure 72).

<sup>80</sup> Les résultats les moins satisfaisants correspondent une nouvelle fois à la température de 30°C

<sup>81</sup> Les résultats des modélisations sont évidemment identiques avant et après le passage de la charge



**Figure 72 : Comparaison des contractions avant et après le passage de la roue obtenus par mesures et par modélisations**

Les résultats sont plus dispersés pour la structure de 10 cm que pour celle de 17 cm, ceci en raison des différences plus marquées entre les deux signaux expérimentaux. Si on s'en tient aux ordres de grandeur, les amplitudes calculées correspondent bien aux mesures. Toutefois, les pics à l'approche de la roue sont généralement sous-estimés alors que ceux après le passage, mieux estimés dans l'ensemble, sont plutôt surestimés.

Comme pour les extensions maximales (cf. § 4.2), l'effet de la température apparaît clairement à travers une augmentation sensible des amplitudes à 30°C : des contractions pouvant avoisiner les 100 microdéformations ont été mesurés sur la structure de 10 cm.

Contrairement à ce qui a été observé pour les modélisations des extensions maximales à 30°C qui donnaient des résultats similaires pour les deux structures étudiées, les contractions sont sensiblement supérieures pour la structure la plus fine. Cela signifie que, selon les résultats des modélisations élastiques, la déformation agissant au bas de la couche de base d'une structure fine est plus « équilibrée », dans le sens des proportions entre contraction et extension, que celle sur une structure plus épaisse. Toutefois, il faut rappeler que les mesures expérimentales ne confirment pas l'égalité des ordres de grandeur des extensions mesurées sur les deux structures, puisque les mesures sur la structure de 10 cm sont toujours sensiblement supérieures à celles sur la structure de 17 cm.

### 5.3.3 Ratio entre les contractions et les extensions des signaux longitudinaux

Pour l'évaluation en laboratoire des propriétés de module complexe ou de fatigue des matériaux bitumineux, les sollicitations appliquées suivent généralement des courbes sinusoïdales centrées sur une amplitude nulle. Cela signifie que les contractions et les extensions ont des amplitudes égales ou, autrement dit que leur ratio est égal à 1. Les mesures et les modélisations montrent que les déformations

longitudinales subies au bas des couches ne sont pas symétriques et ont des ratios nettement inférieurs à 1.

Ces ratios peuvent servir d'estimateur pour la concordance entre les résultats des mesures et ceux des modélisations. Ils correspondent à la division des valeurs pics de contraction  $c_1$  et  $c_2$  par la valeur des extensions maximales  $e$  (cf. Figure 31, page 64). Ces ratios pour les signaux selon les deux directions et pour les signaux modélisés sont calculés (Tableau 46 et Tableau 47)<sup>82</sup>.

**Tableau 46 : Ratios entre les contractions et les extensions des signaux longitudinaux - structure de 17 cm**

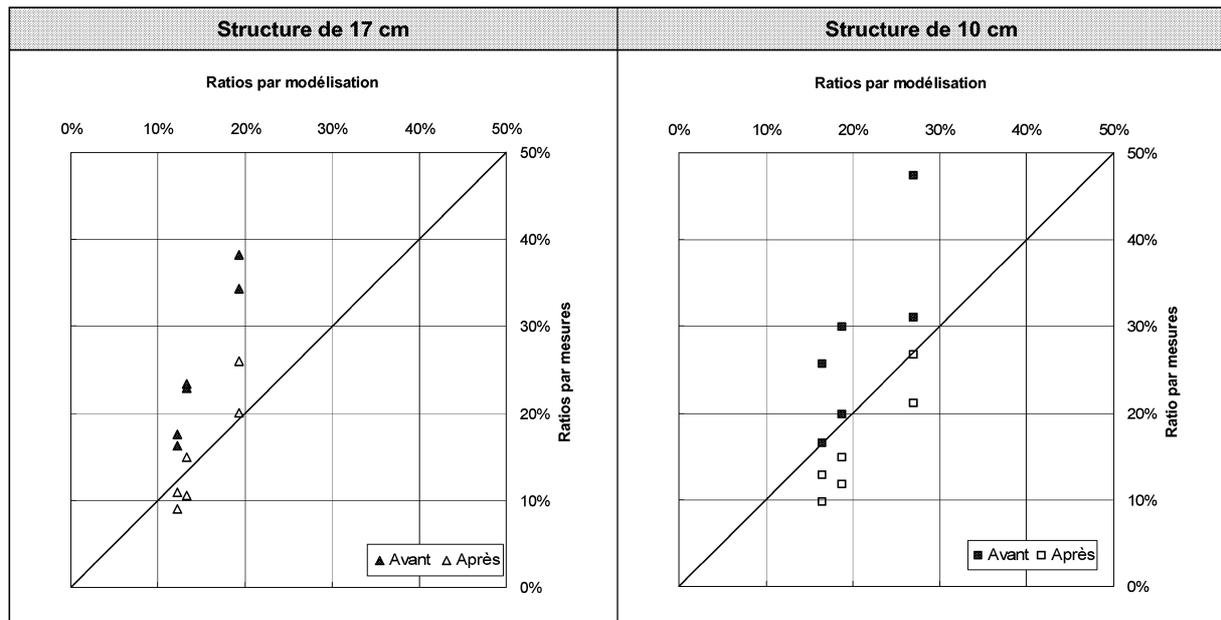
	Modélisation	Avant le passage de la roue		Après le passage de la roue	
		Signal 1	Signal 2	Signal 1	Signal 2
5°C	0,12	0,16	0,18	0,09	0,11
15°C	0,13	0,23	0,23	0,11	0,15
30°C	0,19	0,34	0,38	0,20	0,26

**Tableau 47 : Ratios entre les contractions et les extensions des signaux longitudinaux - structure de 10 cm**

	Modélisation	Pics avant le passage de la roue		Pics après le passage de la roue	
		Signal 1	Signal 2	Signal 1	Signal 2
5°C	0,16	0,26	0,17	0,10	0,13
15°C	0,19	0,30	0,20	0,12	0,15
30°C	0,27	0,47	0,31	0,21	0,27

Ces résultats sont comparés graphiquement avec en abscisse les résultats des modélisations et ceux des mesures en ordonnée (Figure 73).

<sup>82</sup> Ils permettent également de quantifier l'écart entre les sollicitations réelles dans les chaussées et celles utilisées en laboratoire



**Figure 73 : Comparaison des ratios entre les contractions et les extensions obtenus par mesures et par modélisations**

Les ratios augmentent lorsque la rigidité diminue, que ce soit par une réduction de l'épaisseur ou une augmentation de la température. Cela signifie que les sollicitations sont de plus en plus « équilibrées » entre les contractions et les extensions. Cette tendance est visible aussi bien à partir des mesures que des modélisations.

La concordance entre résultats expérimentaux et modélisation est meilleure pour les pics après le passage de la roue, points en blanc, que pour ceux avant, points en noir. Dans le second cas, les modélisations sous-estiment assez fortement les ratios, sous-estimant par conséquent l'alternance des sollicitations subies longitudinalement par les matériaux bitumineux au bas des couches.

Des ratios calculés à partir de mesures expérimentales peuvent atteindre des valeurs voisines de 50 %, signifiant des contractions égales à la moitié des extensions.

#### 5.3.4 Positions temporelle et spatiale des pics de contraction $c_1$ et $c_2$ par rapport à l'extension maximale $e$

Si les ordres de grandeur des contractions maximales sont généralement bien respectés par les modélisations, les superpositions des signaux expérimentaux et modélisés (Figure 67 et Figure 68) montrent que leurs positions par rapport à l'extension maximale sont peu concordantes, particulièrement lorsque les structures sont rigides, c'est-à-dire pour une forte épaisseur ou une basse température. Pour juger de ces écarts, les temps entre les pics de contractions et les extensions maximales ont été extraits. Afin de donner une idée de l'extension spatiale des zones de déformation, les distances correspondant à ces temps ont été calculées à partir de la vitesse (Tableau 48 et Tableau 49).

**Tableau 48 : Temps t (en millisecondes) et distance d (en cm) entre les pics de déformations - structure de 17 cm**

	Modélisation				Signal 1						Signal 2							
	avant		après		total		avant		après		total		avant		après		total	
	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	t	d	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	t	d						
5°C	257	75	514	150	153	45	253	74	407	119	200	58	233	68	433	126		
15°C	206	60	411	120	133	39	227	66	360	105	140	41	220	64	360	105		
30°C	120	35	240	70	113	33	173	51	287	84	113	33	180	53	293	86		

**Tableau 49 : Temps t (10<sup>-3</sup> sec) et distance d (en cm) entre les pics de déformations - structure de 10 cm**

	Modélisation				Signal 1						Signal 2							
	avant		après		total		avant		après		total		avant		après		total	
	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	t	d	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	t	d	t	d
5°C	154	45	309	90	140	41	200	58	340	99	140	41	180	53	320	93		
15°C	137	40	274	80	120	35	167	49	287	84	120	35	160	47	280	82		
30°C	103	30	206	60	100	29	133	39	233	68	100	29	127	37	227	66		

Pour la structure de 17 cm, les distances entre les pics de contraction sont respectivement comprises entre 84 et 126 cm pour les mesures et entre 70 et 150 pour les modélisations. Pour la structure de 10 cm, ces distances sont respectivement comprises entre 68 et 93 cm pour les mesures et entre 60 et 90 cm pour les modélisations. Ces différences entre les deux structures illustrent une nouvelle fois la meilleure diffusion des efforts dans les structures épaisses.

Ces résultats sont comparés graphiquement avec en abscisse les résultats des modélisations et ceux des mesures en ordonnée (Figure 74). L'image de gauche est une représentation des temps avant et après le passage de la roue alors que celle de droite présente les temps totaux de chargement, dans le deux cas pour les deux structures.

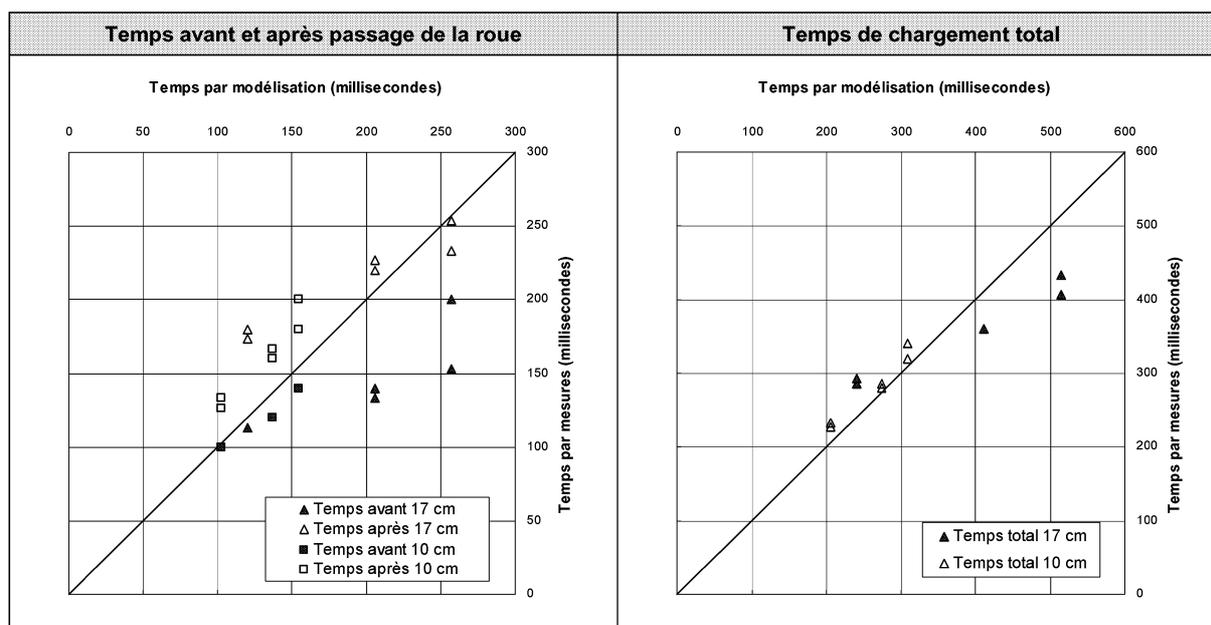


Figure 74 : Comparaison des temps de chargement obtenus par mesures et par modélisations

Dans un premier temps, il faut rappeler que les temps de chargement sont d'autant plus grands que la structure est rigide, ce qui signifie que les points les plus à droite sur les figures correspondent à la température la plus basse.

Dans l'ensemble, la concordance est meilleure pour les structures peu rigides qui sont celles dont les temps sont les plus courts. Ces deux images montrent que si les temps totaux de chargement expérimentaux et calculés concordent bien, la répartition entre les temps avant et après est moins bonne, les premiers étant généralement surestimés par les modélisations, points noirs de l'image de gauche, alors que les seconds sont sous-estimés, points blancs de cette même image.

Enfin, l'image de gauche montre clairement les différences entre les temps mesurés avant et après le passage de la roue, mettant en évidence le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux.

#### 5.4 Analyse de signaux expérimentaux par séries de Fourier

Les essais de module et de fatigue sur les matériaux bitumineux se font principalement à partir de sollicitations sinusoïdales pour lesquelles il convient de choisir une fréquence représentative. La fréquence est généralement choisie en fonction de la vitesse de la charge (cf. Eq. 6, page 27) ou en accord avec une méthode de dimensionnement (SETRALCPC en France). Il est ici proposé de déterminer quelles sont les fréquences à utiliser pour que les sollicitations sinusoïdales utilisées en laboratoire s'approchent au mieux des sollicitations réellement subies par les matériaux bitumineux sous charge de trafic. En d'autres termes, la forme des signaux de déformations expérimentaux sera comparée avec celle de courbes sinusoïdales dont la fréquence aura été choisie à partir d'une décomposition en séries de Fourier. Trois modes d'évaluation pour le choix de cette fréquence unique sont utilisés.

Les observations faites à partir de la superposition des signaux, des temps de chargement et des vitesses de déformation des signaux laissent supposer que les fréquences sont influencées non seulement par la vitesse de la charge, mais également par le type de roue, la température, la rigidité de la structure voir même la direction dans laquelle les déformations sont mesurées.

Les analyses portent toujours sur le même cas de charge de référence (11,5 to avec une pression de 8 bars) et sur les signaux longitudinaux et transversaux présentés au paragraphe 5.2. Les signaux sont composés de 100 points de mesures de part et d'autre de l'amplitude maximale.

#### 5.4.1 Séries de Fourier et spectre d'amplitude

La brève description des séries de Fourier donnée ici est tirée du livre « Complément d'analyse » (Arbenz et Wohlhauser 1990). En notation complexe, la série de Fourier d'une fonction  $f(t)$  de période  $T$  a la forme suivante :

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{i\omega_k t} \quad \text{Eq. 34}$$

avec :

$$\begin{aligned} c_k &= \text{coefficients de Fourier complexes} \\ \omega_k &= \frac{2\pi k}{T} \end{aligned}$$

Le spectre d'amplitude de la fonction  $f(t)$  est obtenu en représentant la norme de  $c_k$  en fonction de  $\omega_k$ . Les spectres d'amplitude sont discontinus et devraient être présentés sous forme d'histogramme. Toutefois, les résultats des analyses sont présentés sous forme de courbes continues qui rendent plus lisible la comparaison des résultats pour les différentes situations analysées. Les spectres sont limités à l'affichage des fréquences peu élevées.

#### 5.4.2 Fréquence unique correspondant au maximum d'amplitude

Les résultats sont présentés par l'intermédiaire des spectres d'amplitude des signaux. Ils sont séparés selon la direction des déformations et selon le type de roues utilisées (Figure 75).

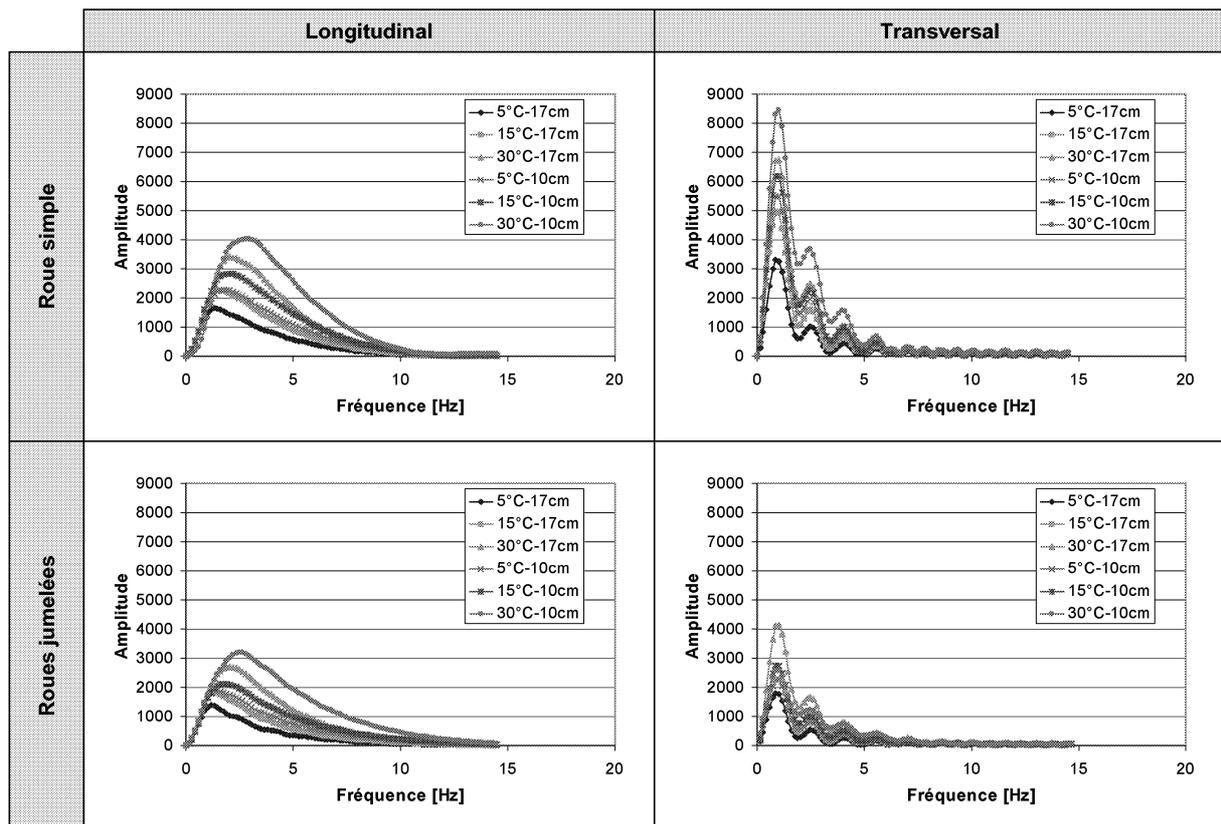


Figure 75 : Spectres d'amplitude pour les signaux

La forme des spectres des signaux longitudinaux, qui ne présentent qu'un seul maximum, diffère sensiblement de celle des signaux transversaux où plusieurs maximaux locaux apparaissent à basse fréquence<sup>83</sup>. Cette différence s'explique vraisemblablement par la forme respective de chacun des signaux : si les signaux longitudinaux, par l'alternance de contraction et d'extension, ont une forme relativement similaire à celle d'une courbe il n'en est pas de même pour les transversaux.

La première approche proposée consiste à prendre comme fréquence unique celle correspondant à l'amplitude maximale des spectres (Tableau 50).

<sup>83</sup> Les spectres transversaux montrent des oscillations de faible amplitude pour les fréquences plus élevées d'origine inconnue

**Tableau 50 : Fréquences (en Hz) correspondant aux amplitudes maximales pour les signaux**

		Signaux longitudinaux		Signaux transversaux	
		Roue simple	Roues jumelées	Roue simple	Roues jumelées
Structure 17 cm	5°C	1.32	1.17	0.88	0.88
	15°C	1.61	1.32	0.88	0.88
	30°C	2.05	2.05	1.03	1.03
Structure 10 cm	5°C	1.76	1.46	1.03	0.88
	15°C	2.05	1.76	1.03	1.03
	30°C	2.93	2.49	1.03	1.03

Ces fréquences sont dans l'ensemble assez faibles. Par comparaison, la méthode proposée par le CRR donne une fréquence d'environ 5 Hz (compte tenu d'une vitesse de charge réelle d'environ 10,5 km/h).

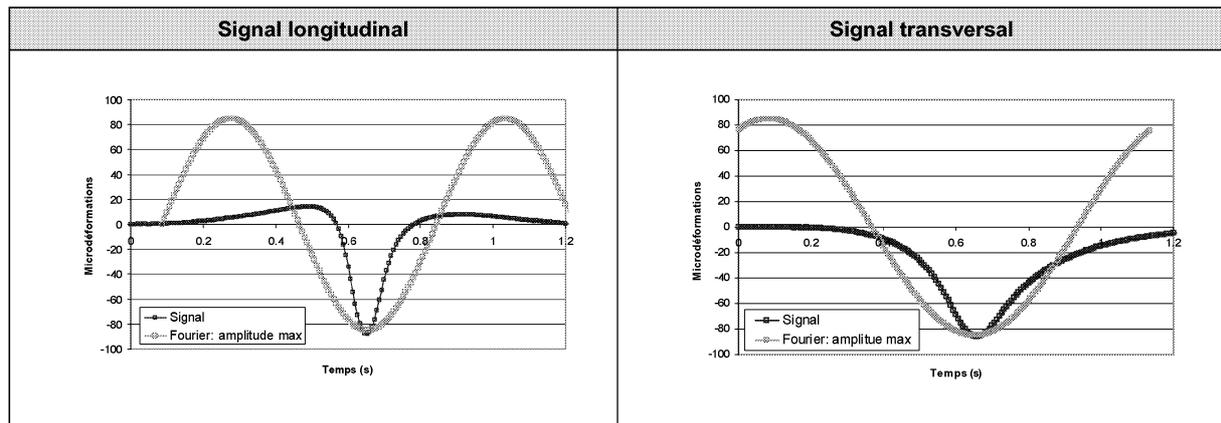
D'autre part, on observe que :

- les fréquences sont différenciées selon la direction des déformations et sont plus importantes longitudinalement. Ceci traduit l'aspect plus fermé des signaux selon cette direction et est conforme aux observations faites précédemment sur les temps de chargement et les vitesses de déformation
- longitudinalement, les fréquences sont généralement plus élevées avec des roues simples qu'avec des jumelages, conformément à l'analyse de la forme des signaux.
- toujours longitudinalement, l'augmentation de la température induit une légère augmentation des fréquences et la structure de 10 cm donne des résultats plus grands que la structure de 17 cm.

Si les résultats longitudinaux laissent supposer que les fréquences dépendent de la température et de l'épaisseur de la structure, il n'en est pas de même de ceux venant des déformations transversales. Dans ce cas, les variations des résultats correspondent à la fréquence de base d'environ 0,15 Hz utilisée pour la décomposition en séries de Fourier.

Les signaux longitudinaux et transversaux, pour un seul cas de charge, sont superposés avec des courbes sinusoïdales de fréquence correspondant aux résultats du Tableau 50 (Figure 76)<sup>84</sup>.

<sup>84</sup> Les autres cas de charge ont également été visualisés mais ne sont pas reproduits ici : les éventuelles différences seront indiquées le cas échéant. D'autre part, les amplitudes des courbes sinusoïdales sont choisies égales à l'extension maximale des signaux de déformations



**Figure 76 :** Superposition de signaux (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence unique correspondant à l'amplitude maximale

Ces graphiques montrent clairement qu'il n'est pas raisonnable et aucunement représentatif des sollicitations réelles, d'utiliser ces fréquences pour les sollicitations des essais en laboratoire.

#### 5.4.3 Fréquence unique à partir des vitesses de déformation des signaux

Les représentations des vitesses de déformation en fonction du temps semblent mieux se prêter à une reproduction à partir d'une seule sinusoïdale que celles des signaux eux-mêmes (cf. § 5.2.3 et 5.3.1). Par conséquent, une analyse similaire à celle effectuée sur les signaux a été faite sur leur vitesse de déformation à partir de laquelle des nouveaux spectres ont été obtenus (Figure 77).

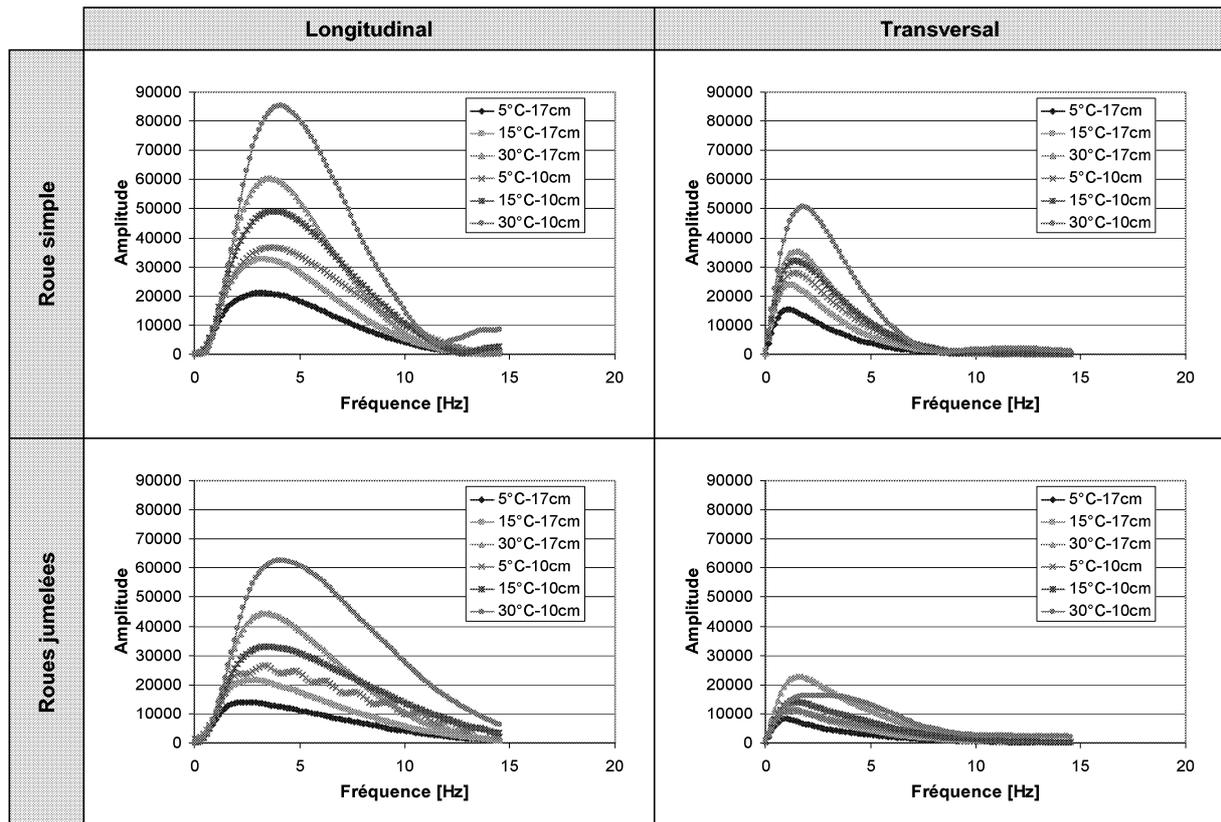


Figure 77 : Spectre d'amplitude pour les vitesses de déformation des signaux

La forme générale de ces spectres ne dépend pas de la direction puisque les maximums locaux dans la direction transversale ont disparu. Les fréquences correspondant aux amplitudes maximales ont été extraites (Tableau 51).

Tableau 51 : Fréquences (en Hz) correspondant aux amplitudes maximales obtenues à partir des vitesses de déformation des signaux

		Signaux longitudinaux		Signaux transversaux	
		Roue simple	Roues jumelées	Roue simple	Roues jumelées
Structure 17 cm	5°C	3.08	2.64	1.03	1.03
	15°C	3.22	2.93	1.17	1.03
	30°C	3.52	3.37	1.46	1.61
Structure 10 cm	5°C	3.66	3.37	1.32	1.17
	15°C	3.81	3.37	1.46	1.32
	30°C	4.10	4.10	1.76	2.05

Une augmentation générale des fréquences est observée. Pour les déformations longitudinales, elles se rapprochent du résultat de 5 Hz obtenu avec la méthode du CRR. Contrairement à ce qui est obtenu par l'analyse des signaux, l'effet du type de roue, de la température et de l'épaisseur de la structure est visible selon les deux directions et les tendances sont les mêmes que celles relevées à partir de l'analyse des signaux longitudinaux, avec toutefois un effet moins marqué de la température. Le contraste entre les fréquences obtenues à partir des déformations longitudinales et celles obtenues à partir des déformations transversales est encore plus marqué, confirmant que les premiers signaux sont sensiblement plus « fermés » que les seconds.

Bien qu'elle ait été effectuée sur les vitesses de déformation des signaux, le but de cette analyse est de définir une fréquence valable pour simuler au mieux les sollicitations réelles pour les essais en laboratoire. Par conséquent, la comparaison des sinusoïdales ne se fait pas avec les vitesses de déformation, mais avec les signaux de déformation (Figure 78).

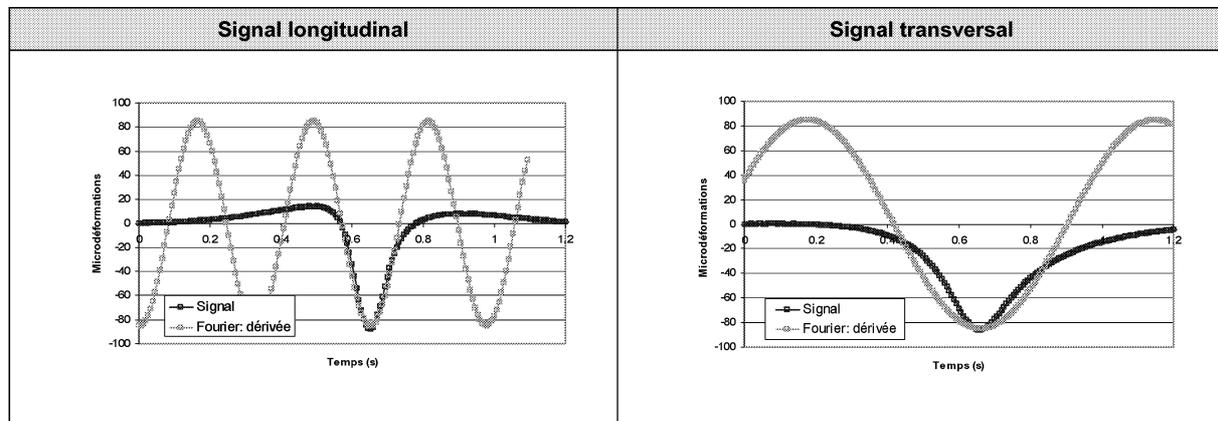


Figure 78 : Superposition de signaux (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence unique obtenue à partir des vitesses de déformation

Ces images montrent une nette amélioration de la concordance des courbes pour les mesures longitudinales, puisque la zone d'extension maximale est bien simulée par la sinusoïdale. Si les zones d'extension sont bien reconstituées, il n'en va pas de même pour celles de contraction qui ne sont pas rendues de façon réaliste. Signalons enfin que la concordance observée sur la Figure 78 est moins bonne avec les roues jumelées, pour lesquelles les fréquences obtenues sont généralement trop basses.

Pour les mesures transversales, une légère amélioration est obtenue du fait de l'augmentation globale des fréquences retenues. Ces dernières demeurent toutefois peu satisfaisantes au regard des sollicitations mesurées in situ, notamment en ce qui concerne les pentes et les courbures à proximité de l'extension maximale.

#### 5.4.4 Fréquence unique par moyenne pondérée

La première méthode retenue pour choisir une fréquence ignore totalement les valeurs voisines du maximum qui participent de façon non négligeable à la décomposition. Partant de ce constat, il a été décidé d'adopter une troisième démarche d'évaluation basée sur le calcul de la moyenne des fréquences pondérées en fonction des amplitudes (espérance) selon la formule suivante :

$$f_{\text{réf}} = \frac{\sum f_i \cdot a_i}{\sum a_i} \quad \text{Eq. 35}$$

avec :

- $f_{\text{réf}}$  = fréquence retenue
- $f_i$  = fréquence (ou harmonique)  $i$  dans la transformation de Fourier
- $a_i$  = amplitude correspondant à la fréquence  $i$  dans la transformation de Fourier

Cette méthode conduit aux résultats suivants (Tableau 52).

Tableau 52 : Espérances des fréquences (en Hz) pour les signaux

		Signaux longitudinaux		Signaux transversaux	
		Roue simple	Roues jumelées	Roue simple	Roues jumelées
Structure 17 cm	5°C	3.51	3.59	3.94	4.07
	15°C	3.54	3.58	3.80	3.92
	30°C	3.79	3.85	3.61	3.62
Structure 10 cm	5°C	3.93	4.26	3.69	3.85
	15°C	4.02	4.23	3.64	3.74
	30°C	4.53	4.68	3.44	3.69

Ces résultats montrent logiquement une uniformisation des fréquences. Les effets de la rigidité de la structure et du type de roue deviennent presque négligeables. Par ailleurs, les fréquences déterminées à partir des mesures transversales deviennent les plus grandes, ce qui ne correspond pas aux observations faites jusqu'ici. La superposition d'une courbe sinusoïdale et d'un signal montre clairement cette non concordance pour la direction transversale (Figure 79).

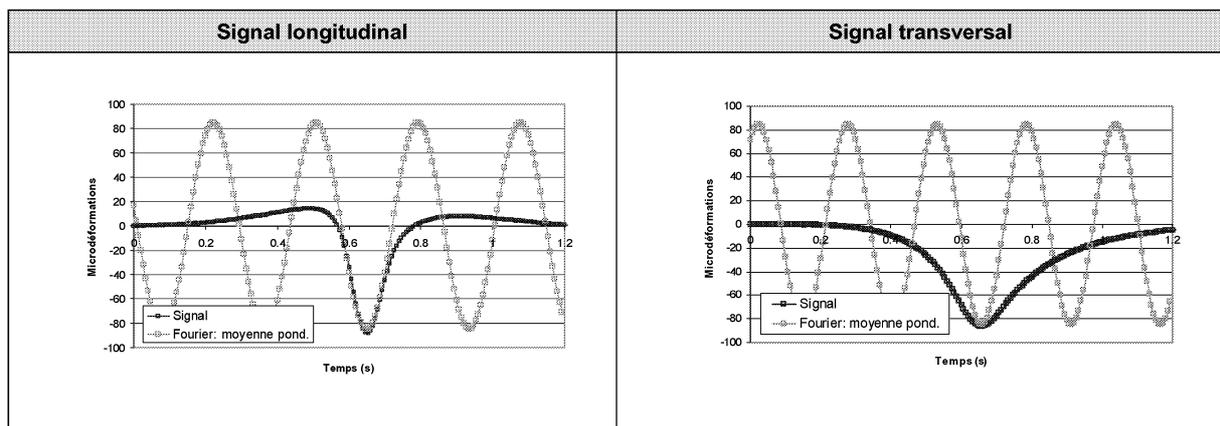


Figure 79 : Superposition de signaux de déformations (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence correspondant à l'espérance

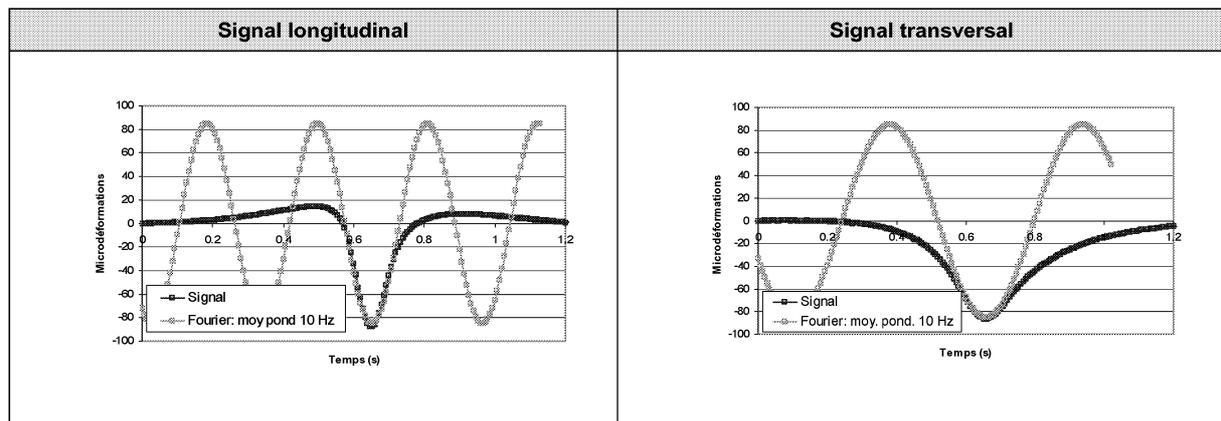
Comme pour les résultats tirés de l'analyse des vitesses de déformation, ces représentations montrent une excellente concordance pour les extensions longitudinales, à la nuance près que ce résultat est aussi valable pour les roues jumelées.

En revanche, cette observation n'est pas du tout valable pour les signaux transversaux. Les fréquences obtenues sont visiblement trop élevées et la concordance entre la courbe sinusoïdale et le signal n'est pas satisfaisante. Toutefois, ce résultat, contraire aux observations faites jusqu'ici, s'explique par les oscillations visibles sur les spectres des déformations transversales pour les fréquences plus élevées (Figure 75, page 149). Même si ces amplitudes sont relativement faibles, elles se rapportent à des fréquences élevées et influencent de façon non négligeable les moyennes pondérées. Les moyennes pondérées ont été recalculées en faisant abstraction des fréquences supérieures à 10 Hz (Tableau 53).

**Tableau 53 : Espérance des fréquences (en Hz) pour les signaux, sans tenir compte des fréquences supérieures à 10 Hz**

		Signaux longitudinaux		Signaux transversaux	
		Roue simple	Roues jumelées	Roue simple	Roues jumelées
Structure 17 cm	5°C	3.20	2.97	1.80	1.84
	15°C	3.29	3.11	1.82	1.87
	30°C	3.55	3.50	1.90	2.08
Structure 10 cm	5°C	3.51	3.32	1.88	2.03
	15°C	3.58	3.52	1.89	2.05
	30°C	3.89	3.86	1.98	2.38

Les fréquences obtenues sont logiquement inférieures à celles obtenues précédemment. La différence est beaucoup plus marquée pour les mesures transversales que pour les longitudinales et les fréquences pour les signaux longitudinaux sont maintenant supérieures à celles des transversaux. La superposition des signaux et des courbes sinusoïdales est considérablement modifiée (Figure 80).



**Figure 80 : Superposition de signaux de déformations (roue simple, 5°C, 11,5 to et 8 bars) avec une courbe sinusoïdale de fréquence obtenue par moyenne pondérée sans tenir compte des fréquences supérieures à 10 Hz**

Ces résultats sont les meilleurs obtenus jusqu'ici puisqu'il est possible de déterminer des fréquences satisfaisantes selon les deux directions. Si la reproduction des signaux expérimentaux est meilleure pour les déformations longitudinales pour lesquelles la quasi-totalité de la zone d'extension est fidèlement reproduite, elle est également bonne pour la zone d'extension maximale des signaux transversaux.

Les fréquences sont nettement différenciées selon la direction, puisque les déformations longitudinales conduisent à des fréquences supérieures de 75 % (moyenne des cas étudiés) à celles obtenues pour les transversales.

#### 5.4.5 Détermination de fréquence à partir de signaux modélisés

Compte tenu des bons résultats obtenus sur la base des mesures de la Halle-fosse, cette démarche a été appliquée à des signaux modélisés. Les analyses sont effectuées pour les trois températures, pour une charge appliquée sur un pneu simple sur la structure de 17 cm. Ces résultats sont comparés avec ceux obtenus à partir des signaux expérimentaux (Tableau 54).

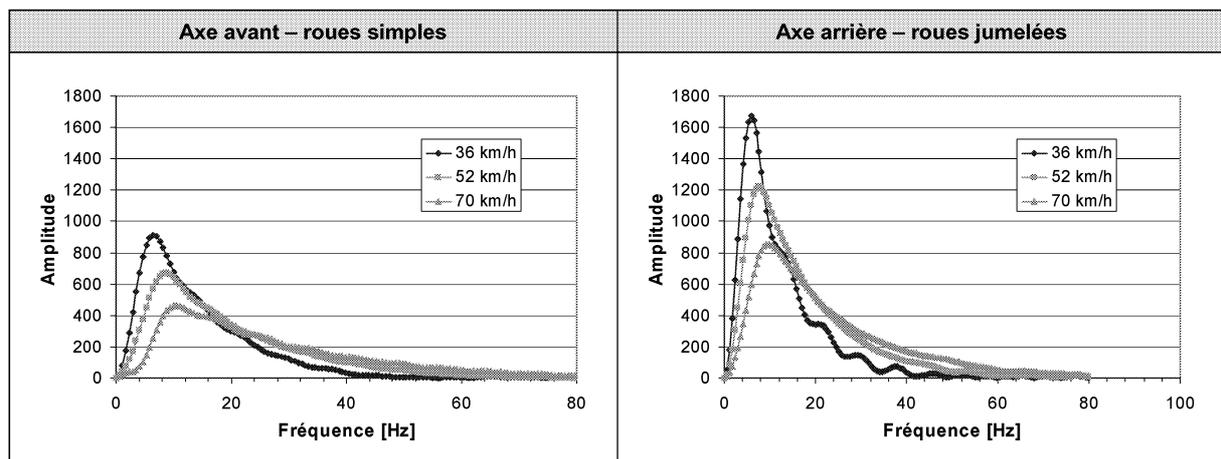
**Tableau 54 : Comparaison des fréquences (en Hz) déterminée à partir de signaux expérimentaux ou modélisés**

	Signaux longitudinaux		Signaux transversaux	
	Mesure	Modélisation	Mesure	Modélisation
5°C	3.20	2.89	1.80	2.19
15°C	3.29	3.08	1.82	2.21
30°C	3.55	3.84	1.90	2.36

Ces résultats sont concordants, même si l'influence de la température est plus marquée pour les modélisations, ce qui est conforme à ce qui a été observé lors de la comparaison des signaux expérimentaux et modélisés (cf. § 5.3). Compte tenu des images de ces signaux (Figure 67, page 136), il n'est pas étonnant que les écarts soient moins importants longitudinalement que transversalement, puisque la concordance observée était meilleure pour les premiers signaux que pour les seconds. En revanche, on peut conclure que les modélisations permettent de différencier les signaux longitudinaux et transversaux en terme de fréquence.

#### 5.4.6 Effet de la vitesse de la charge sur les fréquences

Les résultats présentés jusqu'ici proviennent de l'analyse de signaux des expériences en vraie grandeur à la Halle-fosse. Ces mesures correspondent toutes à une vitesse de déplacement de la charge constante. En revanche, différentes vitesses de charge ont été utilisées lors des mesures de déformation longitudinales sur l'autoroute A9 (cf. § 3.2.3). Les analyses portent sur des signaux enregistrés lors du passage d'un camion ayant deux essieux simples. L'axe avant est équipé de roues simples alors que l'arrière a des roues jumelées. Leurs charges respectives sont de 6 et 12 to et les mesures ont été faites pour trois vitesses, soit 36, 52 et 70 km/h. L'épaisseur totale des couches bitumineuses est de 16 cm. Les spectres des fréquences dépendent nettement de la vitesse (Figure 75).



**Figure 81 : Spectre des fréquences des signaux enregistrés pour différentes vitesses de déplacement de la charge et pour deux types de roue**

Ces spectres ont été analysés selon la méthode basée sur la moyenne pondérée des fréquences puisque c'est celle qui fournit les meilleurs résultats pour les signaux de

la Halle-fosse<sup>85</sup>. Les résultats des fréquences obtenues pour les six cas envisagés sont récapitulés dans le Tableau 55 :

**Tableau 55 : Fréquences (en Hz) calculées pour différentes vitesses de déplacement de la charge**

	36 km/h	52 km/h	70 km/h
Axe avant – roues simples	15.7	19.6	26.9
Axe arrière – roues jumelées	14.1	18.0	23.7

Ces fréquences permettent les superpositions suivantes avec des courbes sinusoïdales (Figure 82).

---

<sup>85</sup> Il en est de même ici, raison pour laquelle les autres résultats ne sont pas présentés

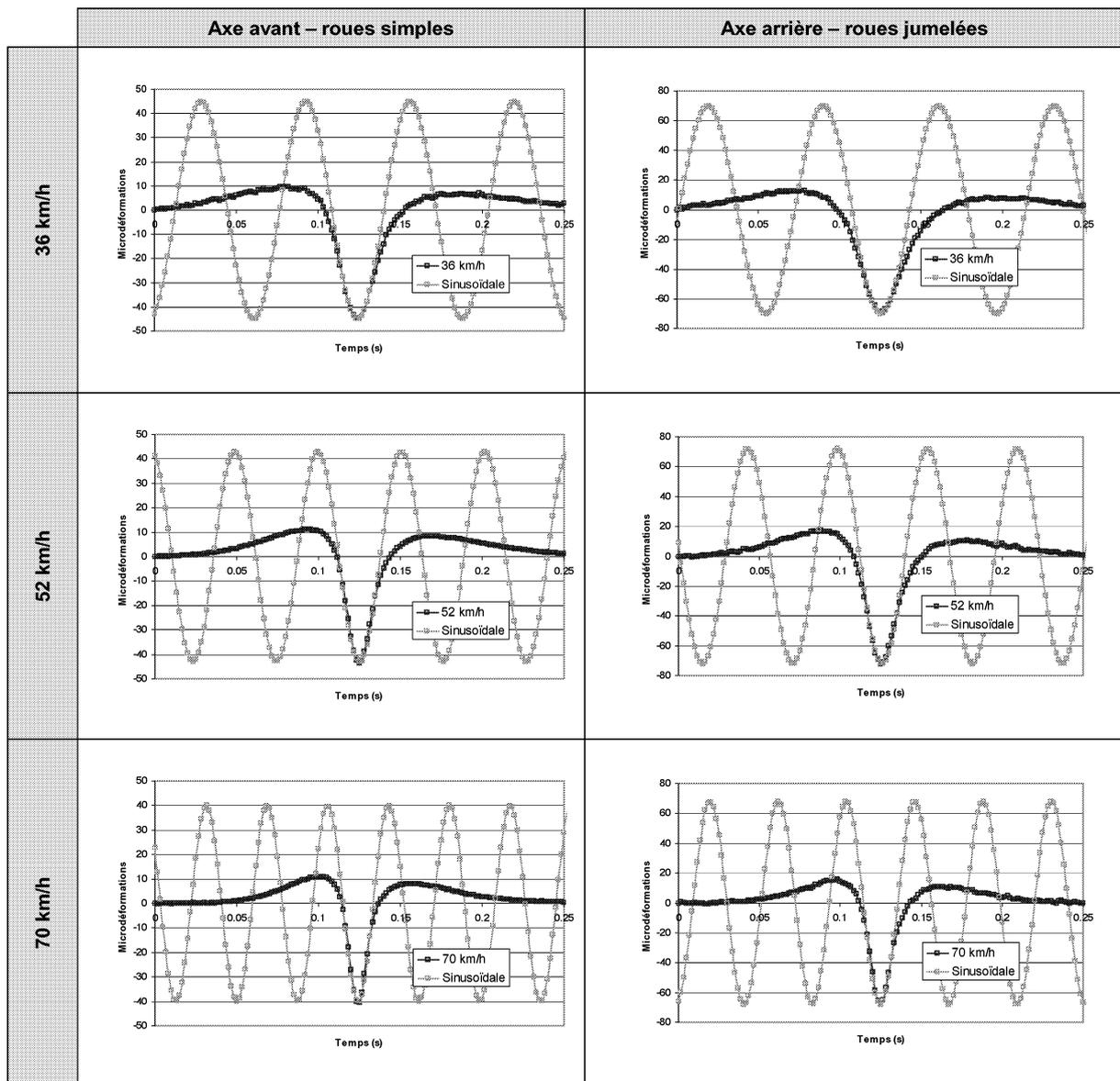


Figure 82 : Superposition de signaux de déformations longitudinales avec des courbes sinusoïdales de fréquences tirées de décomposition en séries de Fourier

Ces résultats confirment ceux obtenus sur les signaux de la Halle-fosse, puisque les courbes sinusoïdales permettent de reproduire l'essentiel de la zone d'extension. Les fréquences obtenues pour les pneus simples sont légèrement supérieures à celles pour des roues jumelées, ce qui correspond également à la tendance observée sur les signaux longitudinaux de la Halle-fosse.

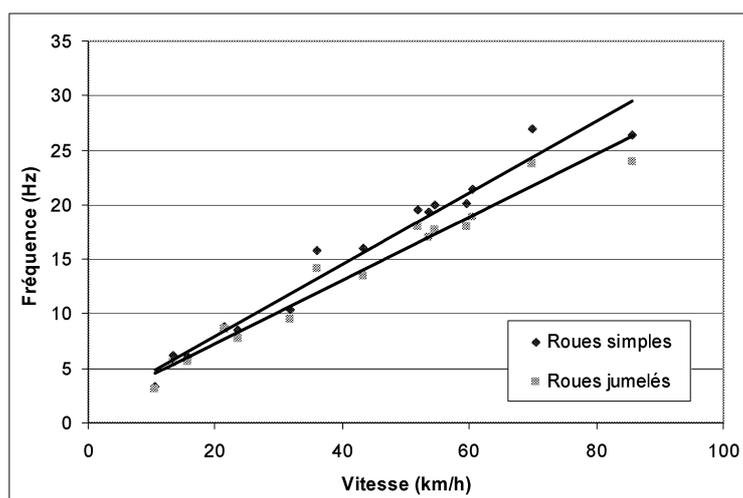
Ces résultats montrent aussi l'existence d'une relation entre la vitesse de la charge et la fréquence. Partant de ce constat, la méthode a été appliquée pour des signaux de déformations longitudinales mesurés pour d'autres conditions de chargement (intensité, vitesses et type de roue) et d'autres structures (épaisseur et température). Ces différentes structures correspondent à des mesures effectuées durant les phases de réalisation de l'autoroute A9, lorsque toutes les couches bitumineuses n'avaient pas encore été construites. Les fréquences ainsi obtenues sont données,

en les séparant par type de roues utilisées et en indiquant la vitesse de la charge et l'épaisseur totale des couches bitumineuses (Tableau 56).

**Tableau 56 : Fréquences et ratios entre la vitesse et la fréquence pour différentes vitesses de déplacement de la charge et pour différentes structures**

Epaisseur des couches bitumineuses	Vitesses (km/h)	Axe avant – roues simples	Axe arrière – roues jumelées	Axe avant – roues simples	Axe arrière – roues jumelées
		Fréquence (Hz)	Fréquence (Hz)	Ratio vit./fréq.	Ratio vit./fréq.
17cm	10	3.3	3.1	0.31	0.30
16 cm	36	15.7	14.1	0.44	0.39
	52	19.6	18.0	0.38	0.35
	70	26.9	23.7	0.38	0.34
	43	16.0	13.5	0.37	0.31
	54	19.3	17.0	0.36	0.32
	59	20.1	18.0	0.34	0.30
7 cm	13	6.2	5.5	0.46	0.41
	21	8.8	8.6	0.41	0.40
12 cm	16	6.06	5.59	0.39	0.36
	24	8.49	7.72	0.36	0.33
	32	10.4	9.5	0.33	0.30
	55	20.0	17.7	0.37	0.32
	61	21.5	18.9	0.35	0.31
	86	26.3	23.9	0.31	0.28

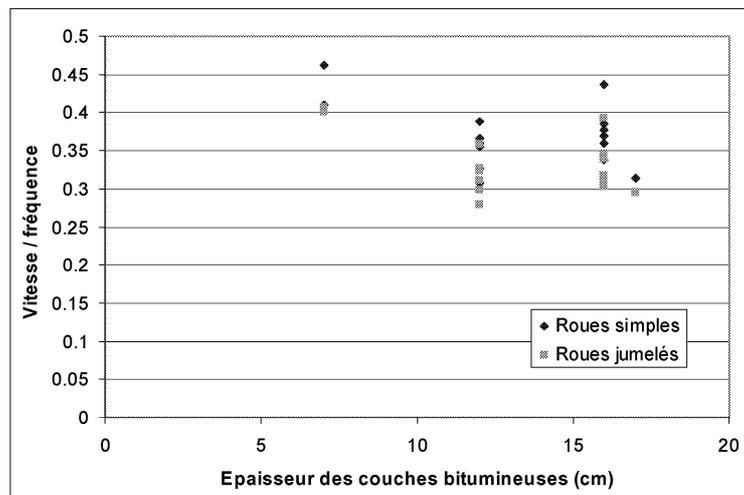
Les fréquences obtenues sont représentées graphiquement en fonction de la vitesse (Figure 83).



**Figure 83 : Fréquence en fonction de la vitesse de la charge pour diverses structures et divers cas de charge**

Cette représentation montre que, conformément à ce que propose le CRR, il est possible de définir une relation linéaire entre la vitesse et la fréquence. Par ailleurs, tous les résultats confirment que les ratios obtenus pour les roues jumelées sont

légèrement inférieurs à ceux des roues simples<sup>86</sup>. En revanche, il ne semble pas que les valeurs des ratios entre les vitesses (en km/h) et les fréquences (en Hz) dépendent de l'épaisseur de la structure (Figure 84).



**Figure 84 : Ratios entre la vitesse de la charge et la fréquence en fonction de l'épaisseur des couches bitumineuses**

Cette figure montre que les valeurs des ratios se concentrent 0,3 et 0,4 quelles que soient les conditions envisagées. Ces valeurs sont légèrement inférieures à celle de 0,45 proposée par le CRR. D'autre part et compte tenu des différences observées lors de l'analyse des mesures de la Halle-fosse, il faut rappeler que des ratios pour des déformations transversales seraient probablement sensiblement inférieurs, puisque les fréquences obtenues transversalement étaient de l'ordre du 75 % de celles obtenues longitudinalement. Il faut encore signaler que ces analyses en fonction de la vitesse ne tiennent absolument pas compte de la température à laquelle les mesures des déformations ont été faites, ni des amplitudes de ces dernières.

#### 5.4.7 Synthèse des résultats des analyses par séries de Fourier

Il est possible, à partir d'une décomposition en série de Fourier de signaux de déformations, de déterminer une fréquence permettant de reconstituer de façon satisfaisante une part importante des sollicitations subies in situ par les matériaux à partir d'une sinusoïdale. Cette part importante correspond à l'ensemble des extensions enregistrées lors du passage de la charge et dont l'amplitude maximale est prise en compte comme critère déterminant dans le cadre du dimensionnement mécanique empirique des chaussées. La détermination de cette fréquence se fait à partir d'une moyenne pondérée des fréquences des séries de Fourier.

Les contractions enregistrées à l'approche de la charge pour les déformations longitudinales ne correspondent en rien aux sollicitations issues des courbes sinusoïdales retenues. La reproduction de ces zones de contraction nécessiterait des fréquences beaucoup plus faibles que celles déterminées à partir des séries de

<sup>86</sup> Il convient toutefois de signaler que les intensités des charges appliquées sur les roues simples étaient inférieures à celles des roues jumelées

Fourier. Lors des modélisations élastiques, pour lesquelles une seule fréquence est prise en compte, la rigidité des matériaux est surestimée lors de l'approche de la roue. Ceci peut en partie expliquer que les pics de contraction modélisés sont souvent situés trop loin de l'extension maximale, puisqu'une diminution de la rigidité de la structure implique une diminution de la distance entre ces deux valeurs (cf. § 5.3.4).

La concordance entre les signaux de déformation et les sinusoïdales est meilleure pour les déformations longitudinales que pour les transversales. Pour les premières, la quasi-totalité de la zone d'extension peut être reproduite par une courbe sinusoïdale, alors que pour les seconds, seule une part limitée, correspondant cependant aux extensions les plus importantes, peut être reproduite de façon réaliste. Les fréquences pour les signaux longitudinaux sont sensiblement supérieures à celles pour les signaux transversaux.

Le principal facteur influençant les fréquences déterminées est la vitesse de déplacement de la charge. Le calcul des fréquences à partir d'une décomposition en séries de Fourier permet d'établir une relation de proportionnalité entre la vitesse de la charge et la fréquence. Le rapport entre ces deux grandeurs, exprimées respectivement en km/h et en Hz, est généralement compris entre 0,3 et 0,4 pour les déformations longitudinales.

Si les fréquences sont différenciées selon la direction et varient avec la vitesse, elles semblent en revanche peu sensibles à la température, à la rigidité de la structure ou aux conditions de chargement (intensité, pression et type de roue). Dans ce dernier cas, on note néanmoins que les fréquences sont toujours très légèrement plus élevées pour des roues simples que pour des roues jumelées.

## 5.5 Enseignements

Les **signaux expérimentaux** enregistrés au bas de la couche de base des deux structures étudiées fournissent d'excellentes références pour des comparaisons avec des modélisations. La superposition de signaux enregistrés selon des directions de déplacement de la charge différentes ne révèle que des variations minimales de leur forme. Les signaux obtenus pour différentes intensités de charge et différentes pressions se superposent très bien, ne marquant des différences que dans la zone de charge.

L'effet des variations des conditions de chargement sur l'ensemble des signaux est conforme à celui observé à partir des amplitudes maximales des déformations. Il apparaît ainsi que la pression est le paramètre le moins important.

L'étude des signaux dans leur ensemble permet de mieux définir les modes d'application des déformations, notamment en terme de durée. Les déformations induites par des pneus simples sont **plus importantes** mais agissent **moins longtemps** que celles induites par des roues jumelées. D'autre part, les déformations dans une structure peu épaisse sont plus importantes mais agissent moins longtemps que dans une structure plus épaisse.

L'utilisation de la notion de **vitesse de déformation** des signaux, en particulier sa valeur maximale, est un excellent complément aux valeurs des amplitudes maximales pour caractériser les déformations dans les couches bitumineuses. Les vitesses maximales de déformation varient évidemment selon la température, mais également selon la direction dans laquelle les signaux sont considérés et selon le type de roues utilisées. Elle présente par ailleurs l'avantage de donner une dimension **dynamique** aux sollicitations dues au passage d'une charge de trafic.

Les vitesses maximales enregistrées avant le passage de la charge sont toujours supérieures à celles obtenues après son passage. Le ratio entre ces deux valeurs maximales peut être utilisé pour **quantifier** l'importance du comportement visqueux : plus ce ratio est important, plus la structure suit un comportement visqueux.

Longitudinalement, les modélisations des signaux donnent des **résultats concordant avec les mesures pour toute la zone d'extension**. Les ordres de grandeurs des pics de contraction avant ( $c_1$ ) et après ( $c_2$ ) le passage de la charge sont généralement corrects. Cependant les résultats de modélisations sous-estiment  $c_1$  alors qu'ils surestiment  $c_2$ . L'évaluation de la position temporelle ou spatiale des pics de contraction par rapport à l'extension maximale n'est pas satisfaisante. Le pic  $c_1$  à l'approche de la charge est généralement donné trop loin de l'extension maximale alors que le pic  $c_2$  est un peu trop près. En revanche, le temps total, ou la distance totale, entre les deux pics est bien estimée. Les ordres de grandeur des vitesses de déformation sont corrects, les modélisations tendant cependant à sous-estimer les vitesses maximales avant le passage de la charge et à les surestimer après.

Pour les signaux transversaux, la qualité des modélisations est meilleure avant le passage de la charge qu'après, où les modélisations fournissent des signaux trop fermés. Conséquence logique de ce premier constat, les vitesses de déformation sont nettement mieux estimées avant le passage de la charge qu'après où elles sont **considérablement surestimées**.

Les **analyses de Fourier** ont fourni des fréquences permettant de générer des courbes sinusoïdales reproduisant une part importante des signaux de déformation au bas des couches bitumineuses. Ces fréquences sont le résultat du calcul d'une moyenne des fréquences pondérée en fonction des amplitudes leur correspondant.

Ces **fréquences** sont dépendantes de la direction de mesures et sont plus importantes longitudinalement. Les résultats sont plus satisfaisants pour les signaux longitudinaux, pour lesquels l'ensemble de la zone d'extension est bien reproduit par les courbes sinusoïdales, que pour les transversaux, où seul la zone directement à proximité de l'extension maximale est correctement approchée.

Les fréquences calculées à partir des signaux modélisés donnent des fréquences proches de celles obtenues à partir de données expérimentales. Enfin, il existe une **relation de proportionnalité entre les fréquences et la vitesse de déplacement de la charge**.

## 6. Déformations horizontales au bas de la couche de roulement

### 6.1 Contenu et démarche

Lors des expériences effectuées à la Halle-fosse, des jauges mesurant les déformations horizontales ont été installées au bas de la couche de roulement, soit à une profondeur constante de 3 cm pour toutes les structures (cf. § 3.2.1). Bien que ces déformations ne soient pas utilisées dans les méthodes de dimensionnement, elles sont en revanche très intéressantes pour étudier l'effet des conditions de chargement sur les sollicitations à faible profondeur, où cet effet est certainement plus marqué. Tout comme au bas de la couche de base, ces mesures permettent également une comparaison avec les résultats de modélisations.

Comme aucune valeur ponctuelle de déformation à cette profondeur n'est utilisée pour le dimensionnement des chaussées, l'étude se focalise sur l'analyse des signaux complets. Elle se limite aux mesures effectuées avec des pneus simples. Les hypothèses et les propriétés élastiques des matériaux pour les modélisations sont en tout point identiques à celles utilisées pour les déformations au bas de la couche de base (cf. § 3.5).

L'étude des signaux au bas de la couche de roulement se déroule de manière identique à celle des signaux au bas de la couche de base, à savoir :

- comparaison des signaux de déformations expérimentaux pour divers cas de charge
- modélisation de signaux de déformations pour un cas de charge et comparaison avec les signaux expérimentaux.

Le principal objectif de ce chapitre est d'expliquer les « irrégularités » observées sur les signaux mesurés au bas de la couche de roulement (cf. § 3.4.2).

Il a également des buts annexes similaires à ceux du chapitre précédent, à savoir :

- évaluer l'influence des paramètres de charge sur les déformations à faible profondeur
- juger de l'efficacité des modélisations pour décrire un signal de déformation complet.

## 6.2 Comparaison de signaux expérimentaux

Les représentations sont données selon des principes similaires à ceux énoncés pour les déformations au bas de la couche de base (cf. § 5.2). En revanche, et pour des raisons évidentes à la vue de la forme des signaux, ces derniers ne sont pas systématiquement centrés sur l'amplitude maximale, mais sur la position présumée du milieu de la roue<sup>87</sup>. Les représentations des signaux sont données par température et par structure (Figure 85 et Figure 86).

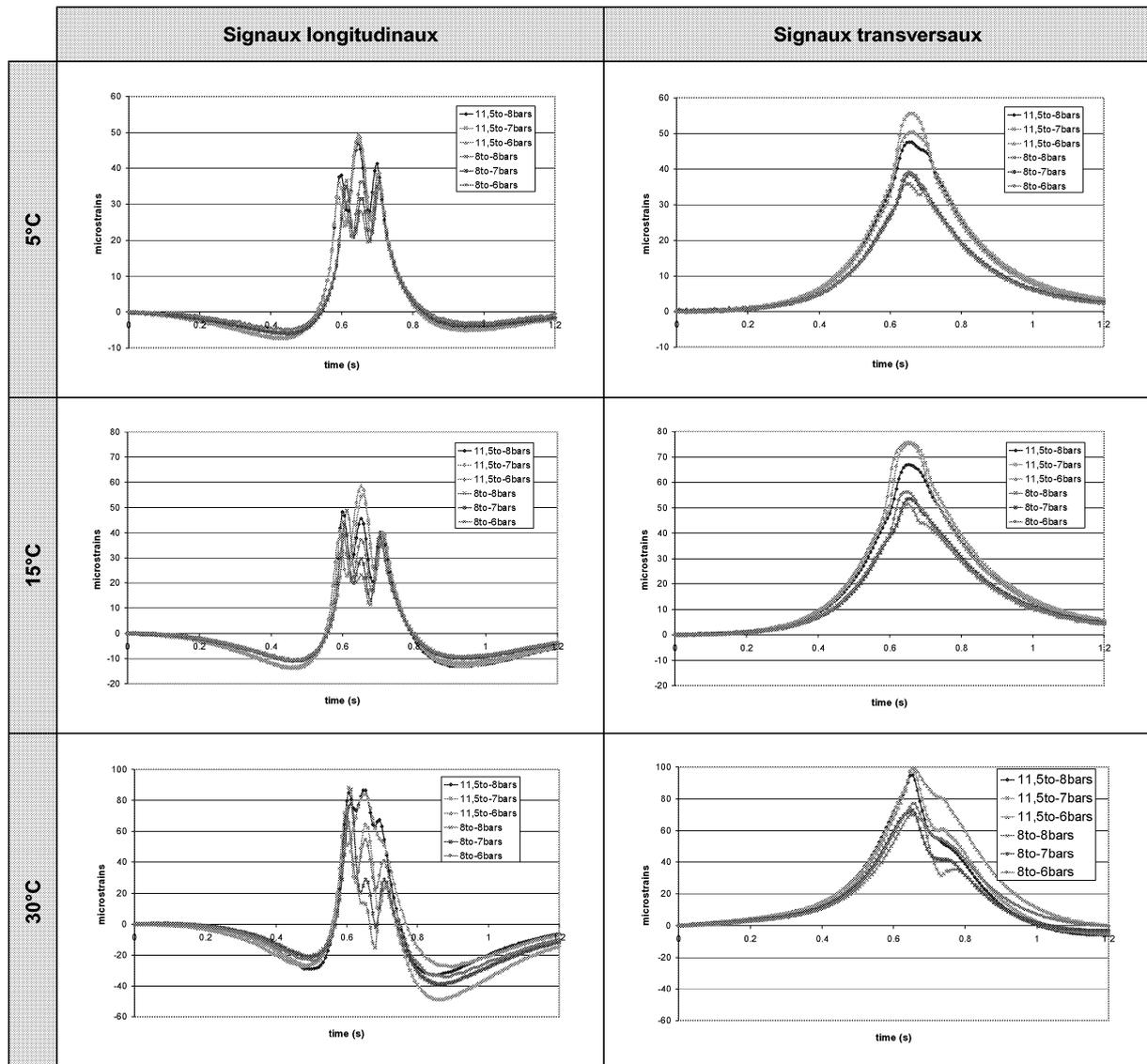


Figure 85 : Signaux de déformations au bas de la couche de roulement - structure de 17 cm

<sup>87</sup> Aucun système de positionnement de la charge par rapport au capteur n'a été mis en place lors des expériences en vraie grandeur

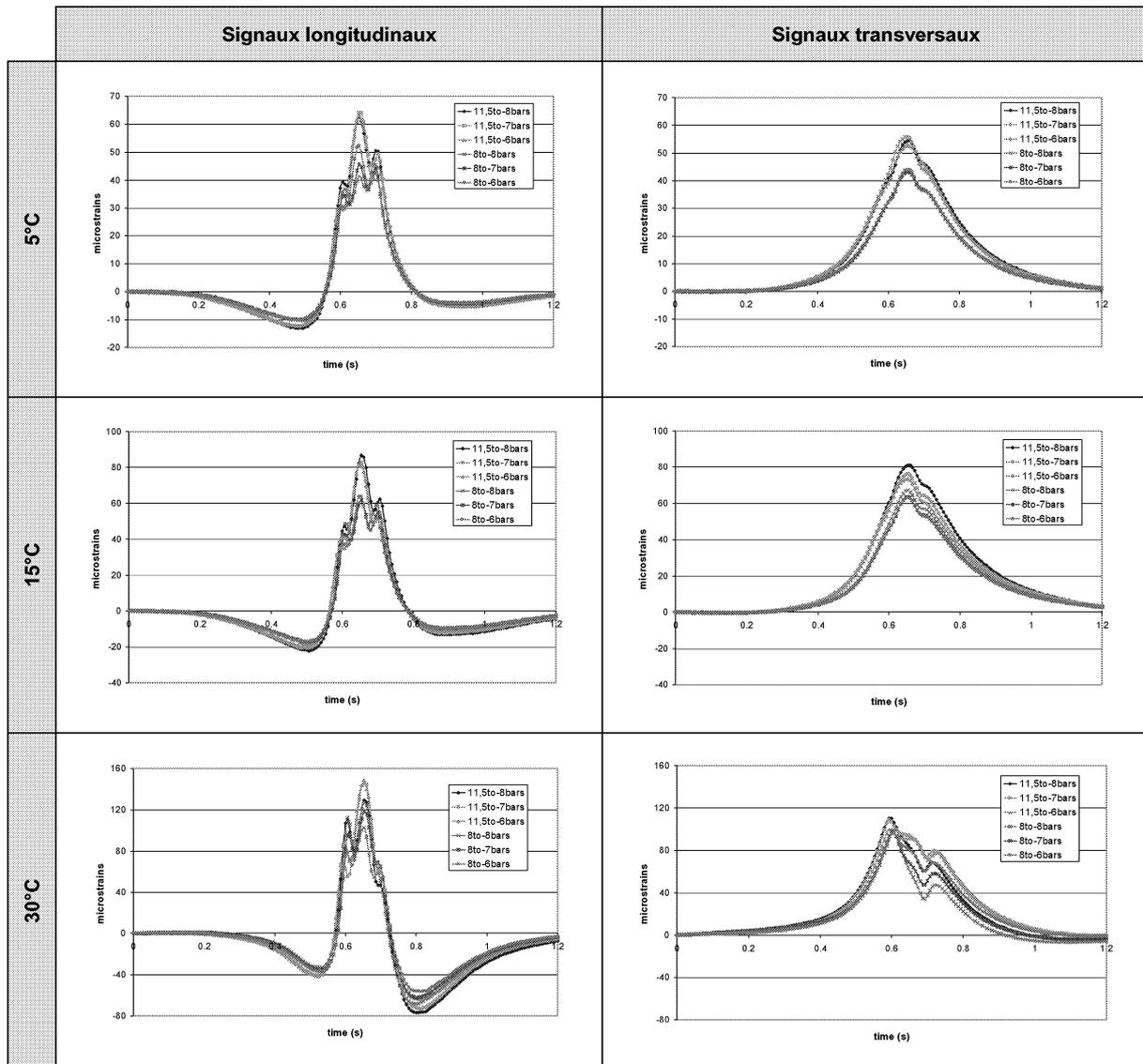


Figure 86 : Signaux de déformations au bas de la couche de roulement - structure de 10 cm

L'essentiel de ce qui a été observé sur les signaux au bas des couches est également valable ici. Premièrement, les signaux se superposent à nouveau remarquablement bien, particulièrement dans la phase d'approche de la charge, attestant une nouvelle fois de la qualité du système de mesure.

Concernant l'effet des conditions de chargement, c'est encore essentiellement l'intensité de la charge qui influence les déformations alors que la pression de gonflage des pneumatiques ne joue pratiquement aucun rôle. Enfin, les signaux enregistrés présentent également d'importantes dissymétries révélatrices du comportement visqueux des matériaux bitumineux.

Pour les signaux longitudinaux, une importante différence, indépendante des conditions de chargement ou de la rigidité de la structure, peut être observée en fonction de la température : pour l'ensemble des mesures effectuées à 30°C, les extensions enregistrées après le passage de la roue sont systématiquement supérieures à celles obtenues lors de son approche alors que la tendance est totalement inversée pour les mesures effectuées à 5 ou à 15°C. Si la situation

observée à 30°C paraît illogique (le fort pic de contraction enregistré au passage de la roue devrait réduire l'amplitude de l'extension après le passage de la roue), elle doit néanmoins être prise en compte en raison de la systématique avec laquelle elle se répète. De plus une tendance similaire est observée sur les signaux transversaux puisque les mesures à 30°C semblent indiquer des déformations résiduelles après le passage de la charge opposées à celles obtenues à 5 et 15°C (cf. § 3.4.2).

La partie centrale des signaux expérimentaux présente une courbe d'allure très surprenante et fortement « irrégulière » lors du passage de la roue, tout particulièrement pour les déformations longitudinales (cf. § 3.4.2). Une étude menée dans le cadre du projet de coopération européenne COST 333 avait relevé la présence de ce genre de perturbation dans les signaux au bas de la couche de roulement, mais sans les analyser dans le détail (Ekdahl 1998). Il avait alors été admis que ce phénomène devait être imputé à un problème de mesures lié à l'utilisation des jauges de déformations à très faible profondeur et les signaux avaient été jugés inutilisables. D'autre part, dans le cadre de projets d'essais en vraie grandeur menés par l'OCDE (OCDE 1985), (Dumont et Scazziga 1985) et (OCDE 1991a), des signaux présentant ce genre de perturbations ont systématiquement été éliminés des analyses, également sous prétexte que ces « irrégularités » étaient imputables à un problème du système de mesures.

Il semblerait logique que les signaux de déformations mesurés au bas de la couche de roulement offrent une image quasiment symétrique de ceux mesurés au bas des couches. Cette similitude s'observe pour les déformations enregistrées à l'approche de la charge avec la présence de pics d'extension « symétriques » de ceux en contraction observés au bas des couches pour les déformations longitudinales. Par contre, lors du passage de la charge au-dessus du point de mesure, les « irrégularités » enregistrées dans la zone de contraction qui ne sont pas l'image « symétrique » de la zone d'extension mesurée au bas des couches.

Toutefois, certains des signaux mesurés au bas de la couche de roulement ne présentent pas ces « irrégularités » et ils offrent alors la vision « symétrique » escomptée (Figure 87) :

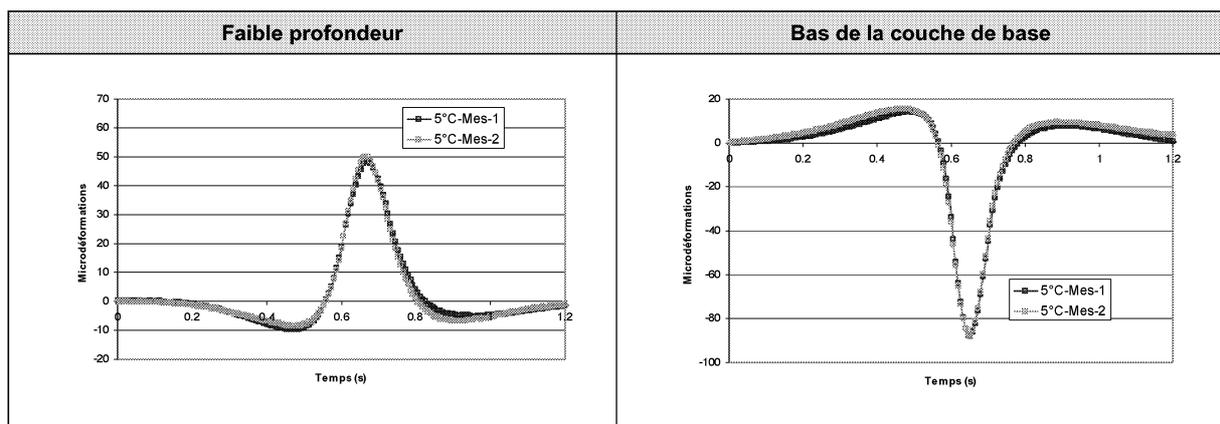
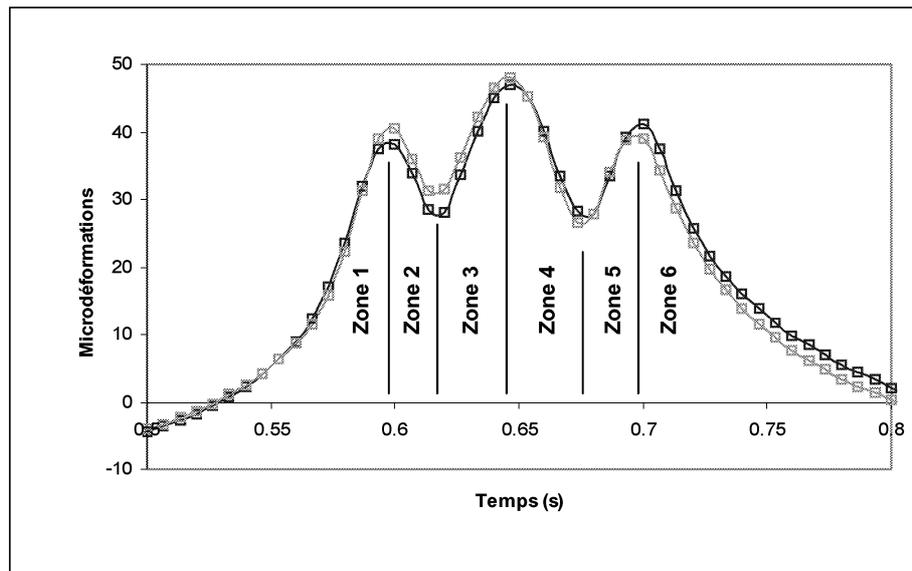


Figure 87 : Images « symétriques » de signaux de déformations longitudinales au bas de la couche de roulement sans « irrégularités » et au bas de la couche de base

Une visualisation systématique des signaux, pour tous les cas de charge et toutes les positions transversales, a montré que les « irrégularités » n'apparaissent que

lorsque les pneumatiques se trouvent au-dessus (ou à proximité immédiate) de la jauge de mesure<sup>88</sup>. Il est logique de penser qu'elles sont dues aux fortes sollicitations induites par les roues au bas de la couche de roulement, tout particulièrement à la composante verticale des contraintes. La question se pose cependant de savoir si ces fortes sollicitations affectent réellement les déformations des matériaux bitumineux ou si elles perturbent le fonctionnement du système de mesure.

Une observation détaillée des « irrégularités » montre que la zone centrale du signal se décompose en 6 zones clairement définies<sup>89</sup> alternant des augmentations et des diminutions des déformations (Figure 88) :



**Figure 88 : Détail et décomposition des « irrégularités » dans la zone centrale d'un signal de déformation longitudinale à la base de la couche de roulement**

En préambule, on relève une nouvelle fois la qualité des mesures effectuées puisque les signaux obtenus selon les deux directions sont quasiment identiques. En première analyse, on peut supposer que les zones 3 et 4 constituent le maximum du signal mais qu'un phénomène, lié au système de mesures, tend à abaisser cette partie du signal. C'est ce type d'explications qui est généralement donné pour justifier l'exclusion de ces signaux des analyses.

Les signaux ne présentent ces « irrégularités » que lorsque la charge est au-dessus du point de mesure et il est intéressant de déterminer leurs longueurs. Ces dernières sont calculées à partir du temps écoulé entre la fin de la zone 1 et le début de la zone 6 qui est multiplié par la vitesse de la charge. Les longueurs correspondent aux mesures effectuées sur la structure de 17 cm et pour des charges appliquées par une roue simple (Tableau 57).

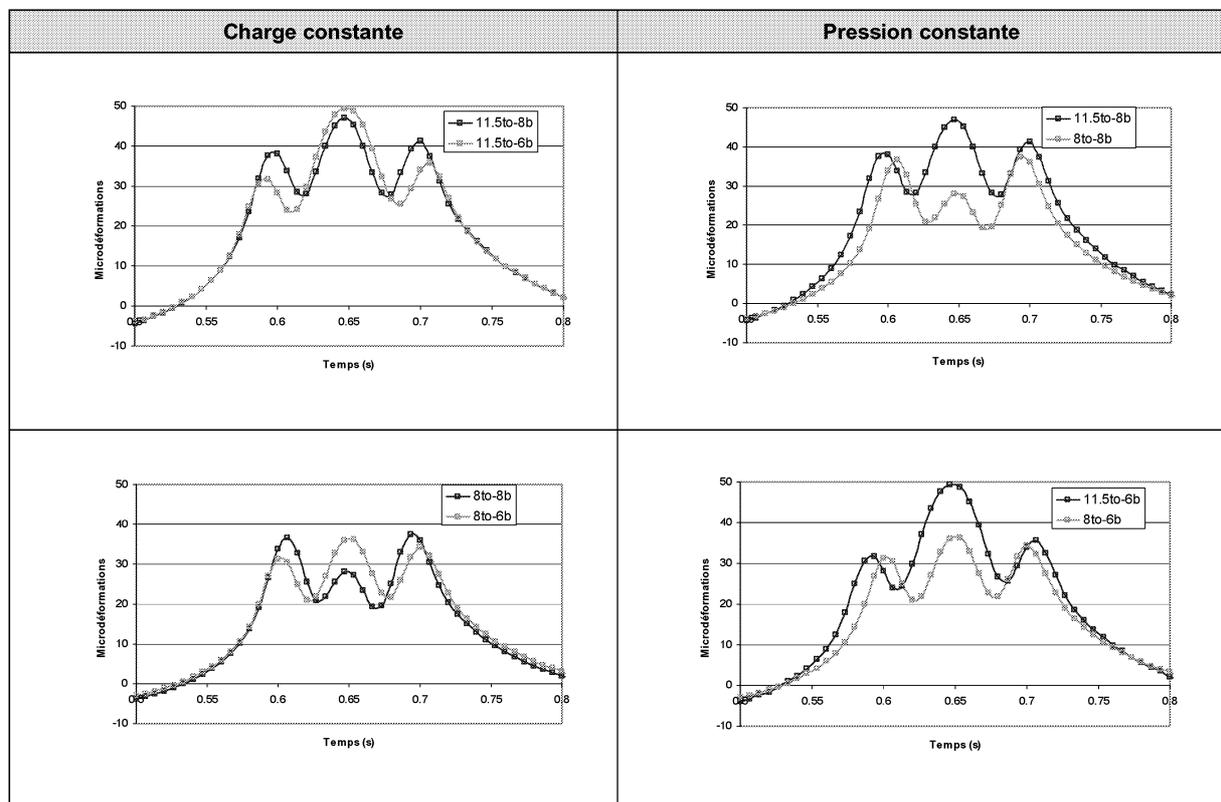
<sup>88</sup> A titre d'exemple, certains signaux mesurés entre les roues du jumelage ne présentent pas d'« irrégularités »

<sup>89</sup> Surtout à basse température et pour la structure la plus épaisse

**Tableau 57 : Longueurs (en cm) des « irrégularités » (zone 2 à 5) des signaux expérimentaux - structure de 17 cm**

	11,5 to - 8 bars	11,5 to - 7 bars	11,5 to - 6 bars	8 to - 8 bars	8 to - 7 bars	8 to - 6 bars
5°C	29.2	31.1	32.1	25.3	26.3	29.2
15°C	31.1	33.1	34.0	26.3	28.2	30.1
30°C	27.2	33.1	33.1	28.2	27.2	28.2
Moyenne	29.2	32.4	33.1	26.6	27.2	29.2

Avec une fréquence d'acquisition de 150 Hz et une vitesse réelle de la charge de 10,5 km/h, la distance entre chaque point de mesure est d'environ 2 cm. Compte tenu de cette précision, on constate que ces longueurs ne dépendent pas de la température. En revanche, les valeurs moyennes mesurées augmentent avec la charge et diminuent avec la pression. Une autre méthode pour visualiser l'effet des conditions de chargement sur ces longueurs consiste à superposer la zone centrale de deux signaux en faisant varier soit l'intensité de la charge à pression constante, soit la pression pour une intensité constante (Figure 89).



**Figure 89 : Superposition des « irrégularités de signaux longitudinaux pour différentes conditions d'intensité de charge et de pression - structure de 17 cm à 5°C**

Les figures à charge constante confirment qu'une diminution de la pression implique un allongement de la zone perturbée, alors que les figures à pression constante montrent que l'augmentation de l'intensité va de pair avec un allongement de la zone perturbée. Ces observations sont similaires à celles concernant les longueurs des empreintes des pneumatiques lorsqu'on modifie les conditions de chargement. Les

longueurs des empreintes et celles des « irrégularités » sont comparées pour quatre cas de charge présentés ci-dessus<sup>90</sup> (Tableau 58).

**Tableau 58 : Longueurs des surfaces de contact et longueurs des « irrégularités »**

	11,5 to - 8 bars	11,5 to - 6 bars	8 to - 8 bars	8 to - 6 bars
Longueur des empreintes (cm)	26.7	30.3	21.7	24.2
Longueur moyenne des « irrégularités » (cm)	29.2	33.1	26.6	29.2

Cette comparaison confirme que les « irrégularités » sont directement liées à la présence de la roue au-dessus du point de mesure, donc à l'apparition d'une importante compression verticale. Compte tenu de la diffusion de la charge dans les trois premiers centimètres des couches bitumineuses, il est logique que les « irrégularités » soient systématiquement légèrement plus longues que les empreintes.

Ces observations tendent à prouver que les « irrégularités » ne sont pas dues à des problèmes liés au système de mesures, mais qu'elles traduisent effectivement des brusques variations des déformations horizontales au bas de la couche de roulement lors du passage de la charge, ces variations étant vraisemblablement dues à l'introduction d'une forte compression verticale. Ce qui suit montrera que les constats effectués sur les signaux expérimentaux sont confirmés par les modélisations et qu'il est possible de expliquer mécaniquement ces « irrégularités ».

### 6.3 Modélisation élastique de signaux de déformation et comparaison avec les signaux expérimentaux

Les signaux obtenus par modélisation l'ont été selon le même principe que pour les déformations au bas de la couche de base (cf. § 5.3), c'est à dire en divisant par la vitesse les distances séparant les points de calcul du milieu de la charge. Les deux signaux expérimentaux obtenus selon les deux directions de déplacement de la charge, sont superposés avec ceux résultant des modélisations. Ils sont centrés sur la position estimée du milieu de la roue. Les résultats correspondent toujours aux déformations pour une charge de 11,5 to appliquée sur une roue simple gonflée avec une pression de 8 bars (Figure 90 et Figure 91).

<sup>90</sup> Aucune mesure d'empreinte n'a été effectuée avec une pression de 7 bars

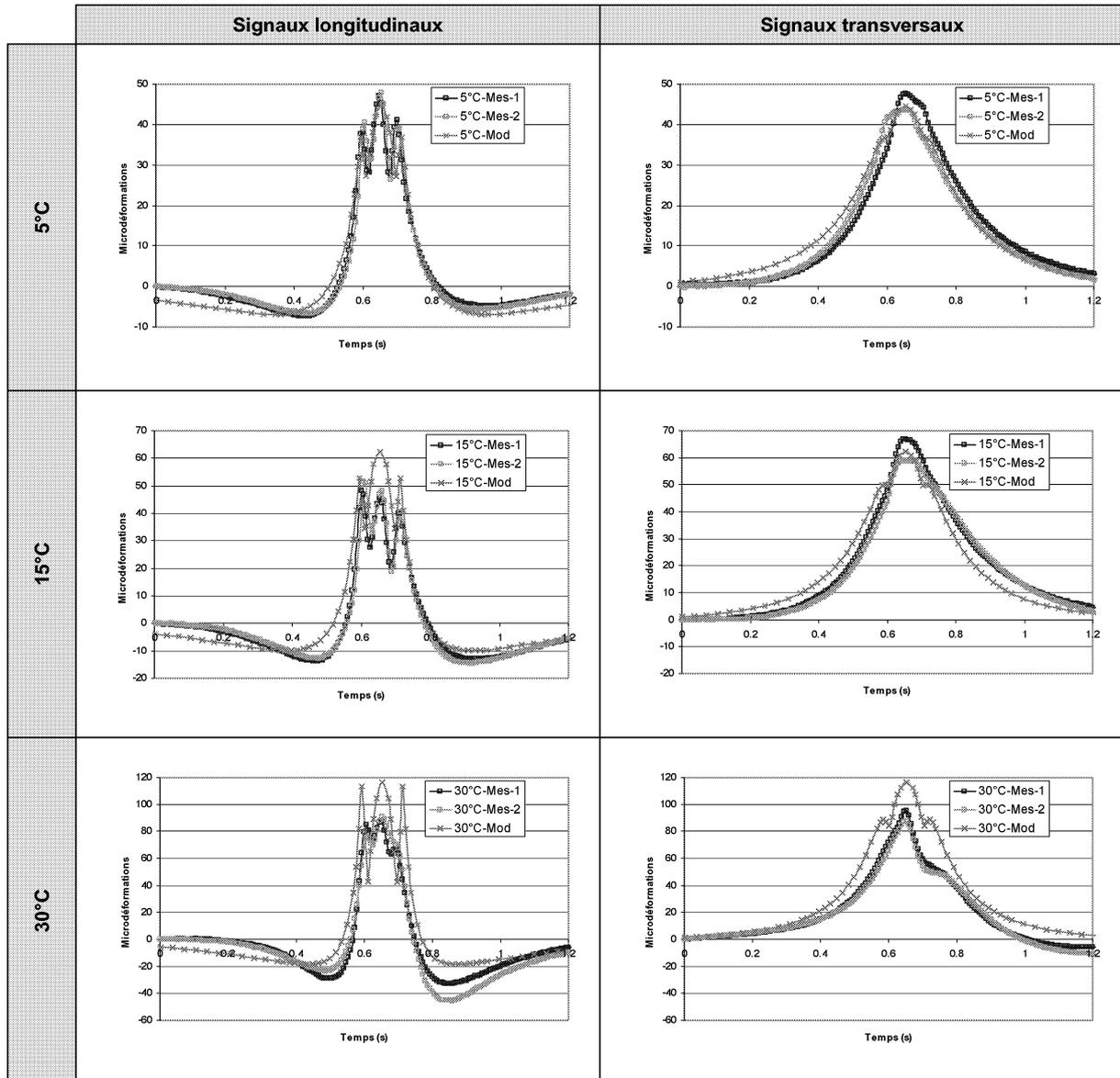


Figure 90 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 17 cm

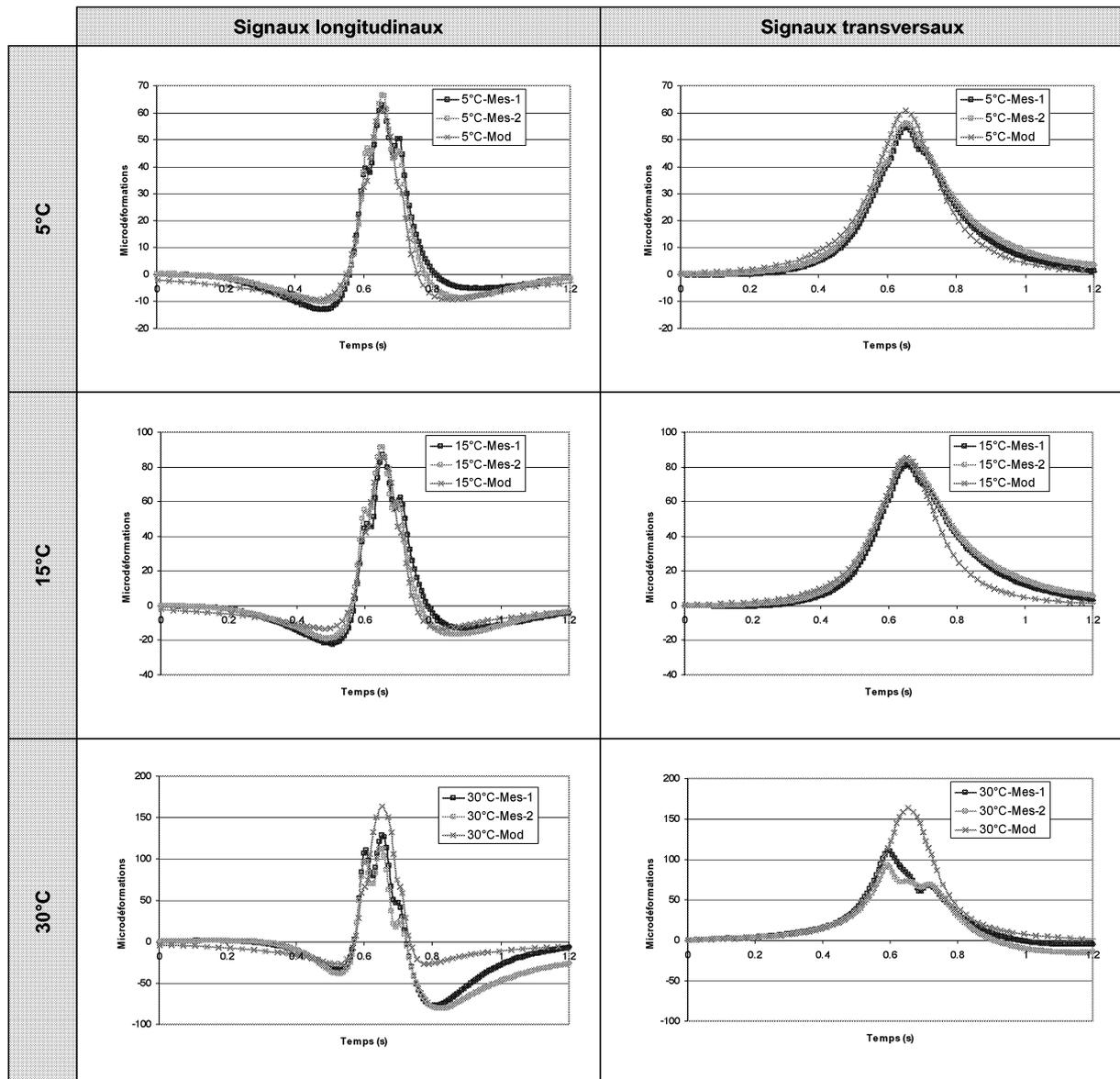


Figure 91 : Comparaison de signaux expérimentaux et modélisés - structure de 10 cm

Le constat le plus intéressant est que les signaux modélisés présentent des « irrégularités » plus ou moins similaires à celles observées sur les signaux expérimentaux. De plus, et toujours en accord avec les mesures, elles sont plus marquées sur la structure la plus épaisse et pour les déformations longitudinales. Ces résultats prouvent de façon définitive que les « irrégularités » correspondent effectivement à des brusques variations des déformations horizontales au bas de la couche de roulement et qu'elles ne doivent pas être attribuées aux équipements de mesures et à leurs éventuelles imperfections.

Concernant les résultats des modélisations, ils sont similaires à ceux obtenus pour les déformations au bas de la couche de base :

- très bonne concordance entre les mesures et les modélisations pour les températures de 5 et 15°C : les amplitudes maximales sont très proches dans les deux directions et pour les deux structures
- concordance légèrement moins bonne à 30°C : tendance des modélisations à surestimer les déformations, tout particulièrement pour la structure la moins épaisse
- les pics d'extension mesurés à l'approche de la charge et après son passage sont relativement bien estimés quant à leur amplitude, mais sont généralement mal situés par rapport à la contraction maximale. Les écarts dans le positionnement de ces pics étant d'autant plus importants que la structure est rigide
- à 30 °C, les forts pics d'extension après le passage de la charge ne sont absolument pas rendus par les modélisations.

### 6.3.1 Visualisation des « irrégularités » à partir des modélisations

Les images détaillées des « irrégularités » de la Figure 88 et de la Figure 89 montrent que les variations de déformations mesurées sont enregistrées dans des intervalles de temps très réduits. Les zones 3 et 5 ne contiennent que trois ou quatre points de mesure, qui correspondent à des distances très courtes. Ces « irrégularités » n'ont donc pu être mesurées que grâce à l'utilisation d'une fréquence d'acquisition relativement élevée (150 Hz) par rapport à la vitesse réelle de la charge (10,5 km/h). Une diminution de la fréquence d'acquisition ou une augmentation de la vitesse entraînerait un accroissement de la distance entre les points de mesure qui risquerait de supprimer l'enregistrement des « irrégularités ». Ce risque de ne pas relever ces variations a aussi été mis en évidence lors des modélisations.

Dans un premier temps, les points de calcul pour les modélisations avaient été choisis espacés de 5 cm sous la charge, puis de 10 cm lorsqu'on se trouvait hors de la zone d'application. Les signaux obtenus montraient certes quelques irrégularités, mais sensiblement moins marquées que celles observées à partir des mesures. Compte tenu de l'écart d'environ 2 cm entre les points de mesures, les points de calculs ont été rapprochés à 2,5 cm pour un second calcul. Des calculs ont été effectués sur une distance de 40 cm depuis le milieu de la roue et sur la base des deux espaces mentionnés (Figure 92)<sup>91</sup>.

---

<sup>91</sup> Compte tenu de la symétrie des signaux modélisés, seule la moitié des signaux est représentée

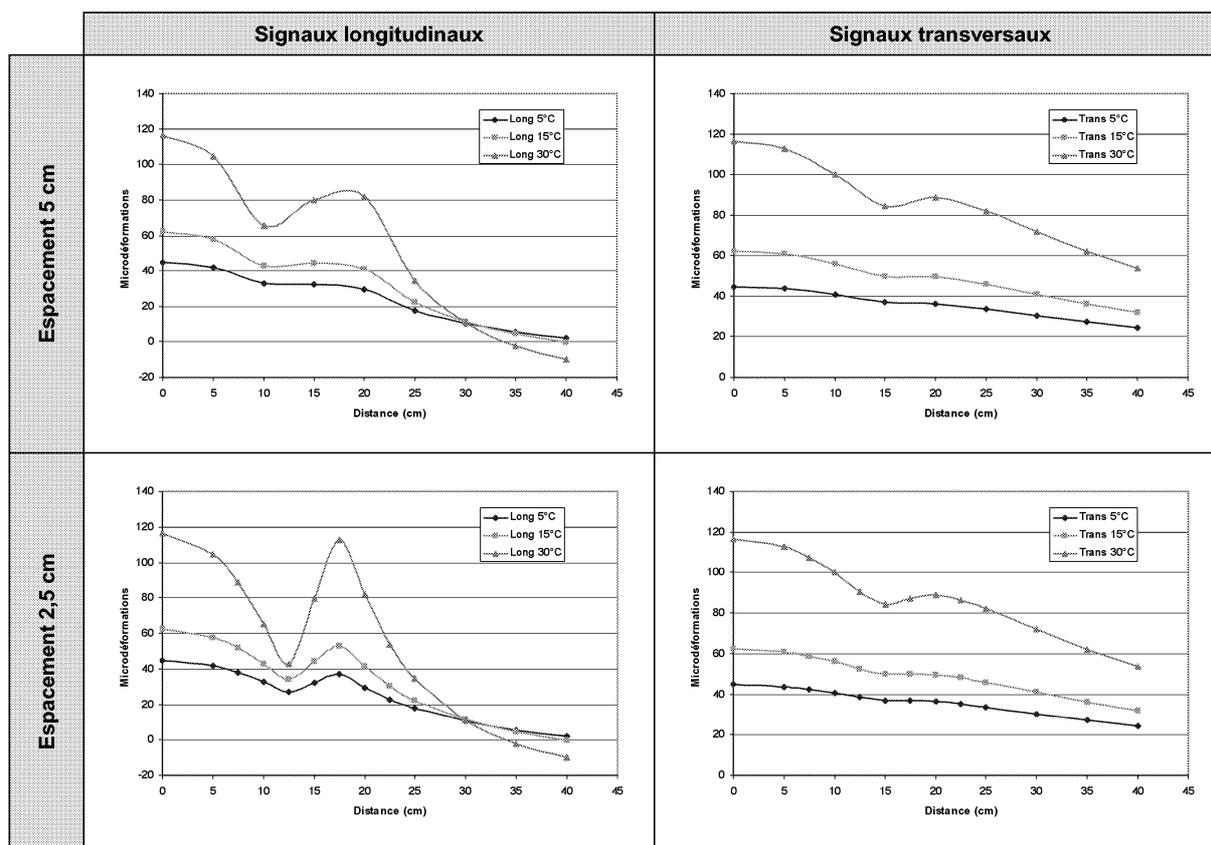


Figure 92 : Détail de la modélisation de la zone centrale des signaux de déformation à faible profondeur, structure de 17 cm

Ces images montrent que l'espacement choisi entre les points de calcul des signaux se révèle décisif pour la forme générale obtenue. Pour les signaux longitudinaux, la valeur déterminante est obtenue à 17,5 cm du milieu de la roue et cette valeur n'apparaît pas dans le premier calcul avec un espace de 5 cm entre les points.

A noter que pour le cas de charge retenu (11,5 to, 8 bars sur pneu simple), le rayon de l'empreinte circulaire définie pour la modélisation est d'environ 15 cm. Compte tenu de la diffusion des efforts dans la structure et d'une profondeur de 3 cm, cette position de 17,5 cm correspond approximativement à la limite de la zone de diffusion des contraintes verticales engendrées par la charge. Il est dès lors indéniable que l'apparition des « irrégularités » est liée à la brusque apparition d'une forte contrainte verticale.

### 6.3.2 Explication théorique et physique des « irrégularités »

Les « irrégularités » s'expliquent très bien à partir de l'évolution des états de contraintes lors du passage de la roue. Si les contraintes longitudinales et transversales augmentent de façon régulière à l'approche de la charge, les contraintes verticales subissent une brusque augmentation dès l'instant où les points de calcul sont situés sous la charge (Figure 93).

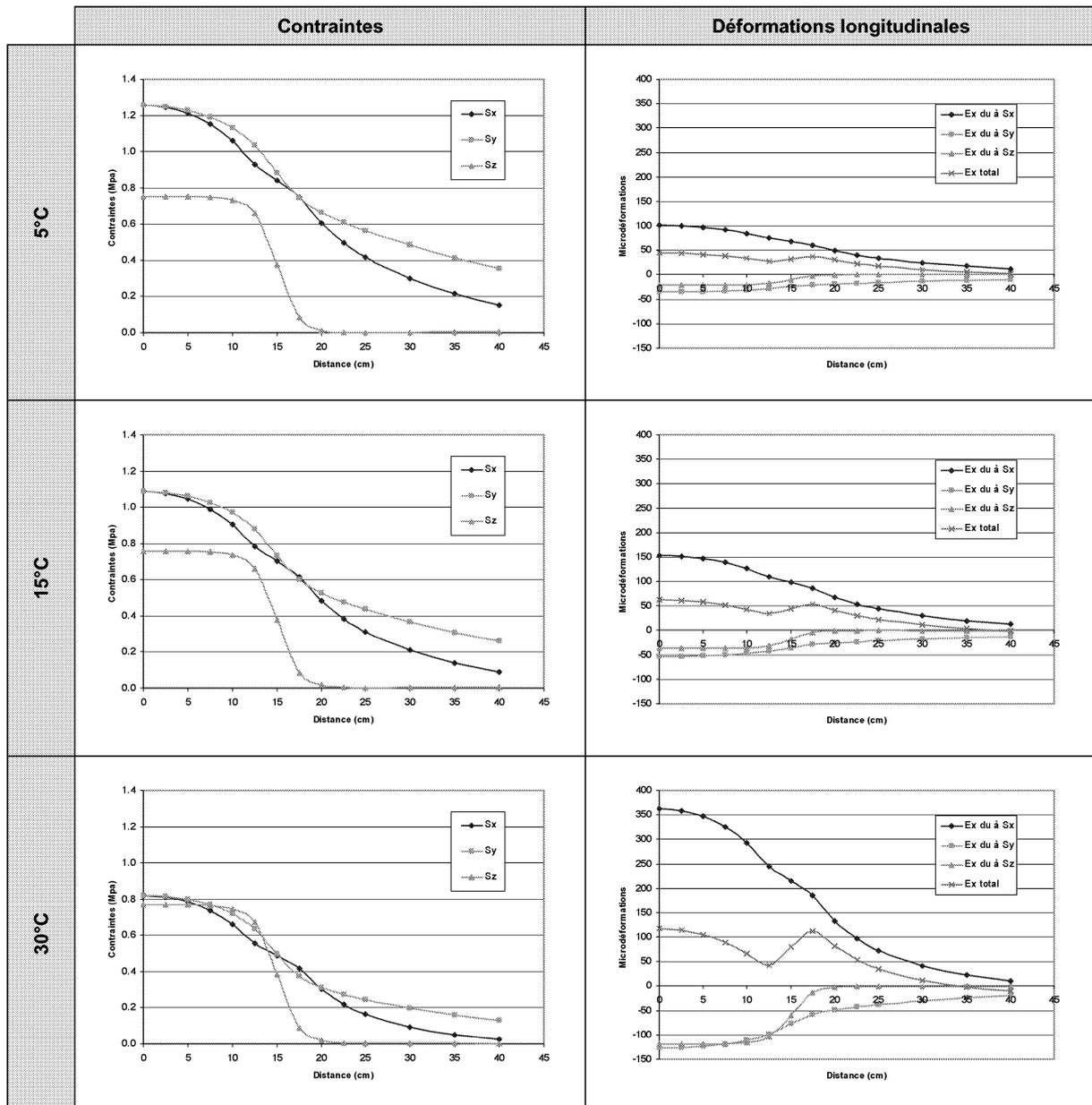


Figure 93 : Composantes des contraintes (gauche) et contribution de ces composantes sur les déformations longitudinales (droite)

La contrainte verticale sous la charge est naturellement voisine de la pression de 8 bars et elle demeure quasiment constante quelle que soit la température. En revanche, les contraintes horizontales augmentent logiquement avec la rigidité de la structure, ce qui signifie qu'elles sont plus importantes à basse qu'à haute température.

De plus, il convient de souligner que les contraintes horizontales sont toujours supérieures aux verticales, ce qui peut sembler paradoxal. En effet, cela signifie qu'à faible profondeur, les matériaux bitumineux sont plus fortement comprimés horizontalement que verticalement, ceci même juste au droit la charge. A faible profondeur, les compressions verticales sont insuffisantes pour que les déformations verticales ne soient pas des extensions. On aboutit alors à une situation à priori paradoxale : juste sous la charge où une forte compression verticale est appliquée

par la roue, les déformations verticales sont des extensions dans les premiers centimètres des couches bitumineuses<sup>92</sup>.

Pour en revenir aux « irrégularités », les déformations longitudinales peuvent être tirées des contraintes en appliquant la relation de Hooke tridimensionnelle :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \text{Eq. 36}$$

Il est alors possible de séparer les contributions de chaque composante des contraintes dans le calcul de la déformation longitudinale :

$$\varepsilon_x(\sigma_x) = \frac{1}{E} \sigma_x \quad \text{Eq. 37}$$

$$\varepsilon_x(\sigma_y) = -\nu \frac{1}{E} \sigma_y \quad \text{Eq. 38}$$

$$\varepsilon_x(\sigma_z) = -\nu \frac{1}{E} \sigma_z \quad \text{Eq. 39}$$

Les contributions en terme de déformations longitudinales des trois composantes des contraintes sont représentées sur la colonne droite de la Figure 93 avec leur somme.

Les contraintes longitudinales  $\sigma_x$  et transversales  $\sigma_y$  sont approximativement du même ordre de grandeur. La composante transversale  $\sigma_y$  engendre une diminution proportionnelle des déformations longitudinales dues à la composante longitudinale  $\sigma_x$  d'environ 35 % (valeur du coefficient de Poisson). En revanche, la brusque variation de la contrainte verticale  $\sigma_z$ , dont l'intensité est quasi constante sous la zone de charge, implique une variation constante et non proportionnelle des déformations longitudinales dans cette zone, qui vient s'ajouter à celles provenant des contraintes horizontales.

En considérant l'équation pour la déformation longitudinale  $\varepsilon_x$  et compte tenu que les composantes horizontales sont du même ordre de grandeur dans la zone sous la charge, l'importance<sup>93</sup> des « irrégularités » dépend de la valeur du coefficient de Poisson et du ratio entre les composantes horizontales et verticales des contraintes. A titre d'exemple, dans le cas à 30°C présenté à la Figure 93, la contrainte verticale  $\sigma_z$ , qui est du même ordre de grandeur que la transversale  $\sigma_y$ , implique elle aussi une réduction d'environ 35 % (toujours égale au coefficient de Poisson). Sous la roue, la déformation longitudinale totale  $\varepsilon_x$  est égale au tiers de la déformation  $\varepsilon_x(\sigma_x)$  due à la contrainte longitudinale.

<sup>92</sup> A noter que ces extensions ne signifient pas que les matériaux subissent un déplacement vertical vers le haut. En revanche, elles signifient que le point subissant le déplacement vertical le plus important n'est pas en surface, mais à quelques centimètres de profondeur

<sup>93</sup> L'importance peut être définie par le ratio entre la déformation au milieu de la roue et celle au bord de la charge

Pour un coefficient de Poisson constant, il est dès lors logique que les « irrégularités » seront d'autant plus importantes que le ratio entre contraintes horizontales et verticales sera petit. Ce ratio va diminuer au fur et à mesure que l'on descend dans la structure : les contraintes horizontales, qui ne sont en compression que dans la partie supérieure des couches bitumineuses<sup>94</sup>, évoluent beaucoup plus rapidement avec la profondeur que les verticales qui demeurent en compression quelle que soit la profondeur. Par conséquent, l'importance des « irrégularités » doit augmenter avec la profondeur. Des calculs effectués à 4 et 5 cm de profondeur pour la température de 30°C confirment ces explications (Figure 94).

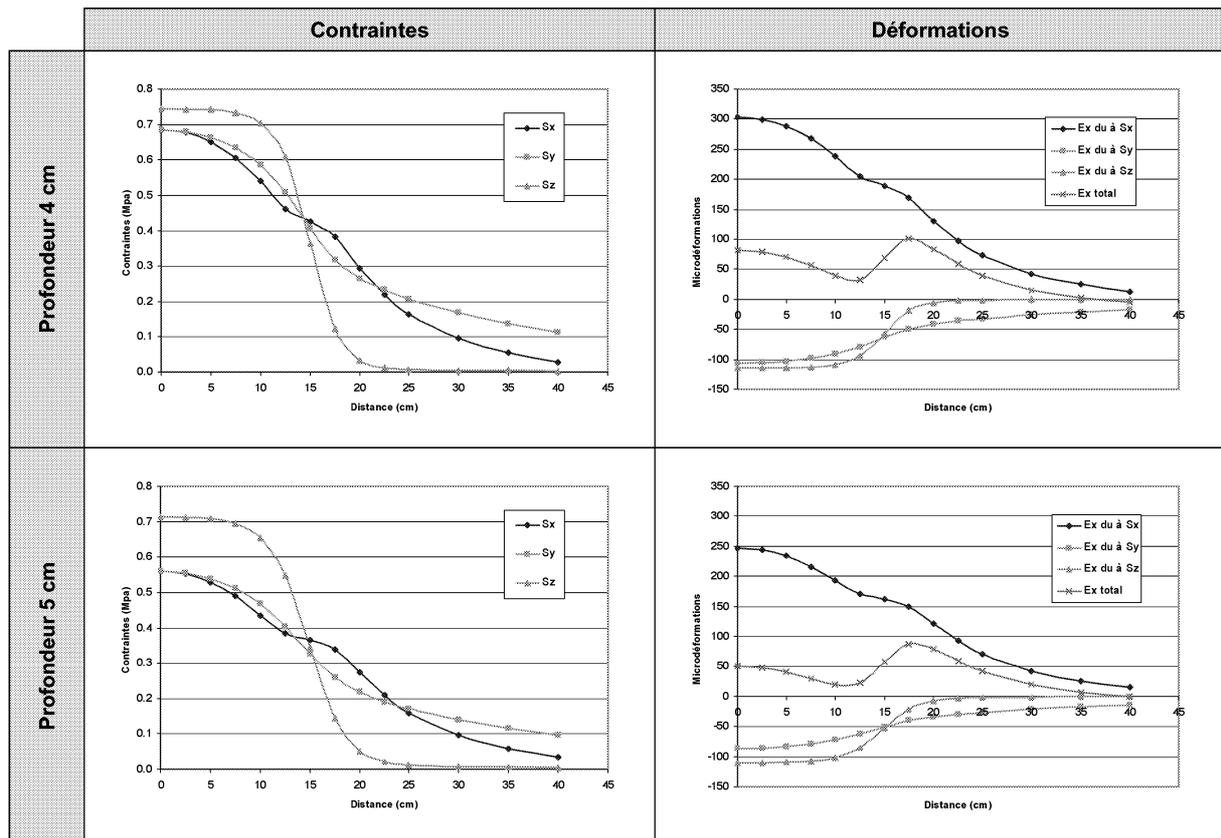


Figure 94 : Composantes des contraintes (gauche) et contribution de ces composantes sur les déformations longitudinales (droite) à des profondeurs 4 et 5 cm

Ces résultats sont conformes aux suppositions émises, puisqu'on observe que les composantes horizontales diminuent bien plus rapidement que les verticales. L'importance des « irrégularités » augmente dans le sens que les déformations maximales ne doivent plus être cherchées au milieu de la charge, mais à ses extrémités et que le ratio entre la valeur à cet endroit et celle au milieu de la charge tend à augmenter : les ratios sont respectivement de 0,97, 1,24 et 1,73 pour les profondeurs de 3, 4 et 5 cm. Dans les deux derniers cas, les amplitudes maximales ne sont pas situées au milieu mais aux extrémités de la zone de charge.

Si les explications données jusqu'ici se basent essentiellement sur les résultats de la théorie de l'élasticité, il est utile de proposer une appréhension plus physique du phénomène. A faible profondeur et avant que la charge ne soit au dessus d'eux, les

<sup>94</sup> Les « irrégularités » ne peuvent apparaître que lorsque les contraintes horizontales sont en compression

matériaux sont essentiellement en compression dans le plan horizontal et libre de se dilater verticalement. En terme de déformations, cela se traduit par des contractions longitudinales et transversales et des extensions verticales. Lorsque la roue passe au-dessus de ces matériaux, elle introduit une compression verticale qui tend (effet de Poisson) à induire un gonflement dans le plan horizontal. C'est ce gonflement latéral (empêché toutefois de se développer librement par les fortes contraintes horizontales) qui est à l'origine des « irrégularités ».

## 6.4 Enseignements

L'analyse des signaux à faible profondeur a permis **d'expliquer les causes des « irrégularités »** observées sur les signaux expérimentaux. De plus, les modélisations élastiques se sont révélées pertinentes pour ces explications. Comme pour les signaux au bas de la couche de base, les modélisations donnent des résultats qui **concordent** bien avec les valeurs expérimentales pour les températures de **5 et 15°C**. La cause de ces « irrégularités » a été décrite de manière complète, tâche qui n'avait pas été réalisée lors d'études précédentes où ce phénomène était systématiquement présenté comme une imprécision inhérente aux systèmes de mesures des déformations. Cela montre à quel point il peut être dommageable d'exclure des résultats, simplement sur la base de la visualisation d'un signal, sans rechercher l'explication des raisons pour lesquels ils sont supposés incorrects. A noter encore que ce phénomène est peu visible à très faible profondeur, où les compressions horizontales sont trop importantes pour que la compression verticale puisse réduire de façon conséquente les contractions horizontales.

Cependant, le principal résultat de ce chapitre a été de montrer qu'à faible profondeur, les matériaux bitumineux subissent des **contraintes horizontales nettement supérieures aux contraintes verticales**, même au droit de la charge. Ce résultat est très paradoxal, puisqu'il signifie que les matériaux proches de la surface de roulement des chaussées sont plus violemment sollicités horizontalement que verticalement. Cet état de contrainte montre que les couches bitumineuses sont essentiellement sollicitées en flexion et que leur **comportement est proche de celui des dalles**. Il n'est dès lors pas étonnant que ce soit plutôt l'intensité de la charge que la pression de gonflage des pneus qui influence les déformations dans les couches bitumineuses des chaussées souples.

Ce constat a été effectué grâce à la présence des « irrégularités » observées sur les signaux de déformations expérimentaux. Les très fortes compressions horizontales ont été mises en évidence lors de l'explication de ces « irrégularités ». Ces dernières sont le résultat de **la brusque application de la contrainte verticale due à la présence de la charge**. Durant l'approche de la charge, les matériaux subissent une augmentation progressive et régulière des contraintes longitudinales et transversales, qui se traduisent par une augmentation progressive et régulière des déformations longitudinales et transversales. Dès que la charge se trouve au droit du point de mesure, la contrainte verticale apparaît brusquement, ce qui induit des extensions horizontales réduisant les contractions horizontales. Il s'agit là du phénomène des « irrégularités ».



# 7. Modélisations viscoélastiques linéaires

## 7.1 Contenu et démarche

Les modélisations basées sur l'hypothèse d'un comportement élastique des matériaux fournissent des résultats en concordance avec ceux tirés des mesures expérimentales (cf. § 4, 5 et 6). En revanche, le comportement élastique fournit des signaux parfaitement symétriques, ce qui ne correspond pas aux signaux expérimentaux qui sont dissymétriques. Les analyses ont montré que ces dissymétries se traduisent par des vitesses de déformation différentes avant et après le passage de la charge. Pour les signaux longitudinaux, ces différences sont aussi quantifiables par les amplitudes et les positions (ou les temps) des pics de contraction enregistrés avant et après le passage de la charge. L'introduction dans les modélisations d'un comportement viscoélastique pour les matériaux bitumineux devrait permettre de reproduire les dissymétries observées sur les signaux expérimentaux.

Les modélisations viscoélastiques sont effectuées pour le cas de charge de référence déjà utilisé précédemment : une charge de 11,5 to appliquée sur des roues simples, gonflées à 8 bars. Il ne concerne que la structure de 17 cm.

Après avoir décrit les hypothèses et les paramètres qui sont utilisés pour les modélisations viscoélastiques, le chapitre se décompose en deux parties :

- modélisation de signaux au bas de la couche de base
- modélisation de signaux au bas de la couche de roulement.

Compte tenu des importantes variations enregistrées sur les signaux expérimentaux en fonction de la température, les modélisations ont été effectuées pour les trois températures (5, 15 et 30 °C).

## 7.2 Hypothèses et paramètres viscoélastiques des matériaux

Deux méthodes de calcul, toutes deux basées sur le modèle de Huet, ont été utilisées pour obtenir des signaux de déformations tenant compte du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux. La première méthode admet comme hypothèse que les contraintes obtenues à partir d'un comportement élastique sont proches de celles d'un modèle viscoélastique. Partant de cette hypothèse, les déformations correspondant à des champs de contraintes élastiques sont calculées par application du modèle de Huet. La seconde méthode à recours à un logiciel de type multicouche mais qui permet l'introduction du comportement viscoélastique pour les matériaux. Elle utilise également le modèle de Huet.

Les paramètres du modèle de Huet doivent être déterminés par calage du modèle sur les résultats d'essais de module complexe (cf. § 2.4.2.3). La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la détermination de ces paramètres.

### *7.2.1 Signaux de déformations viscoélastiques à partir de contraintes calculées par un modèle élastique*

La principale hypothèse de cette démarche est d'admettre que les champs de contraintes calculés à partir d'un comportement élastique ou d'un comportement viscoélastique ne présentent que peu de différences. Cette hypothèse est vérifiée si les conditions aux limites du modèle sont uniquement exprimées en terme d'efforts (forces ou contraintes)<sup>95</sup>. Les conditions aux limites du modèle de Burmister se répartissent entre des conditions en force et en déplacement (cf. § 2.5.1). Il est donc certain que l'hypothèse retenue n'est pas entièrement conforme à la réalité, mais il est a priori possible que les écarts entre ces deux champs de contraintes soient faibles. Cette démarche a été entreprise notamment en raison de la facilité de sa réalisation. En effet, il est possible de calculer des déformations viscoélastiques à partir d'une histoire de contraintes par un simple calcul intégral. Ce calcul a été préparé au LAVOC et mis en application à l'aide du logiciel Matlab (Ould-Henia 2003) (Matlab 2002). Il a par ailleurs été validé sur la base des résultats d'un essai de module complexe.

Les contraintes élastiques ont été calculées pour des points situés sur deux lignes longitudinales passant par le centre de la roue à des profondeurs respectives de 3 et 17 cm. Afin d'obtenir l'évolution des contraintes en fonction du temps, les distances des points de calcul au centre de la charge ont été divisées par la vitesse. Les contraintes ont toujours été calculées dans la couche de base.

### *7.2.2 Signaux de déformations à partir d'un modèle multicouche permettant d'introduire le comportement viscoélastique*

Le logiciel Veroad permet de choisir le type de comportement de chacune des couches de la structure. Dans un premier temps, compte tenu que les propriétés viscoélastiques ne sont connues que pour les matériaux de la couche de base<sup>96</sup>, seule cette dernière a été admise comme adoptant ce comportement. Les autres couches, y compris celle de roulement, ont un comportement élastique. Pour la couche de roulement, le module élastique est néanmoins adapté en fonction de la température.

### *7.2.3 Détermination des paramètres pour le modèle de Huet*

Les modélisations étant effectuées pour des températures de 5, 15 et 30°C, le calage des paramètres se concentre sur les résultats de laboratoire obtenus entre 0 et 30 °C. Ce calage est effectué à partir d'un fichier Excel établi par le LCPC permettant de visualiser les écarts entre le modèle et les résultats de laboratoire.

---

<sup>95</sup> A l'inverse, si ces conditions aux limites sont uniquement exprimées en terme de déplacements, les champs de déplacements (et par suite ceux des déformations) sont identiques.

<sup>96</sup> Les angles de phase n'ont pas été enregistrés pour la couche de roulement en macro rugueux

Plusieurs combinaisons pour les paramètres  $E_{inf}$ ,  $h$ ,  $k$ , et  $\delta$  permettent une bonne approximation de la courbe du module complexe dans le plan de Cole-Cole<sup>97</sup>. Une fois ces quatre paramètres fixés, les valeurs de  $\tau$  en fonction de la température  $T$  sont obtenues à partir de la formule suivante, dont les coefficients  $A_0$ ,  $A_1$  et  $A_2$  sont déterminés par régression:

$$\tau = e^{A_0 + A_1 \cdot T + A_2 \cdot T^2} \quad \text{Eq. 40}$$

Ces paramètres doivent permettre le calage du modèle dans le plan de Cole-Cole et dans l'espace de Black (Figure 95).

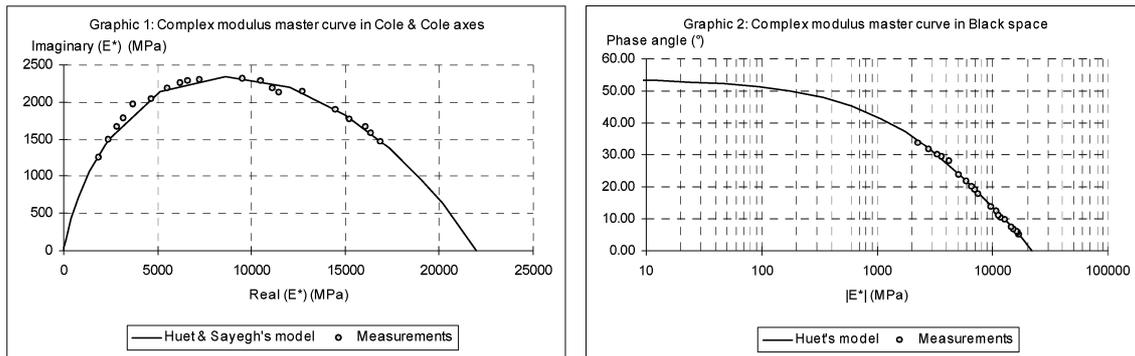


Figure 95 : Calage entre le modèle de Huet et les résultats des essais en laboratoire (HMT 22s)

Les différents paramètres retenus pour les modélisations sont récapitulés dans le Tableau 59.

Tableau 59 : Paramètres du modèle de Huet pour le HMT 22s et le MR 11

Couche	$E_{inf}$	$h$	$k$	$\delta$	$A_0$	$A_1$	$A_2$
Base HMT 22s	22000	0.60	0.23	2.4	3.55	-0.47	0.0046
Roulement MR 11	25000	0.58	0.23	1.7	2.69	-0.40	0.0027

Les propriétés des matériaux des autres couches sont identiques à celles utilisées pour les modélisations linéaires (cf. § 3.5.1).

### 7.3 Signaux au bas de la couche de base

Les signaux de déformations obtenus selon les deux méthodes de calculs viscoélastiques sont comparés entre eux et avec ceux des modélisations élastiques. Ces comparaisons conduisent à également comparer les contraintes résultant des deux modes de calcul, afin de juger de la véracité d'admettre que ces contraintes sont égales. Les résultats obtenus à partir du logiciel Veroad sont alors comparés avec ceux des signaux expérimentaux. Cette comparaison porte en particulier sur la

<sup>97</sup> Il a été vérifié par des calculs qui ne sont pas présentés ici, que les diverses combinaisons permettant un bon calage du modèle sur la courbe du module complexe donnent des résultats similaires quelle que soit la combinaison retenue

dissymétrie des signaux, notamment par les vitesses de déformation des signaux, les amplitudes et les positions des pics de contraction des signaux longitudinaux.

### 7.3.1 Comparaison des différentes modélisations

Trois signaux de déformations modélisés selon des méthodes différentes sont comparés :

- signaux de déformations élastiques linéaires calculés par un modèle multicouche (Burmister), désigné par **EL-EL**
- signaux de déformations viscoélastiques linéaires calculées à partir de contraintes élastiques linéaires calculées par un modèle multicouche (Burmister), désigné par **VEL-EL**
- signaux de déformations viscoélastiques linéaires calculées à partir du programme viscoélastique multicouche Veroad, désigné par **Veroad**.

Ces signaux de déformations sont superposés et représentés en fonction du temps<sup>98</sup> (Figure 96).

---

<sup>98</sup> Les temps négatifs correspondent à des coordonnées avant le passage de la charge

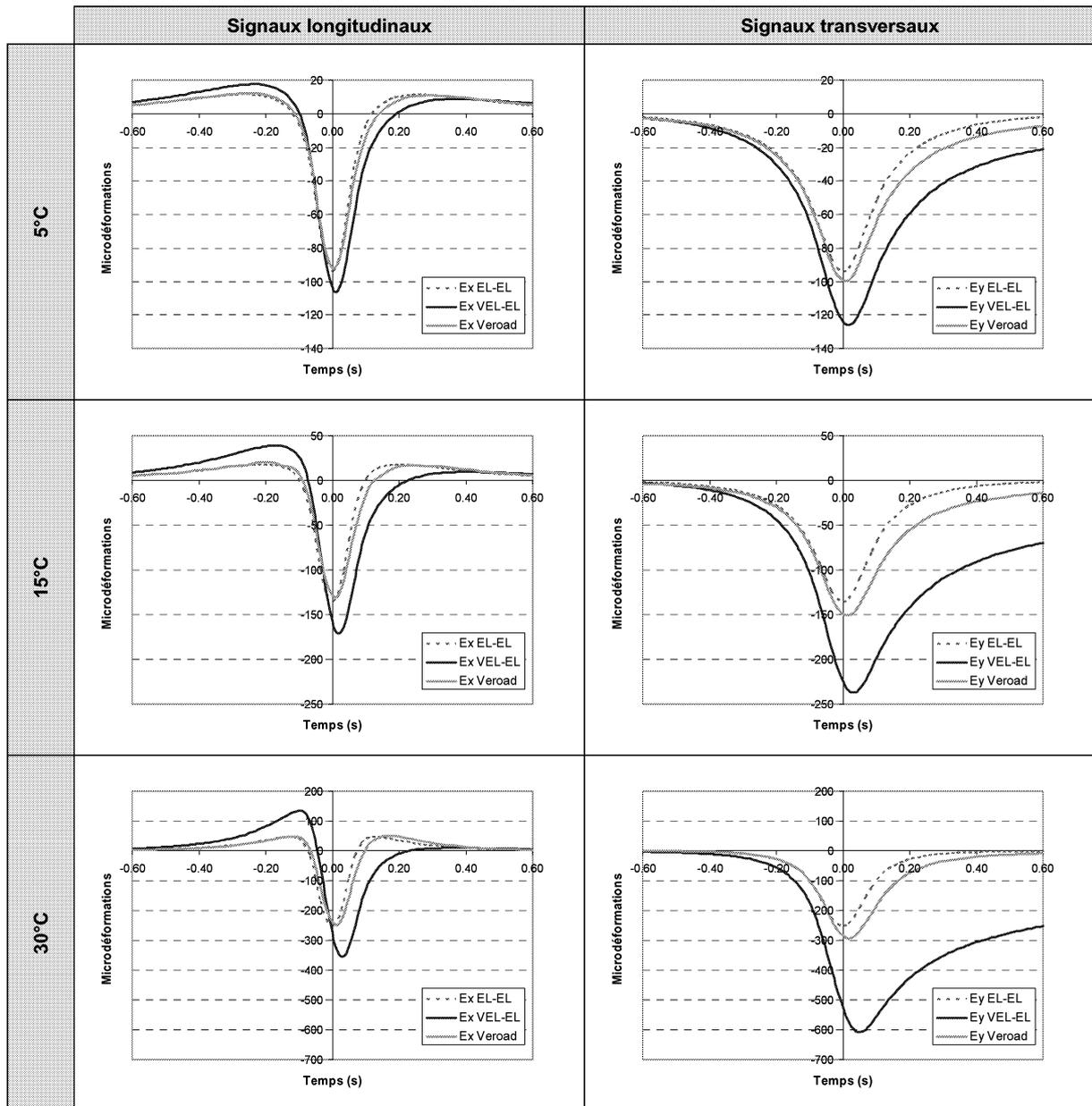


Figure 96 : Comparaison des signaux de déformations obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (VEL-EL) et (Veroad)

Les résultats obtenus par les calculs viscoélastiques diffèrent sensiblement selon la méthode utilisée :

- les écarts entre les deux calculs augmentent considérablement avec la température et sont beaucoup plus marqués dans le sens transversal
- les signaux de déformations viscoélastiques calculés à partir des contraintes élastiques (VEL-EL) sont nettement plus dissymétriques que ceux calculés par Veroad (Veroad)
- l'écart entre les contractions maximales avant et après le passage de la roue est très important avec le premier mode de calcul alors que le second donne des amplitudes relativement similaires à celles du calcul élastique, ne faisant que décaler la position des pics après le passage de la charge
- les amplitudes maximales sont nettement supérieures avec le premier mode de calcul qu'avec le second.

D'un autre côté, les principales modifications apportées par les modélisations viscoélastiques par rapport aux résultats des modélisations élastiques sont que :

- les amplitudes maximales transversales sont systématiquement supérieures aux longitudinales
- les signaux viscoélastiques sont dissymétriques
- les amplitudes maximales de déformation obtenues par les modélisations viscoélastiques sont obtenues après que le milieu de la charge ait passé sur le point de mesure, ceci d'autant plus tard que la température est élevée.

L'analyse des différences entre les résultats élastiques et viscoélastiques est donnée lors de la comparaison entre les mesures et les modélisations (cf. § 7.3.3).

Les importants écarts enregistrés entre les deux méthodes de calculs viscoélastiques imposent une comparaison des contraintes élastiques avec celles, viscoélastiques, fournies par Veroad pour contrôler la validité de l'hypothèse émise quant à une égalité de ces contraintes.

### *7.3.2 Comparaison des contraintes élastiques et viscoélastiques*

Les contraintes longitudinales et transversales obtenues par des modélisations élastiques et viscoélastiques sont superposées en fonction du temps (Figure 97).

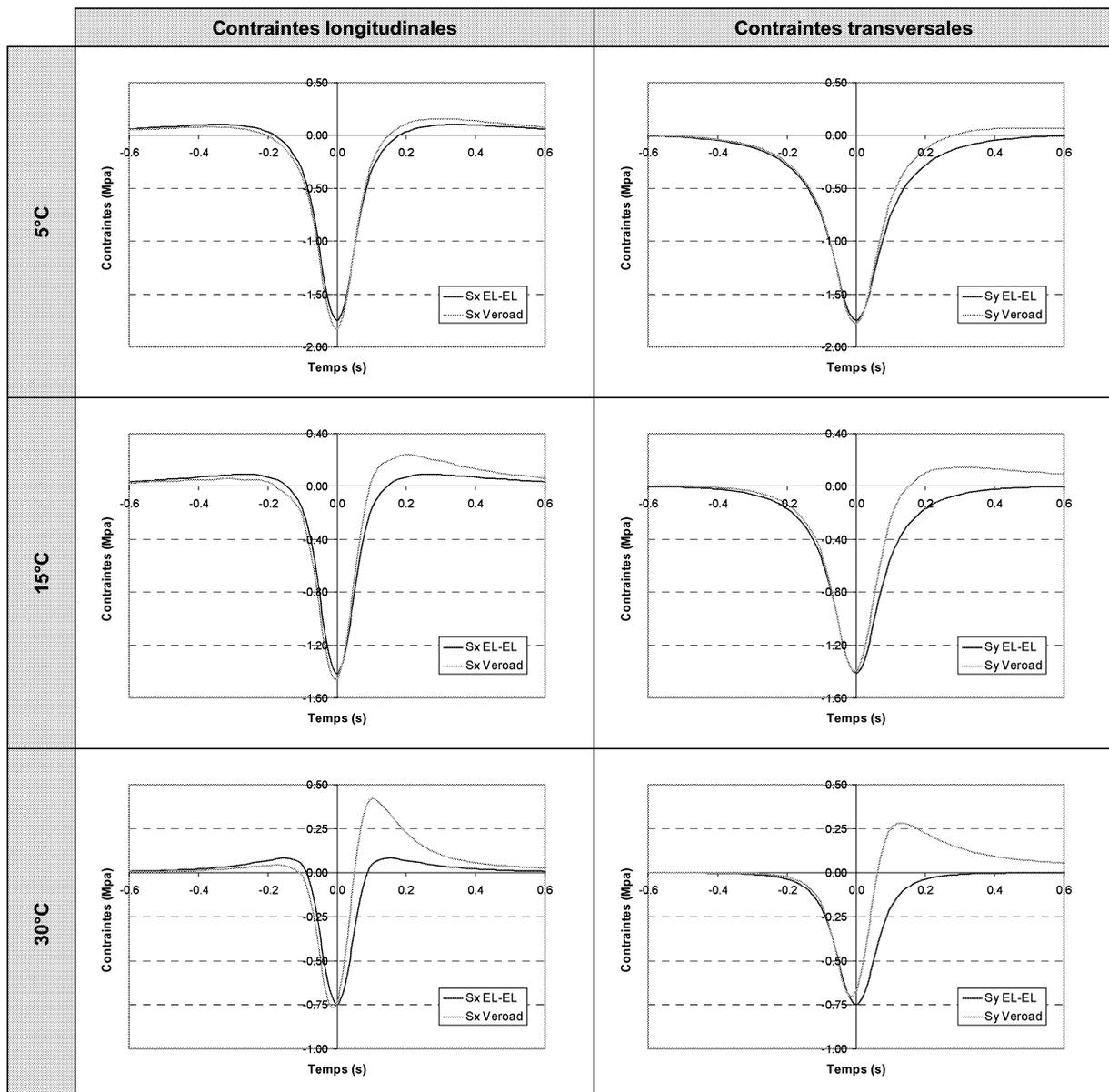


Figure 97 : Comparaison des signaux de contraintes obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (Veroad)

Ces représentations sont étonnantes et assez inhabituelles puisque les signaux de contraintes viscoélastiques présentent des dissymétries contraires à celles observées sur les signaux expérimentaux de déformation :

- les compressions et les vitesses de variation des contraintes les plus importantes sont après le passage de la charge ; des compressions apparaissent aussi transversalement
- les tractions maximales sont obtenues légèrement avant le passage du milieu de la roue.

Les contraintes élastiques et viscoélastiques sont similaires à l'approche de la charge mais se différencient nettement après son passage. Ainsi, les compressions maximales à l'approche de la charge et les tractions maximales sont de même

ampleur. En revanche, dans la seconde partie du signal, lorsque la roue s'éloigne, des importantes compressions longitudinales et transversales sont observées. Par ailleurs, les écarts entre les deux modes de calcul augmentent avec la température.

Les écarts entre les contraintes peuvent être expliqués par les différences de comportement des couches modélisées. Lors des calculs avec Veroad, seule la couche de base du revêtement bitumineux suit un comportement viscoélastique, les autres suivant un comportement élastique. Quand la charge s'éloigne, rien dans le comportement élastique de la couche de fondation ne s'oppose à son retour à son état initial de déformation. En revanche, le comportement viscoélastique de la couche bitumineuse impose à cette dernière un retard dans ce retour à la position initiale. Compte tenu du collage parfait admis entre les couches, la grave « impose » des déformations à la couche viscoélastique qui repose sur elle. Ces déformations imposées par la couche de fondation élastique à la couche de base viscoélastique expliquent l'apparition des compressions après le passage de la charge dans les modélisations viscoélastiques. Cette action de la couche de fondation sur la couche de base justifie l'apparition de compressions dans les deux directions horizontales.

Cela signifie que dans les calculs avec Veroad, bien que les matériaux bitumineux suivent un comportement viscoélastique, la structure dans son ensemble suit plutôt un comportement élastique. C'est ce qui explique le peu de dissymétrie des déformations, notamment entre les pics de contractions avant et après le passage de la charge.

De leur côté, les calculs viscoélastiques basés sur des contraintes élastiques intègrent les interactions entre les couches contiguës, mais sans effet de retard car tous les matériaux tendent à retrouver leur état de déformation initiale simultanément après le passage de la roue. La couche de grave n'exerce pas d'effet différé sur le matériau bitumineux et n'y engendre pas de contrainte supplémentaire. Dans cette situation, les matériaux bitumineux suivent le comportement purement viscoélastique du modèle de Huet, sans que les autres couches influencent l'histoire des contraintes qui leur est appliquée. C'est ce qui explique les très importantes dissymétries des signaux modélisés selon cette méthode. Ces dissymétries sont logiquement plus marquées à température élevée, en raison de l'augmentation de la viscosité.

Ces explications concordent aussi avec le fait que les écarts entre les résultats des deux modes de calcul augmentent avec la température. En plus d'une augmentation de la viscosité, l'augmentation de la température implique une forte diminution de la rigidité des couches bitumineuses, ce qui réduit leur participation à la reprise des efforts des charges de trafic. Ces efforts sont donc reportés sur la couche de fondation dont l'importance dans la réaction de la structure augmente. Cela signifie que l'action de la couche de fondation sur la couche de base sera plus importante à haute température, expliquant ainsi les pics de compression plus conséquents observés après le passage de la charge. Ces pics sont évidemment plus importants en valeur relative, étant entendu que les contraintes diminuent lorsque la température augmente.

Pour terminer, ces explications justifient également que les divergences entre les contraintes soient plus marquées après le passage de la charge qu'avant. Durant son approche, c'est essentiellement la charge qui sollicite les matériaux et les différentes couches n'ont que peu d'interactions contradictoires. En revanche, lorsqu'elle s'éloigne, tous les matériaux élastiques tendent à retrouver leur position

d'origine et imposent des conditions de déformation à la couche de base, ce qui influence sensiblement son état de contrainte.

### *7.3.3 Comparaison des modélisations avec les mesures expérimentales*

Il a été montré que les modélisations élastiques fournissent de bonnes estimations des amplitudes maximales des déformations, de leur répartition latérale et qu'elles sont globalement capables de traduire l'effet des variations des conditions de chargement sur ces amplitudes (cf. § 4). Selon la structure étudiée, les modélisations élastiques conduisent à surestimer ou à sous-estimer les déformations. Il a été expliqué que l'introduction du comportement viscoélastique ne permettrait pas à elle seule d'améliorer la concordance d'ensemble entre les mesures et les modélisations (4.2.2).

On peut en revanche supposer que le comportement viscoélastique permettra une meilleure description de la forme générale des signaux. Les signaux obtenus par l'application du modèle de Huet à des contraintes élastiques (VEL-EL) ne sont pas présentés en raison des observations qui ont démontré son inadéquation pour la modélisation de signaux dans le cadre d'une structure (cf. § 7.3.1 et 7.3.2). Les résultats des signaux expérimentaux (mes) sont superposés avec ceux obtenus par des modélisations élastiques linéaires (EL-EL) et viscoélastiques linéaires (Veroad) (Figure 98).

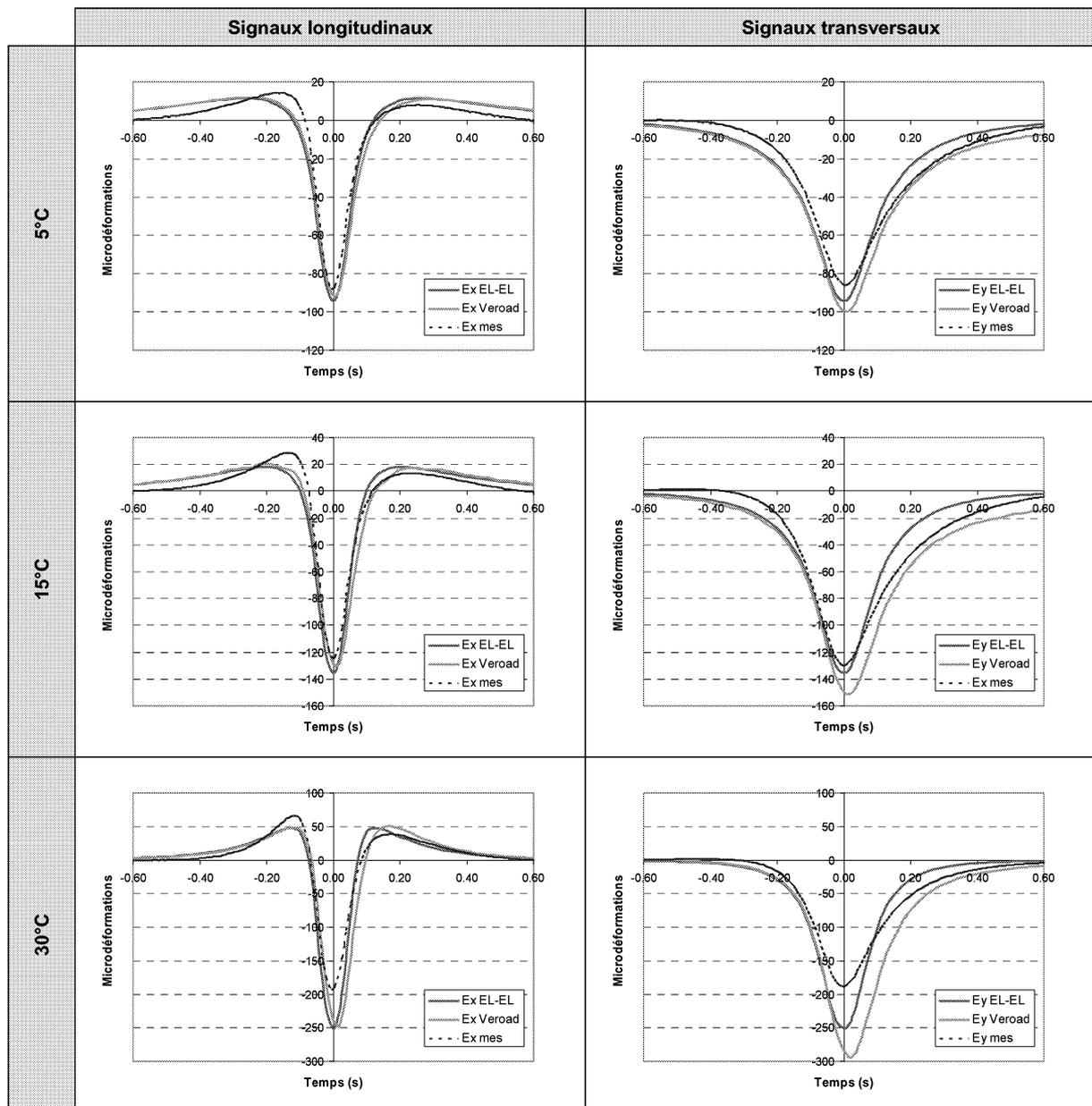


Figure 98 : Comparaison de signaux de déformations : modélisations élastiques (EL-EL), viscoélastiques (Veroad) et mesures expérimentales (mes)

On observe que longitudinalement, les amplitudes maximales calculées avec un comportement viscoélastique sont légèrement inférieures à celles provenant du calcul élastique. Ceci s'explique par la contraction subie par les matériaux à l'approche de la charge qui influence et réduit l'extension maximale lors du passage de la charge. C'est un phénomène similaire à celui qui justifie les différences d'amplitude entre les pics de contraction avant et après le passage de la charge. En revanche, les résultats du calcul viscoélastique sont nettement supérieurs à ceux du calcul élastique dans le sens transversal, où il n'existe pas de pics de contraction lors de l'approche de la charge.

Les analyses qui suivent portent d'une part sur les différences entre les déformations longitudinales et transversales et sur les dissymétries des signaux. Pour ces dissymétries, les méthodes appliquées sont identiques à celles utilisées précédemment pour les signaux (cf. § 5.3).

#### 7.3.3.1 Différences entre les amplitudes maximales longitudinales et transversales

On constate que les amplitudes maximales des déformations longitudinales sont inférieures à celles des déformations transversales, ce qui s'explique par deux facteurs. En plus de l'existence des pics de contraction à l'approche de la charge qui réduisent les extensions, il a été montré que les vitesses de déformation sont sensiblement plus importantes longitudinalement que transversalement et que les temps de chargement longitudinaux sont inférieurs aux transversaux (cf. 5.2 et 5.3). Exprimé autrement, cela signifie que les efforts sont appliqués plus lentement transversalement que longitudinalement. Comme l'effet de la viscosité est d'autant plus marqué que les efforts sont appliqués lentement, il est logique que les déformations transversales soient supérieures aux longitudinales.

D'un autre côté, il a été observé que les mesures avec des pneus simples conduisent à des amplitudes maximales similaires dans les deux directions horizontales, ce qui est en contradiction avec les modélisations viscoélastiques qui les différencient nettement. Cependant, il sera montré que l'utilisation d'une surface de chargement plus large que longue impliquait des déformations longitudinales supérieures dans le cadre d'un calcul élastique (cf. § 8.3). Les mesures d'empreintes effectuées sur les pneus simples montre que cette condition, une largeur de l'empreinte supérieure à sa longueur, est valable dans la plupart des cas de charge envisagés (cf. Figure 7, page 21). Par conséquent, la réduction de la longueur réelle de l'empreinte permet de justifier le fait que les mesures expérimentales donnent des amplitudes similaires bien que le comportement viscoélastique des matériaux impose une différence pour le cas d'une charge appliquée sur une surface circulaire ou carrée<sup>99</sup>.

#### 7.3.3.2 Dissymétrie des signaux viscoélastiques

La première méthode utilisée pour juger de la dissymétrie des signaux consiste à comparer les vitesses de déformation des signaux. Cette comparaison est effectuée en superposant les résultats des deux types de modélisations avec ceux obtenus à partir des signaux expérimentaux (Figure 99).

---

<sup>99</sup> Dans le calcul de Veroad, la charge est définie selon une surface circulaire de rayon égal à 15,1 cm : au centre de la charge, ce diamètre est donc supérieur à la longueur l'empreinte du pneu (cf. Tableau 58)

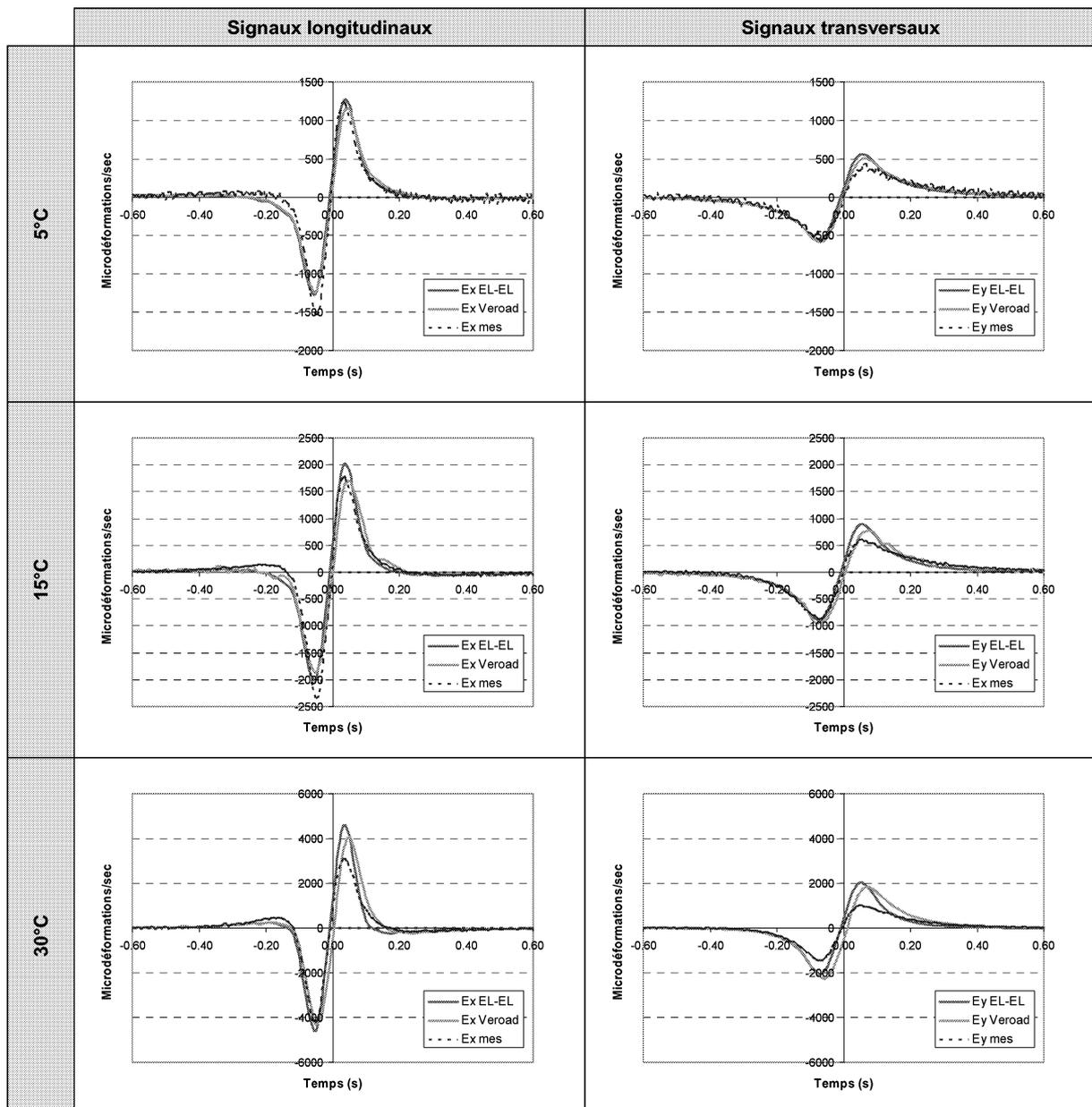


Figure 99 : Comparaison des vitesses de déformation des signaux : modélisations élastiques (EL-EL), viscoélastiques (Veroad) et mesures expérimentales (mes)

Comme le laissait supposer les images des signaux, les modifications apportées par l'introduction du comportement viscoélastique de la couche de base par rapport aux résultats élastiques sont peu importantes. Elles concernent essentiellement les résultats après le passage de la charge :

- légère diminution des vitesses maximales
- léger déplacement temporel (ou spatial) des vitesses maximales.

Ceci montre une nouvelle fois que le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux se manifeste essentiellement après le passage de la charge.

La seconde méthode consiste à comparer les amplitudes des pics de contractions avant et après le passage de la charge, désignés respectivement par  $c_1$  et  $c_2$ . Les signaux de la Figure 98 montrent que les déformations obtenues par modélisations à l'approche de la charge sont quasiment identiques indépendamment du comportement admis pour les couches bitumineuses. Cela signifie que les résultats des modélisations ne doivent pas être sensiblement améliorés par l'introduction du comportement visqueux, ce que confirme la comparaison des divers résultats<sup>100</sup> (Tableau 60).

**Tableau 60 : Amplitudes (en microdéformations) des contractions avant et après le passage de la roue**

	Modèle EL	Pics $c_1$ (avant)		Pics $c_2$ (après)	
		Veroad	Signaux expérimentaux	Veroad	Signaux expérimentaux
5°C	11	12	14 et 15	11	8 et 10
15°C	18	20	28 et 29	17	13 et 18
30°C	48	49	66 et 68	50	39 et 46

Les très faibles écarts enregistrés entre les deux modes de calcul s'expliquent par les conditions aux limites imposées à l'interface entre la couche de base et la grave de fondation.

Le troisième mode de comparaison utilisé au paragraphe 5.3 consiste à étudier les ratios obtenus entre les pics de contractions et les extensions maximales durant le passage de la charge. Compte tenu des très faibles différences enregistrées entre les résultats élastiques et viscoélastiques pour les pics de contraction et les extensions, il n'y a pas de modifications significatives de ces ratios, raison pour laquelle ils ne sont pas présentés ici.

Le quatrième mode de comparaison consiste à étudier les positions temporelles et spatiales des pics de contraction  $c_1$  et  $c_2$  par rapport à l'extension maximale  $e$ . Les résultats des modélisations viscoélastiques sont donnés dans le Tableau 61. Celui-ci contient également un rappel des résultats obtenus par modélisation élastique et ceux d'un signal expérimental<sup>101</sup>.

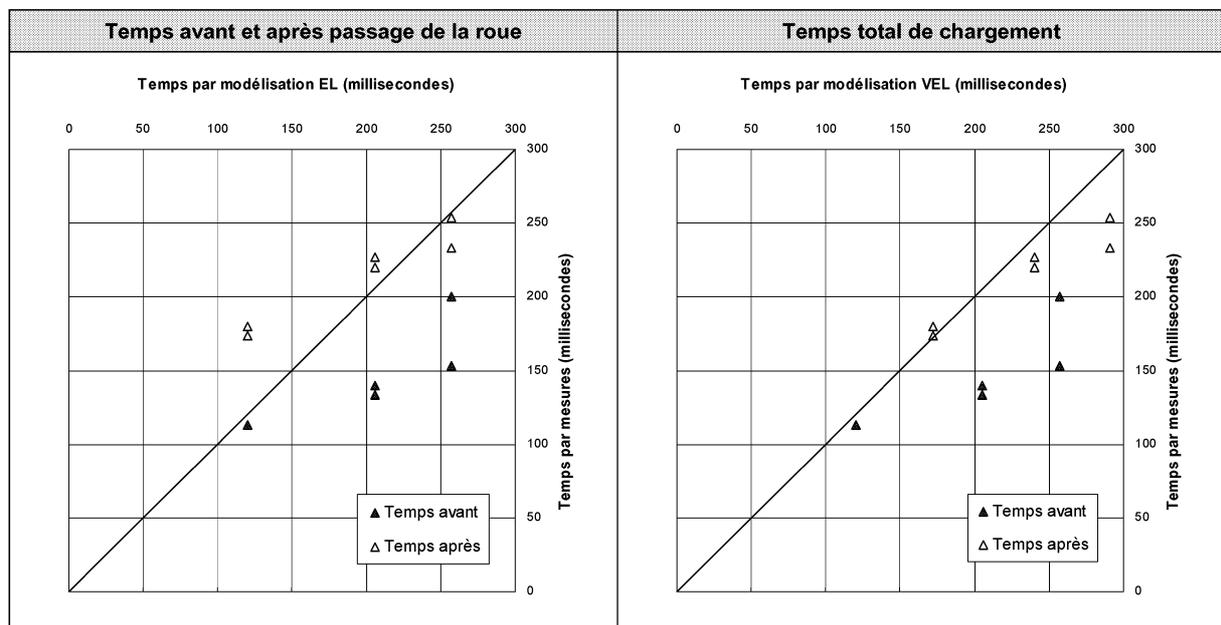
<sup>100</sup> Les deux valeurs pour les pics expérimentaux correspondent aux signaux dans les deux directions

<sup>101</sup> Les résultats pour les deux signaux expérimentaux correspondant aux deux directions de déplacement de la charge sont donnés dans le Tableau 48, page 146

**Tableau 61 : Temps t (en millisecondes) et distance d (en cm) entre les pics de déformations, modélisations élastiques et viscoélastiques (Veroad) et résultats expérimentaux**

	Modèle EL				Veroad						Signal expérimental (1)					
	avant		après		avant		après		total		avant		après		total	
	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	t	d	t <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	t	d
5°C	257	75	514	150	257	75	291	85	548	160	153	45	253	74	407	119
15°C	206	60	411	120	205	60	240	70	445	130	133	39	227	66	360	105
30°C	120	35	240	70	120	35	172	50	292	85	113	33	173	51	287	84

Ces résultats sont comparés graphiquement avec en abscisse les résultats des modélisations et ceux des mesures en ordonnée et avec les valeurs pour les signaux selon les deux directions de déplacement de la charge. L'image de gauche présente les résultats élastiques et celle de droite les résultats viscoélastiques (Figure 100).



**Figure 100 : Comparaison des temps de chargement obtenus par modélisations élastiques et viscoélastiques avec ceux des mesures**

Cette figure illustre une nouvelle fois le fait que l'introduction du comportement viscoélastique de la couche de base influence les signaux essentiellement après le passage de la charge. Les points correspondant aux temps avant le passage de la charge (triangles noirs) ont des positions très similaires, alors qu'un déplacement général vers la droite des points correspondant aux temps après le passage de la charge (triangles blancs) est observé. Ce déplacement conduit par ailleurs à une légère amélioration de la corrélation avec les mesures, particulièrement pour les hautes températures et à une augmentation des temps totaux de chargement.

Globalement, l'introduction du comportement viscoélastique de la couche de base par l'intermédiaire d'un modèle multicouche n'apporte pas d'amélioration sensible des résultats par rapport à un modèle élastique. Cela s'explique essentiellement par les conditions d'interface entre les couches qu'un tel modèle impose.

## 7.4 Signaux au bas de la couche de roulement

La première méthode de calcul viscoélastique des déformations à partir des contraintes élastiques a aussi été appliquée pour les déformations au bas de la couche de roulement afin de juger si ces calculs confirmaient les défauts constatés au bas de la couche de base. Cependant, les défauts observés au bas de la couche y étaient encore plus marqués, raison pour laquelle ces résultats ne sont pas présentés ici.

En revanche, il faut se souvenir que pour les modélisations au bas de la couche de base, le comportement viscoélastique n'a été introduit que pour cette seule couche. Ce choix tendait à respecter la volonté affichée dans l'ensemble de ce travail de n'utiliser que les données de laboratoire existant réellement. Toutefois, compte tenu des observations faites sur l'interaction entre les couches, il semble nécessaire d'y déroger ici et d'adopter un comportement viscoélastique également pour la couche de roulement.

### 7.4.1 Comparaison des différentes modélisations

Pour les modélisations au bas de la couche de roulement, deux calculs viscoélastiques ont été effectués en complément du calcul élastique (**EL-EL**) :

- avec des hypothèses en tout point semblables à celle retenues pour les modélisations au bas de la couche de base (**Veroad**)
- en introduisant un comportement viscoélastique de la couche de roulement (**MR-Veroad**).

Les angles de phase pour la couche de roulement en macro rugueux (MR) n'ont pas été enregistrés lors des essais de détermination du module complexe en laboratoire. Afin de disposer de paramètres viscoélastiques de cette couche pour le modèle de Huet, il a été admis que, pour des conditions données de fréquence et de température, les angles de phase sont identiques à ceux de la couche de base. Les paramètres résultant de cette hypothèse ont été donnés précédemment (cf. Tableau 59, page 181).

Avant de passer à la présentation et à l'analyse, il convient de signaler que les calculs au bas de la couche de roulement ont nécessité l'introduction de critères de convergences plus sévères pour obtenir des résultats satisfaisants. Ceci a engendré une augmentation considérable des temps de calcul.

Les résultats obtenus par ces trois modélisations sont superposés pour être comparés (Figure 101).

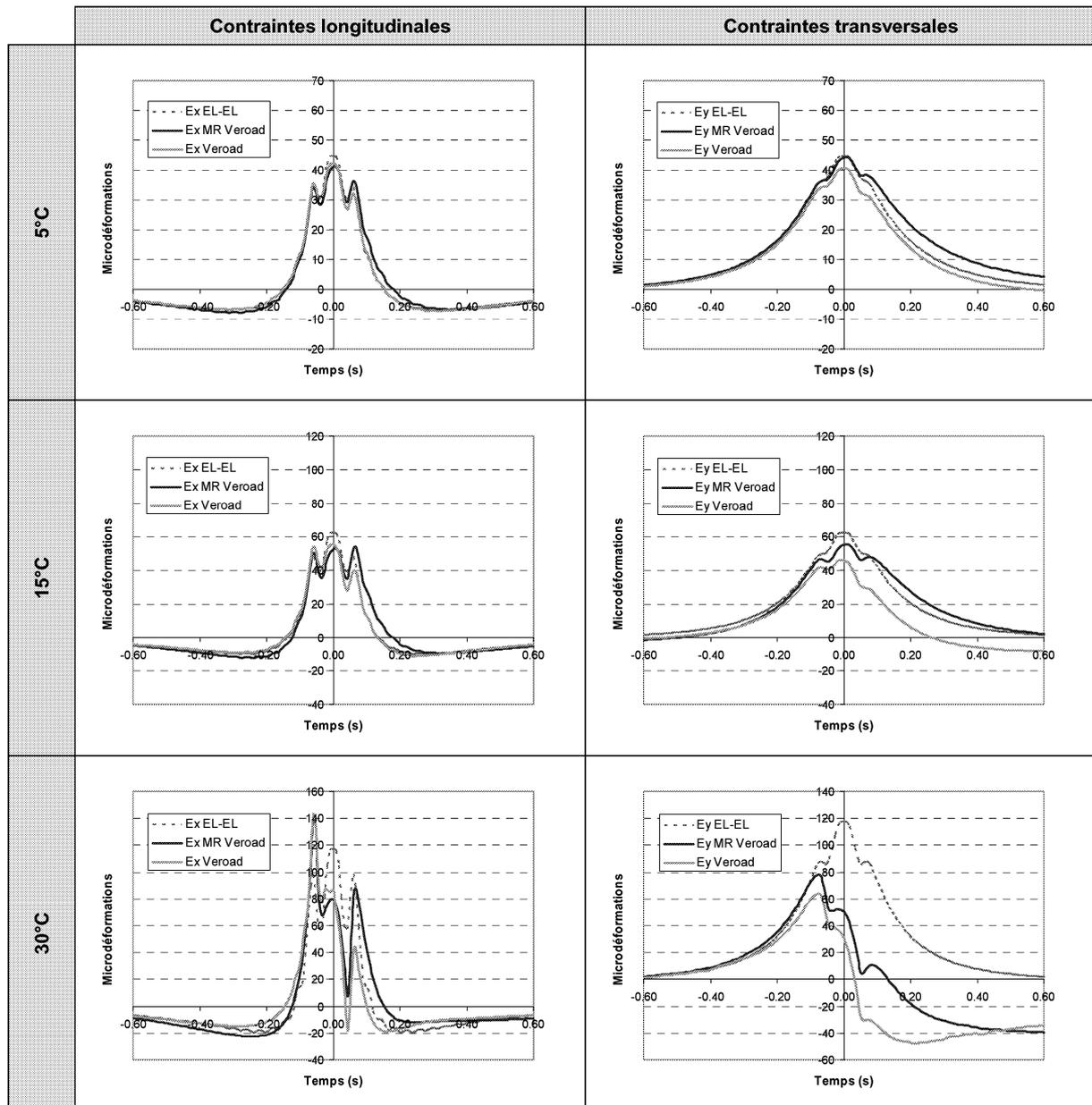


Figure 101 : Comparaison des signaux de déformations obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (MR Veroad) et (Veroad)

Les modifications apportées par les modélisations viscoélastiques par rapport aux résultats élastiques ne sont pas identiques à celles observées au bas de la couche de base :

- à l'exception des déformations longitudinales à 30°C, les amplitudes maximales des modélisations viscoélastiques sont systématiquement plus faibles que celles provenant des modélisations élastiques. Dans la situation où les résultats viscoélastiques donnent une amplitude supérieure, celle-ci se situe avant le passage de la charge
- les amplitudes maximales transversales sont systématiquement inférieures aux longitudinales, contrairement à la situation au bas de la couche de base
- les amplitudes maximales ne sont pas forcément obtenues au droit du milieu de la charge
- les signaux viscoélastiques sont fortement dissymétriques, particulièrement à haute température
- à 5 et 15°C, les signaux obtenus avec un comportement viscoélastique pour la couche de roulement (MR-Veroad) sont relativement proches des signaux élastiques (EL-EL).

D'autre part, les deux résultats viscoélastiques sont à priori paradoxaux. Les calculs adoptant un comportement viscoélastique pour l'ensemble des couches bitumineuses (MR Veroad) donnent des signaux plus proches des signaux élastiques (EL-EL) que ceux dans lesquels la couche de roulement est admise élastique (Veroad).

#### 7.4.2 Comparaison des contraintes des différentes modélisations

Il convient de rappeler que compte tenu des hypothèses de collage entre les couches, les résultats des déformations sont identiques au bas de la couche de roulement et au sommet de la couche de base. En conséquence, ce ne peut pas être le cas pour les contraintes. Etant donné qu'il s'agit de mettre en évidence l'effet de la couche de roulement sur celle de base, il semble logique que les signaux de contraintes étudiés soient ceux des contraintes agissant au sein de la couche de base. Comme pour le bas des couches, les signaux de contraintes correspondant aux divers signaux de déformations sont superposés (Figure 102).

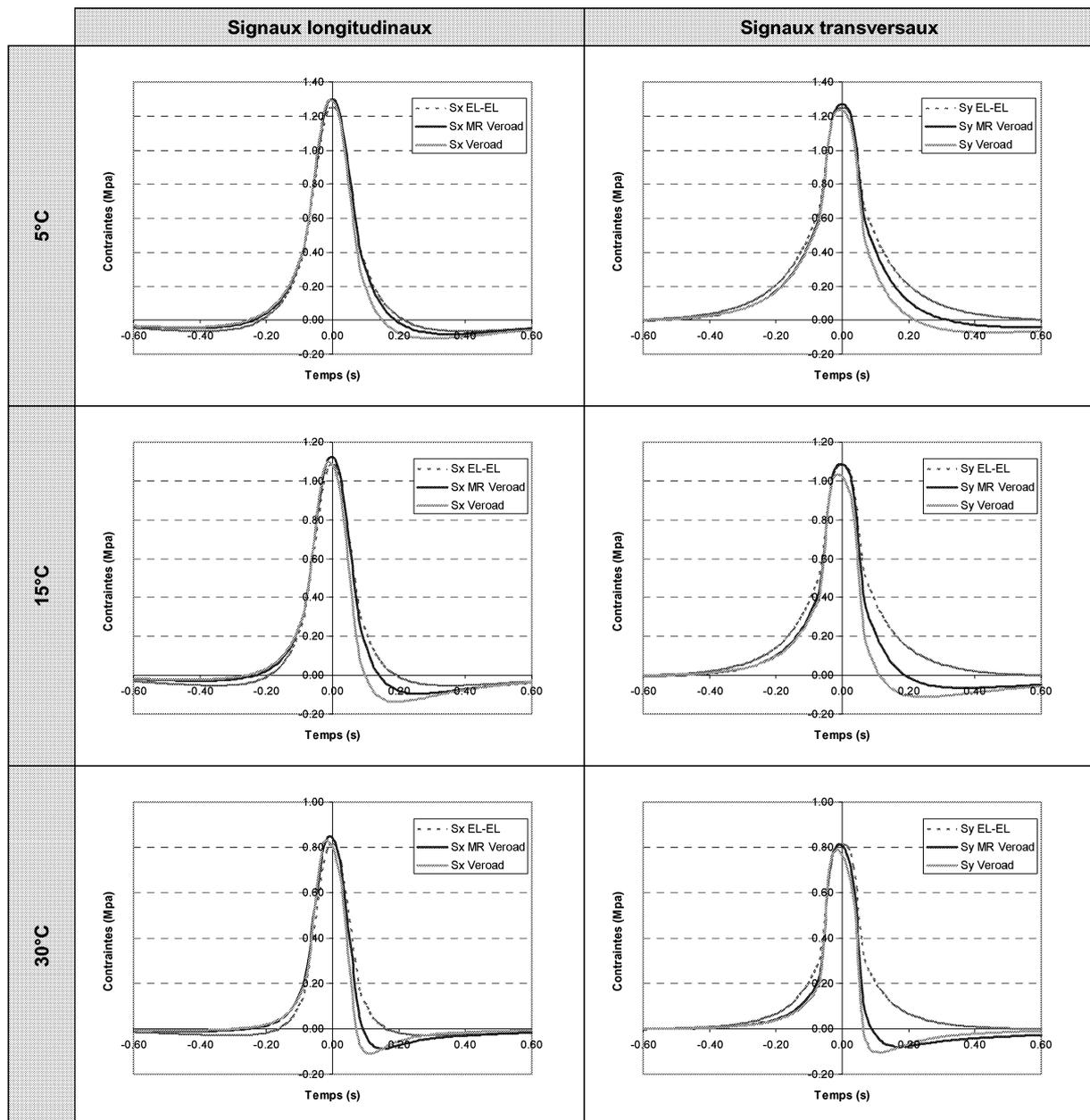


Figure 102 : Comparaison des signaux de contrainte obtenus par des modélisations élastiques (EL-EL) ou viscoélastiques (MR Veroad) et (Veroad)

Les principales différences entre les contraintes élastiques et viscoélastiques sont similaires à celles observées au bas de la couche de base (cf. § 7.3.2). Elles apparaissent pour les deux calculs viscoélastiques. Ces différences ont la même origine que lors des modélisations au bas de la couche de base : elles sont dues aux interactions des couches élastiques sur la couche de base ne seront pas expliquées à nouveau. La suite de l'analyse ne concerne que les différences entre les deux signaux viscoélastiques (MR-Veroad et Veroad).

Durant la phase d'approche de la charge, les contraintes provenant des modélisations viscoélastiques sont quasiment identiques et proches des contraintes élastiques. En revanche, les deux signaux viscoélastiques se différencient après le passage de la charge et, paradoxalement, ce sont les contraintes calculées avec un

comportement élastique de la couche de roulement (Veroad) qui s'éloignent le plus des signaux calculés avec un comportement élastique (EL-EL). Elles diminuent plus rapidement et ont un pic de traction plus important que celles admettant un comportement viscoélastique de la couche de roulement.

Cette différence s'explique aussi par les interactions entre les couches. En voulant regagner sa position originale et en raison du collage entre les couches, la couche de roulement impose des déformations au sommet de la couche de base, y engendrant des contraintes supplémentaires. Il est donc logique, même si cela demeure paradoxal, que les modélisations admettant un comportement viscoélastique de la couche de roulement fournisse des résultats plus proches des modélisations élastiques que celles admettant un comportement élastique de la couche de roulement.

#### *7.4.3 Comparaison des modélisations avec les mesures expérimentales*

Les résultats des modélisations élastiques (EL-EL) au bas de la couche de roulement donnent des résultats très satisfaisants pour les températures de 5 et 15°C. Il ne faut pas s'attendre à ce que l'introduction du comportement viscoélastique améliore nettement ces résultats (cf. § 6.3). De plus il a été observé que pour ces températures, les écarts entre les résultats élastiques et viscoélastiques sont faibles. Par contre pour la température de 30°C, où les modélisations élastiques donnent des amplitudes maximales sensiblement supérieures à celles des mesures expérimentales, on peut espérer que des modélisations viscoélastiques améliorent la concordance des résultats.

De plus, il a été observé que l'allure des signaux empiriques varie considérablement après le passage de la charge en fonction de la température (cf. § 6.2). A 30°C, le pic de compression  $c_2$  obtenu après le passage de la charge est supérieur au pic  $c_1$  obtenu avant. Cette tendance est inversée pour les températures de 5 et 15°C. Il s'agit de vérifier si l'introduction du comportement viscoélastique permet d'expliquer ces tendances inverses.

Les signaux viscoélastiques présentés admettent le comportement viscoélastique pour les deux couches bitumineuses (MR-Veroad) (Figure 103).

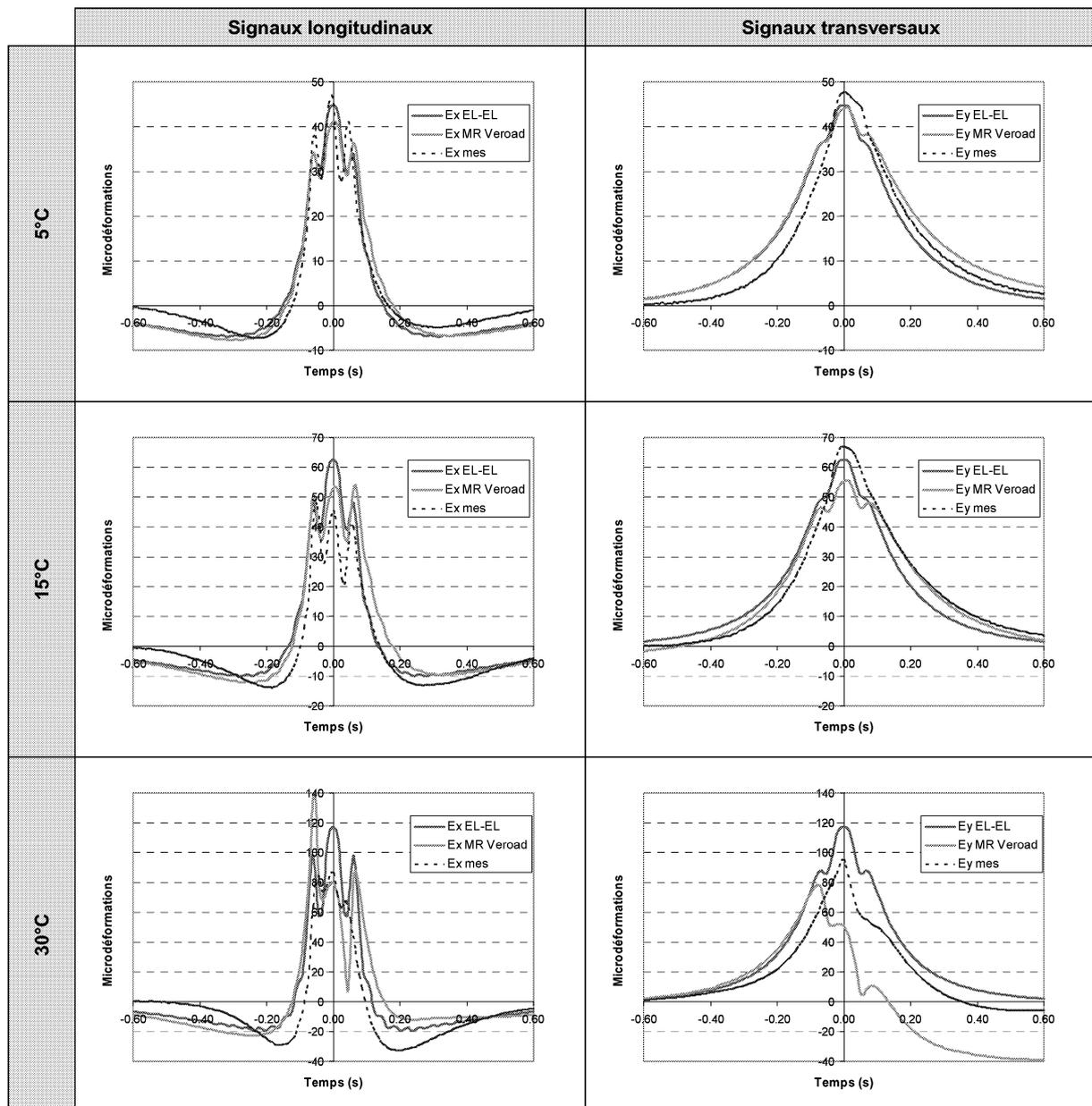


Figure 103 : Comparaison de signaux de déformations : modélisations élastiques (EL-EL), viscoélastiques (MR Veroad) et mesures expérimentales (mes)

Les résultats à 5 et 15°C confirment les observations faites précédemment. L'introduction du comportement viscoélastique (MR-Veroad) ne modifie pas de façon déterminante les résultats par rapport aux modélisations élastiques (EL-EL). Les pics d'extension longitudinaux suivent une tendance similaire à celle observée sur les mesures avec  $c_1$  supérieur à  $c_2$ . On note encore que les signaux transversaux semblent indiquer la présence de déformations résiduelles en contraction, ce qui est également le cas des mesures.

Les signaux à 30°C sont logiquement beaucoup plus sensibles à l'introduction du comportement viscoélastique. Pour les signaux longitudinaux, la zone centrale des « irrégularités » ne correspond pas bien à celle mesurée pour le cas de charge étudié. Toutefois, il faut rappeler qu'une telle forme pour cette zone, avec un premier pic très important suivi de pics plus réduits, a été mesurée à cette température pour

des autres cas de charge (cf. Figure 85, page 164). Les pics d'extension  $c_1$  et  $c_2$  obtenus par modélisations ne sont pas conformes à ceux des mesures et l'inversion de tendance observée sur les mesures, avec le pic  $c_2$  supérieur au pic  $c_1$  pour la température de 30°C, n'est pas confirmée par les modélisations viscoélastiques.

En revanche, pour les signaux transversaux, les résultats des modélisations viscoélastiques semblent effectivement signaler l'inversion de tendance mentionnée à 30°C, à savoir l'apparition d'une déformation résiduelle en extension. Toutefois son amplitude est sensiblement éloignée des valeurs mesurées.

## 7.5 Enseignements

Les calculs de déformations viscoélastiques effectués sur la base d'une histoire de contraintes élastiques ne donnent pas des résultats satisfaisants. Par conséquent, **l'hypothèse selon laquelle les contraintes élastiques et viscoélastiques sont très proches ne peut pas être admise**. En revanche, ces modélisations ont mis en évidence les interactions existant entre les différentes couches et les conséquences qu'elles ont sur la réponse des matériaux bitumineux.

Les résultats des modélisations effectuées avec un logiciel multicouche permettant l'introduction du comportement viscoélastique des matériaux ne permettent pas de reproduire de façon convaincante les dissymétries observées sur les signaux expérimentaux. Par ailleurs, les résultats obtenus à 5 et 15 °C sont très proches des résultats élastiques.

Concernant les déformations au bas de la couche de base, les modélisations viscoélastiques indiquent que les amplitudes maximales des **déformations longitudinales sont systématiquement et sensiblement supérieures à celles des déformations transversales**. Ces résultats ne correspondent pas à ceux des mesures. Cette différence s'explique probablement en partie par l'utilisation d'une surface circulaire qui ne correspond pas aux empreintes réelles des surfaces de contact, ces dernières ayant généralement des dimensions différenciées selon les directions longitudinales et transversales.

Pour les déformations à faible profondeur, les inversions de tendance pour les pics d'extension des signaux longitudinaux en fonction de la température n'apparaissent pas dans les modélisations des signaux à 30°C.

Les résultats des modélisations viscoélastiques semblent indiquer qu'un changement du facteur déterminant pour les contraintes et les déformations se produit juste après le passage de la charge. Durant la phase d'approche de la charge, les couches bitumineuses subissent l'effet de la charge et c'est principalement cette dernière qui y engendre des contraintes et des déformations. En revanche, après son passage, les **différences de comportement** des matériaux impliquent des **interactions entre les couches**. En plus de la diminution de la charge, les matériaux bitumineux ont à subir la réaction des couches de fondation qui tendent à retrouver leur position d'origine. Cette action des couches de fondation est susceptible de créer des répartitions de contraintes dans les couches bitumineuses que des modélisations purement élastiques ne laissent pas supposer, avec notamment des **pics de compression - ou de traction à faible profondeur - après le passage de la**

**charge supérieurs à ceux subis avant son passage.** La prise en compte de la réaction des couches de fondation dépend en grande partie des conditions de collage admises entre les différentes couches.

Le principal enseignement à tirer des modélisations viscoélastiques est que la simple introduction du comportement viscoélastique pour une couche donnée est nettement insuffisante. **Une modélisation viscoélastique des chaussées routières doit être envisagée au niveau de la structure complète.** Une telle modélisation implique notamment une grande attention concernant les conditions de collage entre les couches.

## 8. Effets de la définition des conditions de charge

### 8.1 Contenu et démarche

De nombreux paramètres entrant dans l'application des charges de trafic (cf. § 2.3.4) ne correspondent pas à la modélisation standard (cf. § 3.5.2). Afin de juger de l'influence relative de certains de ces paramètres, des modélisations avec le logiciel d'élément finis CAPA 3D (Scarpas 1998) de l'université de Delft (Pays-Bas) ont été réalisées pour une structure type en ne faisant varier que les conditions d'applications d'une charge définie en terme d'intensité, de pression de gonflage des pneus et de type de roue. La description détaillée de ces modélisations ainsi que leur analyse complète ont été présentés dans une conférence consacrée à l'utilisation des éléments finis dans le domaine de la construction routière (Perret 2002).

Le but est de définir l'effet sur les états de contraintes et de déformations des paramètres suivants :

- forme de l'empreinte : utilisation d'une surface rectangulaire à la place de la surface circulaire traditionnelle
- pression verticale moyenne utilisée : égale à la pression de gonflage des pneus ou calculée à partir de surfaces mesurées
- répartition non-uniforme de la pression verticale sur la surface de chargement
- introduction d'efforts transversaux.

Le cas de charge retenu est de 11,5 to appliquée sur des pneus simples gonflés à 8 bars, ce qui représente une forte surcharge pour ce genre de pneu et peut conduire à une répartition non uniforme des pressions verticales (cf. § 2.3.4.3).

La structure étudiée correspond à la section de référence (couche de base en HMT 22s) de l'expérience concernant l'évaluation des enrobés à module élevé (cf. § 3.2). La température choisie est de 15°C. Les valeurs des modules ont été pris conformément à la méthode française (SETRA-LCPC 1994) et non selon les résultats des essais en laboratoire, ce qui signifie que les résultats de ces calculs ne peuvent pas être comparés avec ceux des mesures<sup>102</sup>.

Les modélisations utilisent différentes répartitions de la charge, tant en ce qui concerne la forme de la surface d'application, que l'intensité et la distribution des pressions verticales. Des charges transversales ont également été appliquées. Les

---

<sup>102</sup> Ce choix a initialement été fait afin que les conclusions puissent être admises indépendamment d'un cas particulier. Il s'avère en fin de compte que ce choix n'est pas réellement nécessaire

résultats ont également été comparés avec ceux obtenus à partir d'un modèle basé sur la théorie de Burmister utilisant la modélisation standard.

L'effet de ces différentes hypothèses retenues pour introduire une charge identique a été étudié au bas de la couche de base, puis à très faible profondeur. L'évaluation a porté essentiellement sur les contraintes et les déformations calculées selon trois directions cartésiennes.

Le chapitre se conclut par quelques observations sur les modifications des états de contraintes et de déformations des matériaux bitumineux en fonction de la profondeur à laquelle ils se trouvent.

## 8.2 Hypothèses de modélisation

Compte tenu de la double symétrie que présente la situation étudiée, seul un quart de la structure a été modélisée. Par conséquent, les dimensions pour les longueurs et les largeurs utilisées correspondent à la moitié des valeurs réelles.

### 8.2.1 Genre d'éléments finis

Trois différents types d'éléments finis ont été utilisés :

- des éléments cubiques : dans la majeure partie des cas
- des éléments infinis : pour simuler des dimensions infinies pour les plans horizontaux
- des éléments d'interface : pour définir des conditions de friction variables entre les couches bitumineuses et la couche de fondation.

### 8.2.2 Maillage

A proximité de la charge, sur une surface de 300 mm par 300 mm, le maillage horizontal est composé de 400 éléments de 15 mm par 15 mm (20 divisions dans chaque direction horizontale). A l'extérieur de cette zone, la taille des éléments a été progressivement augmentée pour se terminer avec des éléments infinis. Verticalement, les dimensions des éléments ont aussi été progressivement augmentées avec la profondeur :

- couche de roulement : deux divisions de 15 mm
- couche de base : cinq divisions augmentant progressivement de 15 à 45 mm
- couche de fondation : trois divisions de respectivement 70, 120 et 210 mm
- sol de fondation : trois divisions de respectivement 300, 450 et 680 mm

Une image du maillage en trois dimensions de la structure est donnée sur la Figure 104.

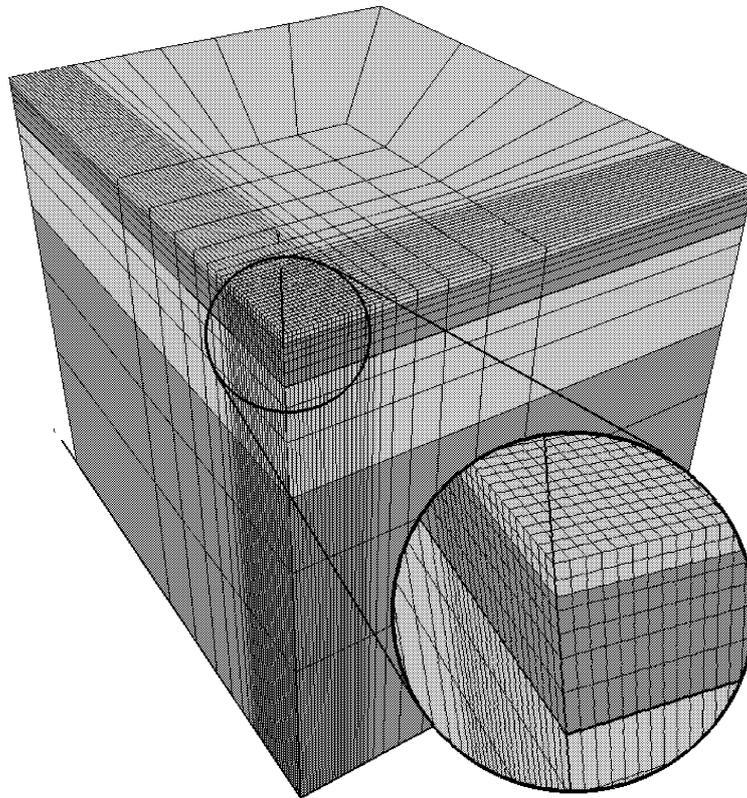


Figure 104 : Maillage en trois dimensions de la structure

### 8.2.3 Conditions aux limites

Les déplacements verticaux du plan horizontal situé au bas de la structure et les déplacements horizontaux des deux plans verticaux de symétrie ont été admis égaux à zéro. Les deux autres plans verticaux sont composés d'éléments infinis.

### 8.2.4 Conditions de charge

Deux hypothèses ont été utilisées pour la détermination de la surface de contact :

- calcul en admettant une pression moyenne égale à celle de gonflage
- directement à partir d'une mesure d'empreintes effectuées sur pneus utilisés à la Halle-fosse (cf. Figure 7, page 22).

Ces hypothèses correspondent à des pressions moyennes de contact respectives de 8,00 et 9,27 bars. Les surfaces de contact sont rectangulaires. Elles ont une largeur constante de 135 mm et des longueurs respectives de 135 et 115 mm.

La répartition transversale des pressions verticales a été faite selon deux schémas :

- une pression uniformément répartie sur la surface de contact (Figure 105)
- appliquant des surpressions sur les bords du pneu (Figure 106).

La répartition non-uniforme des pressions verticales a été déterminée de façon théorique sur la base des méthodes proposées par Blab (cf. § 2.3.4.3). Les deux zones de surpressions dans les bords du pneu correspondent chacune au 20 % de sa largeur alors que la zone centrale est de 60 %. Le coefficient  $\alpha$  de répartition de charge a été admis égal à 1<sup>103</sup>. A ces quatre cas de charges s'ajoute un cas de référence correspondant à la modélisation standard (cf. § 3.5.2).

Ces hypothèses sont récapitulées sur la Figure 105 et la Figure 106.

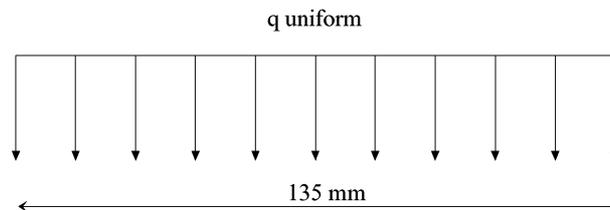


Figure 105 : Répartition uniforme de la pression verticale de chargement

et :

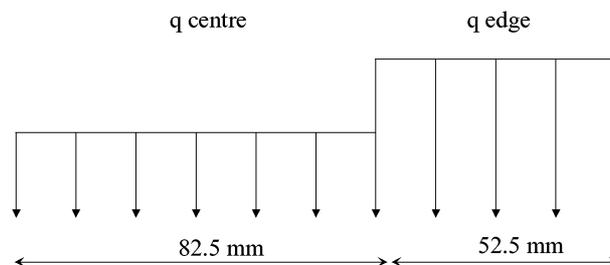


Figure 106 : Répartition non uniforme de la pression verticale de chargement

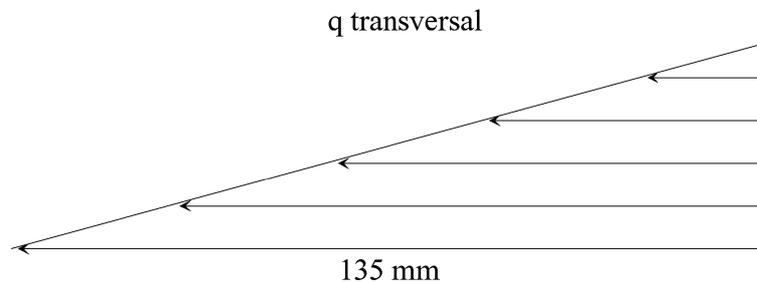
Les valeurs numériques correspondant à ces hypothèses sont récapitulées dans le Tableau 62.

Tableau 62 : Définition des cas de charge et valeurs des pressions verticales de chargement

	Description	q uniforme (bars)	q edge (bars)	q centre (bars)	longueur (mm)
Charge 1	Pression de gonflage non uniforme	-	10,30	6,55	135
Charge 2	Pression de gonflage uniforme	8,00	-	-	135
Charge 3	Pression de contact non uniforme	-	12,05	7,67	115
Charge 4	Pression de contact uniforme	9,27	-	-	115
Charge 5	Modélisation standard	8,00	-	-	circulaire

<sup>103</sup> Cette valeur de 1 signifie que l'intensité totale de la charge sur le centre de la roue est égale à la charge sur les deux bords

En plus de ces charges verticales, des composantes transversales ont été appliquées vers l'intérieur du pneu, ce qui correspond à la situation d'un pneu surchargé. Pour ces composantes, les efforts transversaux dus à la nature des gommés (cf. § 2.3.4.4) n'ont pas été pris en compte<sup>104</sup> et seule une répartition triangulaire sur l'ensemble de la largeur du pneu a été appliquée (Figure 107).



**Figure 107 : Répartition transversale des charges transversales**

Ce schéma de répartition est appliqué sur toute la longueur du pneumatique. L'intensité maximale de la pression transversale au bord du pneu est admise égale à la moitié de la pression verticale moyenne, soit 4 bars. Cette valeur est plus importante que celles qui pourraient être déduites des ratios tirés des mesures réelles (cf. § 2.3.4.4).

### 8.3 Evaluation au bas de la couche de base

L'ensemble des résultats et leur analyse détaillée ayant fait l'objet d'une publication (Perret 2002), seuls les principaux résultats sont synthétisés par l'intermédiaire des conclusions obtenues pour les variations des amplitudes maximales des contraintes et des déformations (Tableau 63).

---

<sup>104</sup> Ces efforts n'agissent que très localement puisqu'ils sont rapidement équilibrés lors de leur diffusion dans la chaussée. Ils ne doivent être pris en compte que pour des études menées à une échelle plus réduite près de la surface de roulement

**Tableau 63 : Effets des conditions d'application de la charge sur les amplitudes maximales des contraintes et des déformations au bas de la couche de base**

	Surface circulaire ou carrée	Pression de gonflage ou de contact	Distribution uniforme ou non de la pression	Charge transversale
Déformations longitudinales	Aucun effet	Augmentation de 9% avec pression réelle	Variation négligeable	Augmentation de 6%
Contraintes longitudinales	Aucun effet	Augmentation de 8% avec pression réelle	Variation négligeable	Augmentation de 6%
Déformations transversales	Aucun effet	Augmentation de 4% avec pression réelle	Réduction de 6% avec pression NU	Augmentation de 6%
Contraintes transversales	Aucun effet	Augmentation de 5% avec pression réelle	Réduction de 5% avec pression NU	Augmentation de 6%
Déformations verticales	Aucun effet	Augmentation de 6% avec pression réelle	Réduction de 4% avec pression NU	Augmentation de 6%
Contraintes verticales	Différence due au modèle	Augmentation de 3% avec pression réelle	Variation négligeable	Augmentation de 4%

Les variations maximales étant toujours inférieures à 10 %, on peut conclure que, pour des calculs au bas de la couche de base, ni la répartition des charges verticales ni les charges transversales n'influencent de façon déterminante les amplitudes maximales, tant en ce qui concerne les contraintes que les déformations.

La forme de la surface de chargement (circulaire ou carrée) n'a pas d'effet sur les résultats (les écarts relevés pour les contraintes verticales ne sont pas dues à la forme de la surface, mais à une situation particulière de répartition entre les contraintes horizontales et verticales). Pour un calcul au bas de la couche de base, une modélisation avec une surface circulaire est satisfaisante pour la détermination des amplitudes maximales.

Concernant les pressions moyennes utilisées, il semble préférable d'utiliser la pression réelle de contact, même si les variations sont peu importantes<sup>105</sup>. Conformément à ce qui a déjà été observé (cf. § 4), les augmentations calculées sont de l'ordre de 5 à 10 % et sont donc toujours nettement inférieures à l'augmentation de la pression moyenne qui est ici d'environ 16 %.

Les variations dues à la pression sont différenciées selon la direction longitudinale ou transversale de calcul. Ceci s'explique par la forme rectangulaire de la surface de chargement utilisée lorsque la pression est déterminée à partir des mesures d'empreintes. Le taux d'augmentation plus important dans le sens longitudinal provient de la réduction de la longueur de la surface de chargement. Cela signifie que la direction selon laquelle les amplitudes maximales apparaissent peut dépendre du niveau de chargement. Ces valeurs maximales sont obtenues selon la direction dans laquelle l'empreinte du pneumatique est la plus courte. Par conséquent, des pneus dont les empreintes sont plus larges que longues induisent des sollicitations plus importantes longitudinalement que transversalement. Cette différence ne peut évidemment pas être obtenue à partir des modélisations basées sur une empreinte circulaire pour l'application de la charge. Rappelons toutefois que ces observations basées sur des calculs élastiques n'ont pas été vérifiées par les mesures, puisque

<sup>105</sup> Il faut rappeler que ces résultats théoriques n'ont pas été confirmés par les mesures in situ sur lesquelles la pression de gonflement n'a que peu d'effet (cf. § 4)

les amplitudes maximales mesurées pour des roues simples étaient généralement identiques dans les deux directions.

La non uniformité de la distribution de la charge n'a que très peu d'influence et, dans les cas où une variation a été observée, les surpressions verticales dans les bords tendent à réduire les valeurs maximales obtenues. Pour les composantes transversales, l'effet des surpressions dans les bords tend à se compenser au centre du pneu entraînant ainsi une diminution logique des contraintes et des déformations en ce point. La réduction de la composante verticale des déformations est une conséquence de la diminution des contraintes transversales. A signaler encore que les amplitudes maximales demeurent au centre du pneu.

Bien que l'intensité choisie pour les efforts transversaux soit importante<sup>106</sup>, ils n'engendrent qu'une faible augmentation de l'ensemble des contraintes et des déformations.

#### 8.4 Evaluation en haut des couches bitumineuses

Pour les mêmes raisons que lors de l'analyse au bas de la couche de base, seuls les principaux résultats sont rappelés ici (Tableau 64).

**Tableau 64 : Effets des conditions d'application de la charge sur les amplitudes maximales des contraintes et des déformations en haut des couches bitumineuses**

	Surface circulaire ou carrée	Pression de gonflage ou de contact	Distribution uniforme ou non de la pression	Charge transversale
<b>Déformations longitudinales</b>	Aucun effet	Augmentation de 8% avec pression réelle	Variation négligeable	Réduction de 3%
<b>Contraintes longitudinales</b>	Aucun effet	Augmentation de 10% avec pression réelle	Augmentation de 4% avec pression NU Maximum au bord	Augmentation de 5% Maximum au centre
<b>Déformations transversales</b>	Aucun effet	Augmentation de 4% avec pression réelle	Réduction de 6% avec pression NU	Augmentation de 60% Variation près des bords
<b>Contraintes transversales</b>	Aucun effet	Augmentation de 5% avec pression réelle	Augmentation de 4% avec pression NU Maximum au bord	Augmentation de 30% Variation près des bords
<b>Déformations verticales</b>	Aucun effet	Augmentation de 11% avec pression réelle	Aucun effet Effet sur les valeurs sous la charge	Augmentation de 60% Contraction dans les bords
<b>Contraintes verticales</b>	Aucun effet	Egales aux conditions de chargement	Egales aux conditions de chargement	Aucun effet

<sup>106</sup> Egale à la moitié de la pression verticale dans les bords

Comme au bas des couches, la répartition des charges verticales n'influencent que très peu les résultats des amplitudes maximales en haut des couches bitumineuses, tant en ce qui concerne les contraintes que les déformations. L'effet est logiquement plus marqué avec l'introduction d'efforts transversaux.

La forme de la surface de chargement (circulaire ou carrée) n'a pas d'effet sur les résultats maximaux. Elle n'a un effet que lorsqu'on s'éloigne du centre de la charge, dans les zones où les deux types de surfaces ne se superposent pas.

Concernant les pressions moyennes utilisées, il semble préférable d'utiliser la pression réelle de contact, même si les variations, quoique plus marquées qu'au bas des couches, restent peu importantes<sup>107</sup>. Ici aussi, elles demeurent toujours inférieures à la variation de la pression. Les variations des contraintes et des déformations sont également différenciées selon la direction longitudinale ou transversale, ce qui s'explique de la même façon que pour le bas de la couche de base, c'est-à-dire par la réduction de la longueur de l'empreinte utilisée pour la modélisation.

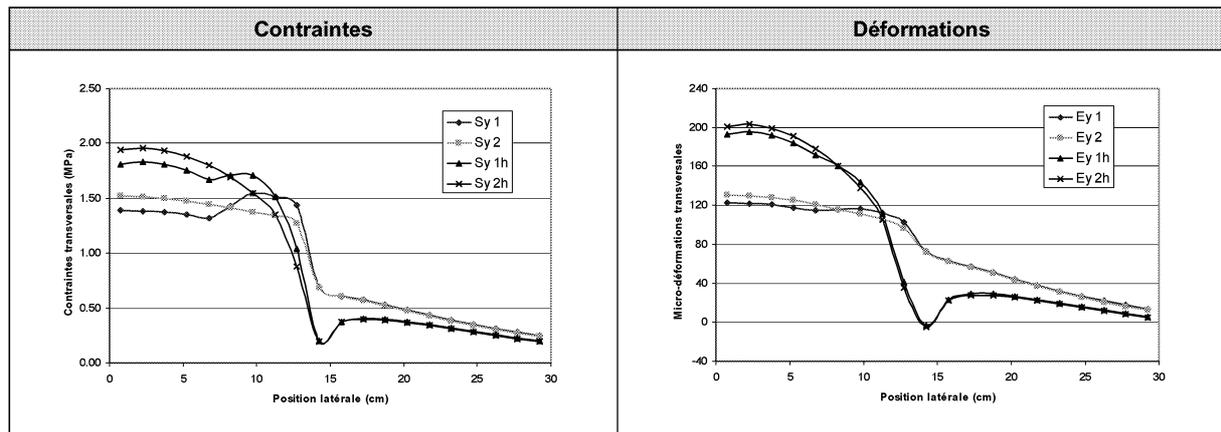
Bien que la distribution non uniforme de la charge verticale n'ait que peu d'influence sur les amplitudes maximales, elle fait légèrement augmenter les contraintes horizontales et, surtout, les déplace dans les bords des pneus où les surpressions sont introduites. C'est la seule situation où les valeurs maximales de contraintes ou de déformations ne sont pas situées au centre du pneu. En revanche, on note une diminution des déformations transversales.

Si les efforts transversaux induisent naturellement une forte variation des contraintes et déformations dans cette direction, ils n'ont en revanche que peu d'influence sur les composantes longitudinales (on note néanmoins que les contraintes longitudinales maximales sont toujours obtenues au centre du pneu, même si la pression verticale n'est pas uniforme).

Pour les composantes transversales, l'augmentation signalée (cf. Tableau 64) concerne le centre du pneu, où tant les contraintes que les déformations sont en compression. En revanche, dans les bords des pneus, les charges transversales (résultats accompagné d'un h) sont insuffisantes pour induire des tensions en surface, aussi bien en contraintes qu'en déformations (Figure 108).

---

<sup>107</sup> On ne dispose pas de mesures à une profondeur aussi faible. Toutefois, les mesures effectuées à 3 cm ne confirment pas ces observations, puisque les signaux expérimentaux de déformations ne varient que très peu avec la pression de gonflage des pneus (cf. § 6.2)



**Figure 108 : Répartition transversale des contraintes et déformations transversales en haut des couches bitumineuses**

Ces résultats sont en contradiction avec certaines études (Mante, Molenaar et al. 1995), (Groenendijk 1998), (Bensalem, Brown et al. 2000) qui signalent des tensions horizontales à proximité immédiate des bords des pneumatiques. Ils concluent généralement que ces tensions pourraient favoriser la fissuration par le haut observée dans de nombreuses situations. S'il est possible que des tractions ou des extensions apparaissent très localement juste à l'extérieur des pneus (que la modélisation relativement grossière dans cette zone n'aurait pas pu mettre en évidence), la forte intensité des compressions horizontales en surface dues aux seules charges verticales (de l'ordre de 15 bars au centre de la charge et de 7 bars juste à l'extérieur du pneu) oblige à conclure que si ces sollicitations existent réellement, elles doivent demeurer très localisées et présenter des intensités très faibles dont on peut douter qu'elles soient suffisantes pour expliquer l'initialisation de fissures à partir de la surface.

Enfin, quelles que soient les hypothèses de modélisations des charges, il faut souligner que les déformations verticales maximales calculées indiquent une extension des matériaux, ceci même sous la roue où les contraintes verticales sont en compression. A très faible profondeur, malgré les importantes charges verticales introduites par le pneu, les matériaux sont nettement plus comprimés horizontalement que verticalement avec pour conséquence (effet du coefficient de Poisson) que les déformations verticales sont des extensions (cf. § 6.3.2).

## 8.5 Variation des sollicitations en fonction de la profondeur

Les résultats présentés jusqu'ici ont permis de juger de l'influence de la modélisation des charges sur les contraintes et les déformations dans les couches bitumineuses d'une structure souple. Les résultats présentés se basent sur les contraintes et les déformations définies selon des axes cartésiens. D'autres analyses, qu'il n'a pas été jugé utile de présenter dans ce travail car elles n'ont fait que confirmer les observations faites sur les composantes cartésiennes, ont été menées sur la base d'une décomposition des contraintes en axes principaux. Ces analyses - tant celles selon les axes cartésiens que celles selon les axes principaux - ont nettement mis en évidence des importantes variations du type des sollicitations des matériaux bitumineux selon la profondeur à laquelle ils sont situés dans la structure et selon leur position par rapport à la zone d'application de la charge.

La décomposition en axes principaux conduit à des résultats tridimensionnels qu'il est malaisé de représenter graphiquement<sup>108</sup>. Par conséquent, il a été décidé de représenter les résultats par l'intermédiaire de diagramme p-q utilisant les notions de contrainte moyenne (p) et de déviateur (q). La valeur de p correspond à une pression hydrostatique moyenne exercée sur les matériaux alors que la composante q quantifie le cisaillement subi par les matériaux. Soit  $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$  les trois contraintes principales, les valeurs de p et de q sont calculées de la façon suivante :

$$p = \frac{1}{3}(p_1 + p_2 + p_3) \quad \text{Eq. 41}$$

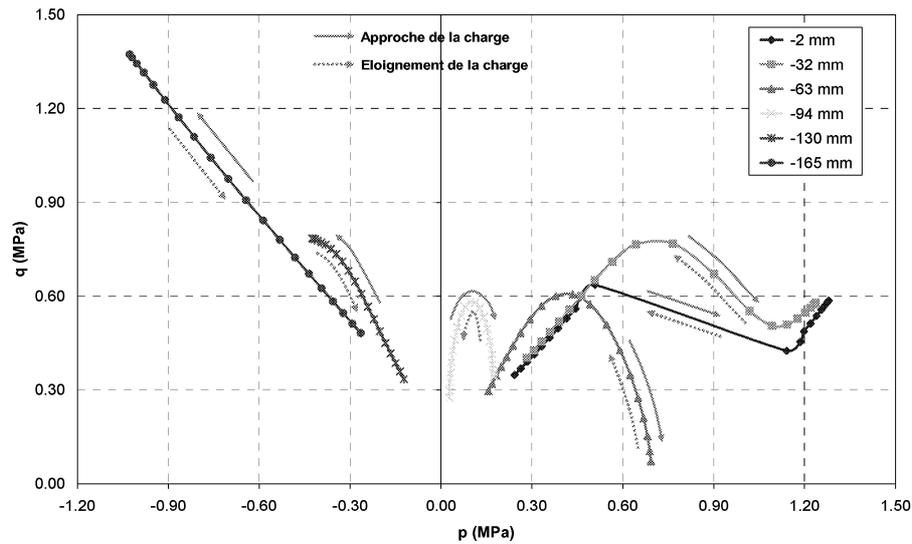
$$q = \sqrt{\frac{1}{3}((p_1 - p_2)^2 + (p_1 - p_3)^2 + (p_2 - p_3)^2)} \quad \text{Eq. 42}$$

Partant de cette décomposition, il est possible d'associer à chacun des points de calcul un couple de valeur p-q. Les diagrammes p-q représentent p en abscisse et q en ordonnée. Il est alors possible de visualiser le chemin des contraintes exercées sur un élément de matière lors du passage d'une charge. Ce chemin des contraintes décrit les couples p-q que les matériaux situés en un point donné de la structure sont appelés à subir au passage d'une charge, permettant de visualiser la répartition entre la pression hydrostatique et le cisaillement.

Les résultats présentés correspondent aux valeurs p et q de points sis dans le plan longitudinal vertical passant par le centre de la charge. Afin de représenter l'évolution temporelle des valeurs p-q lors du déplacement de la charge, les valeurs p-q ont été calculées sur une distance de 30 cm à partir du milieu de la charge. Ces représentations ne varient pas sensiblement pour les différents modes d'introduction de la charge étudiés, les diagrammes p-q du cas de charge 2 (cf. Tableau 62) sont présentés pour six profondeurs différentes séparées d'environ 30 mm (Figure 109).

---

<sup>108</sup> Les graphes 3D donnent des visualisations peu lisibles des résultats



**Figure 109 : Chemin des contraintes à différentes profondeurs dans les couches bitumineuses, situation théorique à 15°C**

Pour des calculs élastiques linéaires, le chemin des contraintes est identique avant et après le passage de la charge. A l'approche de la charge, les états de contrainte  $p$ - $q$  d'un point donné se modifient selon les flèches continues sur la Figure 109. Lorsque la charge s'éloigne, les courbes sont parcourues en sens inverse selon les flèches pointillées. Ces chemins des contraintes diffèrent fortement selon la profondeur à laquelle les calculs sont effectués. Cela signifie que les matériaux bitumineux subissent des cycles de sollicitations très variables selon la profondeur à laquelle ils se situent dans la chaussée. Il est raisonnable de penser que ces différents cycles de sollicitations conduisent à des modes de dégradation différents.

Si on adopte un critère de rupture du type Mohr-Coulomb, la situation la plus critique se situe au bas des couches (165 mm) où les matériaux subissent une valeur hydrostatique en traction couplée avec un important niveau de cisaillement. Ceci confirme l'utilité d'un critère de dimensionnement situé au bas de la couche de base et est en accord avec la limitation des déformations horizontales retenue par la majorité des méthodes mécaniques de dimensionnement. On note par ailleurs que le chemin des contraintes à une profondeur de 130 mm (chemin violet sur la Figure 109) est très voisin de celui au bas de la couche de base. Aux profondeurs de 63 et 94 mm, il est logique, compte tenu de la proximité de l'axe neutre, que la matière subisse des sollicitations peu importantes.

Concernant les chemins de contraintes à faible profondeur, on observe des formes plus inattendues avec des passages par des valeurs maximales et minimales de cisaillement. Mathématiquement, cette situation s'explique par la brusque introduction d'une composante  $p_3$  dans les calculs de  $p$  et de  $q$ , composante due à l'application de la composante verticale du chargement. Ces formes inattendues ont donc la même origine que les « irrégularités » observées sur les signaux au bas de la couche de roulement étudiés au paragraphe 1. La courbe à très faible profondeur (2 mm) présente un brusque saut dans les valeurs de  $p$ . Les valeurs de part et d'autre de ce saut correspondent au dernier et au premier point de calcul, situés respectivement à l'extérieur et à l'intérieur de la charge verticale. Il est quasiment

certain qu'une densification des points de calcul dans cette zone conduirait à une forme similaire à celle obtenue à 32 mm, mais avec une composante de cisaillement supérieure.

Ces variations des chemins de contraintes en fonction de la profondeur devraient être intégrées dans le choix des sollicitations à appliquer sur les matériaux lors des essais en laboratoire.

Ces différences de sollicitations entre le haut et le bas des couches méritent d'être illustrés par une visualisation des deux situations extrêmes que sont les états de contraintes et de déformations au sommet et au bas des couches bitumineuses (Figure 110).

	Contraintes	Déformations
A faible profondeur		<p>avec <math>\sigma_{hor} \gg \sigma_{vert}</math></p>
Au bas des couches		

Figure 110 : Contraintes et déformations d'éléments de matériaux bitumineux situés à différentes profondeurs au droit de la charge

A proximité de la surface, les matériaux sont fortement comprimés dans toutes les directions. Les contraintes horizontales sont nettement supérieures à la contrainte verticale, cette dernière étant voisine de la pression de contact entre le pneu et la surface. Pour les déformations, cette situation conduit aux extensions verticales déjà signalées. Un élément de matériau à faible profondeur est ainsi contracté horizontalement et subi une extension verticale. La situation est différente au bas des couches bitumineuses, où les matériaux subissent des fortes tractions dans le plan horizontal et une compression verticalement. Du point de vue des déformations, cela conduit à une situation dans laquelle les matériaux sont en extension horizontalement et en contraction verticalement.

Ces observations permettent de confirmer que les exigences pour la composition des mélanges bitumineux doivent être adaptées selon la profondeur à laquelle les matériaux sont utilisés. Au sommet de la couche de roulement, où les efforts sont en compression, la qualité des composants granulaires est capitale. En revanche, la situation est différente au bas de la couche bitumineuse où les matériaux bitumineux sont appelés à subir des tractions et des extensions pour lesquelles la qualité du liant est capitale.

## 8.6 Enseignements

**Les contraintes et les déformations au bas de la couche de base ne sont que peu affectées par les diverses hypothèses d'application de la charge.** En effet, les écarts les plus importants restent inférieurs à 10 %. Ces écarts résultent essentiellement du choix de la valeur retenue pour la pression de contact. Il convient à priori de recommander d'utiliser la pression réelle de contact pour les modélisations, même si cette donnée est difficile à obtenir. Les efforts horizontaux induisent une augmentation générale des contraintes et des déformations au bas de la couche de base de l'ordre de 6 % pour le cas étudié.

Concernant les contraintes et les déformations en surface, la variation des conditions d'application des charges verticales n'a que peu d'effet puisque les écarts les plus importants sont d'environ 10 %. En revanche, les efforts transversaux affectent plus les résultats, mais restent insuffisants pour induire des tractions en surface.

**Les états de sollicitations des matériaux bitumineux dépendent fortement de la profondeur à laquelle ils se situent.** Ces variations devraient être intégrées tant dans le cadre des essais en laboratoire que pour la formulation des mélanges bitumineux.



## 9. Conclusion

Une des clés du comportement des chaussées routières souples est sans aucun doute la compréhension de la variation de l'état de contrainte et de déformation y régnant durant le passage d'une charge de trafic. La détermination de ces sollicitations peut se réaliser selon deux méthodes à utiliser de façon complémentaire : des mesures expérimentales et des modélisations. Les progrès enregistrés dans le développement des outils informatiques et dans la connaissance des lois de comportement des matériaux laissent entrevoir des possibilités importantes pour ces démarches théoriques. Toutefois, les données expérimentales doivent jouer un rôle de validation indispensable pour ces approches.

En ce sens, la quantité et la qualité des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ce travail de thèse constituent un apport précieux. Ces résultats se caractérisent notamment par la grande variété des conditions de charge et de température pour lesquelles ils ont été obtenus. La systématique et la rigueur appliquées lors de l'acquisition et du dépouillement de ces données mettent à disposition des modélisateurs des informations qualitatives et quantitatives fiables.

L'analyse comparative des résultats des mesures et de ceux tirés de modélisations, réalisées conformément aux recommandations d'une méthode mécanique empirique de dimensionnement, a permis de déterminer les influences relatives de trois des principaux paramètres définissant les charges de trafic et de la température. Il a été montré que les modélisations permettent une évaluation satisfaisante de l'effet de la plupart de ces paramètres. Des propositions pour la prise en compte de ces paramètres dans la détermination du trafic équivalent ont pu être émises. Elles se basent tant sur les résultats expérimentaux que théoriques. Par ailleurs, cette analyse comparative a montré que l'adéquation entre les valeurs mesurées et modélisées à partir d'un modèle simple – comportement élastique linéaire selon les recommandations de la méthode française de dimensionnement des chaussées souples – est excellente pour des températures au moins jusqu'à 15°C. Les résultats sont moins concluants à 30°C, notamment en raison du comportement visqueux des matériaux bitumineux.

Il ressort des analyses des effets des conditions de charge que les pressions de gonflage des pneus ne sont pas déterminantes pour les calculs des déformations horizontales dans les couches bitumineuses des chaussées souples. Ceci s'explique en grande partie par un comportement global de ces couches qui peut être assimilé à celui des dalles. Cette faible importance de la pression est essentiellement valable pour des couches bitumineuses relativement épaisses, la pression ayant un certainement un rôle plus marqué pour des structures très fines dont le comportement ne peut pas être assimilé à celui des dalles.

Cette similitude de comportement avec les dalles se traduit notamment par une situation a priori paradoxale concernant les contraintes agissant à faible profondeur, à savoir que les composantes horizontales y sont sensiblement supérieures aux verticales. Les premières dépendent essentiellement de l'intensité de la charge et de la rigidité de la structure alors que les secondes ne dépendent que de la pression de contact entre les pneus et la chaussée.

Il faut souligner que cet état particulier de contrainte a été mis en évidence par l'explication d'« irrégularités » observées sur des signaux de déformations horizontales mesurés à faible profondeur, ce qui prouve une fois encore l'utilité des données expérimentales. Ces « irrégularités » avaient déjà été observées auparavant, mais elles ont systématiquement été considérées comme provenant d'un défaut des systèmes de mesures à faible profondeur.

Ce phénomène apparaît aux extrémités de la charge, soit à l'endroit où les contraintes verticales subissent une brusque et importante variation. Cette position est révélatrice de la zone dans laquelle les efforts de recherche doivent être menés, c'est-à-dire au bord de la zone de charge et à faible profondeur. Les importants efforts de cisaillement agissant à cet endroit ont déjà été soulignés par de nombreux chercheurs et ont une origine similaire à celle du poinçonnement des dalles.

Un autre résultat clé de ce travail concerne le dépouillement des signaux de déformation. Les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement des chaussées utilisent une valeur unique pour définir leur comportement vis-à-vis d'un type d'endommagement. L'utilisation de grandeurs permettant de quantifier les variations des sollicitations en fonction du temps permet une indéniable amélioration de la définition des cycles de chargement subis par les matériaux des chaussées souples. La notion de vitesse de déformation ou encore la détermination de fréquence permettant la reconstitution d'une part importante des sollicitations à partir d'une sinusoïdale constituent indéniablement des informations importantes pour la définition des conditions de charge à appliquer lors d'essais en laboratoire.

Les résultats des calculs viscoélastiques ont permis de montrer que les contraintes subies par les couches bitumineuses dépendent non seulement de la charge de trafic, mais aussi des propriétés des autres couches constitutives de la chaussée. Les interactions entre les couches se font sentir essentiellement après le passage de la charge, lorsque la chaussée tend à retrouver sa position initiale.

Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse devraient faire l'objet de recherches complémentaires dans au moins quatre directions. Premièrement, les efforts concernant la précision des mesures expérimentales doivent être poursuivis et les types de mesures être diversifiés. On pense en particulier au fait de pouvoir disposer de plus de mesures à proximité des charges, notamment des mesures de contraintes. Deuxièmement, les résultats fournis concernant les variations temporelles des déformations devraient être intégrés dans les essais en laboratoire. Un troisième axe consisterait à effectuer des modélisations plus complexes qui permettraient de mettre un accent particulier sur les différences de comportement des matériaux et sur les interactions entre les différentes couches des structures routières. Une attention toute particulière devrait être accordée aux conditions d'interface entre les couches. Enfin, il serait intéressant d'introduire des variations statistiques des nombreux paramètres intervenant dans la modélisation des chaussées, notamment en ce qui concerne l'épaisseur réelle des couches et la répartition de la température dans ces couches.

## 10. Bibliographie

- [1] AASTHO (1986). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D. C., 1986.
- [2] AMADEUS (2000). *Final report for publication of AMADEUS (Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures), RO-97-SC.2137*. Luxembourg, European Commission, (non édité).
- [3] Arbenz, K. and Wohlhauser, A. (1990). *Compléments d'analyse*. Méthodes mathématiques pour l'ingénieur. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR).
- [4] Balay, J.-M. (1998). *AlizéWin*. Logiciel de calcul. Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Nantes (F).
- [5] Bensalem, A., Brown, A. J., Nunn, M. E. and Merril, D. (2000). *Finite element modeling of fully flexible pavements; surface cracking and wheel interaction*. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp.103-122.
- [6] Blab, R. (1999). *Introducing Improved Loading Assumptions into Analytical Pavement Models Based on Measured Contact Stresses of Tires*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno NV.
- [7] Blab, R. and Tarvey, J. T. (2000). *Modeling measured 3D tire contact stresses in a viscoelastic FE pavement model*. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp.123-148.
- [8] Brown, S. F. (1973). *Determination of Young's Modulus for Bituminous Materials in Pavement Design* in Highway Research Record 431(Highway Research Board): pp. 38-49.
- [9] Cebon, D. (1999). *Handbook of Vehicle-Road Interaction*. Lisse, Ed. Swets & Zeitlinger.
- [10] COST\_323 (1998). *Pesage en marche des véhicules routiers: 2ème conférence européenne Lisbonne - Actes finaux*. Luxembourg, European Commission, 1998.
- [11] COST\_333 (1999). *Final report of Cost Action 333: Development of New Bituminous Pavement Design Method*. Luxembourg, European Commission, 1999.
- [12] COST\_334 (non publié à ce jour). *Final report of Cost Action 334: Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres*. Luxembourg, European Commission, non publié à ce jour.

- [13] COST\_337 (2001). *Final report of Cost Action 337: Unbound granular materials for road pavements*. Luxembourg, European Commission, 2001.
- [14] Couarraze, G. and Grossiord, J.-L. (1991). *Initiation à la rhéologie*. Paris, Ed. Lavoisier TEC&DOC.
- [15] De Beer, M., Fisher, C. and Jooste, F. (1997). *Determination of pneumatic tyre/pavement contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers*. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 179-227.
- [16] De La Roche, C. (1996). *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux - expérimentation et nouvelles perspectives d'analyse*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, Paris (F).
- [17] Di Benedetto, H. (1990). *Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique*. Fourth Int. Symp. RILEM Mechanical tests for bituminous Mixes, Budapest, pp. 387-401.
- [18] Di Benedetto, H. and de La Roche, C. (1998). *State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures*. RILEM Report 17. Londres, Ed. E & FN Spon, pp. 137-180.
- [19] Dumont, A.-G., Di Benedetto, H. and Pucci, T. (2002). *Réalisation des infrastructures de transport*. Cours EPFL. Lausanne.
- [20] Dumont, A.-G., Sahli, A., Recordon, E. and Gueye, I. (1994). *Validation expérimentale des lois de comportement de matériaux hydrocarbonés et de sols*, Office fédéral des routes (OFROU), Rapport n° 327, septembre 1994.
- [21] Dumont, A.-G. and Scazziga, I. (1985). *Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées*. Berne, Office fédéral des routes (OFROU), Rapport n° 104, 1985.
- [22] Eckmann, B. (1997). *New Tools for Rational Pavement Design*. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 25-42.
- [23] Eisenmann, J. (1975). *Dynamic wheel load fluctuations - road stress in Strasse und Autobahn 4*.
- [24] Ekdahl, P. (1998). *Analysis of the stresses and strains collected in COST 333 (Swiss contribution) through a short term scientific mission*, LAVOC - EPFL, Rapport, octobre 1998.
- [25] Erkens, S. M. J. G., Liu, X. and Scarpas, A. (2000). *3D Finite element model for asphalt concrete response simulation*. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp.291-327.

- [26] Francken, L. (1977a). *Déformations permanentes observées en laboratoire et sur routes expérimentales*. Internationales Kolloquium über die plastische Verformbarkeit von Asphaltmischguten, Zürich, pp. 113-137.
- [27] Francken, L. (1977b). *Permanent Deformation Law of Bituminous Road Mixes in Repeated Triaxial Compression*. 4th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, pp. 483-496.
- [28] Francken, L. (1979). *Fatigue d'un enrobé bitumineux soumis à des conditions de sollicitations réalistes* in La technique routière.
- [29] Francken, L. (1997). **PRADO**. Logiciel de calcul. Centre de recherches routières (CRR), Bruxelles (B).
- [30] Francken, L., Clauwaert, C. (1987). *Characterisation and structural assessment of bound materials for flexible road structures*. 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, pp. 130-144.
- [31] Frey, F. (1994). *Analyse des structures et milieux continus - Mécanique des structures*. Traité de génie civil - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR).
- [32] Frey, F., Jirousek, J. (2001). *Analyse des structures et milieux continus - Méthode des éléments finis*. Traité de génie civil - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR).
- [33] Groenendijk, J. (1998). *Accelerated testing and surface cracking of asphaltic concrete pavements*. Thèse de doctorat, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft (NL).
- [34] Groenendijk, J. (1999). *Relative Pavement Wear Ratios of Wide Base Single and Dual Truck Tyres: a Literature Survey*. Delft (NL), Dienst Wegen Waterbouwkunde (DWW), Rapport, août 1999.
- [35] Hopman, P. (2000). **Veraod (Visco Elastic ROad Analysis Delft)**. Logiciel de calcul. Netherlands pavement consultants, Utrecht (NL).
- [36] Hopman, P. C., Nilsson, R. N. and Pronk, A. C. (1997). *Theory, validation and application of the visco-elastic multilayer program Veraod*. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 693-705.
- [37] Hua, J. and White, T. (2000). *Use of a Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model for Permanent Deformation in Asphalt Concrete Pavement*. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp. 165-194.
- [38] Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*. Engelwoodcliffs, Ed. Prentice Hall.

- [39] Huet, C. (1965). ***Etude, par une méthode d'impédance, du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés***. Thèse de doctorat, Faculté des sciences, Université de Paris, Paris (F).
- [40] Huet, C. (1998). ***Cours de matériaux I et II, Fascicule C, Destiné aux étudiants de Génie Civil 3e et 4e semestres***. Cours EPFL. Lausanne.
- [41] Huhtala, M., Pihlajmäki, J. and Halonen, P. (1997). ***Pavements Response due to Dynamic Axle Loads***. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 471-485.
- [42] Jacobs, M. M. M. (1995). ***Crack Growth in Asphaltics Mixes***. Thèse de doctorat, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft (NL).
- [43] Kim, H. B. and Buch, N. (2003). ***Reliability-Based Pavement Design Model accounting for Inherent Variability of Design Parameters***. 82nd Transport Research Board Annual Meeting, Washington D. C.
- [44] Lemaître, J. and Chaboche, J.-L. (1988). ***Mécanique des matériaux solides***. Paris, Ed. Dunod.
- [45] Long, F. and Monismith, C. L. (2002). ***Use of a Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model for Permanent Deformation in Asphalt Concrete Pavement***. 3rd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Amsterdam, pp. 91-110.
- [46] Mante, B. R., Molenaar, A. A. A. and Groenendijk, J. (1995). ***Stresses and Strains in Pavements***. Delft (NL), Technical University of Delft, Rapport n° 7-95-209-32M, mars 1995.
- [47] Matlab (2002). ***Matlab, The Language of Technical Computing***. Logiciel mathématique. The MathWorks Inc., Natick (USA).
- [48] Mayoraz, F. (2002). ***Comportement mécanique des milieux granulaires sous sollicitations cycliques: application aux fondations de chaussées***. Thèse de doctorat, Département de génie civil, EPFL, Lausanne.
- [49] Morgenthaler, S. (1997). ***Introduction à la statistique***. Méthodes mathématiques pour l'ingénieur. Lausanne, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR).
- [50] NF\_P98-253-1 ***Essais relatifs aux chaussées - Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés - Partie 1 : essai d'orniérage***. Norme française, AFNOR, 1991.
- [51] NF\_P98-260-2 ***Essais relatifs aux chaussées - Mesure des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés - Partie 2 : détermination du module complexe par flexion sinusoïdale***. Norme française, AFNOR, 1992.

- [52] NF\_P98-261-1 **Essais relatifs aux chaussées - Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés - Partie 1 : essai par flexion deux points à amplitude de flèche constante sur éprouvettes trapézoïdales isocèles**. Norme française, AFNOR, 1992.
- [53] Nilsson, R. N., Hopman, P. C. and Isacsson, U. (2002). **Influence of different rheological models on predicted pavement responses in flexible pavements** in Road Materials and Pavement Design Vol. 3 (2/2002): pages 117 à 149.
- [54] OCDE (1983). **Effets des véhicules lourds de marchandises**. Paris, Ed. OCDE, Rapport, décembre 1982.
- [55] OCDE (1985). **Essais en vraie grandeur des superstructures routières**. Paris, Ed. OCDE, Rapport, 1985.
- [56] OCDE (1991). **Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières**. Paris, Ed. OCDE, Rapport, 1991.
- [57] Ould-Henia, M. (2003). **Modèle de réponse viscoélastique simplifié - Bases théoriques et implémentation**. Note interne, LAVOC - EPFL, février 2003.
- [58] Partanen, L. and Panu, S. (2001). **Tyre Pressure on Trucks**. Helsinki, Finnra, 27, 2001.
- [59] Perret, J. (2001a). **A1 Genève Lausanne - Estimation de la durée de vie de la structure par mesures de déformations in situ**, LAVOC-EPFL, Rapport.
- [60] Perret, J. (2001b). **N9 Sierre Ouest - Sierre Est, lot 4085, Tranchée couverte, tube sud - Estimation de la durée de vie de la structure par mesures de déformations in situ**, LAVOC-EPFL, Rapport.
- [61] Perret, J. (2002). **The Effect of Loading Conditions on Pavement Responses calculated using a Linear-Elastic model**. 3rd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Amsterdam, pp. 283-303.
- [62] Perret, J., Dumont, A.-G., Turtzschy, J.-C. and Ould-Henia, M. (2001). **Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: 1ère partie: Enrobés à haut module**, OFROU (Office fédéral des routes), 1000, décembre 2001.
- [63] Pigois, M., Dumont, A.-G. and Hefti, J.-J. (1983). **Superstructures routières dans des conditions climatiques extrêmes**, Office fédéral des routes (OFROU), Rapport n° 77, décembre 1983.
- [64] Pigois, M., Ullidtz, P., Dumont, A.-G. and Hefti, J.-J. (1989). **Comportement des superstructures avec couches de fondation en grave stabilisée au ciment**, Office fédéral des routes (OFROU), Rapport n° 181, mars 1989.

- [65] Salençon, J. (1983). *Cours de calcul des structures anélastiques - Viscoélasticité*. Paris, Ed. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [66] Sayegh, G. (1965). *Contribution à l'étude des propriétés rhéologiques des bitumes purs et des bétons bitumineux*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Paris, Paris.
- [67] Scarpas, A. (1998). *CAPA 3D User's manual, parts I, II and III*. Programme d'éléments finis. Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft (NL).
- [68] Schimmerling, P., Sisson, J.-C. and Zaïdi, A. (1998). *Pratique des plans d'expériences*. Paris, Lavoisier TEC&DOC.
- [69] SETRA-LCPC (1994). *Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique*, Laboratoire central des ponts et chaussées - Service d'études techniques des routes et autoroutes, Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme (F).
- [70] SN\_640302 *Route et voie ferrée - Terminologie*. Norme suisse, VSS, 2000.
- [71] SN\_640320 *Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent*. Norme suisse, VSS, 2000.
- [72] SN\_640324 *Dimensionnement - Superstructure des routes*. Norme suisse, VSS, 1997.
- [73] SN\_640431 *Revêtements en béton bitumineux - conception, exigences, exécution*. Norme suisse, VSS, 1997.
- [74] SN\_640435 *Couches de roulement en enrobé macro rugueux - conception, exécution*. Norme suisse, VSS, 1994.
- [75] SN\_670120 *Graves pour couches de fondation - Exigences de qualité*. Norme suisse, VSS, 1999.
- [76] SN\_670316 *Sols, essais - pénétromètre CBR, essai in situ*. Norme suisse, VSS, 1994.
- [77] SN\_670317 *Sols, essais - essai de plaque  $M_E$  et  $E_v$* . Norme suisse, VSS, 1998.
- [78] SN\_670319 *Sols, essais - essai de plaque selon Westergaard*. Norme suisse, VSS, 1992.
- [79] SN\_670320 *Sols, essais - essais CBR en laboratoire*. Norme suisse, VSS, 1994.
- [80] Sweere, G. T. H. (1990). *Unbound granular bases for roads*. Thèse de doctorat, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft.

- 
- [81] Tille, M. (2001). ***Choix de variantes d'infrastructures routières: méthodes multicritères***. Thèse de doctorat, Département de génie civil, EPFL, Lausanne.
- [82] Turtshy, J.-C. and Perret, J. (1999). ***Swiss Contribution to COST 333 - Full-Scale Accelerated Loading Test (ALT) at the Halle-Fosse***, LAVOC-EPFL, Rapport, avril 1999.
- [83] Ullidtz, P. (1998). ***Modelling Flexible Pavement Response and Performance***. Technical University of Denmark, Ed. Polyteknisk Forlag.
- [84] Van Cauwelaert, F. (1995). ***Stresses and displacements in multi-layered orthotropic systems - Theoretical background to the stress/strain calculation program used within the NOAH software***.
- [85] Van Dommelen, A. (1998). ***COST Action 333 - Swiss contribution - Short Term Scientific Mission n°5 : Data Accuracy Evaluation***, LAVOC-EPFL, Rapport, septembre 1998.
- [86] Viagroup (1998). ***Mesures de modules et contraintes sur Champs 2, 3, 5 et 6, Bilan structurel avec le FWD***, LAVOC - EPFL, Rapport, février 1998.
- [87] Yap, P. (1989). ***Truck Tire Types and Road Contact Pressures***. Second International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Kelowna.



# 11. Annexes

## 11.1 Equations des contraintes et déplacements du système de Burmister

Ces équations sont obtenues à partir de la fonction de contraintes :

$$\phi_i = pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{mz} - zD_i e^{-mz}] dm$$

à partir de laquelle on tire les résultats suivants pour les contraintes et les déplacements.

**Contraintes normales :**

$$\sigma_z = pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} - C_i m(1 - 2\nu_i + mz)e^{mz} + D_i m(1 - 2\nu_i - mz)e^{-mz}] dm$$

$$\sigma_r = -pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 - 2\nu_i + mz)e^{mz} - D_i m(1 - 2\nu_i - mz)e^{-mz}] dm$$

$$+ pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}] dm$$

$$\sigma_{\theta} = -pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [C_i m e^{mz} - D_i m e^{-mz}] 2\nu_i dm$$

$$- pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}] dm$$

**Contraintes tangentielles :**

$$\tau_{rz} = -pa \int_0^{\infty} J_1(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(2\nu_i + mz)e^{mz} + D_i m(2\nu_i - mz)e^{-mz}] dm$$

**Déplacements :**

$$w = \frac{1 + \nu_i}{E_i} pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} + zC_i m(2 - 4\nu_i - mz)e^{mz} - zD_i m(2 - 4\nu_i - mz)e^{-mz}] dm$$

$$u = -\frac{1 + \nu_i}{E_i} pa \int_0^{\infty} \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr} [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}] dm$$

avec :

$a$ :	rayon de la surface circulaire de chargement
$p$ :	pression de chargement (uniformément répartie)
$r$ :	distance radiale en coordonnées cylindriques
$z$ :	profondeur
$\sigma_z$ :	contrainte verticale
$\sigma_r$ :	contrainte radiale
$\sigma_\theta$ :	contrainte circonférentielle
$\tau_z$ :	contrainte verticale de cisaillement
$w$ :	déplacement vertical
$u$ :	déplacement radial
$E_i$ :	module de Young de la $i^{\text{ème}}$ couche
$\nu_i$ :	coefficient de poisson de la $i^{\text{ème}}$ couche
$A_i, B_i, C_i, D_i$ :	paramètres inconnus, déterminés par les conditions aux limites
$J_0$ :	fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0
$J_1$ :	fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1
$m$ :	paramètre d'intégration

## 11.2 Calendriers des mesures à la Halle-fosse dans le cadre des EME

### Champs 3 et 4

Date	Temp.	Roue	Intensité	Pression	Passages	Total	Remarques
			?	?	3466	3466	Test et mise en place orniéreur
26.05.1999	-5°C	2	11.5	8.0	408	3874	Problème acquisition
26.05.1999	-5°C	2	11.5	8.0	110	3984	Problème acquisition
			0.0	0.0	66	4050	Mise en place orniéreur
01.06.1999	-5°C	2	11.5	8.0	358	4408	
01.06.1999	-5°C	2	8.0	8.0	324	4732	
01.06.1999	-5°C	2	11.5	7.0	330	5062	
01.06.1999	-5°C	2	8.0	7.0	318	5380	
01.06.1999	-5°C	2	11.5	6.0	330	5710	
01.06.1999	-5°C	2	8.0	6.0	352	6062	
02.06.1999	-5°C	1	11.5	8.0	252	6314	
02.06.1999	-5°C	1	8.0	8.0	210	6524	
02.06.1999	-5°C	1	11.5	7.0	218	6742	
02.06.1999	-5°C	1	8.0	7.0	206	6948	
02.06.1999	-5°C	1	11.5	6.0	208	7156	
02.06.1999	-5°C	1	8.0	6.0	200	7356	
08.06.1999	5°C	1	11.5	8.0	242	7598	
08.06.1999	5°C	1	8.0	8.0	198	7796	
08.06.1999	5°C	1	11.5	7.0	198	7994	
08.06.1999	5°C	1	8.0	7.0	200	8194	
08.06.1999	5°C	1	11.5	6.0	202	8396	
08.06.1999	5°C	1	8.0	6.0	278	8674	
			0.0	0.0	34	8708	Mise en place orniéreur
09.06.1999	5°C	2	11.5	8.0	326	9034	
09.06.1999	5°C	2	8.0	8.0	312	9346	
09.06.1999	5°C	2	11.5	7.0	314	9660	
09.06.1999	5°C	2	8.0	7.0	310	9970	
09.06.1999	5°C	2	11.5	6.0	316	10286	
09.06.1999	5°C	2	8.0	6.0	314	10600	
16.06.1999	15°C	2	11.5	6.0	316	10916	
16.06.1999	15°C	2	8.0	6.0	318	11234	
16.06.1999	15°C	2	11.5	7.0	312	11546	
16.06.1999	15°C	2	8.0	7.0	308	11854	
16.06.1999	15°C	2	11.5	8.0	318	12172	
16.06.1999	15°C	2	8.0	8.0	346	12518	
17.06.1999	15°C	1	11.5	6.0	220	12738	
17.06.1999	15°C	1	8.0	6.0	206	12944	
17.06.1999	15°C	1	11.5	7.0	202	13146	
17.06.1999	15°C	1	8.0	7.0	210	13356	
17.06.1999	15°C	1	11.5	8.0	206	13562	
17.06.1999	15°C	1	8.0	8.0	206	13768	
21.06.1999	30°C	1	11.5	8.0	202	13970	
21.06.1999	30°C	1	8.0	8.0	198	14168	
21.06.1999	30°C	1	11.5	7.0	204	14372	
21.06.1999	30°C	1	8.0	7.0	202	14574	
21.06.1999	30°C	1	11.5	6.0	204	14778	
21.06.1999	30°C	1	8.0	6.0	252	15030	
25.06.1999	30°C	2	11.5	8.0	324	15354	
25.06.1999	30°C	2	8.0	8.0	314	15668	
25.06.1999	30°C	2	11.5	7.0	310	15978	
25.06.1999	30°C	2	8.0	7.0	310	16288	Refection jauges deflexion
25.06.1999	30°C	2	11.5	6.0	318	16606	
25.06.1999	30°C	2	8.0	6.0	314	16920	

## Champ 5 et 6

Date	Temp.	Roue	Intensité	Pression	Passages	Total	Remarques
			?	?	3204	3204	Test ornièreur
26.02.1999	-5°C	2	8.0	6.0	408	3612	
26.02.1999	-5°C	2	11.5	6.0	376	3988	
26.02.1999	-5°C	2	8.0	7.0	406	4394	
26.02.1999	-5°C	2	11.5	7.0	376	4770	
26.02.1999	-5°C	2	8.0	8.0	366	5136	
26.02.1999	-5°C	2	11.5	8.0	370	5506	
26.02.1999	-5°C	1	11.5	8.0	348	5854	
26.02.1999	-5°C	1	8.0	8.0	248	6102	
26.02.1999	-5°C	1	11.5	7.0	278	6380	
26.02.1999	-5°C	1	8.0	7.0	278	6658	
26.02.1999	-5°C	1	11.5	6.0	278	6936	
26.02.1999	-5°C	1	8.0	6.0	0	6936	
			0.0	0.0	2466	9402	Réparation
24.03.1999	5°C	1	11.5	8.0	244	9646	
24.03.1999	5°C	1	8.0	8.0	232	9878	
24.03.1999	5°C	1	11.5	7.0	226	10104	
24.03.1999	5°C	1	8.0	7.0	222	10326	
24.03.1999	5°C	1	11.5	6.0	230	10556	
24.03.1999	5°C	1	8.0	6.0	286	10842	
			0.0	0.0	40	10882	Mise en place ornièreur
25.03.1999	5°C	2	11.5	8.0	452	11334	
25.03.1999	5°C	2	8.0	8.0	370	11704	
25.03.1999	5°C	2	11.5	7.0	356	12060	
25.03.1999	5°C	2	8.0	7.0	360	12420	
25.03.1999	5°C	2	11.5	6.0	342	12762	
25.03.1999	5°C	2	8.0	6.0	354	13116	
31.03.1999	15°C	2	11.5	6.0	462	13578	
31.03.1999	15°C	2	8.0	6.0	336	13914	
31.03.1999	15°C	2	11.5	7.0	336	14250	
31.03.1999	15°C	2	8.0	7.0	324	14574	
31.03.1999	15°C	2	11.5	8.0	326	14900	
31.03.1999	15°C	2	8.0	8.0	326	15226	
01.04.1999	15°C	1	11.5	6.0	256	15482	
01.04.1999	15°C	1	8.0	6.0	214	15696	
01.04.1999	15°C	1	11.5	7.0	208	15904	
01.04.1999	15°C	1	8.0	7.0	212	16116	
01.04.1999	15°C	1	11.5	8.0	204	16320	
01.04.1999	15°C	1	8.0	8.0	206	16526	
03.04.1999	30°C	1	11.5	8.0	220	16746	
03.04.1999	30°C	1	8.0	8.0	200	16946	
03.04.1999	30°C	1	11.5	7.0	214	17160	
03.04.1999	30°C	1	8.0	7.0	200	17360	
03.04.1999	30°C	1	11.5	6.0	212	17572	
03.04.1999	30°C	1	8.0	6.0	204	17776	
			0.0	0.0	42	17818	Mise en place ornièreur
27.04.1999	30°C	2	11.5	8.0	324	18142	
27.04.1999	30°C	2	8.0	8.0	320	18462	
27.04.1999	30°C	2	11.5	7.0	308	18770	
27.04.1999	30°C	2	8.0	7.0	314	19084	
27.04.1999	30°C	2	11.5	6.0	308	19392	
27.04.1999	30°C	2	8.0	6.0	316	19708	

### 11.3 Jauges de mesure de déformations horizontales

Les jauges utilisées sont confectionnées au LAVOC à partir de jauges de contraintes Kyowa sur lesquelles des barrettes métalliques visant à assurer une bonne liaison avec les matériaux bitumineux sont fixées. Les jauges de contraintes se composent d'une résistance noyée dans une barre en résine synthétique dont les dimensions sont de 120 x 15 x 4 mm. La résistance a une longueur d'environ 70 mm.

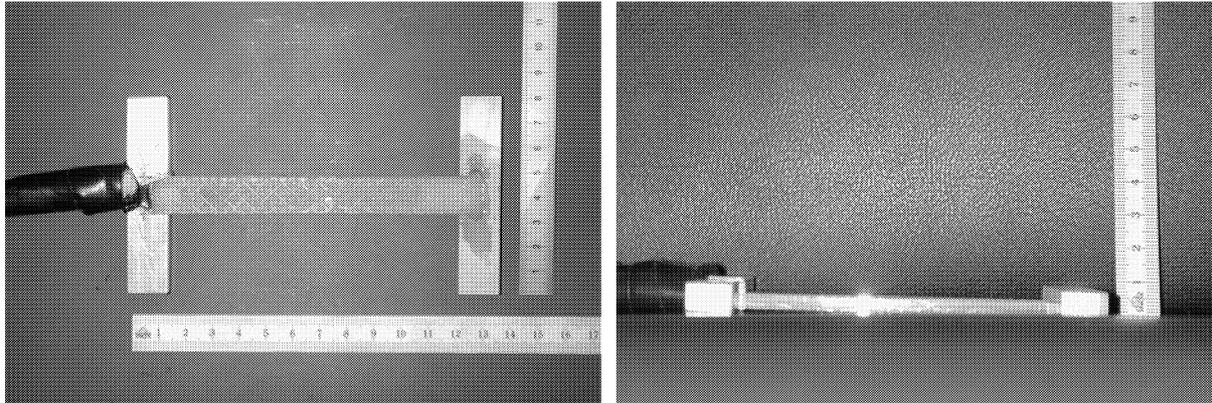


Figure 111 : Jauge de mesure de déformations de type Kyowa

Elles ont été testées en laboratoire dans une poutre simple en résine à laquelle des déplacements ont été imposés. Une relation directe indépendante du module permet d'obtenir la déformation horizontale à partir de la flèche de cette poutre simple.

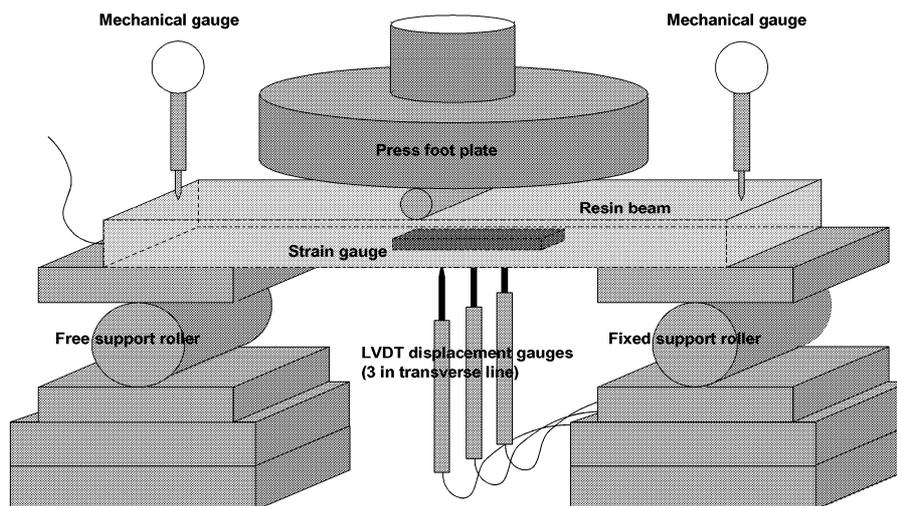


Figure 112 : Dispositif de test en laboratoire des jauges de déformation

Les écarts maximaux entre la déformation théorique calculée à partir de la flèche et la valeur mesurée par la jauge dans la résine sont de 3,8 %.

Certaines jauges installées dans les couches bitumineuses ont été endommagées lors de la mise en œuvre des matériaux et n'ont pas pu être exploitées. Nous donnons dans le Tableau 65 un récapitulatif du nombre de jauges ayant fonctionné correctement en début d'expérience pour chaque champ.

**Tableau 65: Nombre de jauges de déformation fonctionnant en début d'expérience**

	Champ 3	Champ 4	Champ 5	Champ 6
Jauges au bas de la couche de roulement	6	5	7	7
Jauges au bas de la couche de base	1	5	0	7

Les résultats de ces jauges n'ont pas tous pu être exploités pour deux raisons. Premièrement, les sections testées durant les expériences de la Halle-fosse étaient équipées d'autres capteurs de mesures qui ne concernent pas directement les déformations des couches bitumineuses. Le fait que le système d'acquisition utilisé ne permettait la lecture que d'un nombre limité de capteurs a fait que les jauges de déformations horizontales mentionnées dans le Tableau 65 n'ont pas toutes été utilisées. Deuxièmement, certaines jauges, notamment la seule fonctionnant au bas de la couche sur le champ 3, ont été endommagées lors des mesures à 30°C, rendant impossible une lecture propre des signaux pour cette température.

## 11.4 Essais de module en laboratoire pour les matériaux bitumineux

### Couche de roulement en MR 11

LAVOC-EPFL  
1015 LAUSANNE  
TEL (021) 6932345

#### COURBE MAITRESSE DU MODULE E\* - REFERENCE 10 °C MR 11 AU LIANT COLFLEX N 55

MANDANT : COST 333  
TYPE D'ENROBE : COUCHE DE ROULEMENT AU LIANT COLFLEX N 55 (enrobé réchauffé)  
DATE DE FABRICATION : 19.09.97  
DATE DU SCIAGE : AOUT 1998  
DATE DE L'ESSAI : SEPTEMBRE 1998  
OPERATEUR (S) : M.PITTET

#### CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C] : -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30  
FREQUENCE [Hz] : 8, 15, 25, 33, 50  
EPSILON THEORIQUE [1E-6] : 40

#### CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMINEUX

TENEUR EN LIANT / E [%] : 5.83  
TENEUR EN VIDES MOY. GEOM.[%] : 5.4 (HYDRO. 4.4)  
DELTA H MOYEN [Kcal/mole] : 40.87

MODULE E\* INTERPOLE A 10 °C / 10 Hz : 12504 MPa

MODULE E\* INTERPOLE A 15 °C / 10 Hz : 9358 MPa

#### MODULE E\* - RESULTATS D'ESSAI

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
-10	8	21837	1998
	15	22538	3747
	25	23145	6245
	33	23473	8243
	50	24603	12489
-5	8	19582	465
	15	20630	872
	25	21327	1454
	33	21663	1919
	50	23266	2908
0	8	17468	114
	15	18316	214
	25	19244	357
	33	19790	471
	50	21441	714
5	8	14728	30
	15	15809	55
	25	16750	92
	33	17312	122
	50	19459	185
10	8	12035	8
	15	13212	15
	25	14172	25
	33	14734	33
	50	16375	50
15	8	8800	2.27
	15	10042	4.25
	25	10809	7.09
	33	11584	9.36
	50	12607	14.18

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
20	8	6629	0.67
	15	7693	1.26
	25	8604	2.10
	33	9077	2.77
	50	10247	4.20
25	8	4438	0.21
	15	5416	0.39
	25	6184	0.65
	33	6634	0.85
	50	7506	1.29
30	8	2733	0.066
	15	3415	0.124
	25	4036	0.207
	33	4351	0.274
	50	4886	0.415
35	8	-	-
	15	-	-
	25	-	-
	33	-	-
	50	-	-
40	8	-	-
	15	-	-
	25	-	-
	33	-	-
	50	-	-
45	8	-	-
	15	-	-
	25	-	-
	33	-	-
	50	-	-

## Couche de base en HMT 22s

LAVOC-EPFL  
1015 LAUSANNE  
TEL (021) 6932345

### COURBE MAITRESSE DU MODULE E\* - REFERENCE 10 °C (-10 / 45 °C) HMT 22S AU LIANT B 80/100

MANDANT : OFR 20/96 - ENROBES A MODULE ELEVE  
TYPE D'ENROBE : HMT 22S AU LIANT B 80/100, ECHANTILLONS PRELEVES IN SITU  
DATE DE FABRICATION : SEPTEMBRE 1997  
DATE DU SCIAGE : NOVEMBRE 1999  
DATE DE L'ESSAI : DECEMBRE 1999  
OPERATEUR (S) : M.PITTET

#### CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C] : -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45  
FREQUENCE [Hz] : 8, 15, 25, 33, 50  
EPSILON THEORIQUE [1E-6] : 40

#### CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMEUX

TENEUR EN LIANT / E MESUREE [%] : 4.13  
TENEUR EN VIDES MOY.HYDRO. [%] : 6.6  
DELTA H MOYEN [Kcal/mole] : 50.57

MODULE E\* INTERPOLE A 10 °C / 10 Hz : 10'184 MPa

MODULE E\* INTERPOLE A 15 °C / 10 Hz : 7'524 MPa

#### MODULE E\* - RESULTATS D'ESSAI

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]	TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
-10	8	18883	7403	20	8	5108	0.37
	15	19559	13880		15	5940	0.70
	25	20604	23133		25	6634	1.17
	33	20569	30536		33	7013	1.54
	50	21263	46267		50	7584	2.33
-5	8	16767	1220	25	8	3492	0.09
	15	17593	2287		15	4183	0.16
	25	18316	3812		25	4848	0.27
	33	18797	5032		33	5124	0.36
	50	18991	7625		50	5956	0.54
0	8	14620	215	30	8	2259	0.021
	15	15358	403		15	2842	0.040
	25	16168	671		25	3326	0.067
	33	16450	886		33	3656	0.088
	50	16972	1342		50	4198	0.133
5	8	12387	40	35	8	1387	0.0055
	15	13121	75		15	1710	0.0102
	25	13760	126		25	2116	0.0170
	33	14034	166		33	2332	0.0225
	50	14817	252		50	2856	0.0341
10	8	9799	8	40	8	800	0.0015
	15	10760	15		15	1054	0.0027
	25	11352	25		25	1312	0.0046
	33	11697	33		33	1440	0.0060
	50	12884	50		50	1785	0.0091
15	8	7107	1.68	45	8	442	0.00041
	15	7927	3.15		15	609	0.00076
	25	8657	5.26		25	750	0.00127
	33	9020	6.94		33	841	0.00168
	50	9672	10.51		50	1038	0.00254

## Couche de base en EME2

LAVOC-EPFL  
1015 LAUSANNE  
TEL (021) 6932345

### COURBE MAITRESSE DU MODULE E\* - REFERENCE 10 °C (-10 / 45 °C) EME 2 AU LIANT MIXELF 10/20, VIDES ELEVES

MANDANT : OFR 20/96 - ENROBES A MODULE ELEVE  
TYPE D'ENROBE : EME 2 AU LIANT MIXELF 10/20, VIDES ELEVES, ECHANTILLONS PRELEVES IN SITU  
DATE DE FABRICATION : SEPTEMBRE 1997  
DATE DU SCIAGE : NOVEMBRE 1999  
DATE DE L'ESSAI : JANVIER 2000  
OPERATEUR (S) : M.PITTET

#### CONDITIONS D'ESSAI

TEMPERATURE [°C] : -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45  
FREQUENCE [Hz] : 8, 15, 25, 33, 50  
EPSILON THEORIQUE [1E-6] : 40

#### CARACTERISTIQUES DU BETON BITUMEUX

TENEUR EN LIANT / E MESUREE [%] : 5.7  
TENEUR EN VIDES MOY.HYDRO. [%] : 5.5  
DELTA H MOYEN [Kcal/mole] : 49.34

MODULE E\* INTERPOLE A 10 °C / 10 Hz : 17'137 MPa

MODULE E\* INTERPOLE A 15 °C / 10 Hz : 14'082 MPa

#### MODULE E\* - RESULTATS D'ESSAI

TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]	TEMPERATURE D'ESSAI [°C]	FREQUENCE D'ESSAI [Hz]	MODULE E* [MPa]	FREQUENCE CALCULEE (R 10 °C) [Hz]
-10	8	25464	6272	20	8	10735	0.40
	15	25958	11759		15	11816	0.75
	25	25944	19599		25	12643	1.26
	33	26448	25870		33	13163	1.66
	50	26748	39198		50	14427	2.51
-5	8	23837	1080	25	8	8179	0.10
	15	24143	2025		15	9293	0.18
	25	24906	3374		25	10085	0.30
	33	25103	4454		33	10502	0.40
	50	26360	6749		50	11782	0.61
0	8	21883	198	30	8	5895	0.025
	15	22392	372		15	6797	0.046
	25	22975	620		25	7650	0.077
	33	23517	818		33	8101	0.101
	50	23989	1239		50	9242	0.154
5	8	19527	39	35	8	3745	0.0065
	15	20349	73		15	4550	0.0122
	25	20634	121		25	5401	0.0203
	33	21235	160		33	5762	0.0269
	50	22134	242		50	6765	0.0407
10	8	16756	8	40	8	2258	0.0018
	15	17548	15		15	2921	0.0034
	25	18358	25		25	3560	0.0056
	33	18864	33		33	3933	0.0074
	50	19665	50		50	4828	0.0112
15	8	13730	1.75	45	8	1258	0.00052
	15	14547	3.28		15	1690	0.00097
	25	15304	5.46		25	2176	0.00162
	33	15795	7.21		33	2460	0.00213
	50	16817	10.92		50	3123	0.00323



# Curriculum Vitae

## PERRET

Jacques

7 avril 1968

Marié à Monica, père d'Ivan et de Tania

### Etudes et formation

Etudes d'ingénieur civil à l'EPFL (1986 à 1991)

Gymnase section scientifique, au Belvédère à Lausanne (1984 à 1986)

Collège secondaire section scientifique, à Morges (1979 à 1984)

Ecole primaire, à Cossonay (1975 à 1979)

### *Formations complémentaires*

Formation à l'Université technique de Delft (programme d'éléments finis CAPA 3D).  
Durée de la formation : 3 semaines

Formation au Centre de Recherches Routières à Bruxelles (programme d'éléments finis SYSTUS).  
Durée de la formation : 3 semaines

Cours SIC EPFL "Les macros avec Excel 97"

Cours SIC EPFL "Introduction à LabView" et "LabView avancé"

Cours interne de formation en marketing chez Zschokke SA

### Diplômes et titres

Diplôme d'ingénieur civil EPFL

Maturité fédérale et baccalauréat cantonal scientifique

Certificat cantonal d'études secondaires scientifiques

## Activités à ce jour

### *Professionnelles*

Ingénieur au LAVOC (Laboratoire des voies de circulation) au sein du département de Génie Civil de l'EPFL (1998 à ce jour)

Rédacteur responsable pour le génie civil à la revue TRACES, organe officiel de la société suisse des ingénieurs et architectes (SIA) (2001 à ce jour)

Ingénieur conducteur de travaux au sein de l'entreprise Losinger SA à Crissier (1996 à 1997)

Employé au sein de l'Entreprise Générale Conrad Zschokke SA, assistant chef de projet (1993 à 1995)

Professeur de physique et de mathématiques à l'Ecole CAP à Lausanne (1992 à 1993)

Professeur de statique et de mathématique à l'Ecole Athenaum à Lausanne (1992)

Assistant de construction à l'EPFL pour le département de génie civil (1991-1992)

Géotest SA à Cheseaux-sur-Lausanne, en qualité d'ingénieur géotechnicien (1991)

Divers remplacements en tant que professeur de physique et de mathématiques dans des collèges vaudois (1986 à 1992)

### *Autres*

Président et membre de la commission d'experts VSS EK 5.03 Dimensionnement

Co-représentant suisse pour le projet de collaboration européenne COST 347 concernant les essais en vraie grandeur des chaussées routières

Représentant suisse pour le projet de recherche européen AMADEUS (Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures)

**Publications :**

« *Rapport sectoriel sur les superstructures routières* » dans le cadre d'un rapport confidentiel sur les conséquences de l'introduction des 40t en Suisse sur les structures routières, LAVOC-EPFL, février 1998.

« *Le défi des 40 tonnes* », Journée technique LAVOC à Lausanne, septembre 1998.

« *Development of New Pavement Design Methods – Swiss contribution : Full-Scale Accelerated Loading Test (ALT) at the Halle-Fosse (LAVOC-EPFL)* », rapport pour la contribution suisse à l'action COST 333, avril 1999.

« *Compte routier - Vérification des coefficients de répartition des coûts* », Rapport OFROU pour le compte de l'OFS, LAVOC-EPFL, août 2000.

« *Renforcement à l'aide d'enrobés à haut module (EME)* », Journée technique LAVOC à Lausanne, septembre 2000.

« *Estimation de la durée de vie de la structure par mesures de déformations in situ* », autoroute N9 Sierre Ouest - Sierre Est, rapport d'étude, LAVOC-EPFL, janvier 2001.

« *Estimation de la durée de vie de la structure par mesures de déformations in situ* », autoroute A1 Lausanne - Genève, rapport d'étude, LAVOC-EPFL, mars 2001.

« *Dimensionnement des infrastructures de transports* », cours à option pour les étudiants 8<sup>ème</sup> semestre de Génie civil de l'EPFL, mars 2002.

« *Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: 1<sup>ère</sup> partie: Enrobés à haut module* », Rapport OFROU n° 1000, mandat de recherche 20/96, décembre 2001.

« *Effect of loading conditions on pavement response calculated using a linear elastic model* », Proceedings of the third international symposium on 3D finite element for pavement analysis, design and research.

« *Numerical modelling of experiments performed on full-scale structures* », BCRA 2002, workshop 2 - Modelling of flexible pavement, 21 juin 2002.

**Langues :**

- Français, langue maternelle.
- Espagnol, très bonnes connaissances écrites et orales.
- Anglais, bonnes connaissances écrites et orales.
- Allemand, connaissances écrites et orales.