



HAL
open science

Instrumentation de chaussées : la route intelligente qui s'auto-détecte ?

Ngoc Son Duong

► **To cite this version:**

Ngoc Son Duong. Instrumentation de chaussées : la route intelligente qui s'auto-détecte ?. Génie civil. École centrale de Nantes, 2017. Français. NNT : 2017ECDN0033 . tel-02982181

HAL Id: tel-02982181

<https://theses.hal.science/tel-02982181>

Submitted on 28 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

Ngoc Son DUONG

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes
Sous le label de l'UNIVERSITÉ BRETAGNE LOIRE*

École doctorale : Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture (SPIGA)

Discipline : Génie Civil

Unité de recherche : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)

Soutenue le 17 novembre 2017

Instrumentation de chaussées: la route intelligente qui s'auto-détecte ?

JURY

Rapporteurs :	Cyrille CHAZALLON , Professeur d'Université, INSA de Strasbourg Andreas LOIZOS , Professeur d'Université, School of Civil Engineering National Technical University of Athens
Examineurs:	Frédéric GRONDIN , Professeur d'Université, Ecole Centrale de Nantes Yann LEFEUVRE , Docteur, Colas
Directeur de thèse :	Pierre HORNYCH , IDTPE (H.D.R), IFSTTAR
Encadrant de thèse :	Juliette BLANC , Docteur, IFSTTAR

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu les professeurs Cyrille Chazallon et Andreas Loizos d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et du temps qu'ils ont consacré à lire et commenter ce manuscrit. Toute ma gratitude s'adresse également à monsieur Frédéric Grondin, monsieur Yann Lefeuvre qui m'ont donnée l'honneur d'être dans mon jury de thèse.

Cette thèse n'aura jamais vu le jour sans la confiance, la direction et les suivis portés par mes encadrants: M. Pierre Hornyh et Mme Juliette Blanc que je veux adresser mes sincères remerciements. Les nombreuses réunions de suivi étaient des moments d'échanges très fructueux et très agréables. Leurs connaissances et leurs encouragements me permettent de surmonter les difficultés et me donner toujours la motivation sur mon travail. Je garderai leurs conseils pendant très longtemps.

Je tiens également à remercier M Fabien Menant et M Mai Lan Nguyen d'avoir partagé les expériences et d'avoir des moments d'échanges très intéressants et enrichissants.

Tous mes remerciements s'adressent également à tous mes collègues de l'IFSTTAR (Vinciane Le Boursicaud, Maissa Gharbi, Franck Tartrou, Jean-Luc Geffard, Hanan Nasser, Van Thang Vu, Benjamin Shiferaw, Olivier Chupin, Jacques Kerveillant, Olivier Burban et autres...bien sûr !) pour les discussions fructueuses et surtout les doctorants avec qui j'avais des moments inoubliables et qui m'ont encouragé beaucoup au cours de cette thèse.

Je tiens également à remercier mes amis vietnamiens à Nantes pour la présence à mes côtés ainsi que de leurs aides pendant plus de trois ans.

Enfin, j'aimerais remercier toute ma famille qui m'a donnée beaucoup de soutiens pour cette période de ma vie. Leurs encouragements m'ont beaucoup aidé pour aller jusqu'à la fin du travail. Leur participation au grand jour devient notamment un moment inoubliable dans ma vie.

Table des matières

Introduction générale	5
1 Chapitre 1 – Recherche bibliographique.....	9
1.1 Introduction	10
1.2 Caractéristiques des structures de chaussées	10
1.2.1 Composition des structure de chaussées	10
1.2.2 Modes d'endommagement des couches de chaussées.....	11
1.2.3 Différents types de chaussées utilisées en France	12
1.3 L'instrumentation des chaussées et les différents types de capteurs.....	13
1.3.1 Les jauges de déformation	14
1.3.2 Jauges de mesures des déformations horizontales (Blanc, et al., 2016)	14
1.3.3 Jauges de mesures des déformations verticales	19
1.3.4 Capteurs de pression.....	19
1.3.5 Les sondes de température	20
1.3.6 Les capteurs de mesure de déplacement.....	21
1.4 Les sections routières instrumentées	26
1.4.1 Site instrumenté dans les Yvelines (Pouteau & Mazé, Mai 2012)	27
1.4.2 Site instrumenté sur l'A41N (Gaborit, et al., 2013).....	28
1.4.3 Tronçon de la Route 15 de Guildford, Maine, USA (Swett, et al., Octobre 2008)	30
1.4.4 Section expérimentale à Ottawa, Canada (Région froide) (Maadani, et al., 2015).....	32
1.4.5 Projet d'instrumentation: Virginia Smart Road (Al-Qadi, et al., 2004)	34
1.4.6 Section expérimentale de la Virginia State Road 114 (Xue, et al., 2013).....	36
1.4.7 Section expérimentale en Chine (Ai, et al., 2016).....	40
1.4.8 Conclusion sur les expérimentations sur chaussées	41
1.5 Méthodes de dimensionnement de chaussées.....	42
1.5.1 Méthodes empiriques	42
1.5.2 Méthodes mécaniques-empiriques.....	44
1.5.3 Méthode Française de dimensionnement.....	44
1.5.4 Méthode incrémentale.....	48
1.6 Modélisation du comportement mécanique de chaussées	49
1.6.1 Modèles mécaniques de chaussées	49
1.6.2 Logiciels de calcul de structures de chaussées utilisés	57
1.7 Conclusion.....	62

2	Chapitre 2 - Présentation des deux sites instrumentés sur les autoroutes A10 et Ax	64
2.1	Introduction	65
2.2	Présentation du site instrumenté sur l'autoroute A10	65
2.2.1	Objectifs de l'expérimentation	65
2.2.2	Structure de chaussée	66
2.2.3	Instrumentation	67
2.2.4	Programme de suivi	71
2.3	Présentation du site instrumenté sur l'autoroute Ax	73
2.3.1	Objectifs de l'expérimentation	73
2.3.2	Structure de chaussée	73
2.3.3	Instrumentation	74
2.4	Présentation du dispositif d'acquisition et de transmission des données à distance	77
2.4.1	Principe de la plate-forme PEGASE	77
2.4.2	Généricité matérielle	78
2.4.3	Généricité logicielle	78
2.4.4	Application aux deux sites instrumentés	79
2.4.5	Acquisition des données	80
2.5	Conclusion	81
3	Chapitre 3 - Etudes réalisées sur l'autoroute A10	83
3.1	Introduction	84
3.2	Description des campagnes expérimentales sur site	84
3.3	Résultats des mesures des jauges (mesures sur site)	86
3.3.1	Exemple de mesures obtenues lors de la campagne de mesures d'avril 2012	86
3.3.2	Evolution des mesures de jauges durant les différentes campagnes de mesures	89
3.4	Analyse des mesures sur site et estimation des modules des couches de chaussées	91
3.5	Analyse des mesures issues du système d'acquisition à distance	101
3.5.1	Analyse des mesures de température	101
3.5.2	Mesures des géophones	105
3.5.3	Analyse des mesures des géophones	109
3.6	Conclusion	112
4	Chapitre 4 - Analyse des mesures des jauges sur l'autoroute Ax	114
4.1	Introduction	115
4.2	Analyse des mesures sur site	115
4.2.1	Chargements réalisés	115

4.2.2	Exemples de signaux de mesure.	116
4.2.3	Modélisation de la structure de chaussée initiale avec Alizé	119
4.3	Mesures enregistrées avec le système d'acquisition à distance.....	123
4.3.1	Bilan sur le fonctionnement des capteurs.....	123
4.3.2	Exemples de signaux de mesures des jauges.....	124
4.3.3	Première analyse des mesures des jauges sans tri des signaux.....	127
4.3.4	Développement d'une procédure de tri des signaux des jauges.....	133
4.3.5	Evolution des mesures de déformation	142
4.4	Modélisation du comportement mécanique de la chaussée	145
4.4.1	Différents scénarios de modélisation avec Alizé et Viscoroute	145
4.4.2	Résultats des modélisations élastiques linéaires	146
4.4.3	Résultats des Modélisations viscoélastique avec Viscoroute	152
4.4.4	Evaluation des performances des interfaces de chaussée à différentes températures.....	159
4.5	Conclusion.....	166
5	Chapitre 5 – Calcul d'endommagement de la structure de l'autoroute Ax	168
5.1	Introduction	169
5.2	Démarche de calcul de l'endommagement d'une chaussée	169
5.2.1	Notion de dommage appliquée aux chaussées	169
5.2.2	Application du calcul de dommage à la section de l'Ax	170
5.3	Hypothèses pour les calculs d'endommagement sur la section de l'Ax	177
5.4	Calculs des déformations maximales en extension.....	179
5.5	Résultats des calculs d'endommagement – influence des hypothèses de calcul	186
5.6	Conclusion.....	191
6	Chapitre 6 - Analyse des mesures de géophone.....	193
6.1	Introduction	194
6.2	Caractéristiques des géophones utilisés et essais en laboratoire	194
6.2.1	Caractéristiques intrinsèques des géophones	195
6.2.2	Essais en laboratoire	196
6.3	Exploitation des mesures des géophones	200
6.3.1	Exemple d'un signal de géophone.....	200
6.3.2	Etude de la valeur moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des géophones.....	201
6.3.3	Etude de la position latérale des géophones	202
6.3.4	Etude de la profondeur des géophones	203
6.3.5	Caractérisation des silhouettes des poids lourds.	204

6.3.6	Détermination de la vitesse des poids lourds.....	208
6.4	Estimation de la déflexion.....	210
6.4.1	Méthode de correction des signaux des géophones.....	210
6.4.2	Validation de la méthode de correction des mesures des géophones à partir d'essais sur le manège de fatigue	217
6.4.3	Applications aux mesures sur l'Ax.....	233
6.5	Conclusion.....	236
7	Conclusion générale	239
8	Bibliographie	244
9	Annexes.....	248

Introduction générale

Les itinéraires routiers supportant un nombre élevé de véhicules lourds ont habituellement des structures de chaussées épaisses et peu déformables. Pour conserver un haut niveau de service, ils nécessitent un suivi régulier sur toute la longueur de l'ouvrage au moyen d'appareils d'auscultation continue à grand rendement. A ce jour, l'évaluation de l'état structurel est réalisée au moyen d'appareils de mesure de déflexion et de rayon de courbure sous un essieu standard de 130 kN (déflectographe ou curviamètre). Pour des sections de chaussées épaisses, la précision de mesure de ces appareils est souvent insuffisante pour détecter un début d'endommagement des structures. De même, les relevés de dégradation ne permettent de détecter que des fissures visibles en surface et ne donnent pas d'information sur les fissures internes, et leur évolution.

L'instrumentation, au moyen de capteurs spécifiques, constitue un moyen d'auscultation complémentaire, permettant de mesurer de façon plus précise, la réponse mécanique de la chaussée. De plus, les progrès récents dans le domaine de l'instrumentation et de la transmission des données à distance, permettent aujourd'hui de réaliser, pour un coût raisonnable, des systèmes intelligents, de suivi à distance d'ouvrages instrumentés, tels que les chaussées. Ces progrès concernent à la fois :

- La miniaturisation des capteurs et des composants électroniques.
- La réduction des coûts et de la consommation d'énergie de l'instrumentation.
- L'augmentation des capacités de stockage et de traitement en temps réel des données.
- Les possibilités de communication sans fil, pour la transmission des données et également la programmation à distance du système d'acquisition.

Aujourd'hui le Laboratoire LAMES/IFSTTAR dispose de plusieurs sites autoroutiers instrumentés, en partenariat avec des sociétés autoroutières (Cofiroute et Colas) avec les mêmes types de capteurs: géophones, sondes de température, et jauges d'extensométrie. Des suivis en continu de ces mesures sous trafic sont réalisés.

L'exploitation des mesures de ces différents capteurs sous chargement peut se faire de 2 façons :

- soit en faisant les mesures sur place, en faisant passer une charge de référence connue,
- soit en faisant des acquisitions à distance sous le trafic réel.

Sous charge de référence, l'exploitation des mesures, pour retrouver par un calcul mécanique les caractéristiques des différentes couches de la structure ne pose pas de difficultés et permet d'avoir des informations pertinentes sur l'évolution du comportement d'une structure de chaussée. Toutefois, les contraintes liées aux mesures sont nombreuses, en particulier sur autoroute : nécessité d'utiliser un véhicule spécifique, de fermer les voies auscultées au trafic, d'être sur place pour réaliser les mesures. Cela pose donc des problèmes de sécurité pour les agents qui réalisent les mesures. De plus, au vu de la difficulté de faire les mesures, celles-ci ne peuvent être réalisées que ponctuellement (une ou deux fois par an).

Pour cette raison, on cherche à développer de plus en plus des suivis à distance, avec mesure sous le trafic réel. Ce type de suivi conduit cependant à des mesures très variables. En effet, elles sont affectées par les variations des charges qui passent et également par les variations climatiques

journalières et saisonnières. De plus, les caractéristiques des poids-lourd dont le signal a été enregistré (charge, type, vitesse, position transversale) ne sont généralement pas connues. Ce suivi génère également de grandes quantités de données, qu'il faut traduire par des indicateurs plus simples.

Le travail présenté dans ce rapport de thèse porte l'analyse de deux sites instrumentés par l'IFSTTAR en partenariat avec des gestionnaires routiers : Cofiroute et Colas. Ces sites instrumentés sont localisés sur l'autoroute A10 (Cofiroute) et sur l'autoroute Ax (Colas) (le nom de l'autoroute n'est pas cité pour des raisons de confidentialité). Ces sites ont été instrumentés au moyen de jauges de déformation, de géophones et de sondes de température. A partir des différents types de mesures, plusieurs objectifs ont été réalisés:

- Sur l'A10, les mesures sont réalisées sur site, de façon ponctuelle, avec un poids-lourd de charge connue. Le suivi de ces mesures a pour objectif d'étudier l'évolution du comportement des matériaux innovants mis en place. Un dispositif permet également de suivre en continu les mesures des sondes de température et des géophones. C'est la première fois qu'un tel système d'acquisition à distance a été testé par l'IFSTTAR sur une chaussée et les possibilités de ce système sont étudiées.
- Sur l'Ax, les mesures sont toutes réalisées en continu, sous trafic réel. Un traitement des réponses des jauges placées dans les différentes couches de chaussées est réalisé afin d'évaluer les performances mécaniques de la chaussée au cours du temps et de détecter des endommagements éventuels de ces couches (perte de module). Pour cela, une méthode originale de tri des signaux a été mise en place, afin de sélectionner les données pertinentes pour l'étude et réduire leur variabilité. Un travail de modélisation des mesures des jauges a également été mené, avec différents modèles, afin de mieux comprendre la réponse mécanique de la chaussée, et son évolution sous l'effet des variations de température.
- Sur l'Ax, une méthode permettant d'estimer, à partir des réponses individuelles des géophones et des jauges, les silhouettes et les vitesses des poids lourds passant sur la chaussée a été développée. Enfin, une méthode de traitement des mesures des géophones permettant de remonter des mesures de vitesse de déplacement fournies par ces capteurs à une mesure de la déflexion de la chaussée a été proposée.

Le **premier chapitre** de la thèse est consacré à l'étude bibliographique. Après une présentation des caractéristiques principales des différents types de structures de chaussées et de leurs mécanismes d'endommagements, il s'intéresse aux méthodes d'instrumentation des chaussées. Une présentation des différents types de capteurs utilisés pour l'instrumentation des chaussées est réalisée. La suite du chapitre présente un état de l'art sur les études réalisées sur différents sites instrumentés. Enfin, la dernière partie du chapitre est consacrée aux modèles de calcul de structures de chaussées et aux méthodes de dimensionnement des chaussées. Elle présente en particulier les outils de calcul qui seront utilisés dans la suite de la thèse.

Le **deuxième chapitre** présente les deux sites expérimentaux étudiés dans cette thèse. Il décrit les caractéristiques de ces deux sites et les structure des chaussées. Il présente ensuite les plans d'instrumentation, les caractéristiques des différents capteurs utilisés, et les systèmes d'acquisition et de transmission des données. Enfin les programmes de réalisation des mesures sont décrits en détail.

Le **troisième chapitre** est consacré à l'analyse des mesures des capteurs mis en place sur l'autoroute A10. Deux types de mesures sont effectués : des mesures ponctuelles sur site et des mesures à distance. Les mesures sur site concernent les mesures des jauges de déformation. Ce type de mesures a permis d'étudier l'évolution des propriétés de l'assise de chaussée, réalisée avec un matériau innovant et de suivre l'évolution de l'état structurel de la chaussée. Des calages avec un modèle de calcul élastique linéaire ont permis d'estimer les valeurs de module de l'assise, et leur évolution. Les mesures à distance concernent les mesures des sondes de température et des géophones. L'objectif était de tester la possibilité d'utiliser ce type de système d'acquisition pour suivre d'une part les variations de températures saisonnières et journalières et de définir, à partir des mesures des géophones, un indicateur de rigidité globale de la chaussée, et de suivre son évolution au cours du temps.

Suite aux résultats encourageants obtenus avec le système d'acquisition et de transmission des données à distance installé sur l'autoroute A10, un dispositif similaire a également été testé sur l'autoroute Ax, mais avec un nombre plus important de capteurs. L'objectif était de mieux évaluer les applications possibles de ce type de suivi, sous trafic réel, pour le monitoring des chaussées. La suite de la thèse porte sur le traitement des différents types de mesures réalisées sur le site de l'autoroute Ax.

Le **quatrième chapitre** présente l'analyse des mesures des jauges de déformation enregistrées sur le site de l'autoroute Ax, avec le système d'acquisition à distance, sous trafic réel. Afin de réduire la variabilité du trafic (charges des essieux, position des roues sur la chaussée...), une méthode de tri des signaux est proposée. Cette méthode est basée sur quatre critères de sélection: type des poids lourds, position latérale des poids lourds, qualité du signal et niveau de charge. L'estimation des charges est nécessaire pour faire des comparaisons entre les mesures et la modélisation. Afin de mieux comprendre le fonctionnement mécanique de la chaussée, des calculs ont été effectués avec un modèle élastique linéaire (logiciel Alizé) et un modèle viscoélastique (logiciel Viscoroute) avec différentes conditions d'interfaces. Ces calculs permettent de mieux comprendre l'évolution du comportement réel de la chaussée, sous l'effet des variations journalières et saisonnières de température.

Le **cinquième chapitre** propose une démarche de calcul de l'endommagement en fatigue de la section de l'autoroute Ax, prenant en compte les résultats du monitoring des déformations et des températures. Cette démarche constitue l'une des finalités du monitoring de la chaussée, qui est de comprendre comment la chaussée s'endommage, et quelles sont les situations (charges, conditions climatiques) les plus sévères du point de vue de l'endommagement, et également d'estimer sa durée de vie. Cette étape permet de prendre en compte les différents cas de modélisation étudiés dans le chapitre précédent (notamment les différentes hypothèses de comportement des interfaces en fonction de la température), et de comparer l'influence de ces hypothèses sur l'endommagement de la chaussée, et donc sur sa durée de vie. Les calculs sont simplifiés et ont été effectués sur une période limitée de 10 mois pendant laquelle les données de variation de températures et des propriétés des couches de chaussées ont été enregistrées en continu sans interruption.

Le **sixième et dernier chapitre** de la thèse présente l'exploitation des mesures des géophones réalisées sur l'autoroute Ax, afin d'obtenir différentes informations sur le trafic (silhouette des poids lourds, vitesses de passage). La deuxième partie de ce chapitre présente une méthode mise au point pour corriger les signaux des géophones, afin de remonter à la déflexion réelle de la chaussée, en vue de suivre l'évolution dans le temps de la déflexion.

Ces différents travaux répondent à une demande très actuelle des gestionnaires d'ouvrages routiers, qui souhaitent disposer d'outils pour le monitoring dans le temps de leurs infrastructures, tels que :

- Des indicateurs simples et pertinents relatifs au comportement de la structure (pour éventuellement éviter des désordres et prévoir des entretiens).
- Des indicateurs de l'agressivité du trafic, plus simples à mettre en œuvre et moins coûteux que les systèmes de pesage en marche des poids lourds.

Chapitre 1 – Recherche bibliographique

Sommaire

1	Chapitre 1 – Recherche bibliographique.....	9
1.1	Introduction	10
1.2	Caractéristiques des structures de chaussées	10
1.2.1	Composition des structure de chaussées	10
1.2.2	Modes d’endommagement des couches de chaussées.....	11
1.2.3	Différents types de chaussées utilisées en France	12
1.3	L’instrumentation des chaussées et les différents types de capteurs.....	13
1.3.1	Les jauges de déformation	14
1.3.2	Jauges de mesures des déformations horizontales (Blanc, et al., 2016)	14
1.3.3	Jauges de mesures des déformations verticales	19
1.3.4	Capteurs de pression.....	19
1.3.5	Les sondes de température	20
1.3.6	Les capteurs de mesure de déplacement.....	21
1.4	Les sections routières instrumentées	26
1.4.1	Site instrumenté dans les Yvelines (Pouteau & Mazé, Mai 2012)	27
1.4.2	Site instrumenté sur l’A41N (Gaborit, et al., 2013).....	28
1.4.3	Tronçon de la Route 15 de Guildford, Maine, USA (Swett, et al., Octobre 2008)	30
1.4.4	Section expérimentale à Ottawa, Canada (Région froide) (Maadani, et al., 2015).....	32
1.4.5	Projet d’instrumentation: Virginia Smart Road (Al-Qadi, et al., 2004)	34
1.4.6	Section expérimentale de la Virginia State Road 114 (Xue, et al., 2013).....	36
1.4.7	Section expérimentale en Chine (Ai, et al., 2016).....	40
1.4.8	Conclusion sur les expérimentations sur chaussées.....	41
1.5	Méthodes de dimensionnement de chaussées.....	42
1.5.1	Méthodes empiriques	42
1.5.2	Méthodes mécaniques-empiriques.....	44
1.5.3	Méthode Française de dimensionnement.....	44
1.5.4	Méthode incrémentale.....	48
1.6	Modélisation du comportement mécanique de chaussées	49
1.6.1	Modèles mécaniques de chaussées	49
1.6.2	Logiciels de calcul de structures de chaussées utilisés	57

1.1 Introduction

L'objectif de ces travaux est de développer des méthodes d'analyse des mesures réalisées sur des sections de chaussées instrumentées, dont le suivi est fait sous trafic réel. Afin de mieux poser la problématique de la thèse, cette étude bibliographique aborde successivement :

- Les caractéristiques des structures de chaussées et les principaux types de structures rencontrées en France
- Le fonctionnement mécanique des structures de chaussées et leurs mécanismes d'endommagement
- Les différents types de capteurs utilisés pour l'instrumentation des chaussées et leurs principes de fonctionnement.
- Les expérimentations sur chaussées instrumentées.
- Les modèles utilisés pour le calcul des structures de chaussées et le dimensionnement des chaussées.

1.2 Caractéristiques des structures de chaussées

1.2.1 Composition des structure de chaussées

Une chaussée est une superposition de couches de matériaux de construction, de différentes épaisseurs, destinée à répartir les charges du trafic routier sur le sol support. Elle permet le déplacement des usagers et le transport des marchandises, quelles que soient les conditions météorologiques, dans des conditions de sécurité et de confort adapté au type d'itinéraire.

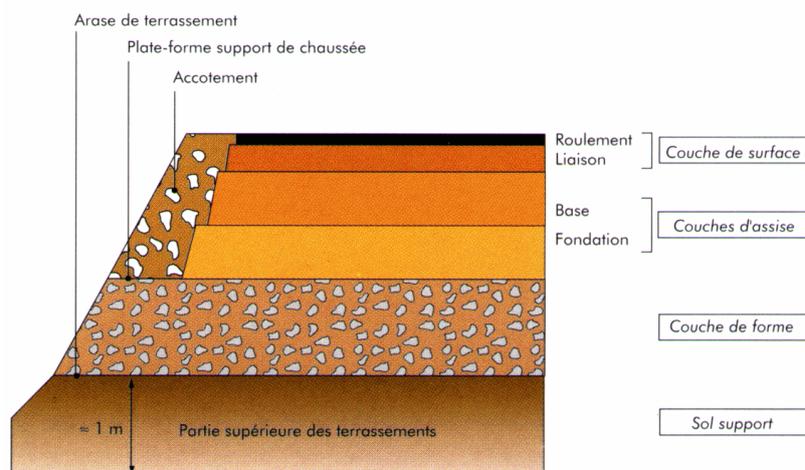


Figure 1.1. Structure d'une chaussée

Une chaussée est constituée de trois couches principales: (LCPC-SETRA, 1994)

- **La couche de surface** est la couche la plus haute dans la structure de chaussée. Cette couche peut être constituée de deux couches: la couche de roulement et la couche de liaison. La première permet de résister aux actions du climat et du trafic. Elle permet d'assurer l'étanchéité et l'adhérence. La deuxième couche est située en-dessous de la couche de roulement. Sa fonction est d'assurer l'étanchéité et la résistance à l'orniérage. C'est à l'interface entre la couche de surface et la couche d'assise que l'on trouvera éventuellement les dispositifs visant à ralentir la remontée des fissures des couches d'assises traités aux liants hydrauliques.
- **La couche d'assise** peut-être constituée de deux couches: la couche de base et la couche de fondation. Elles apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.
- **La couche de forme** est la couche la plus basse dans la structure de chaussée. Elle permet de transférer les efforts entre le sol et le corps de chaussée. À court terme, elle joue un rôle important lors de la construction de la chaussée: avant la mise en œuvre des couches d'assises, elle assure une protection du sol contre les intempéries, un nivellement pour la circulation de chantier, une amélioration et une homogénéisation de la portance, et enfin un nivellement pour la mise en œuvre de la couche de fondation. À long terme, elle permet d'améliorer et d'homogénéiser la portance, et assure la protection thermique du sol.

1.2.2 Modes d'endommagement des couches de chaussées

Les modes d'endommagement les plus courants des couches de chaussées sont présentés ci-dessous: (LCPC-SETRA, 1994)

Couche de roulement

- Orniérage par fluage dans les conditions excessives de température et de sollicitations par le trafic.
- Fissuration par remontée des fissures des couches d'assises de chaussée.
- Fissuration de fatigue par suite d'une mauvaise adhérence de la couche de roulement bitumineuse à l'assise.
- Usure due aux efforts tangentiels exercés par les charges roulantes.
- Fissuration par fatigue thermique suite à un vieillissement du bitume.

Couche d'assise

- Fissuration de fatigue due à la répétition des efforts de traction par flexion aux passages des charges.
- Fissuration due aux gradients thermiques des dalles de béton.
- Fissuration de prise et de retrait thermique des graves traitées aux liants hydrauliques et des bétons.
- Pompage et décalage de dalles dans les couches présentant des fissures de retrait ou des joints, du fait d'une mauvaise qualité du transfert de charge et de l'érodabilité du support.

Couches d'assise non liées et support de chaussée

- Déformations permanentes de la structure (affaissement, orniérage...) dues au cumul de déformations plastiques

1.2.3 Différents types de chaussées utilisées en France

Les différents types de chaussées employées en France sont schématisés sur la Figure 1.2. Ils se répartissent en 6 catégories: chaussées souples, chaussées bitumineuses épaisses, chaussées semi-rigides, chaussées rigides, chaussées à structure mixte et chaussée à structure inverse. (Goacolou, et al., 2003) (LCPC-SETRA, 1994)

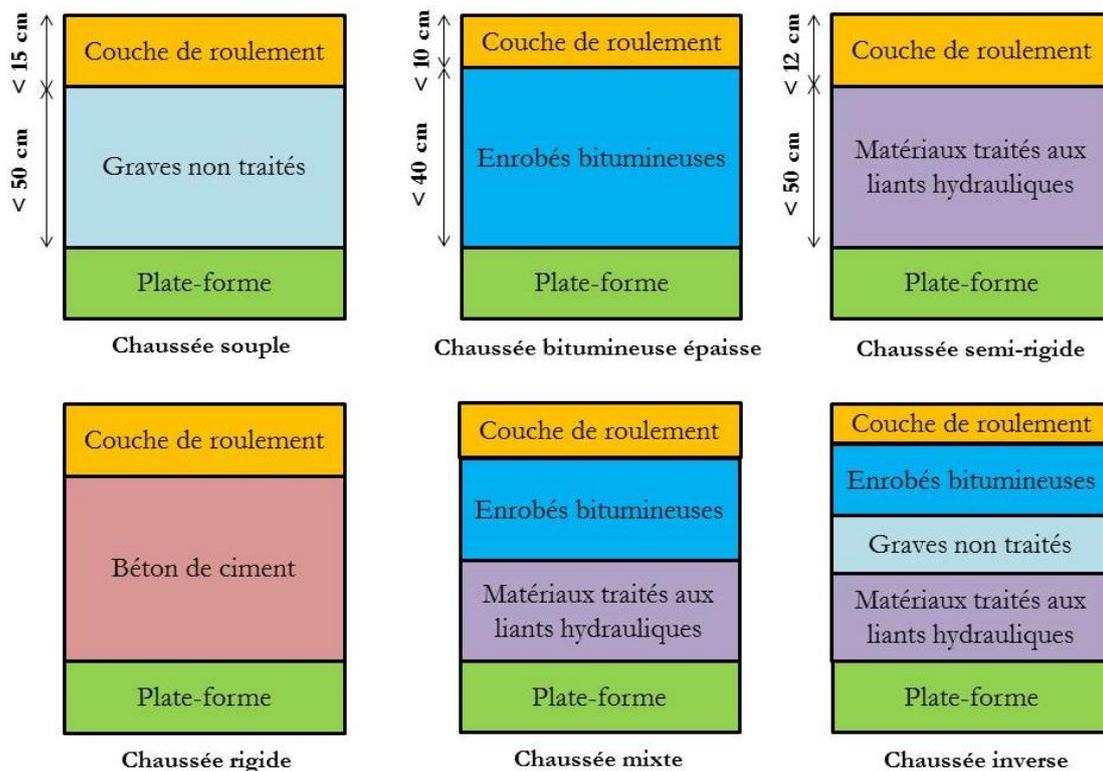


Figure 1.2. Différents types de chaussées utilisés en France

Chaussée souple

Ce type de structure se compose d'une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur générale de ces structures est comprise entre 30 et 60 cm. Ce type de structures est réservé pour les chaussées à faible et très faible trafic et constitue la majorité du réseau routier français.

Chaussée bitumineuse épaisse

Ce type de structure se compose d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, constitué d'une ou de deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est généralement comprise entre 15 et 40 cm. Ce type de chaussées peut supporter tout type de trafic. De plus, cette structure étant facile à

entretenir (ajout d'une nouvelle couche sur la structure existante, précédé ou non d'un rabotage), elle constitue la solution la plus courante sur les autoroutes françaises.

Chaussée semi-rigide

Elle se compose d'une couche de surface bitumineuse reposant sur une couche d'assise en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur de l'assise est généralement comprise entre 20 et 50 cm. Du fait de la forte rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, cette structure est capable de supporter un très fort trafic. Cependant, les matériaux traités aux liants hydrauliques sont susceptibles aux phénomènes de retrait thermique, ou de prise, qui conduisent à une fissuration transversale des couches. Ces fissures remontent ensuite à travers la couche de roulement bitumineuse.

Chaussée rigide

Ce type de structure se compose d'une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (qui peut être en matériaux traités aux liants hydrauliques, en béton de ciment, ou drainante non traitée), soit directement sur le support de chaussée avec interposition fréquente d'une couche bitumineuse. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu) ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints.

Chaussée à structure mixte

Elle se compose d'une couche de roulement et d'une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les épaisseurs des couches bitumineuses et traitées aux liants hydrauliques sont du même ordre de grandeur (rapport 1/1) afin de résister à la remontée des fissures de retrait initiées dans la couche traitée aux liants hydrauliques. La couche bitumineuse assure la protection de la couche de fondation vis-à-vis du trafic, de l'eau et des sollicitations thermiques.

Chaussée à structure inverse

Ce type de structure se compose d'une couche de roulement bitumineuse d'environ 15 cm, sur une couche en grave non traitée d'environ 12 cm reposant sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale de la structure est comprise entre 60 et 80 cm. L'insertion d'une couche en grave non traitée permet d'empêcher la propagation de la fissuration des matériaux traités aux liants hydrauliques vers les matériaux bitumineux.

1.3 L'instrumentation des chaussées et les différents types de capteurs

Avec les progrès des outils d'acquisition de données et des capteurs, et la réduction des coûts de ces équipements, l'instrumentation est de plus en plus utilisée pour suivre le comportement des chaussées, et valider les modèles de calcul et de dimensionnement des structures de chaussées. On présente ci-dessous les principaux types de capteurs utilisés. Les plus courants sont les jauges de déformation, utilisées pour mesurer les déformations horizontales ou verticales dans les couches de chaussées, et qui permettent d'estimer les modules des couches, ainsi que les sondes de température; mais d'autres types de capteurs commencent également à être utilisés, tels que les accéléromètres ou les géophones.

1.3.1 Les jauges de déformation

Les capteurs à jauges sont classiquement utilisés pour mesurer les déformations horizontales des couches de chaussées. Avec le développement de l'instrumentation des chaussées, de nombreux types de jauges ont été successivement développés. On peut distinguer deux catégories principales de jauges :

- Les jauges horizontales: Ces jauges sont placées dans les couches traitées (bitumineuses ou aussi traitées aux liants hydrauliques). Elles permettent de mesurer les déformations longitudinales et transversales de ces couches.
- Les jauges verticales: Ces jauges sont placées dans les couches de matériaux non liés. Elles permettent de mesurer les déformations verticales de ces couches, qui sont utilisées comme critère de dimensionnement dans de nombreuses méthodes

Pour assurer un bon ancrage des jauges dans les couches de chaussées, celles-ci sont généralement installées lors de la construction. Elles doivent donc être suffisamment robustes pour résister aux sollicitations dues au compactage, et aux températures élevées de mise en œuvre (160 à 180 °C) dans le cas des enrobés bitumineux.

1.3.2 Jauges de mesures des déformations horizontales (Blanc, et al., 2016)

1.3.2.1 Jauges avec support en résine

Ces jauges sont les premiers capteurs de déformation qui ont été utilisés sur le manège de fatigue à l'IFSTTAR. Ces jauges, de marque Kyowa (jauge 120 Ohms, modèle KM-120-120-h2-11W1M3) sont constituées d'un barreau de résine, instrumenté à l'aide d'une jauge de déformation placée dans sa partie centrale. Elles sont conçues, à l'origine, pour les mesures internes dans les bétons. L'étendue de mesures est de $\pm 2000 \mu\text{def}$. Le barreau en résine, d'une longueur de 120 mm, est étanche. Afin de créer un système d'ancrage permettant de fixer les jauges dans les couches d'enrobé, deux barreaux en aluminium sont ajoutés à chaque extrémité de la jauge. (Figure 1.3)

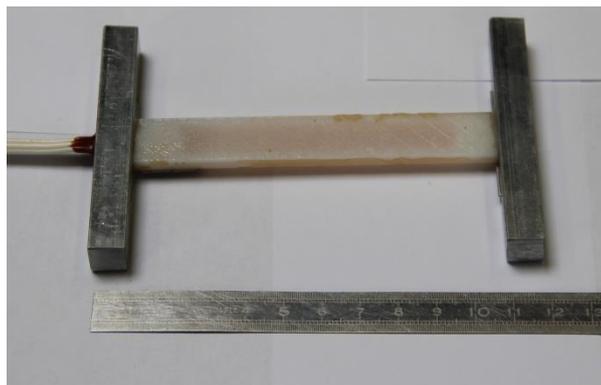


Figure 1.3. Jauge de déformation horizontale Kyowa, en résine, avant protection

Pour les applications sur le manège de fatigue, afin d'améliorer la résistance de ces jauges aux conditions de mise en œuvre dans les enrobés, des éléments de protection ont été ajoutés : la jauge est d'abord protégée avec une résine résistant aux températures élevées. En plus, deux lames métalliques sont scotchées sur cet isolant afin de protéger la jauge du poinçonnement dû aux granulats (Figure 1.4). La résine utilisée, la Loctite AS 312, est un adhésif élastomère de

silicone mono-composant qui résiste à des hautes températures. Le prix de revient total est d'environ 120 euros.



Figure 1.4. Jauge de déformation Kyowa avec la résine de protection

Ce type de capteurs a été mis en place récemment à la base des couches d'enrobé sur un site expérimental sur l'autoroute A75, près de Saint-Chély-d'Apcher (Lozère) en 2012. Sur ce site, environ 40% des capteurs ont été cassés lors de la construction. Ce taux d'endommagement élevé a confirmé (après d'autres observations), la fragilité de ce type de barreau en résine, lorsque les couches de chaussées sont soumises à une énergie de compactage élevée. De plus, d'autres expériences d'instrumentation dans des couches d'enrobé à module élevé (EME) ont également montré que ces jauges résistent mal aux températures de mise en œuvre très élevées de ce type d'enrobés (de l'ordre de 180°C). Pour cette raison, des jauges plus résistantes ont été développées, avec un support en aluminium.

1.3.2.2 Jauges avec support en aluminium

Ces jauges, fabriquées manuellement par l'équipe technique du manège de fatigue, sont constituées d'une jauge de déformation (type HBM, longueur de 20 à 50 mm), collée, au moyen d'une colle à jauge adaptée, sur une lame en aluminium de 120 mm de longueur (Figure 1.5). Deux barreaux en aluminium sont ajoutés aux extrémités, afin d'assurer l'ancrage dans le matériau.

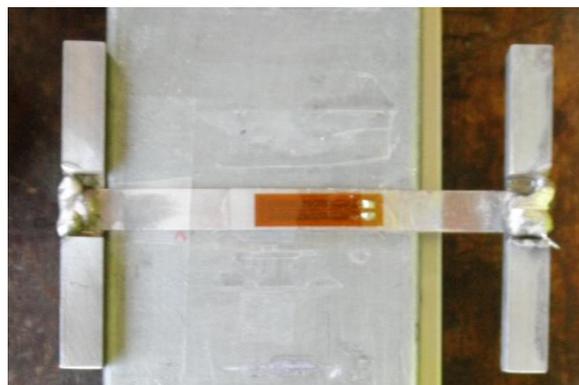


Figure 1.5. Jauge de déformation horizontale en aluminium (longitudinale ou transversale) sans protection

Ce barreau est câblé, puis protégé comme les jauges Kyowa par une résine résistant aux températures élevées (Figure 1.6). Le prix de revient est d'environ 80 euros.



Figure 1.6. Jauge de déformation horizontale en aluminium avec protection

Ce genre de capteurs a été mis en place à la base des couches d'enrobés sur le site de l'A10, près de Dourdan (Essonne) (Sohm, et al., Mai 2012). Cependant, deux problèmes ont été rencontrés :

- On a constaté que ce type de capteur avait tendance à sous-estimer les déformations mesurées à haute température. Cela a été expliqué par le fait qu'à haute température, la rigidité du barreau en aluminium devient trop élevée par rapport au module des couches bitumineuses, qui diminuent fortement à haute température.
- Sur site, on a de nouveau observé un taux d'endommagement élevé de ces capteurs à la mise en œuvre (jusqu'à 75 % de capteurs endommagés), sans doute à cause de la forte intensité de compactage. Sur les essais réalisés sur manège de fatigue où des précautions sont prises lors du compactage (pas de vibration durant les premières passes), le pourcentage de perte était de l'ordre de 50%.

1.3.2.3 Jauges de type TML

Un troisième type de capteurs de déformations est maintenant utilisé sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR: les jauges KM-100HAS de la marque TML (Tokyo Sokki Kenkyujo). Ces capteurs sont composés de 4 jauges de 350 Ohms, montées en pont complet. Ces jauges sont collées sur une lame mince qui est protégée par un tube métallique et des bandes de matériau de type Téflon. Deux barreaux métalliques sont fixés à chaque extrémité pour former un système d'ancrage en H (Figure 1.7). L'avantage de ces capteurs est leur très bonne résistance à la température et aux chargements dus au compactage, ainsi que leur étanchéité. En plus, ils présentent une très faible raideur (40 Mpa), ce qui permet des mesures très fiables même pour des températures élevées d'enrobés. Ces capteurs sont livrés « prêts à être utilisés », avec des barreaux d'ancrage et un câble de connexion. Leur prix de revient est de 350 euros.

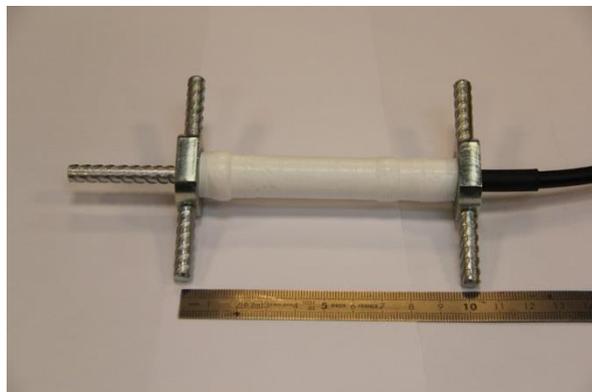


Figure 1.7. Jauges horizontales de type TML

Ces capteurs ont été mis en place par l'IFSTTAR sur plusieurs sites autoroutiers depuis 2012:

- A75 (pour l'opération de recherche CClear, juin 2012): 4 jauges mises en place à l'interface entre deux couches. (Mauduit, et al., 2013)
- Ax, section concédée (partenariat Ifsttar – Colas, septembre 2013): 16 jauges mises en place dans la couche de base et la couche de liaison. (Duong, et al., 2017)
- A63, section non concédée (partenariat Ifsttar-DIR A – Cerema/LR de Bordeaux, septembre 2014): 5 jauges mises en place.
- Deux sites sur la ligne à grande vitesse Bretagne-Pays de la Loire (LGV BPL) (partenariat Ifsttar – Eiffage – SNCF Réseau – Railenium – Sétec, avril-mai 2015): 16 jauges mises en place (8 par site).
- RN 164 (partenariat Ifsttar – DIR Ouest – Cerema/LR de Saint-Brieuc, juin 2015) : 8 jauges mises en place dans de la grave émulsion.

Presque aucune perte de jauges n'a été observée jusqu'à présent sur ces différents chantiers. Les retours d'expériences montrent également que des jauges TML mises en place il y a trois ans sur site fonctionnent toujours. Enfin, ces jauges présentent encore d'autres avantages:

- Elles sont moins sensibles aux variations de température car elles sont montées en pont complet.
- leur construction est particulièrement robuste et elles sont parfaitement étanches.
- Chaque capteur fait l'objet d'un étalonnage par le fabricant.

Aux États-Unis, ces capteurs ont également été utilisés dans plusieurs projets d'instrumentation, au NCAT (National Center for Asphalt Technology) (David, et al., 2004) (Willis & Timm, Octobre 2009), au Kansas (Athar Saeed & Jim Hall, 2003) (Hossain, et al., 2012) en Louisiane (Mostafa Elseifi, 2009) et sur la piste d'essai de Minnroad (Lukanen, Novembre 2005) (Worel & Clyne, 2012)...

1.3.2.4 Autres types de jauges de déformation

D'autres types de jauges de déformations n'ont jamais été testés par l'Ifsttar, mais sont utilisées dans d'autres projets.

Fabriqués par le Laboratoire CTL (Construction Technology Laboratories), les capteurs de déformation de type CTL sont composés d'une tige vinyle sur laquelle sont collées quatre jauges. L'ensemble est ensuite recouvert de matériaux protecteurs qui assurent une bonne résistance mécanique. Deux barreaux métalliques sont positionnés aux deux extrémités, pour former un système d'ancrage en H. Les jauges CTL sont de deux types : la jauge ASG-152 utilisée pour mesurer les déformations horizontales et la jauge ASG-VS utilisée pour mesurer les déformations verticales (CTLGroup, s.d.) (Figure 1.8). L'étendue de mesures est de $\pm 1500 \mu\text{def}$.



Figure 1.8. Jauges de déformation CTL (ASG-52: horizontale; VS: verticale)

Ces capteurs ont été mis en place sur piste d'essai de NCAT (National Center for Asphalt Technology) (Willis & Timm, Octobre 2009). En France, ils ont été utilisés sur l'A41N reliant Annecy et Chambéry, lors d'une instrumentation réalisée par Eiffage (Gaborit, 2015).

Un autre type de capteur, de marque Dynatest (jauges PAST-2AC) est couramment utilisé aux États-Unis. Ces capteurs sont composés d'un barreau en fibre de verre renforcée avec de l'époxy, équipé de jauges. Le barreau est protégé avec différents matériaux et fixé à un système d'ancrage en forme de H. Sa fabrication est similaire à celle des jauges en résine utilisées sur le manège de fatigue, mais plus élaborés. Ces jauges sont régulièrement utilisées sur la piste d'essai de MinRoad (Lukanen, Novembre 2005) (Worel & Clyne, 2012) et sur un simulateur de trafic dans l'Ohio. (Khoury, et al., 2012).

1.3.2.5 Mise en place des capteurs de déformation

La pose des capteurs de déformation est une opération délicate, les capteurs devant être installés au cours de la construction des couches bitumineuses. Ils sont généralement posés à la base des couches d'enrobés où les déformations sont les plus importantes. Les déformations dans les couches bitumineuses variant fortement avec la position (verticale et horizontale), Ils doivent être parfaitement positionnés et alignés, pour obtenir une mesure précise. En France, l'équipe du manège de fatigue de l'IFSTTAR a une expérience importante concernant la pose de jauges d'extensométrie dans les chaussées (Sohm, et al., Mai 2012). Les jauges de déformation doivent être mises en place au moment de la mise en œuvre des couches bitumineuses, juste avant le passage du finisseur. La procédure de pose comprend les étapes suivantes :

- On définit précisément l'implantation des jauges.
- L'emplacement des jauges est marqué avec une bombe de peinture.
- Les jauges et leurs câbles sont positionnés à l'emplacement choisi; un adhésif peut être utilisé pour les maintenir en place.
- Un peu d'enrobé (non tamisé) est prélevé et utilisé pour recouvrir les jauges.
- L'enrobé est pré-compacté manuellement autour des jauges.
- Les câbles sont également recouverts avec de l'enrobé, que l'on compacte manuellement, afin de les protéger.
- Enfin, le finisseur met en place la couche d'enrobé, puis celle-ci est compactée.

Il faut placer les jauges en dehors des zones de passage des chenilles du finisseur qui pourraient les déplacer ou les endommager, et il est conseillé d'effectuer les premiers passages du compacteur sans vibrer pour ne pas casser les jauges. Il est à noter que ces jauges peuvent subir des déformations importantes lors de la phase de compactage (Mostafa Elseifi, et al., 2012). Le taux de survie des capteurs peut être amélioré par le tamisage et le compactage manuel des matériaux placés autour de ceux-ci. Cependant, cette opération peut potentiellement faire augmenter les mesures de déformations, surtout lorsque la structure de chaussée est mince et que le module des couches est faible. (Leiva-Villacorta & Timm, 2012). Les jauges de déformations horizontales sont généralement placées dans les bandes de roulement afin de mesurer les déformations sous passage des poids lourds et éventuellement une évolution des déformations, due à l'endommagement de la structure, sous le trafic cumulé des poids lourds.

1.3.3 Jauges de mesures des déformations verticales

Les jauges de mesures de déformations verticales utilisées dans les projets d'instrumentation de l'IFSTTAR sont les jauges de type Kyowa KM-120-120-H211W1M3. Comme les jauges horizontales de type Kyowa présentée ci-dessus, ces capteurs sont constituées d'un barreau de résine, instrumenté à l'aide d'une jauge de déformation placée dans sa partie centrale. Ils sont ensuite munis de disques de 8 cm de diamètre aux extrémités, assurant l'ancrage dans le matériau. Ces capteurs sont généralement placés dans la partie supérieure du sol support, ou également dans la partie supérieure des couches de GNT. Ces jauges sont placées de la façon suivante :

- Après la mise en place et le compactage du sol ou de la couche de GNT, un trou vertical est creusé dans la couche.
- La jauge est placée dans le trou, et l'espace autour de la jauge est rempli avec le matériau excavé (éventuellement tamisé, s'il contient de gros éléments), et celui-ci est compacté manuellement avec une dame.
- Le dessus de la jauge est également recouvert avec le même matériau, et celui-ci est compacté manuellement.



Figure 1.9. Mise en place des jauges de déformations verticales au sommet du sol support

1.3.4 Capteurs de pression

1.3.4.1 Principe de fonctionnement

Les capteurs de pression (ou de contraintes totales) sont utilisés pour mesurer les contraintes verticales dans les couches de chaussées, notamment dans les matériaux non liés. Ils sont

beaucoup utilisés dans les projets d'instrumentation aux Etats-Unis (Al-Qadi, et al., 2004) (Swett, et al., Octobre 2008) (Maadani, et al., 2015). Ce type de capteur est constitué de deux plaques circulaires en acier. L'espace entre ces plaques est rempli par un liquide. Le liquide est connecté à un capteur de pression par un tube en acier. (Figure 1.10).

1.3.4.2 Procédure de mise en place des capteurs

Une procédure de mise en place des capteurs de pression verticale, proposée par (Al-Qadi, et al., 2004) est présentée ci-dessous:

- Une excavation est réalisée dans la couche non-liée qui doit être instrumentée. Le diamètre de ce trou doit être légèrement supérieur à celui du capteur.
- Tous les grains de diamètre supérieur à 6mm à la base de ce trou sont ensuite enlevés. Le lissage de la surface est assuré par une dame.
- Une petite couche de sable est mise dans le fond du trou. Le lissage de cette couche est également assuré par une dame.
- Le capteur est positionné sur cette couche de sable. Afin d'assurer un bon contact, la face sensible du capteur doit être positionnée vers le bas. Le nivellement du capteur doit être également vérifié.
- Le capteur est ensuite recouvert par le sol précédemment enlevé pour l'excavation avant le compactage manuel.



Figure 1.10. Capteur de pression

1.3.5 Les sondes de température

Les sondes de température sont utilisées pour mesurer les températures des couches de chaussées. Leur principe de fonctionnement est basé sur la transformation de l'effet de la variation de température sur leurs composants en un signal électrique. Deux types de capteurs de température sont utilisés :

- les capteurs à thermocouple;
- les capteurs à résistance de platine.

Les sondes de température sont généralement placées à différentes profondeurs dans les couches de chaussées (par exemple à chaque interface entre couches) afin de pouvoir suivre l'évolution du profil de température sur toute l'épaisseur de la structure.

1.3.6 Les capteurs de mesure de déplacement

Les mesures de déplacement sont très utilisées car elles permettent de déduire un grand nombre de grandeurs physiques (vitesse, accélération...). Il existe deux types de capteurs de déplacement: les capteurs de déplacement relatif et les capteurs de déplacement absolu (Donnat, 1965).

Les capteurs de déplacement relatif les plus utilisés sont: les LVDT (Linéaire Variable Différentiel Transformer), les capteurs à courants de Foucault, les interféromètres et les fibres optiques à réseau de Bragg (Colette, 2011). Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1. Caractéristiques des capteurs de déplacement relatif (Colette, 2011)

Technologie	Fréquence (Hz)	Gamme	Taille (cm)	Gamme de température (°C)
LVDT	DC-200	1-10 mm	1	-50, 100
Courants de Foucault	5k	0.5-50 mm	1	-50, 100
Capacitive	DC-100k	50 nm-1 cm	0.5-1	-40, 120
Interféromètre	300k	10 cm	1	-250, 100
Codeur	DC-1M	7-27	3x3.5	0-40
Fibres Bragg	DC-150	3.5 mm	10	-30, 80

Généralement, le mot « absolu » est utilisé pour exprimer une mesure relative par rapport à une référence d'inertie. Ce genre de capteur, dit souvent capteur d'inertie, ne permet d'effectuer des mesures d'une quantité absolue (déplacement, vitesse ou accélération) que dans une certaine gamme de fréquence. Il existe trois types de capteur de déplacement absolu: le géophone, l'accéléromètre et le sismomètre (Collette, et al., 2012). Les améliorations de ce genre de capteur portent principalement sur la réduction des prix, la diminution des bruits de fond, l'augmentation de la sensibilité et la résolution du système.

1.3.6.1 Le géophone

L'utilisation des géophones est très variée. Ils sont par exemple utilisés pour détecter automatiquement des objets en mouvement qui peuvent être considérés comme des sources sismiques (Chang & Cui, 2013). En géophysique, ils servent à mesurer le temps de propagation des ondes sismiques (Oome, et al., 2009). Ils sont également beaucoup utilisés dans le domaine sismique pour détecter des séismes, des champs de gaz....

Les géophones peuvent être classés en deux catégories: les géophones mécaniques et les géophones électromagnétiques (Oome, et al., 2009). Les géophones électromagnétiques sont plus utilisés. Ceux-ci permettent de convertir la vitesse de déplacement de l'objet en une tension (Oome, et al., 2009). Le géophone est composée d'une masse suspendue par un système de ressort et entourée d'une bobine (Figure 1.11).

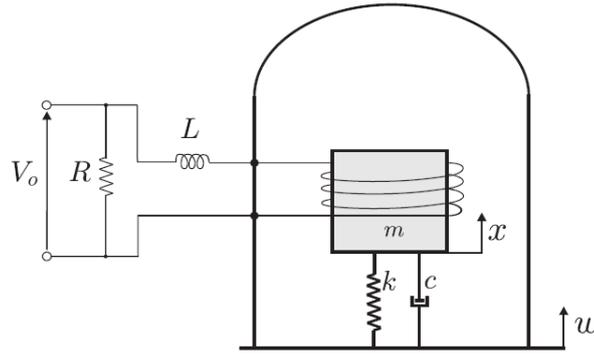


Figure 1.11. Principe de fonctionnement du géophone

Le principe du fonctionnement du géophone est simple. Lorsqu'une vitesse est imposée dans la direction x et que la fréquence est inférieure à celle de résonance, la masse suspendue et le boîtier du géophone commencent à se déplacer. Par contre, si cette fréquence est supérieure à celle de résonance, le boîtier est le seul élément qui bouge. Le déplacement relatif entre la bobine et la masse dans le champ magnétique va induire un courant qui circule dans le système. La tension de sortie du géophone est proportionnelle à la vitesse de déplacement mesurée par celui-ci.

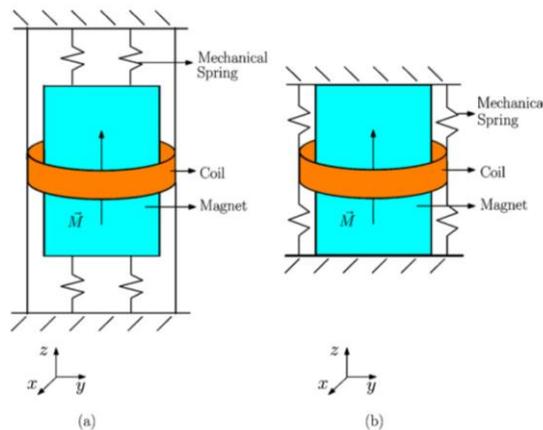


Figure 1.12. Géophones électromagnétiques

La Figure 1.12a montre un déplacement de l'aimant quand la bobine est fixée et la Figure 1.12b montre une configuration inverse. Le fonctionnement des géophones électromagnétique est basé sur la loi de Faraday :

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.1)$$

Où E représente l'intensité du champ électrique et B représente la densité du flux magnétique. L'équation (*) peut s'écrire sous la forme :

$$\oint_C E \, dl = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_S B \, dS \quad (1.2)$$

Plus précisément, d'après la Figure 1.11, les équations d'équilibre du système s'écrivent :

Pour la partie mécanique : $m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{w}) + k(x - w) + T\dot{q} = 0$ (1.3)

Pour la partie électrique : $L\ddot{q} - T(\dot{x} - \dot{w}) + R\dot{q} = 0$ (1.4)

Le géophone est caractérisé par sa fréquence de résonance (fréquence propre), par son coefficient d'amortissement et par sa bande passante. Pour un fonctionnement optimal, la fréquence imposée doit être supérieure à la fréquence de résonance que l'on cherche à diminuer. La bande passante est définie par l'intervalle entre la fréquence de résonance propre (f_r) et la fréquence de fausse résonance (f_{sp}).

La fréquence propre est définie par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$
 (1.5)

Où k est la raideur du ressort et m représente la masse suspendue.

La fausse résonance dépend strictement des propriétés mécaniques du ressort. Le géophone ne répond pas aux sollicitations horizontales ce qui n'induit donc pas de déplacement vertical relatif entre la masse et la bobine. Cependant, en pratique, lorsque les sollicitations horizontales sont suffisamment élevées, ce déplacement vertical peut se produire, ce qui est caractérisé par la fausse fréquence de résonance du système (Oome, et al., 2009) (Ling, et al., 1990). Dans ce cas, les performances du géophone sont limitées par la fausse fréquence de résonance (f_{sp}). Et, celle-ci est limitée par la fréquence propre en basse fréquence (Figure 1.13).

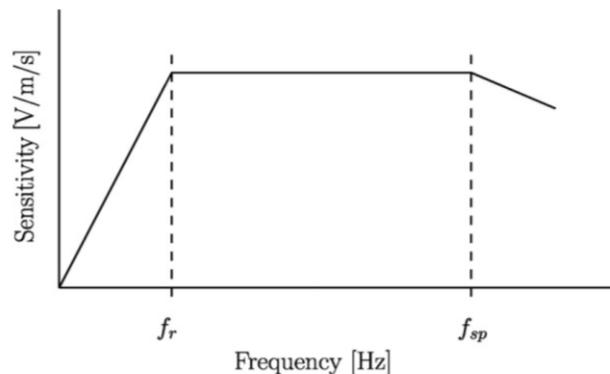


Figure 1.13. Courbe de réponse d'un géophone (Oome, et al., 2009)

Les propriétés de certains géophones commerciaux sont présentées dans le Tableau 1.2. (Colette, 2011)

Tableau 1.2. Propriétés des différents types de géophones commerciaux (Colette, 2011)

Type	Range (Hz)	Fréquence propre (Hz)	Sensibilité (V/m/s)	Poids (g)	Taille (cm)
GS1	1-	1	40	2000	16x7.5
SN4-1V	1-	1	-	-	-
LF-24	1-240	1	15	170	3.4x6.5
GS11D	4.5-	4.5	94.4	111	3.35x3.18
JF-20DX	8-180	8	23	87	2.5x3.4
L4C	1-	1	276	2.1	7.6x13
SM-4 UB8	8-160	8	28.8	75	2.54x3.2
SM-6(UB 8 10 14)	8-150	8	28.8	81	2.54x3.6
G.GS-11D	4.5-	4.5	3.2	110	3.3x3.5

Les géophones utilisés sur les sites expérimentaux A10 et Ax sont ceux de type GS11D.

1.3.6.2 L'accéléromètre

L'accéléromètre est un capteur qui sert à mesurer l'accélération linéaire selon une ou plusieurs directions. L'accéléromètre simple mesure la composante de l'accélération dans une direction particulière (1D). Si trois accéléromètres sont liés dans un même capteur, il est alors possible de mesurer l'accélération dans trois directions orthogonales (3D).

L'accélération est mesurée de manière indirecte par: (Allian Tech, 2010)

- le déplacement sismique du capteur (quelques μm) ;
- ou par la force inertielle induite par l'accélération de la masse sismique du capteur.

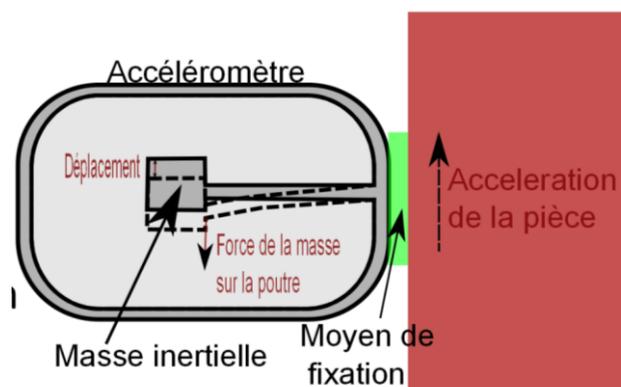


Figure 1.14. Schéma d'un accéléromètre

Un accéléromètre est caractérisé par sa pleine échelle, sa bande passante (la bande à laquelle le capteur fonctionne, normalement, elle est 1/3 de la fréquence de résonance), sa sensibilité, sa masse, son nombre d'axes de mesure et sa résistance à l'environnement. Il existe trois types d'accéléromètres :

- Accéléromètre piézoélectrique ;
- Accéléromètre piézorésistif ;
- Accéléromètre captif.

1.3.6.2.1 Accéléromètre piézoélectrique

La plupart des accéléromètres fonctionne sur l'effet piézoélectrique (propriété de certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une force: des charges apparaissent alors sur les faces du cristal). Généralement, le cristal de quartz est utilisé. L'accéléromètre piézoélectrique présente plusieurs caractéristiques: (National Instruments, s.d.)

- Une large gamme de fréquence et d'accélération ;
- Taille très variable, adaptée à la configuration d'essai (0.2g pour le plus petit) ;
- Utilisation possible pour la mesure de chocs moyens et vibration ;
- Stabilité dans le temps ;
- Robustesse et fiabilité dues à l'absence de pièces mobiles ;

1.3.6.2.2 Accéléromètre piézorésistif

L'accéléromètre piézorésistif est constitué d'une masse sismique M et d'une lame de rappel élastique équipée de 2 ou 4 jauges piézorésistives montées dans un pont de Wheatstone. Ces jauges mesurent la flexion de la lame soit directement comme le cas des accéléromètres à basse fréquence, soit indirectement en association avec un amplificateur mécanique comme le cas des accéléromètres moyenne fréquence ou de choc.

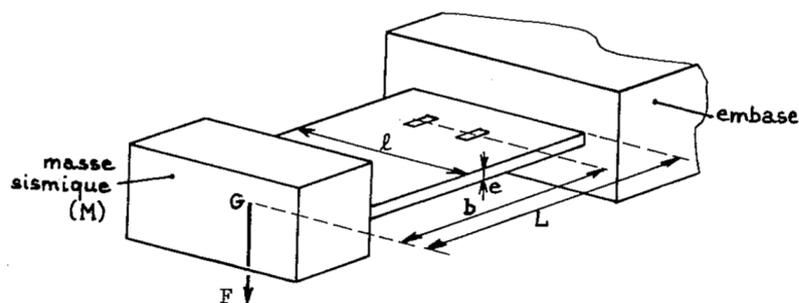


Figure 1.15. Schéma d'un accéléromètre piézorésistif

Ce type d'accéléromètre a les caractéristiques suivantes: (Allian Tech, 2010)

- Une faible sensibilité qui est utile pour mesurer des chocs de longue durée ;
- Une grande bande passante continue ;
- Facile à conditionner (pont de jauge) ;
- Faible tolérance à la surcharge mécanique (fragile) ;
- Dérive notable en température.

1.3.6.2.3 Accéléromètre captif

La variation de la capacité entre deux électrodes permet d'induire un déplacement de la masse inertielle. Contrairement à l'accéléromètre piézorésistif, cet appareil a une grande sensibilité, ce qui permet de mesurer des déplacements ou des vibrations à basses fréquences. Sa bande passante est limitée mais continue. Il dérive peu en température. Outre une technologie robuste, il est également facile à conditionner et peu sensible aux perturbations extérieures. (Allian Tech, 2010)

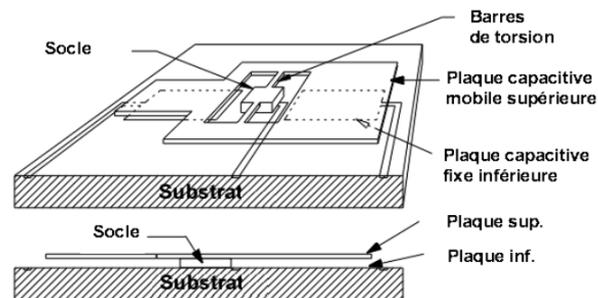


Figure 1.16. Schéma d'un accéléromètre capacitif

Les accéléromètres ont récemment été utilisés dans le domaine de l'instrumentation de chaussées, en visant deux objectifs :

- La contribution au monitoring des propriétés mécaniques des couches de chaussées. Une telle information est importante pour les gestionnaires routiers pour suivre l'état de la chaussée et planifier les activités d'entretien de chaussées.
- La détection des caractéristiques du trafic (vitesse, types de véhicules, estimation des charges, balayage du chargement sur la chaussée...).

Malgré ces possibles applications, les applications des accéléromètres sont encore relativement limitées dans le domaine des chaussées.

1.4 Les sections routières instrumentées

Dans cette partie, on recense un certain nombre d'expérimentations réalisées en France et à l'étranger, pour instrumenter et suivre le comportement de différents types de structures de chaussées. A travers cette présentation, on a cherché à analyser :

- Les types d'instrumentation utilisés (capteurs, systèmes d'acquisition), leurs avantages et inconvénients ;
- Le positionnement des différents capteurs dans la chaussée (nombre de capteurs, positionnement vertical et latéral...);
- Les types de mesures réalisés (mesures ponctuelles, sous une charge connue, ou mesures continues, sous le passage du trafic) ;
- Les méthodes d'exploitation des données ;
- Les principaux résultats tirés de ces études.

1.4.1 Site instrumenté dans les Yvelines (Pouteau & Mazé, Mai 2012)

En 2010, le conseil général des Yvelines (CG 78) en partenariat avec le centre de recherche d'Eurovia a réalisé un chantier expérimental instrumenté. Le travail consistait à requalifier la rue Louis Blériot à BUC (PR 2+110 au PR 3+800). L'opération consistait à déconstruire la chaussée existante pour réaliser la nouvelle structure dimensionnée pour un trafic TC5/20 ans et reposant sur une plate-forme de classe 2:

- 5 cm d'enrobé phonique VIAPHONE[®].
- 2x10 cm d'enrobé à module élevé EME (SOPREVIA[®]).

Sur cette section, Différents capteurs ont été mis en place:

- 24 capteurs de déformations positionnées à la base de la couche d'EME.
- 16 capteurs de température à différentes profondeurs dans la structure.
- 60 puces RFID positionnées à différentes profondeurs.
- 2 capteurs de charge à l'essieu installés dans la couche de roulement.

Les puces RFID (Radio Frequency Identification) fonctionnent grâce à la technologie radio-identification. Elles permettent de mémoriser et de récupérer des données sur les caractéristiques de la chaussée ou des matériaux à distance à l'aide d'une antenne associée permettant de recevoir et de répondre aux requêtes radio émises depuis l'émetteur-récepteur.

Les capteurs de déformation et de température sont reliés à une nouvelle génération de boîtiers d'acquisition autonomes en énergie développés spécialement pour cette application. L'analyse des données est réalisée sur un serveur de données à distance, à l'aide d'une suite logicielle développée spécifiquement.

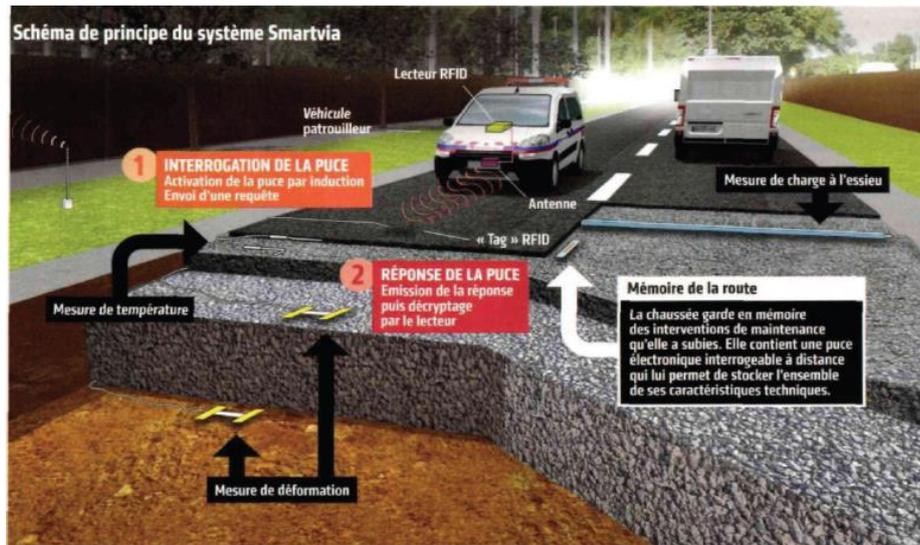


Figure 1.17. Schéma de principe du système Smartvia® développé par Eurovia

Jusqu'à présent, les premiers retours d'expériences concernaient les taux de survie des capteurs. La vérification des capteurs a été faite par des simples mesures d'impédance à l'aide d'un ohmmètre. Les résultats ont montré que toutes les sondes de températures étaient opérationnelles après un an. Les capteurs de déformation ont eu un taux de défaillance plus important. Ce taux est peut être dû à la mise en place des couches bitumineuses à haute température et avec un fort niveau de compactage.

1.4.2 Site instrumenté sur l'A41N (Gaborit, et al., 2013)

Une instrumentation de chaussée a été réalisée sur l'autoroute A41, afin de mieux comprendre le fonctionnement mécanique des structures et les processus d'endommagement des chaussées. Ce projet de recherche a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre AREA, Eiffage Travaux Publics et le Laboratoire génie civil et bâtiment de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE). La zone instrumentée, d'une longueur de 1 km se situe sur l'autoroute A41N entre Annecy et Chambéry. Cette autoroute comporte deux voies de circulation dans chaque sens et supporte un trafic de 1200 poids lourds/jour/sens. Deux sections, situés à 500 m l'un de l'autre, dans le même sens de circulation, ont été instrumentés. La structure des deux sites est la même. Cependant, les matériaux utilisés pour les couches d'assise sont différents. Pour la première section, une couche d'assise classique en EME 2 (Enrobé à module élevé) a été réalisée. Pour la deuxième section, une couche d'assise innovante de type grave-bitume à haute performance (GB5) au liant modifié par un polymère Biprène® 41 a été réalisée. Cette étude visait également à comparer les performances mécaniques de ces deux structures, avec un matériau classique et un matériau innovant à hautes performances.

Les sites expérimentaux ont été instrumentés par des jauges de déformation, des sondes de température et des capteurs à fibres optiques. Les jauges de déformations de type CTL ont été placées par groupes de trois (jauges verticale, longitudinale et transversale) à différents niveaux dans les couches bitumineuses:

- A la base de la couche de fondation, à 19 cm sous la surface;
- A la base de la couche de base, à 11 cm de profondeur.
- A la base de la couche de roulement, à 3 cm de profondeur.

Les sondes de températures ont été placées à la base de chaque couche de la chaussée. Les fibres optiques de type TenCate GeoDetect, munies de réseaux de Bragg (permettant de réaliser des mesures locales de déformations), ont été placées dans chacune des couches de la section en EME2.

Au total, 38 capteurs à jauges ont été mis en place à différentes profondeurs dans les couches bitumineuses, au centre de la voie et dans la bande de roulement (voir Figure 1.18). Six capteurs à fibres optiques ont également été installés sur la section en EME2. Une instrumentation similaire à celle de la section en EME2 a été réalisée sur la section en GB5. Elle est cependant plus restreinte puisque les capteurs verticaux n'ont pas été mis en place, ni certains capteurs longitudinaux et transversaux. Seulement 15 capteurs à jauges ont été installés dans cette section.

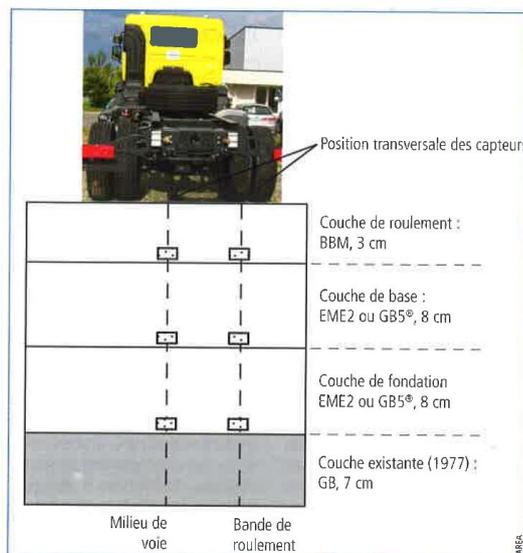


Figure 1.18. Structure de la chaussée instrumentée (les carrés indiquent les positions des jauges)

Les campagnes de mesures ont été faites sous différents passages de deux types de véhicules:

- soit un camion de référence à deux essieux préalablement pesé, avec une charge de 13 tonnes sur l'essieu arrière. C'est une saumureuse utilisée habituellement pour la viabilité hivernale.
- soit le curviamètre qui est un appareil automatisé de mesure de déflexion, utilisé pour l'auscultation structurelle des chaussées. Il s'agit également d'un camion à deux essieux, dont l'essieu arrière est chargé à 13 tonnes.

Les mesures sous le camion de référence ont été faites à différentes conditions de vitesse (10 km/h, 50 km/h et 90 km/h) et pour différentes positions latérales des roues sur la chaussée (trois trajectoires). Les mesures du curviamètre ont été faites à la vitesse classique d'avancement du curviamètre, soit 18 km/h.

Des campagnes de mesures ont été régulièrement réalisées sous balisage. La dépendance des déformations mesurées aux conditions de mesure a pu être observée. Les effets de la température de la chaussée et de la vitesse de sollicitation sur les déformations ont pu être observés. En effet, les déformations des couches bitumineuses augmentent lorsque la température augmente, et

lorsque la vitesse de chargement diminue. Ces observations ont pu être expliquées par le comportement viscoélastiques et thermo susceptible des matériaux bitumineux.

L'effet de la trajectoire de chargement a également pu être mis en évidence. L'amplitude de déformation ainsi que la forme des signaux varie selon que la charge se situe à l'aplomb des capteurs, de part et d'autre ou à côté. Un autre phénomène a été mis en évidence dans les couches de roulement et de base, lorsque la roue est à l'aplomb des capteurs: au passage de la roue, on a constaté une très forte diminution des déformations longitudinales de contraction dans les couches situées au-dessus de l'axe neutre de déformation, due à l'effet Poisson. En effet, au passage de la roue, les couches de chaussées sont soumises à la fois à des sollicitations de flexion (qui induisent des contractions dans les couches supérieures) et de compression verticale, qui induisent des déformations d'extension (par effet du coefficient de Poisson). Ces deux effets se compensent (voir Figure 1.19).

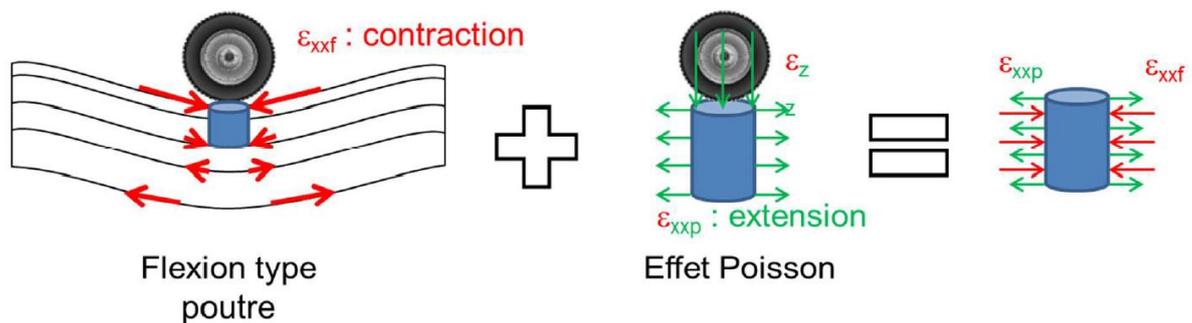


Figure 1.19. Schéma d'explication de l'effet de Poisson

1.4.3 Tronçon de la Route 15 de Guildford, Maine, USA (Swett, et al., Octobre 2008)

Le département des transports du Maine est connu pour ses investissements importants (50 millions de dollars) pour la conception, la construction et la réhabilitation des chaussées chaque année. Dans les projets récents de reconstruction du département, la nouvelle plate-forme est constituée des anciens matériaux bitumineux sur l'ancienne couche de sol, ce qui n'est pas classique en réhabilitation des chaussées. Pour cette raison, l'instrumentation constitue un moyen intéressant d'appréhender le comportement de ces matériaux anciens et ainsi d'évaluer le comportement de ces structures.

Située sur la route 15, cette section expérimentale est la première section de chaussée souple instrumentée dans le département du Maine. Les capteurs utilisés sont: (Tableau 1.3)

- 16 jauges de déformations (12 jauges dans les couches bitumineuses, 4 jauges dans le sol).
- 30 thermocouples (6 sondes à la base des couches bitumineuses, 24 sondes dans le sol).
- 6 sondes d'humidité.
- 2 sondes de résistivité.

Tableau 1.3. Différents types de capteurs utilisés sur la section expérimentale du Maine

Type des capteurs	Réponse	Fabricant
Jauges de déformation (sol)	Déformation	Type FTC-1, LVDT (SSDT)
Jauges de déformation (couches d'enrobés)	Déformation	Dynatest PAST II, Danemark
Capteurs de pression	Contrainte	Type FTC (SOPT), Dynatest
Sonde d'humidité	Taux d'humidité	Modèle CS615, Campbell Scientific
Thermocouple (sol)	Température	Type T, PMC Corporation
Thermocouple (couches d'enrobés)	Température	Type T, Omega Entreprise
Sonde de resistivité	Front de gel	ABF Entreprise, Minnesota

Chaque type de capteur a son propre moyen d'acquisition de données. Les données des contraintes dynamiques et celles des jauges de déformation ont été enregistrées sur site avec un ordinateur. Les données environnementales ont été enregistrées toutes les heures par un système spécifique. Les campagnes de mesures ont été faites sous le passage d'un véhicule à deux essieux à trois températures différentes et à cinq vitesses différentes.

L'exploitation des données consiste à étudier l'impact des différents facteurs environnementaux sur le comportement mécanique de la chaussée à travers les signaux obtenus. Les mesures ont ensuite été comparées avec différents modèles. Les résultats ont montré que les calculs dans les couches bitumineuses étaient cohérents avec les mesures à basse température et à vitesse élevée. Dans la couche d'assise, les contraintes étaient sous-estimées. Cependant, les mesures de déformation et les valeurs calculées étaient cohérentes. Au niveau de la plate-forme, les mesures de contraintes et déformations étaient plus élevées que celles du modèle. Cet écart est devenu plus important à haute température et à faible vitesse.

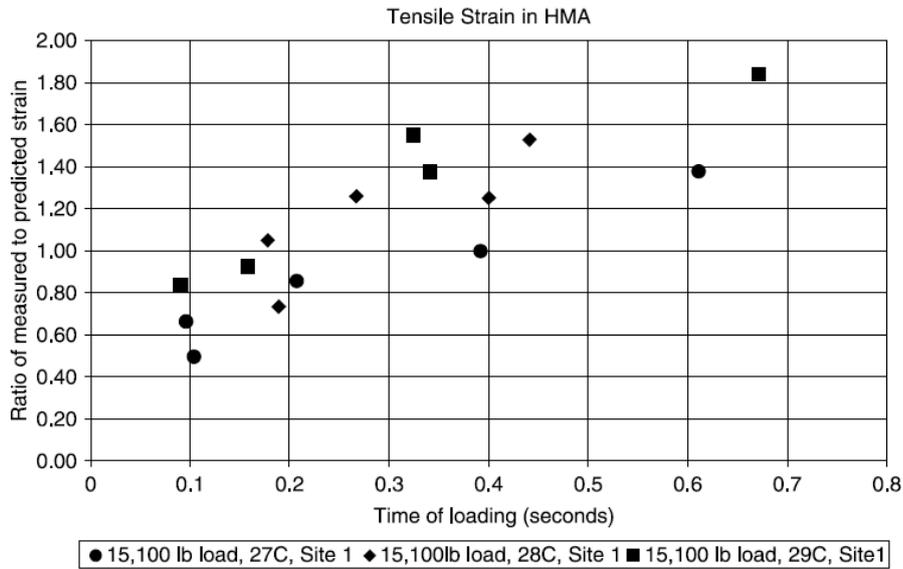


Figure 1.20. Comparaison entre mesures et valeurs calculées de déformation horizontale à la base de la couche d'enrobé bitumineuse (trois niveaux différents de vitesse et de température)

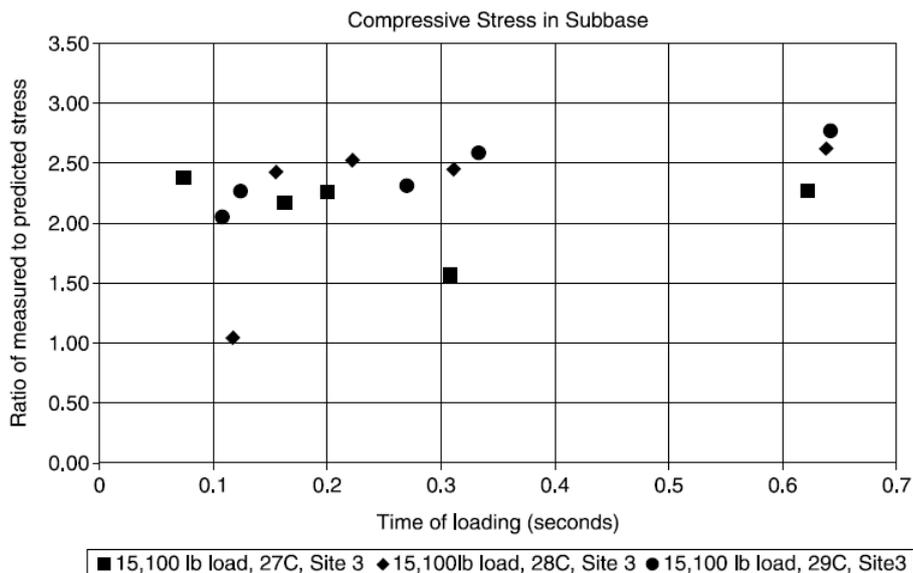


Figure 1.21. Comparaison entre mesures et valeurs calculées de contrainte verticale dans la couche d'assise (trois niveaux différents de vitesse et de température)

1.4.4 Section expérimentale à Ottawa, Canada (Région froide) (Maadani, et al., 2015)

Cette instrumentation a été réalisée afin d'étudier l'impact des variations journalière et saisonnière des températures et de l'humidité sur le comportement de la chaussée. L'observation des chaussées en région froide révèle clairement la nécessité de mesurer la distribution de contraintes, déformations, l'état d'humidité et le régime thermique au cours du temps. La section expérimentale située à Ottawa, Canada est une structure souple.

Différents types de capteurs ont été mis en place (Tableau 1.4). Ces capteurs sont utilisés pour mesurer les contraintes, les déformations, les températures, les taux d'humidité et le front de gel dans les couches de la chaussée.

Tableau 1.4. Liste des types de capteurs sur la section d'Ottawa

Type des capteurs	Réponse	Fabricant
Cellules de pression	Pression	RST Instruments, Canada
Jauges de déformation	Déformation	Dynatest PAST II, Danemark
Sonde d'humidité	Taux d'humidité	Campbell Scientific, Logan/Utah
Thermocouple	Température	Fils et câbles thermo-électrique Saddle Brook, New Jersey
Extensomètre	Déformation permanente	RST instrument, Canada
ϵ -measuring unit (capteur de déplacement inductif)	Déformation permanente	U.S. Army Corps of Engineers
Sonde de résistivité	Front de gel	U.S. Army Corps of Engineers

Le système d'acquisition des données est constitué de deux parties:

- Modèle CR10X : Ce modèle permet d'enregistrer des données statiques (température, humidité, front gel, déformation permanente).
- Modèle CR900 : Ce modèle permet d'enregistrer des données dynamiques (déformation transversale et longitudinal) à des moments donnés.

Les données sont transférées vers un serveur et peuvent être téléchargées à distance.

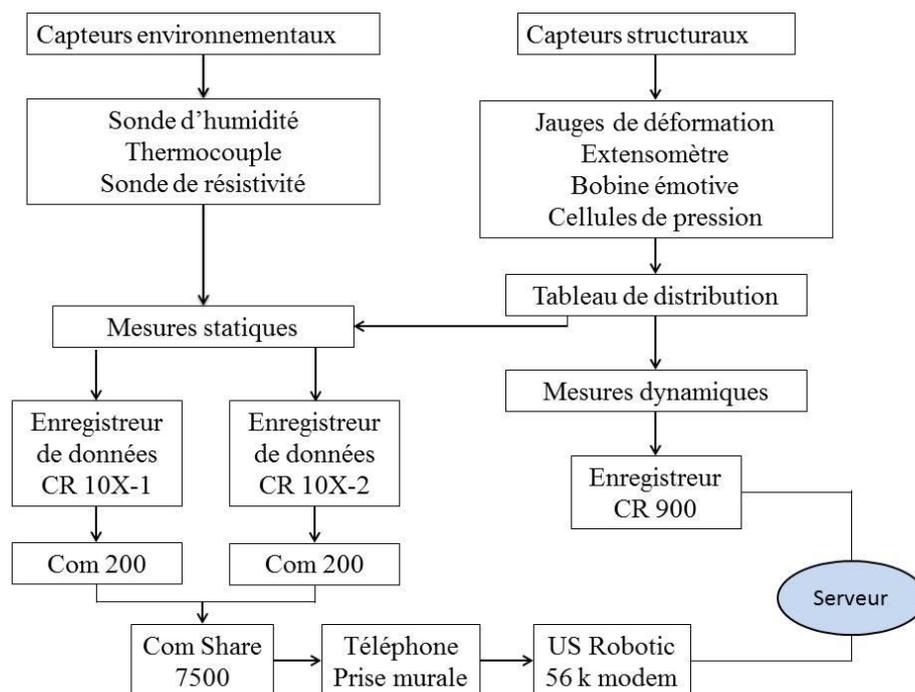


Figure 1.22: Plan de fonctionnement de l'instrumentation

Les mesures ont été faites en continu pour les paramètres statiques et sous le passage d'un véhicule de charge connue pour les paramètres dynamiques (Figure 1.22). Ce véhicule est composé de trois essieux de charge différente (43, 87 et 86 kN de l'essieu avant à l'essieu arrière). Les mesures ont été effectuées immédiatement après construction. L'exploitation des données consiste à suivre simplement l'évolution de la distribution de contraintes, déformations, humidité et régime thermique.

1.4.5 **Projet d'instrumentation: Virginia Smart Road (Al-Qadi, et al., 2004)**

Afin d'étudier l'impact des différents paramètres structurels et environnementaux, en vue d'améliorer la méthode de dimensionnement des chaussées, une chaussée expérimentale a été construite par le département des transports de Virginie en 1999. Cette chaussée souple est constituée de 12 sections de 100 m de long. Ces sections ont été instrumentées par différents types de capteurs: jauge de déformation, cellules de pression, thermocouples, sondes d'humidité, sonde de résistivité (Tableau 1.5).

Tableau 1.5. Liste des différents types de capteurs sur le projet Virginia Smart Road

Type des capteurs	Réponse	Fabricant
Cellules de pression	Pression	RST Instruments
Jauges de déformation	Déformation	Dynatest PAST II, Geokone VCE-4200
Sonde d'humidité	Taux d'humidité	Campbell Scientic
Thermocouple	Température	Type T
Sonde de résistivité	Front de gel	Type CS610, CS 615

Le système d'acquisition des données est présenté dans la Figure 1.23. Il est constitué de deux unités :

- DaqBook 200 : Cette unité permet d'enregistrer les données statiques (température, humidité, front de gel).
- WaveBook512 : Cette unité permet d'enregistrer les données dynamiques (déformation, contrainte).

Les unités ont été connectées à un ordinateur par des ports parallèles améliorés. Les données y sont stockées avant d'être téléchargées.



Figure 1.23. Système d'acquisition des données

Les mesures ont été réalisées sous plusieurs passages d'un poids lourd dont le chargement de l'essieu avant (roue simple) est de 25.8 kN. Le chargement de l'essieu avant est utilisé pour les études. Ce poids lourd circulait à quatre vitesses différentes: 8 km/h, 24 km/h, 40 km/h et 72 km/h. L'exploitation des données est constituée de deux parties :

- L'analyse des impacts des différents paramètres (température, vitesse...) sur la réponse structurelle de la chaussée à travers des signaux obtenus.
- La modélisation du comportement mécanique de la chaussée avec différents modèles.

Les résultats de la première partie ont indiqué que la vitesse du véhicule et la température influencent beaucoup les déformations longitudinales et transversales à la base des couches bitumineuses. Cependant, la contrainte verticale ne semble pas affectée par la vitesse du véhicule. Il est également à noter que lors de la phase du chantier, le compactage peut provoquer des déformations critiques des couches bitumineuses surtout avec le compactage vibrant. Pour la deuxième partie, plusieurs modèles ont été proposés. Les résultats ont montré que les calculs par éléments finis en prenant en compte les propriétés viscoélastiques des matériaux permettent d'avoir une meilleure approche de la réponse mécanique de la chaussée.

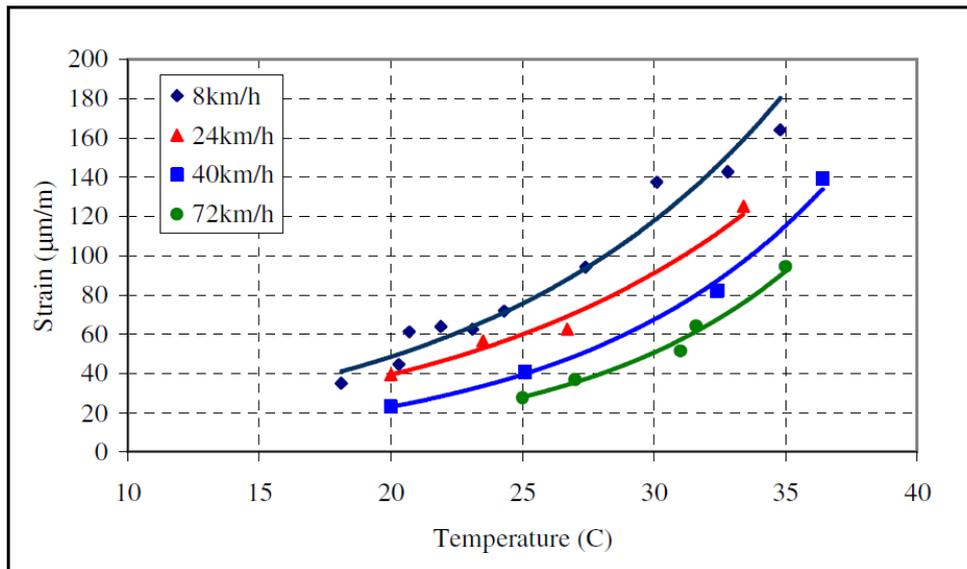


Figure 1.24. Mesures de déformation transversale dans la couche d'enrobé bitumineuse à différentes vitesses et températures

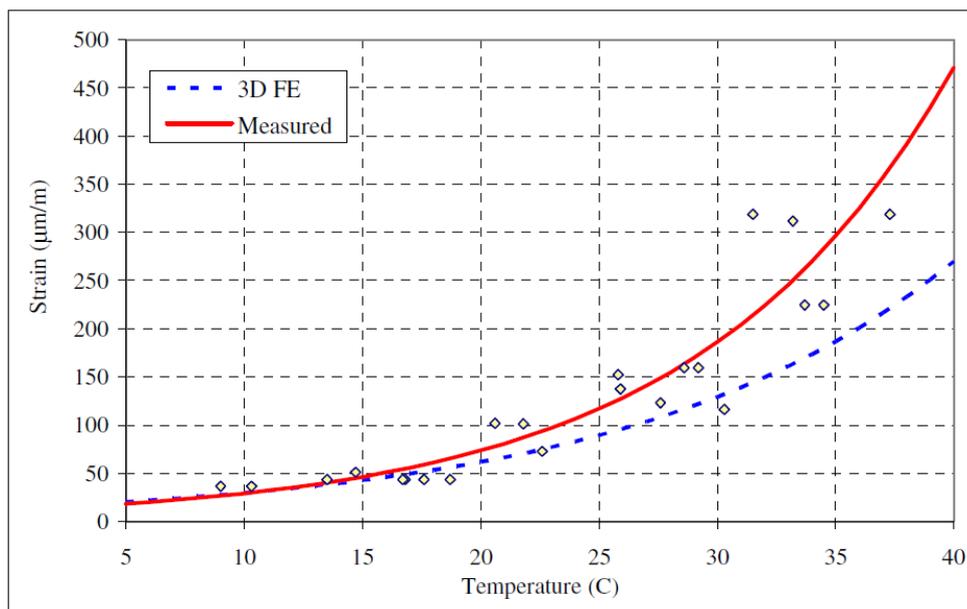


Figure 1.25. Comparaison entre mesures de déformation transversale à la base de la couche d'enrobé bitumineuse et valeurs calculées avec le modèle des éléments finis

1.4.6 Section expérimentale de la Virginia State Road 114 (Xue, et al., 2013)

L'objectif de cette étude était de tester un système de monitoring de chaussées qui permet d'appréhender en continu l'état structurel de la chaussée. Pour cette étude, une section expérimentale a été réalisée sur la route 114 de l'état de Virginie. Différents types de capteurs ont été mis en place en octobre 2011 (Tableau 1.6). En particulier, plusieurs jauges de déformation longitudinale ont été mises en place dans le sens latéral afin d'étudier l'effet de balayage des passages des véhicules.

Tableau 1.6. Liste des différents types de capteurs sur la section 114 Virginia State Road

Type des capteurs	Réponse	Fabricant
Jauges de déformation	Déformation	CTL group
Cellules de pression	Pression	Type KDE-PA (Tokyo Sokki)
Sonde d'humidité	Taux d'humidité	VH400 (Vegetronix Company)
Thermocouple	Température	Type TMTSS-125-6 (Omega Company)

Les données des capteurs sont transférées vers un serveur par un système d'enregistrement sans fils appelé V-Link. Ce système a été choisi pour sa durabilité et son coût peu élevé.

Les mesures ont été réalisées:

- Avec un véhicule chargé différemment lors de chaque passage.
- sous trafic réel pendant 45 minutes.

Les données sous les passages du véhicule test ont été récupérées pour effectuer un calcul inverse afin d'évaluer la capacité portante de la chaussée. Les études révèlent que le module élastique des couches de chaussées peut constituer un indicateur permettant de caractériser l'état structural de la chaussée et sa durée de vie. L'objectif initial de ces études est de déterminer les modules des couches à partir des mesures de contraintes et déformations verticales. Cependant, cette démarche n'a pas pu être mise en place car les jauges de déformations verticales ont été endommagées. Les mesures de déformations transversales ont donc été utilisées. Le rapport entre la contrainte verticale et la déformation longitudinale (R_{zx}) a ensuite été utilisé pour le calcul inverse des modules des couches de chaussée. La relation entre celui-ci et le module de la couche bitumineuse est déterminée par un calcul par éléments finis avec ABAQUS (Figure 1.26).

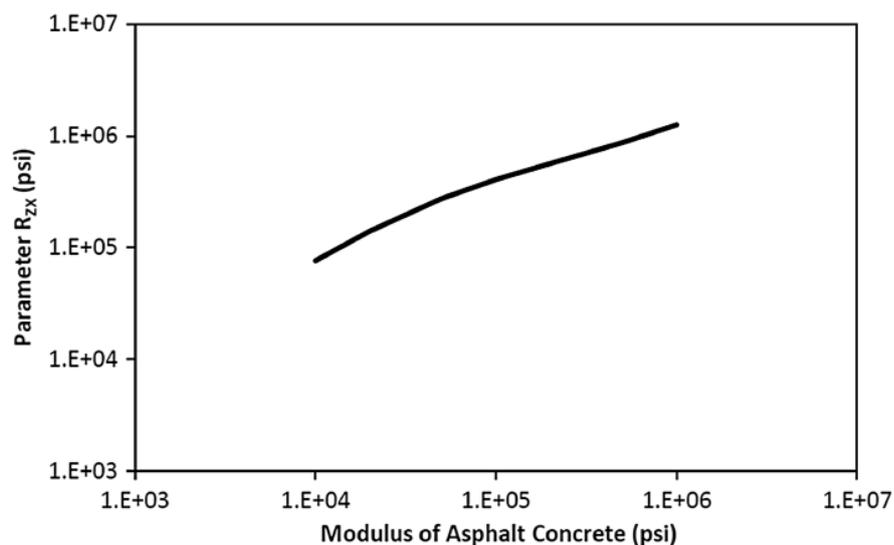


Figure 1.26. Relation entre le paramètre R_{zx} et le module de la couche bitumineuse

La correction en température et en vitesse de cette relation est présentée dans la Figure 1.27.

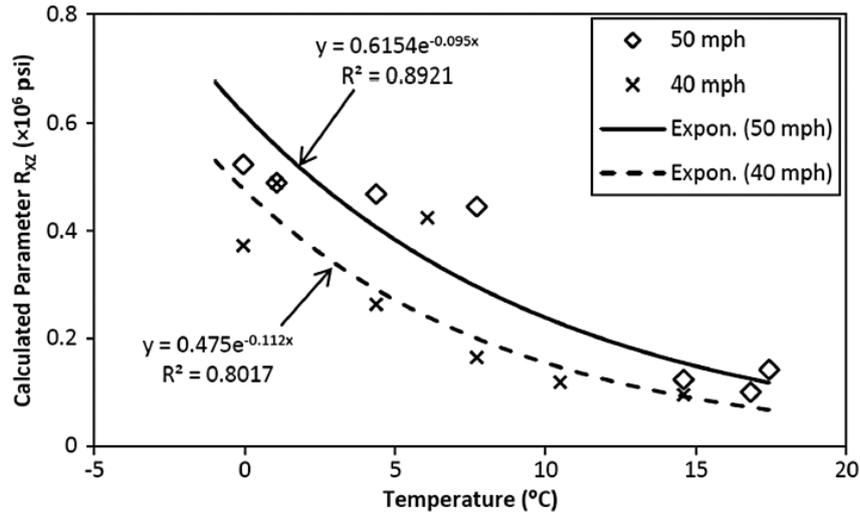


Figure 1.27. Variation du rapport R_{zx} en fonction de la température et de la vitesse

Les résultats ont montré la relation entre le rapport entre la contrainte verticale et la déformation verticale et la capacité portante de la chaussée. Ce rapport peut être utilisé dans le calcul inverse pour déterminer le module élastique des couches de chaussées.

Les données sous trafic réel pendant 45 minutes ont été utilisées pour prévoir l'endommagement de la chaussée. Dans le cadre de ce projet, deux critères sont concernés: l'endommagement par fatigue et l'orniérage. Les calculs de l'endommagement ont été effectués à partir des modèles de la méthode de dimensionnement MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide) dans le programme de recherche NCHRP 2011 (National Cooperative Highway Research Program). L'endommagement par fatigue sous chaque essieu de véhicule est donné par :

$$D_{fc} = 231.48 * \frac{1}{c} (\epsilon_t)^{3.291} (E)^{0.854} \quad (1.6)$$

Avec :

D_{fc} le dommage par fatigue sous chaque passage de véhicule. Pour le système de monitoring, le paramètre $D_{fc,i}$ peut être calculé après chaque passage et ajouté à l'indice D_{fc} . Lorsque D_{fc} est égal à 1, la chaussée est totalement endommagée par fatigue.

$C = 10^M$ $M = 4.84 * (\frac{V_a}{V_a+V_b} - 0.69)$ avec V_a étant le volume des vides et V_b étant le contenu effectif de liant.

ϵ_t la déformation en tension à la base de la couche bitumineuse.

E le module élastique de la couche bitumineuse.

L'orniérage de la chaussée est donné par:

$$D_r = (k_1 * \epsilon_r * \frac{h}{PD_{failure}})^{2.086620} T^{3.256379} 10^{-7.196335} \quad (1.7)$$

Avec:

D_r le dommage par orniéage sous chaque passage de véhicule. Cet indice peut être cumulé pour chaque essieu. Lorsque la somme des dommages élémentaires vaut 1, la chaussée est totalement endommagée par orniéage vertical.

PD_{faillure} la déformation permanente correspondant à un orniéage vertical de 12.5 mm.

T la température de la chaussée.

$$k_1 = (C_1 + C_2 * depth) * 0.328196^{depth} \quad (1.8)$$

Avec :

$$C_1 = -0.1039 * H_{ac}^2 + 2.4868 * H_{ac} - 17.342 \quad (1.9)$$

$$C_2 = 0.0172 * H_{ac}^2 - 1.7331 * H_{ac} + 27.428 \quad (1.10)$$

Avec :

$depth$ la profondeur calculée.

H_{ac} l'épaisseur des couches bitumineuses.

Selon les études précédentes, un système de monitoring de chaussée à partir des mesures des capteurs a donc été proposé, comme décrit sur la Figure 1.28. Ce monitoring s'appuie sur des tests périodiques avec une charge de référence et les mesures sous trafic réel. Les tests périodiques permettent de déterminer la résistance structurelle de la chaussée à des moments précis. Pour cela, les modules des couches sont déterminés à partir du rapport entre contrainte verticale et déformation horizontale mesurée sur site. Les mesures sous trafic réel permettent de calculer le dommage cumulé sous le passage des véhicules. La chaussée est considérée endommagée lorsque la somme des dommages élémentaires est égale à 1. Cependant, dans l'étude décrite, le monitoring continu sous trafic réel n'a été réalisé que pendant 45 minutes.

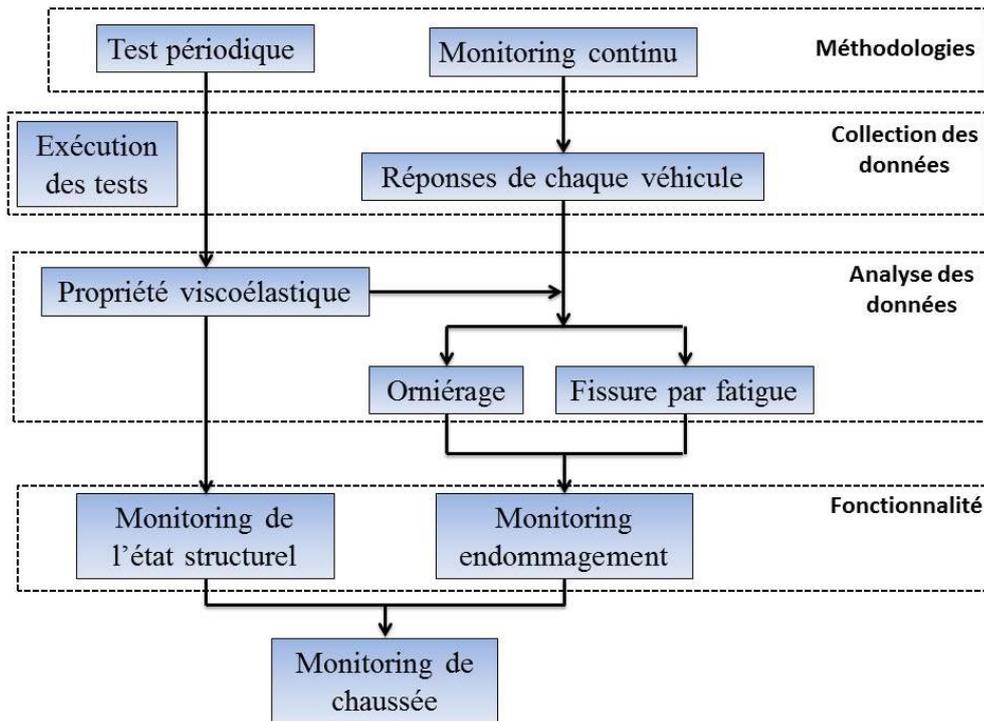


Figure 1.28. Principe du système de monitoring de chaussée

1.4.7 Section expérimentale en Chine (Ai, et al., 2016)

Ce projet a consisté à étudier la réponse mécanique de la chaussée sous conditions réelles en prenant en compte les effets de la vitesse, la configuration et le chargement des véhicules et la température des couches de chaussées. La section expérimentale (900 m de long) est constituée de trois différents types de chaussées largement utilisées en Chine: chaussée semi-rigide, chaussée inverse et chaussée mixte. Les capteurs utilisés sont des jauges de déformation et des sondes de température. Ces capteurs ont été mis à la base des couches d'enrobé bitumineux.

Pour la réalisation des mesures, deux types de poids lourds spécifiques ont été utilisés: Poids lourds type 1 (essieu arrière simple) et poids lourds type 2 (essieu arrière tandem) (Figure 1.29). Pour chaque poids lourds, trois niveaux de chargement ont été choisis: normal, surchargé et extrêmement surchargé. Les différentes vitesses sont : T1 (20, 40, 60, 80 km/h) et T2 (20, 30, 40, 60 km/h). Les tests ont été faits avec trois niveaux de température: froide (hiver), modérée (printemps) et chaude (été). Pour chaque essai, trois mesures ont été réalisées. Seule la valeur maximale des déformations a été retenue.

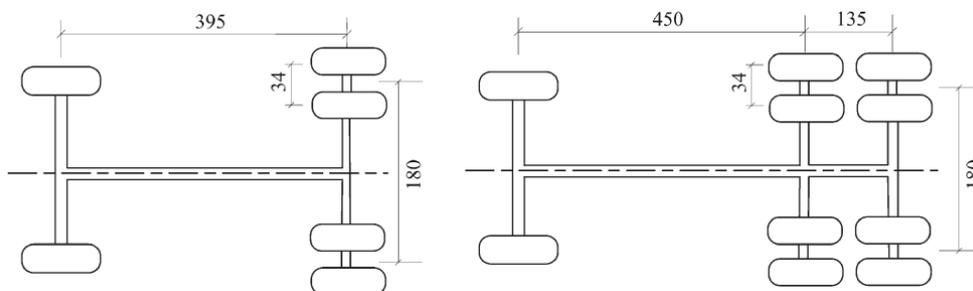


Figure 1.29. Configuration des deux types de véhicules (unité: cm)

Comme dans les études citées précédemment, les résultats confirment l'effet important du chargement, de la température et de la vitesse sur les déformations des couches de chaussées. L'impact des différents paramètres (température, chargement, vitesse) et de leurs combinaisons sur la déformation des couches de chaussées a été étudié. Il a été montré que la combinaison des hautes températures et des chargements élevés peut exacerber l'endommagement par fatigue de la chaussée. La vitesse, quant à elle, a moins d'influence. Une fonction exponentielle a été proposée par la suite pour prédire la réponse de la chaussée.

$$y = e^{(a_1x_1+a_2x_2+\dots+a_nx_n)} \quad (1.11)$$

Avec:

x_1, x_2, \dots, x_n	les facteurs d'influence (température, charge de l'essieu, vitesse de chargement et leur combinaison)
y	la valeur de déformation à la base de la couche de surface.
a_1, a_2, \dots, a_n	les coefficients à déterminer.

Cette fonction peut être convertie en une équation de régression linéaire multivariée. Le modèle de prédiction est ensuite déterminé par des analyses statistiques à l'aide du logiciel SPSS (Statistical Package for the Social Sciences). Les études ont montré que le modèle de prédiction donne des résultats relativement proches des valeurs mesurées. Il est également à noter que les mesures de déformation sur site sont influencées par de nombreux facteurs, alors que les facteurs pris en compte dans le calcul sont limités. L'écart entre ces valeurs est donc inévitable.

1.4.8 Conclusion sur les expérimentations sur chaussées

Ce chapitre présente plusieurs projets d'instrumentation de chaussées dans lesquels la mise en place des capteurs, le système d'acquisition des données et les mesures ont été présentés. Généralement, les capteurs utilisés sont principalement des jauges de déformation, des sondes de température et des sondes d'humidité. Aux États-Unis, les capteurs de pression et les sonde de résistivité sont aussi souvent utilisées afin de mesurer les contraintes verticales au niveau des couches de matériaux non liés et le front de gel dans les chaussées situées dans des régions froides.

Les systèmes d'acquisition des données sont développés spécifiquement pour chaque application, avec différents types de transmission des données: récupération sur place ou transmission à distance.

Les campagnes de mesures sont principalement faites sous différents passages de véhicules de référence, dont les charges et les dimensions sont connues. Il est important de souligner que les campagnes de mesures sur site sont donc des campagnes de mesures ponctuelles, réalisées périodiquement, à des intervalles plus ou moins espacés. Les mesures sous charge ne sont donc pas effectuées en continu, sous le trafic normal des poids lourds.

Différents moyens d'exploitation des données ont été mis en place pour analyser le comportement mécanique des chaussées. Les mesures de déformations sont interprétées à l'aide de modèles élastiques ou viscoélastiques (ces derniers donnant de meilleurs résultats), puis différents modèles de durée de vie (de fatigue, d'orniérage) peuvent être utilisés pour estimer la durée de vie des chaussées.

La réalisation des mesures en continu sous trafic réel, que l'on va présenter dans cette thèse, représente donc une façon innovante de réaliser les mesures. Son intérêt est de pouvoir suivre non seulement les caractéristiques de la chaussée, mais aussi les charges appliquées, et l'évolution journalières et saisonnières des paramètres environnementaux et de la réponse de la chaussée.

1.5 Méthodes de dimensionnement de chaussées

1.5.1 Méthodes empiriques

Les premières méthodes de dimensionnement de chaussées étaient des méthodes empiriques, Ces méthodes consistaient à définir les durées de vies des chaussées à partir d'essais en vraie grandeur. En France, la première piste d'essai a été construite en 1931. Cette piste se situait dans l'enceinte dite de la Maison-Blanche du Bois de Vincennes, à l'initiative du ministère des Travaux publics, du ministère de la Guerre et de la Ville de Paris. La longueur de la piste fermée, qui formait sensiblement un quadrilatère, était de 933 m, et sa largeur de 6.5 m entre bordures de trottoir. La chaussée comportait une fondation en hérisson sur laquelle venaient se placer les revêtements destinés aux expérimentations. Ces premiers essais étaient ciblés principalement sur l'usure des revêtements, plutôt que sur la conception et le dimensionnement de la chaussée. (Berthier, 2013)

La méthode empirique était très développée dans les années cinquante et soixante. Deux grands tests ont été organisés aux Etats-Unis (Berthier, 2013). Le premier test WASHO (1952-1954), à l'initiative de la *Western Association of State Highway Officials*, a été mis en œuvre sur des chaussées souples de l'Idaho. Il était constitué de deux circuits de 2 km de longueur comportant, sur un sol limoneux, des chaussées souples classiques d'épaisseurs variées. Au niveau du chargement, des camions à essieux simples ou jumelés ont été utilisés. L'essai WASHO a contribué à la mise au point des abaques de dimensionnement de Jeuffroy et Bachelez (Berthier, 2013). Le plus grand apport de ce test a consisté à mettre en évidence pour la première fois la notion « d'effet de dalle » des tapis d'enrobés épais. En effet, un revêtement épais (épaisseur supérieure à 6 ou 7 cm)... se comporte comme une plaque élastique et soulage les couches inférieures de la chaussée ainsi que le sol de fondation. Un revêtement de cette nature est « équivalent à une épaisseur beaucoup plus importante de matériaux routiers communs ». Le deuxième test AASHO (1958-1960) est un essai beaucoup plus ambitieux. Son coût a été estimé à 27 millions de dollars. Ce projet a été défini en 1951 par *l'American Association of State Highway Officials* en collaboration avec le *Bureau of Public Roads* (AASHTO (1986), 1986) (Berthier, 2013). Cet essai à grande échelle a été réalisé à Ottawa (Illinois). L'emplacement du projet a été choisi parce que le sol y est uniforme et représentatif de ce que l'on trouve dans de vastes régions du pays et parce que le climat est représentatif de ce que l'on rencontre dans la plus grande partie du nord des Etats-Unis. La piste était constituée de quatre circuits principaux et deux circuits secondaires. Chacun des circuits principaux comportait deux lignes droites de 2 km, raccordées par des courbes de 60 m de rayon, les sections d'essai ayant une longueur de 30 m.

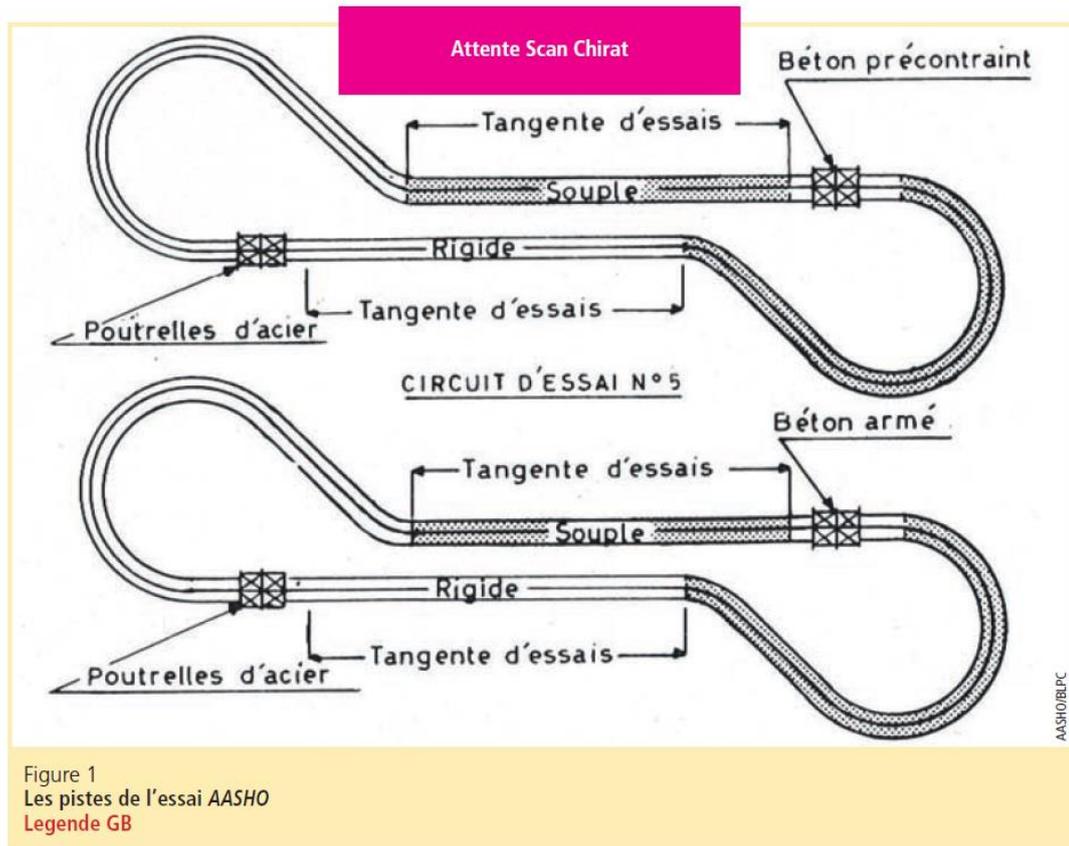


Figure 1.30. Les pistes d'essai AASHO

Les matériaux utilisés dans les structures étaient les suivants :

- Couches de fondation constituées d'un mélange de sable avec un gravier de concassage extrait à proximité du site.
- Couches de base non traitées en calcaire dolomitique concassé à granulométrie continue.
- Couches de base traitées au ciment constituées du matériau de la couche de fondation, traité par 4% de ciment en centrale à béton.
- Couches de base traitées au bitume constituées du matériau de la couche de fondation traité en poste discontinu par 5% de bitume.
- Couches de base en béton bitumineux de bonne qualité.

Au total, il y avait 234 types de planches expérimentales relatives aux chaussées souples. Parmi ces planches, 210 ont été construites avec le même type de couche de surface, de base et de fondation, et 12 seulement avaient des couches de base liées au ciment ou au bitume. Au niveau du chargement, 10 types de véhicules équipés à la fois d'essieux simples de 0.9 à 3.6 tonnes et d'essieux tandem de 10.9 à 21.8 tonnes ont été utilisés (126 camions au total). Les essais ont débuté à l'automne 1958 et se sont terminés en novembre 1960, date à laquelle 1140000 charges avaient été appliquées. Pendant la construction, les conditions d'exécution des travaux étaient strictement identiques pour toutes les sections: aucun camion n'a circulé sur les couches de forme, aucun engin de terrassement n'y a fait demi-tour. Malgré ces conditions soignées, une grande dispersion des résultats a été observée. La durée de vie d'un même type de structure peut

varier d'un facteur 1 à 3.5. L'étude de l'influence de la nature des matériaux de la chaussée n'était à l'évidence pas l'objectif principal. Malgré l'importance des moyens engagés, les apports de l'essai AASHO sont modestes. Cependant, la notion d'épaisseur équivalente a été définie. Le dimensionnement des chaussées souples par la méthode ASSHO est basé sur l'indice CBR (California Bearing Ratio) qui caractérise la capacité portante de la plate-forme (Berthier, 2013) (Liddle, 1962). Pour une chaussée à assise traitée, le principe consiste à définir une épaisseur équivalente de matériau granulaire non traité calculée de la façon suivante: 1 cm de béton bitumineux est équivalent à 1.4 cm de couche de base traité au ciment, à 3 cm de couche de base non traitée, et à 4 cm de couche de fondation. Malgré ses apports modestes, la méthode AASHO constituait une référence pour les méthodes empiriques de dimensionnement de chaussées.

1.5.2 Méthodes mécaniques-empiriques

Ces types de méthodes, actuellement utilisées dans de nombreux pays et notamment en France, font appel à une méthode de calcul mécanique, complétée par des données empiriques. Les principes de ces méthodes sont décrits dans le rapport final de l'action COST 333 intitulée « Development of New Bituminous Pavement Design Method » (COST_333 (1999), 1999) ou dans « Pavement Analysis and Design » (Huang, 1993). Elles sont basées sur l'utilisation d'un modèle de calcul des sollicitations dans la chaussée (modèle élastique linéaire), et l'utilisation de plusieurs lois de dommage (fatigue,orniérage) pour prédire la durée de vie de la chaussée (Figure 1.31).

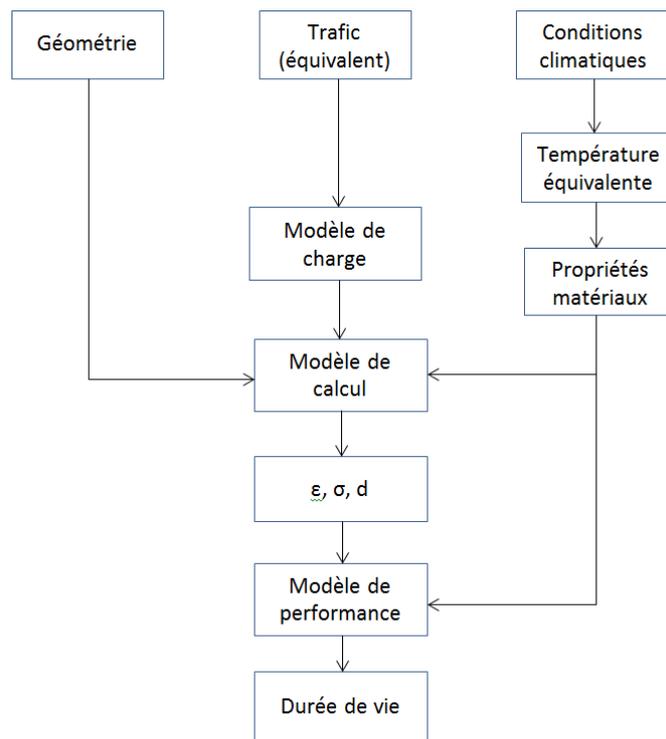


Figure 1.31. Principe de fonctionnement des méthodes mécaniques empiriques (COST_333 (1999), 1999)

1.5.3 Méthode Française de dimensionnement

La méthode Française de dimensionnement de chaussées est basée sur ces principes. Elle consiste à choisir un type de structure, à retenir les matériaux constitutifs des différentes couches

et à en fixer les épaisseurs respectives, puis à calculer: (Goacolou, et al., 2003) (Perret, 2003) (Gaborit, 2015) (Norme NF P 98-086, 2011)

- Les sollicitations induites dans cette structure (modèle de calcul) au passage d'un essieu représentatif du trafic poids lourd (l'essieu isolé à roue jumelée de 130 kN, dit « essieu de référence ») à l'aide du modèle multicouche élastique linéaire de Burmister.
- Les sollicitations jugées admissibles par les matériaux (modèle de performance), en fonction de leur position dans la structure, du trafic cumulé devant circuler sur la chaussée pendant sa durée de vie et de leur mode de dégradation (rupture par fatigue pour les matériaux liés ou par cumul de déformations permanentes pour les matériaux non liés). La structure convient si les sollicitations induites au passage de l'essieu de référence restent inférieures ou égales aux sollicitations admissibles, pour chaque couche sollicitée mécaniquement. Le choix de la structure finale se fait par calculs itératifs intégrant, d'une part, une optimisation du fonctionnement mécanique et, d'autre part, les contraintes de faisabilité en phase de construction (sur l'épaisseur des couches, notamment). La vérification au gel/dégel est également nécessaire.

1.5.3.1 Détermination des sollicitations induites dans la structure par la charge de référence

Les calculs des sollicitations induites au sein de la structure de chaussée sous la charge de référence sont réalisés à l'aide d'un modèle multicouche élastique linéaire semi-infini (modèle de Burmister). Chaque couche de chaussée est supposée d'extension infinie dans le plan horizontal, et constituée d'un matériau homogène, isotrope avec un comportement élastique linéaire. Elle est caractérisée par un module d'Young noté E et un coefficient de Poisson noté ν .

Les conditions d'interfaces sont soit collées, soit glissantes en fonction des matériaux en contact. L'hypothèse d'interface semi-collée est prise par définition égale à la demi-somme des résultats obtenus successivement avec une interface collée et une interface glissante.

Les sollicitations (contraintes et déformations réversibles) sont calculées à la base des couches de matériaux liés et au sommet des couches non liées, pour l'ensemble des points situés aux endroits les plus critiques de la structure: aplombs des centres de charges ou aplomb du centre de gravité du demi-essieu de référence. Et les valeurs maximales de contraintes et de déformations sont retenues pour le dimensionnement des chaussées.

1.5.3.2 Calcul des sollicitations admissibles

Pour le calcul des sollicitations admissibles, trois mécanismes d'endommagement sont pris en compte:

- L'endommagement par fatigue des matériaux bitumineux, pris en compte à travers leur déformation d'extension horizontale réversible maximale admissible $\epsilon_{t,adm}$.
- L'endommagement par fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques et des bétons de ciment, pris en compte à travers leur contrainte de traction horizontale maximale admissible $\sigma_{t,adm}$.

- L'endommagement par cumul des déformations permanentes dans les matériaux non traités, pris en compte à travers leur déformation verticale maximale admissible $\varepsilon_{z,adm}$.

1.5.3.3 Critère de déformation admissible pour les matériaux bitumineux

Pour une couche bitumineuse sollicitée en extension par flexion, la déformation admissible pour la température équivalente θ_{eq} est calculée de la façon suivante :

$$\varepsilon_{t,adm} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}; 25\text{Hz}) * \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C}; 10\text{Hz})}{E(\theta_{eq}; 10\text{Hz})}} * \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b * k_c * k_r * k_s \quad (1.12)$$

Avec:

ε_6 Le paramètre de la loi de fatigue du matériau bitumineux, représentant la déformation d'extension conduisant à une durée de vie de 10^6 cycles. ε_6 est déterminé par l'essai normalisé de fatigue en flexion deux points (NF EN 12697-24). Cet essai est réalisé à 10°C et 25 Hz.

b La pente de la loi de fatigue du matériau bitumineux ($-1 < b < 0$).

$E(10^\circ\text{C}; 10\text{Hz})$ Le module de rigidité obtenu selon la norme NF EN 12697-26 mesuré à 10°C et à 10 Hz.

$E(\theta_{eq}; 10\text{Hz})$ Le module de rigidité obtenu selon la norme NF EN 12697-26, mesuré à la température θ_{eq} et à 10 Hz.

NE Le nombre d'essieux équivalents (essieux à roues jumelées, chargés à 130 kN).

k_c, k_r, k_s des coefficients d'ajustement.

1.5.3.4 Critère de contrainte admissible pour les matériaux traités aux liants hydrauliques et les bétons de ciment

Pour une couche constituée de matériaux traités aux liants hydrauliques et les bétons de ciment, la contrainte admissible en traction par flexion est calculée de façon suivante :

$$\sigma_{t,adm} = \sigma_6 * \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b * k_c * k_r * k_s * k_d \quad (1.13)$$

Avec :

σ_6 Le paramètre représentant la contrainte conduisant à une durée de vie en fatigue par flexion de 10^6 cycles sur des éprouvettes dont le mûrissement est de 360 jours (NF P 98-233-1).

b La pente de la loi de fatigue du matériau ($-1 < b < 0$).

NE Le nombre de passages de l'essieu de référence (essieu à roues jumelées, chargé à 130 kN).

k_c, k_r, k_s, k_d des coefficients d'ajustement.

1.5.3.5 Critère de déformation admissible pour les matériaux non traités et les sols supports de chaussée.

Pour une couche constituée de matériaux non traités et pour les sols supports de chaussée, la déformation verticale admissible en surface de la couche est calculée de la façon suivante :

$$\varepsilon_{z,adm} = A * (NE)^b \quad (1.14)$$

Avec :

A, b Des paramètres fonction du niveau de trafic, du type de matériau et de structure.
($-1 < b < 0$).

NE Le nombre de passages de l'essieu de référence.

1.5.3.6 Calcul du nombre d'essieux équivalents

En France, l'essieu de référence est l'essieu jumelé chargé à 13 tonnes. Pour les calculs de dimensionnement, le trafic des poids lourds sur la chaussée est converti en un nombre équivalent NE de passages de l'essieu de référence (NF P 98-082).

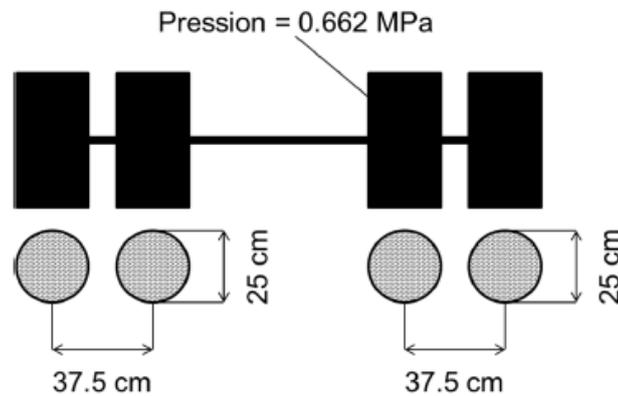


Figure 1.32. Vue et trace au sol de l'essieu français de référence (Gaborit, 2015)

Ce nombre est défini par:

$$NE = N * CAM \quad (1.15)$$

Avec:

N Nombre total de poids lourds qui roulent sur la chaussée.

CAM Coefficient d'agressivité moyen.

Pour chaque type d'essieu (simple, tandem, tridem...), l'agressivité A est donnée par:

$$A = k * \left(\frac{P}{13}\right)^\alpha \quad (1.16)$$

Avec:

P La charge de l'essieu dont on calcule l'agressivité.

k, α Les coefficients relatifs au matériau et à l'essieu.

Le CAM est donc défini par la moyenne des différentes agressivités, selon la répartition de chaque type d'essieu dans le trafic.

1.5.4 Méthode incrémentale

Si les deux approches précédemment présentées sont largement utilisées actuellement, cette méthode est en fait une proposition émise par un groupe d'experts européennes afin de mieux prendre en compte l'évolution réelle du comportement des chaussées au cours de leur durée de vie. (COST_333 (1999), 1999) (Perret, 2003) (Figure 1.33)

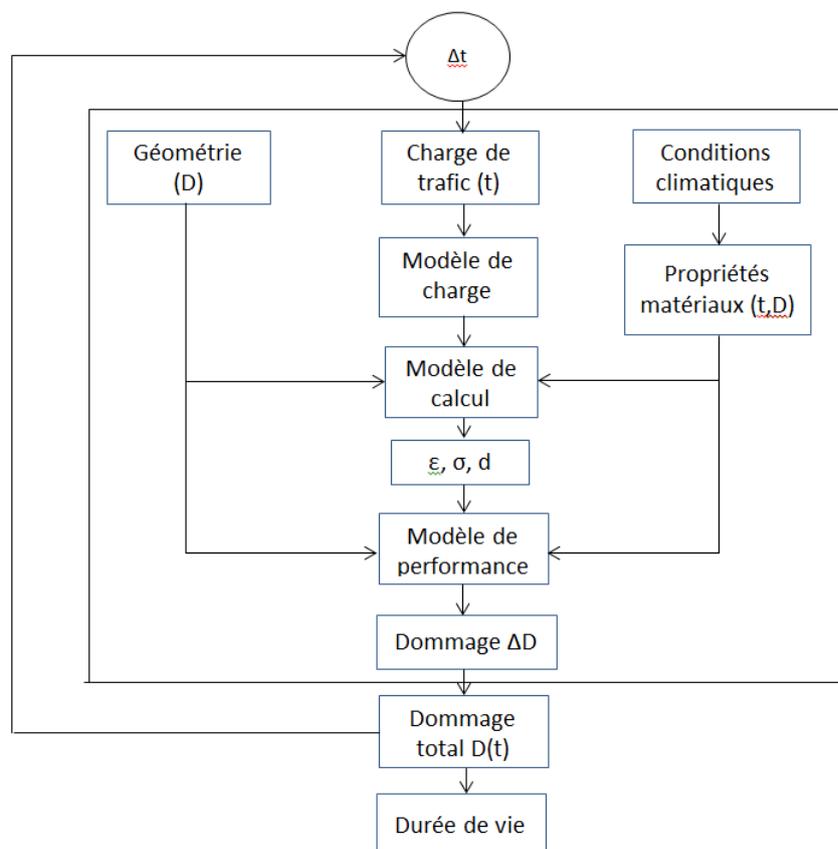


Figure 1.33. Principe de fonctionnement de la méthode incrémentale (COST_333 (1999), 1999)

Cette méthode consiste à calculer les endommagements élémentaires produits par chacune des sollicitations induites par les charges de trafic à l'instant t , en prenant en compte les performances réelles des matériaux à cet instant t (qui dépendent de la température, des conditions hydriques, et éventuellement aussi du vieillissement et de l'endommagement des matériaux). Une telle méthode doit permettre de limiter, voire de supprimer, les corrections empiriques. Cependant, sa mise en place s'avère très complexe à cause de nombreuses interactions entre les phénomènes pris en compte (trafic, variations climatiques...). L'intérêt de cette méthode réside dans la possibilité de

suivre l'évolution d'une chaussée au cours du temps: outre sa durée de vie, il serait possible d'évaluer son état structurel à tout instant.

1.6 Modélisation du comportement mécanique de chaussées

1.6.1 Modèles mécaniques de chaussées

1.6.1.1 Modèle de Boussinesq (Boussinesq, 1885)

Développé en 1885, le modèle de Boussinesq est le premier modèle de calcul de l'effet d'une charge circulaire sur un massif élastique, et il constitue l'un des modèles de base de la mécanique des sols. Pour ce modèle, le sol est considéré comme un massif homogène, isotrope, infini en plan. Le sol a un comportement élastique linéaire. La charge appliquée est circulaire de rayon a et est chargée avec une pression uniforme q_0 . L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte une structure multicouche de chaussée.

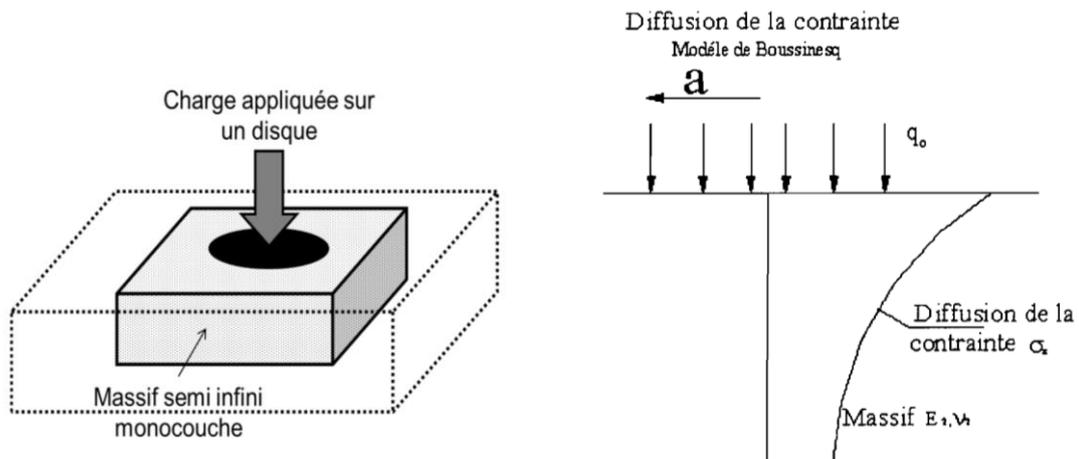


Figure 1.34. Modèle de chargement d'un massif homogène, isotrope et élastique linéaire proposée par Boussinesq (1885)

Lorsque l'on applique une charge circulaire uniformément répartie, la contrainte et la déformation maximale sont situées sur l'axe de symétrie passant par le centre géométrique. Dans ce cas, $\tau_{rz} = 0$ et $\sigma_t = \sigma_r$. Les solutions du modèle de Boussinesq s'expriment de la façon suivante :

Pour les contraintes:

$$\sigma_z = q_0 \left(1 - \frac{z^3}{\sqrt{(a^2+z^2)^3}} \right) \quad (\text{contrainte verticale}) \quad (1.17)$$

$$\sigma_r = q_0 \left[(1 + 2\mu) - \frac{2(1+\mu)z}{\sqrt{a^2+z^2}} + \frac{z^3}{\sqrt{(a^2+z^2)^3}} \right] \quad (\text{contrainte radiale}) \quad (1.18)$$

Pour les déformations:

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\mu)q_0}{E} \left[(1 - 2\mu) + \frac{2\mu z}{\sqrt{a^2+z^2}} - \frac{z^3}{\sqrt{(a^2+z^2)^3}} \right] \quad (\text{déformation verticale}) \quad (1.19)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\mu)q_0}{2E} \left[(1 - 2\mu) + \frac{2(1-\mu)z}{\sqrt{a^2+z^2}} + \frac{z^3}{\sqrt{(a^2+z^2)^3}} \right] \quad (\text{déformation radiale}) \quad (1.20)$$

Avec :

- E Module du massif
- μ Coefficient de Poisson
- a Rayon du chargement circulaire appliqué sur le massif
- z Profondeur de calcul

1.6.1.2 Modèle de Westergaard (Westergaard, 1943)

Créé en 1926, le modèle de Westergaard est le premier modèle de chaussée bicouche dans lequel une couche de matériau isotrope, homogène et élastique repose sur un sol de profondeur infinie. Ce sol est considéré comme un ensemble de ressorts verticaux (appelé fondation de Winkler) dont le déplacement vertical en un point est proportionnel à la pression verticale en ce point.

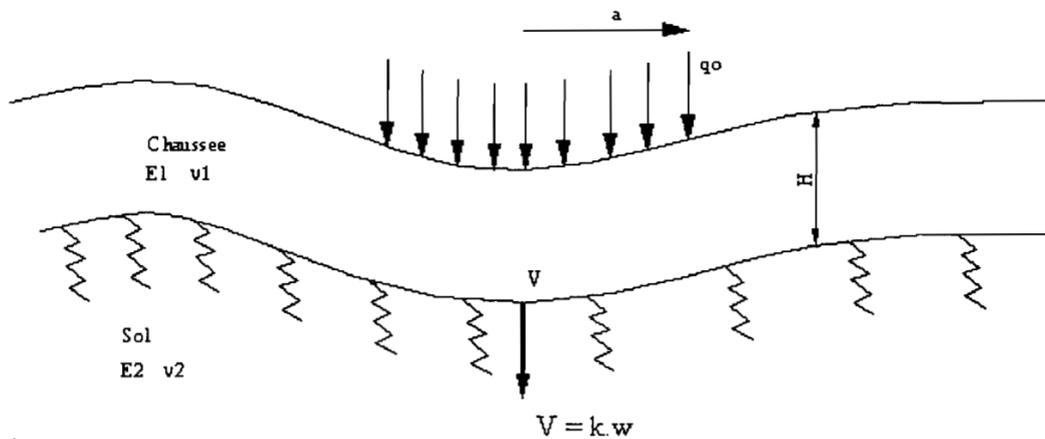


Figure 1.35. Modèle bicouche de Westergaard (1926)

La Figure 1.35 présente le modèle bicouche proposé par Westergaard. La base de la couche de chaussée travaille en traction par flexion. La contrainte de traction est donnée par:

$$\sigma_t = \frac{P}{H^2} C \left(\frac{l}{a} \right) \quad (1.21)$$

Avec:

$$I = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{E_1 H^3}{p(1 - \nu_1)k}} \quad \text{Rayon de rigidité de la chaussée}$$

P Charge par roue

C Fonction croissante de I qui dépend de la position de la charge

a Rayon du chargement circulaire appliqué sur le massif

D	Facteur de rigidité
k	Module de réaction du sol support
E_1	Module élastique de la chaussée
ν	Coefficient de Poisson
H	Epaisseur de la chaussée

1.6.1.3 Modèle de Hogg (Hogg, 1944)

Le modèle de Hogg, comme celui de Westergaard, est un modèle bicouche dans lequel une plaque mince (E_1, ν_1) repose sur un massif infini de Boussinesq (E_2, ν_2).

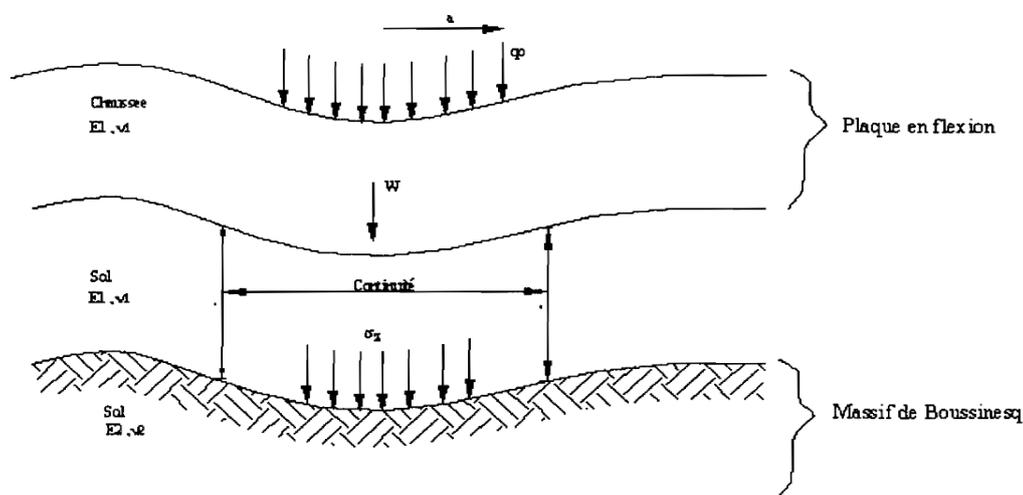


Figure 1.36. Modèle bicouche de Hogg (1938)

La plaque mince respecte la théorie de l'élasticité et les hypothèses de Navier. Son déplacement vertical est assimilable à celui du massif. La contrainte de traction est donnée par :

$$\sigma_t = \frac{P}{H^2} \frac{1+\nu}{2\pi} \Phi\left(\frac{E_1 H^3}{E_2 a^3}\right) \quad (1.22)$$

Avec:

$$P = \pi a^2 q_0 \quad \text{La charge de la roue}$$

$$\frac{1+\nu}{2\pi} \Phi\left(\frac{E_1 H^3}{E_2 a^3}\right) \quad \text{Le facteur de rigidité}$$

$$\frac{E_1 H^3}{E_2 a^3} \quad \text{Le facteur de rigidité relative}$$

a Rayon du chargement circulaire appliqué sur le massif

1.6.1.4 Modèle de BURMISTER (Burmister, 1943)

La solution du calcul des contraintes et des déformations, dans un massif multicouche (n couches) élastique semi-infini sous une charge circulaire a été proposée par Burmister (Burmister, 1943). Cette structure est décrite de la façon suivante:

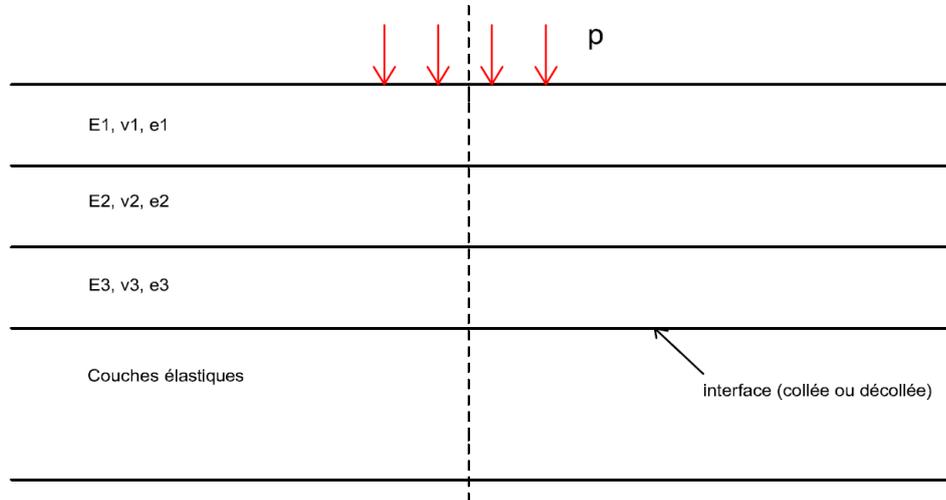


Figure 1.37. Modèle multicouche de Burmister

Pour ce modèle multicouche, plusieurs hypothèses ont été établies:

- Les couches sont infinies en plan
- L'épaisseur de la couche la plus profonde est infinie
- Les interfaces entre couches sont collées ou glissantes
- Toutes les couches sont considérées comme des solides homogènes, élastiques linéaires et isotropes
- La charge introduite équivaut à une pression uniforme appliquée sur une surface circulaire de rayon a . Dans le cas où des charges sont multiples (roues jumelées, essieux tandem ou tridem, remorques), le problème est traité en faisant une superposition des charges élémentaires sur la chaussée.

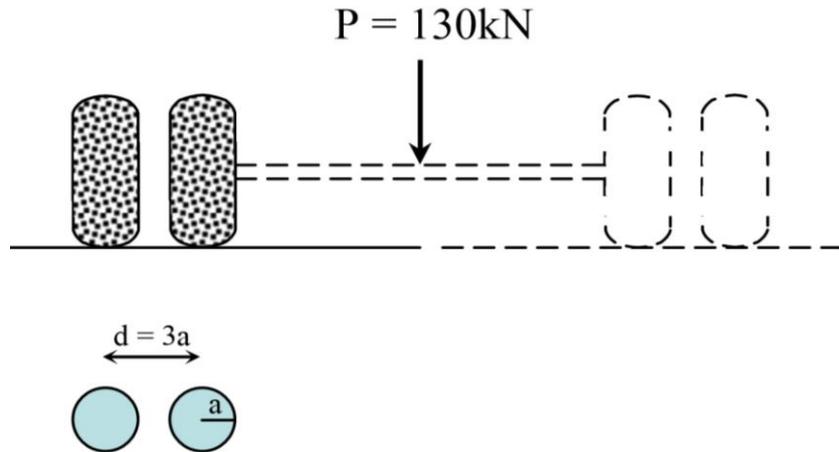


Figure 1.38. Charge de référence de la mécanique des chaussées (1/2 essieu de 130 kN)

Chaque couche est caractérisée par son épaisseur e , son module élastique E et son coefficient de Poisson ν . L'hypothèse d'extension infinie en plan ne permet pas de prendre en compte les effets de bord. Par contre, elle facilite grandement les calculs.

Les contraintes et les déplacements dans un tel modèle sont déterminés à partir de la fonction de contrainte suivante: (Burmister, 1943) (Perret, 2003) (Van Cauwelaert, 1995).

$$\varphi_i = pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{mz} - zD_i e^{-mz}] dm \quad (1.23)$$

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

Les résultats pour les contraintes et les déplacements sont les suivants:

Contraintes normales

$$\sigma_z = pa \int_0^{\infty} J_0(mr)J_1(ma) [A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} - C_i m(1 - 2\nu_i + mz) e^{mz} + D_i m(1 - 2\nu_i - mz) e^{-mz}] dm \quad (1.24)$$

$$\sigma_r = -pa \int_0^\infty J_0(mr)J_1(ma)[A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 - 2\nu_i + mz)e^{mz} - D_i m(1 - 2\nu_i - mz)e^{-mz}]dm + pa \int_0^\infty \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr}[A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}]dm \quad (1.25)$$

$$\sigma_\theta = -pa \int_0^\infty J_0(mr)J_1(ma)[C_i m e^{mz} - D_i m e^{-mz}]2\nu_i dm - pa \int_0^\infty \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr}[A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}]dm \quad (1.26)$$

Contraintes tangentielles

$$\tau_{rz} = -pa \int_0^\infty J_1(mr)J_1(ma)[A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(2\nu_i + mz)e^{mz} + D_i m(2\nu_i - mz)e^{-mz}]dm \quad (1.27)$$

Déplacements

$$w = \frac{1+\nu_i}{E_i} pa \int_0^\infty \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m}[A_i m^2 e^{mz} - B_i m^2 e^{-mz} + zC_i m(2 - 4\nu_i - mz)e^{mz} - zD_i(2 - 4\nu_i - mz)e^{-mz}]dm \quad (1.28)$$

$$u = -\frac{1+\nu_i}{E_i} pa \int_0^\infty \frac{J_1(mr)J_1(ma)}{mr}[A_i m^2 e^{mz} + B_i m^2 e^{-mz} + C_i m(1 + mz)e^{mz} - D_i m(1 - mz)e^{-mz}]dm \quad (1.29)$$

Avec :

a	Rayon de la surface circulaire de chargement
p	Pression de chargement (uniformément répartie)
r	Distance radiale en coordonnées cylindriques
z	Profondeur
σ_z	Contrainte verticale
σ_r	Contrainte radiale
σ_θ	Contrainte circonférentielle
τ_z	Contrainte verticale de cisaillement
w	Déplacement vertical
u	Déplacement radial
E_i	Module de Young de la $i^{\text{ème}}$ couche
ν_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

Ce modèle est actuellement utilisé dans la méthode de dimensionnement de chaussées en France.

1.6.1.5 *Modèle de Huet-Sayegh pour les enrobés bitumineux (Huet, 1965) (Sayegh, 1966)*

1.6.1.5.1 *Modèle de Huet (Huet, 1965)*

Pour mieux comprendre le comportement des liants et des enrobés bitumineux, Huet (1963) a initialement proposé un modèle analogique qui est un assemblage d'un ressort de rigidité E_∞ et deux éléments de fluage paraboliques ($J_1(t)=at^h$ et $J_2(t)=bt^k$ et $0 < k, h < 1$) (Huet, 1965). Ces éléments sont placés en série (Figure 1.39)

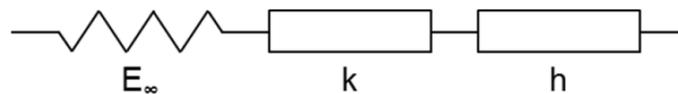


Figure 1.39. Modèle de Huet (1963)

Le module complexe du système s'exprime de la façon suivante :

$$E^*(\omega, \theta) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (1.30)$$

Les paramètres du modèle sont:

E_∞ est la limite du module complexe pour $\omega \rightarrow \infty$

h, k sont les exposants tels que $1 > h > k > 0$, lié respectivement au rapport $E_{\text{imag}}/E_{\text{réel}}$ lorsque ω tend vers 0 (respectivement vers l'infini)

δ est une constante adimensionnelle qui balance la contribution du premier amortisseur dans le comportement global du système

$\tau(\theta)$ est une fonction de la température dont l'expression est suivante:

$$\tau(\theta) = \exp(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2) \quad (1.31)$$

1.6.1.5.2 *Modèle de Huet-Sayegh (Sayegh, 1966)*

Le modèle de Huet permet de mieux comprendre le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux. Cependant, il donne un comportement de type fluide dans le domaine des basses fréquences et des hautes températures, ce qui n'est pas réaliste pour un enrobé. Dans ces conditions, la norme du module complexe tend vers 0. Face à ce problème, Sayegh (1965) a proposé un modèle qui est basé sur le modèle de Huet en ajoutant un ressort en parallèle comme indiqué dans la Figure 1.40. (Sayegh, 1966)

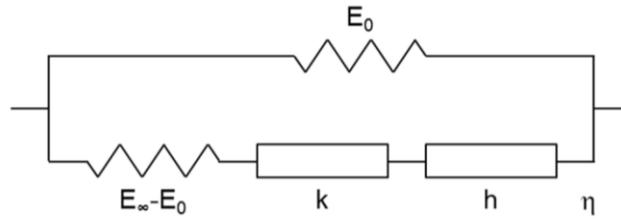


Figure 1.40. Modèle de Huet-Sayegh (1965)

Le modèle est décrit par les équations suivantes:

$$E^*(\omega, \theta) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (1.32)$$

Les paramètres du modèle sont:

- E_0, E_∞ sont les limites du module complexe pour $\omega=0$ ou $\omega=\infty$
- h, k sont les exposants tels que $1 > h > k > 0$, lié respectivement au rapport $E_{\text{imag}}/E_{\text{réel}}$ lorsque ω tend vers 0 (respectivement vers l'infini)
- δ est une constante adimensionnelle
- $\tau(\theta)$ est une fonction de la température dont l'expression est suivante:

$$\tau(\theta) = \exp(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2) \quad (1.33)$$

On constate que lorsque ω vers 0, Le module complexe tend vers une valeur non nulle E_0 , appelée module statique. Si cette valeur vaut 0, les deux modèles sont identiques. La Figure 1.41 montre des courbes de modules complexes de ces deux modèles sur le plan Cole-Cole.

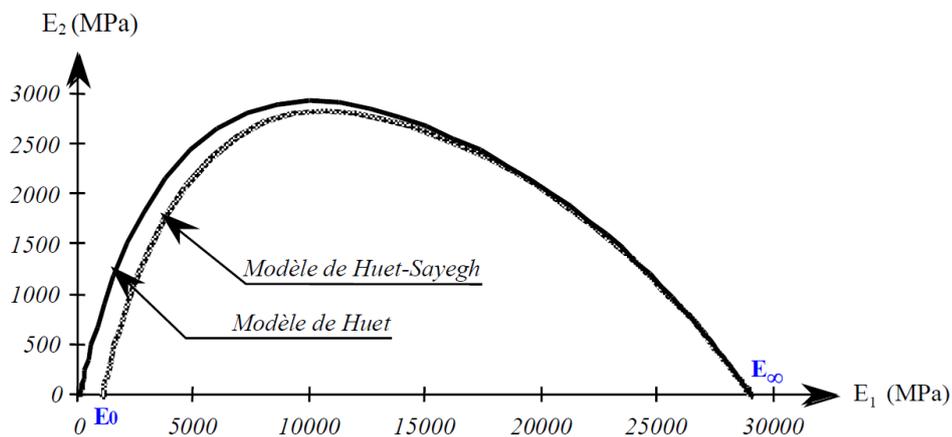


Figure 1.41. La représentation du module complexe des modèles de Huet (1963) et Huet-Sayegh (1965) sur le plan Cole-Cole

Le modèle de Huet-Sayegh a fait l'objet de nombreuses validations, qui ont montré qu'il décrit de façon très réaliste le comportement thermo-visco-élastique des enrobés bitumineux dans les plages de fréquence et de température rencontrées dans les chaussées.

1.6.2 Logiciels de calcul de structures de chaussées utilisés

1.6.2.1 ALIZE-LCPC

Basé sur le modèle multicouche homogène linéaire et isotrope de Burmister, le logiciel ALIZE-LCPC est un programme de référence pour le dimensionnement de chaussée en France depuis les années soixante. Il met en œuvre la méthode rationnelle de dimensionnement des structures de chaussées développée par le LCPC et le SETRA. Il intègre ainsi un outil de calcul des valeurs admissibles (contraintes ou déformations) en fonction du contexte de trafic et de matériaux. Sa mise au point a permis l'élaboration du guide de dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC 1994) et du catalogue de dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC, 1998) (<http://www.lcpc.fr/en/produits/alize/index.dml>) (<http://media.lcpc.fr/ext/pdf/prod/alize.pdf>) (LCPC-SETRA, 1994) (Saint-Laurent, 2008). ALIZE-LCPC permet de dimensionner tout type de chaussées (souple, rigide, béton...). C'est également un outil puissant pour les projets de renforcement de chaussées. En plus, son option « Rétrocalcul » permet de réaliser l'analyse inverse des bassins de déflexion, pour la détermination des modules des couches de chaussées. Cette option est utile aux gestionnaires routiers, pour l'évaluation de l'état des chaussées, et les études de renforcement.

ALIZE-LCPC comprend trois modules principaux :

- Le module Alizé-Mécanique, qui permet de déterminer les sollicitations mécaniques dans les structures de chaussées.
- Le module Alizé-Gel qui concerne la vérification au gel/dégel de la chaussée (calcul thermique).
- Le module Alizé-Rétrocalcul qui permet d'effectuer un calcul inverse des modules d'élasticité des différentes couches de chaussée.

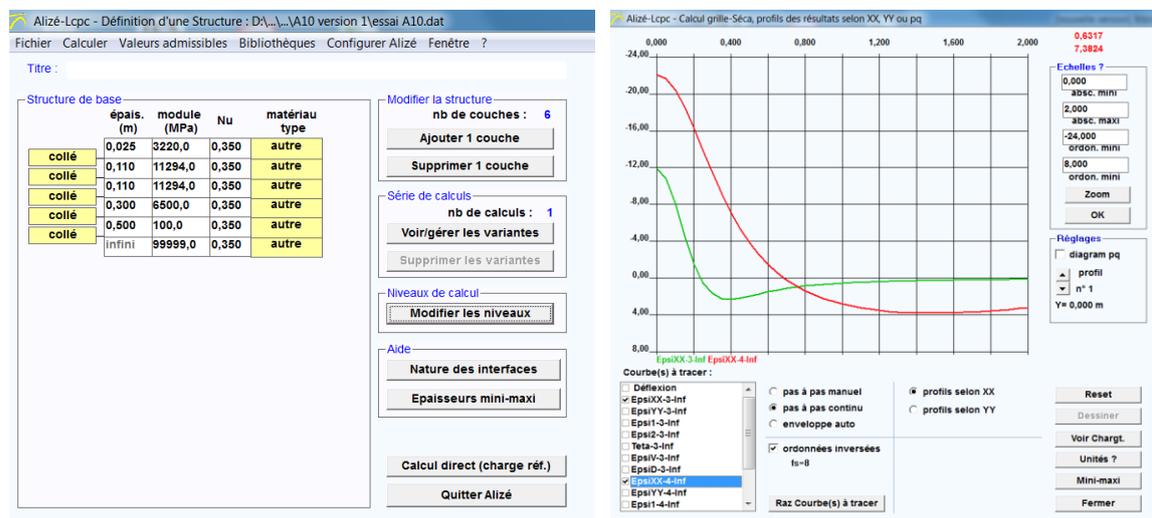


Figure 1.42. Exemple de l'interface du logiciel ALIZE-LCPC

1.6.2.1.1 Définition d'une structure de chaussées

La définition d'une structure de chaussées est faite dans le module « Module routier de base » (« Module Alizé-Mécanique » pour la version recherche) dans ALIZE-LCPC. Chaque couche de chaussée est caractérisée par son épaisseur, son module élastique (E), son coefficient de Poisson

(v). ALIZE possède une bibliothèque des matériaux dont le module élastique est donné par la norme NF P98-086 à 15°C et 10 Hz. Cette bibliothèque contient 5 grandes classes de matériaux de chaussées: matériaux bitumineux, matériaux traités aux liants hydrauliques, bétons de ciment, graves non traitées, sols et plates-formes.

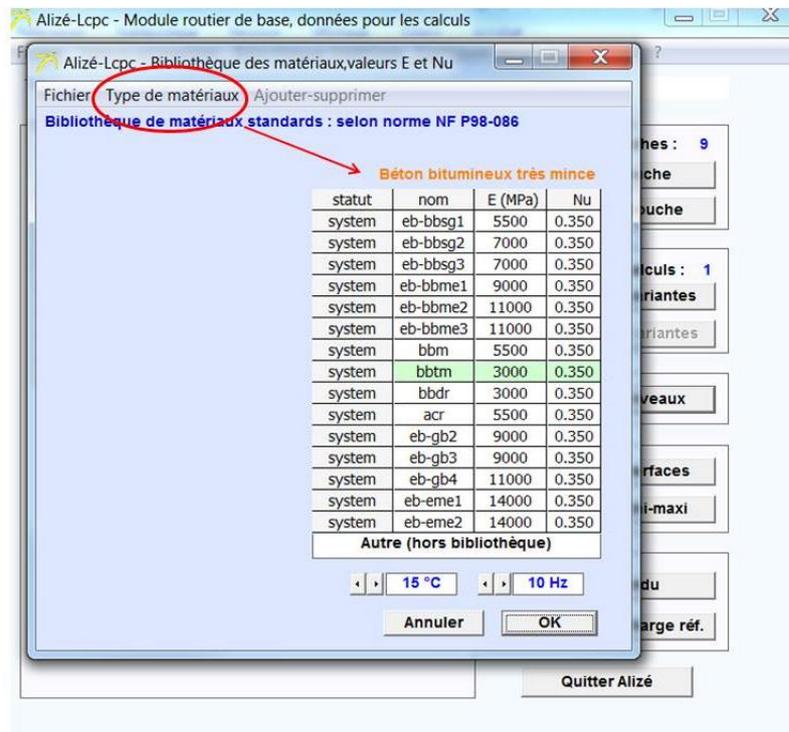


Figure 1.43. Bibliothèque des matériaux de chaussées dans ALIZE-LCPC

Les interfaces entre couches de chaussées peuvent être décrites avec différentes hypothèses. Elles peuvent être considérées soit collées, soit glissantes, soit semi-collées, ce qui correspond aux hypothèses de la méthode française de dimensionnement.. L'hypothèse d'interface semi-collée correspond à la demi-somme des résultats obtenus successivement avec une interface collée et une interface glissante. Mais deux autres hypothèses sont également disponibles dans ALIZE-LCPC :

- L'hypothèse « glissement partiel », où l'interface est caractérisée par un coefficient de souplesse de cisaillement élastique dont la valeur est à définir en fonction de la température.
- L'hypothèse de couche mince, où l'interface est modélisée par une couche élastique de faible épaisseur. Cette couche mince est caractérisée par son épaisseur, son coefficient de Poisson et son module élastique. La valeur du module de cette couche est à définir en fonction du type d'interface et de la température.

1.6.2.1.2 Définition d'un chargement

La charge utilisée pour le calcul peut être la charge de référence de dimensionnement (demi-essieu à roues jumelées, chargé à 65 kN), ou une charge spécifique, définie dans le module « Charge spéciale ». La charge est circulaire, et définie par son rayon R (m), la charge appliquée

(MN), et la pression de contact (MPa), ainsi que les coordonnées de son centre (y). Plusieurs charges circulaires peuvent être superposées.

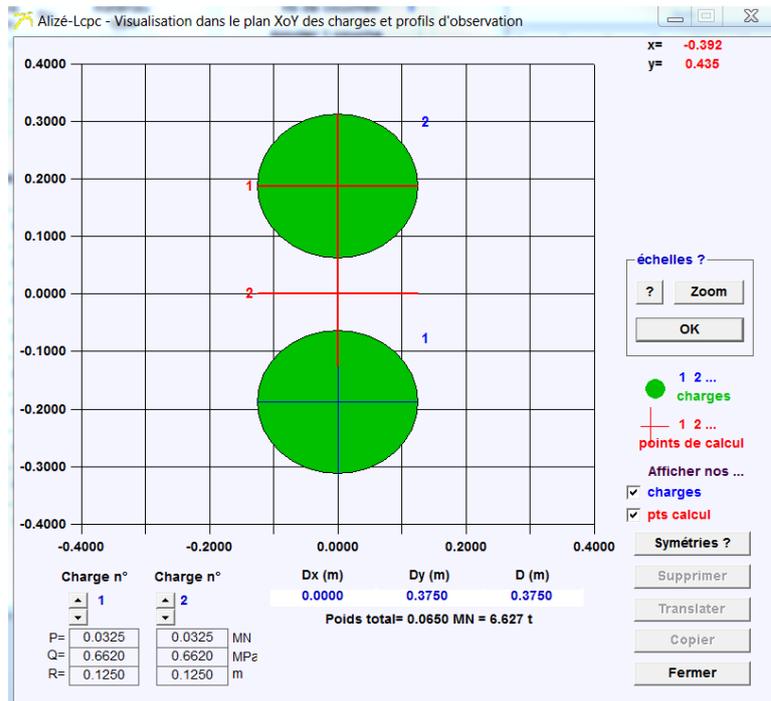


Figure 1.44. Définition d'un chargement dans ALIZE (échelle en m)

1.6.2.1.3 Calcul des sollicitations

Deux types de calculs sont possibles dans ALIZE:

- Calcul direct.
- Calcul étendu.

Le calcul direct est fait sous la charge de référence (demi-essieu standard chargé à 65 kN). Les sollicitations (contrainte et déformation) maximales sont calculées au sommet et à la base de chaque couche de chaussée pour l'ensemble des points situés aux endroits les plus critiques de la structure: aplomb des centres de charge ou aplomb du centre de gravité du demi-essieu.

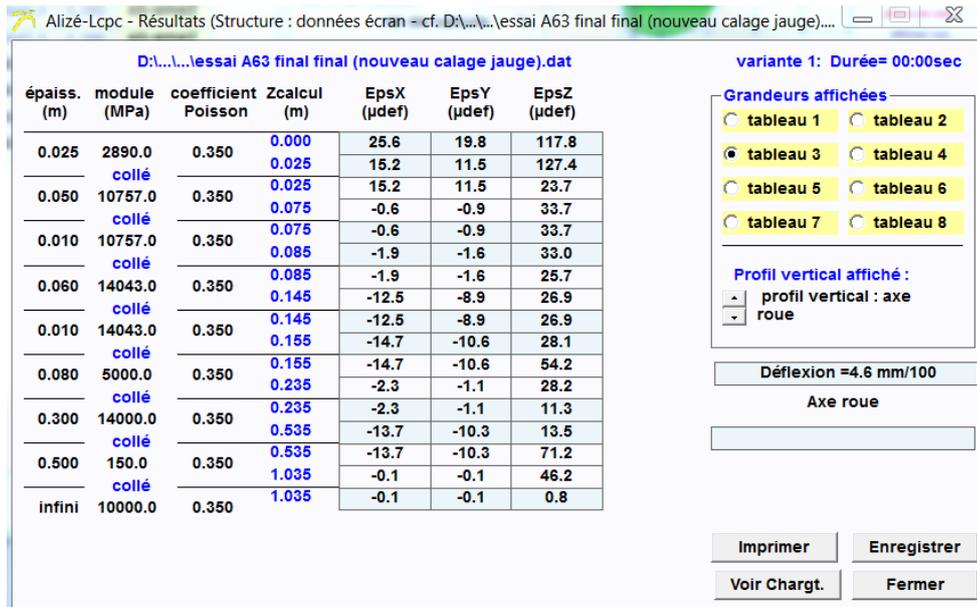


Figure 1.45. Résultats obtenus avec l'option calcul direct d'ALIZE-LCPC

Le calcul étendu, quant à lui, permet de calculer les sollicitations sur une grille de points régulièrement espacés dans le plan horizontal, et à différentes profondeurs. Cela permet de tracer des lignes d'influence des sollicitations (déformations, contraintes, etc..) produites par les charges, suivant une direction horizontale (x ou y), à une profondeur donnée. Ceci est illustré sur la Figure 1.46, qui présente la déformation longitudinale obtenue à la base de la couche d'assise d'une structure bitumineuse épaisse, sous passage d'un poids-lourd à 5 essieux.

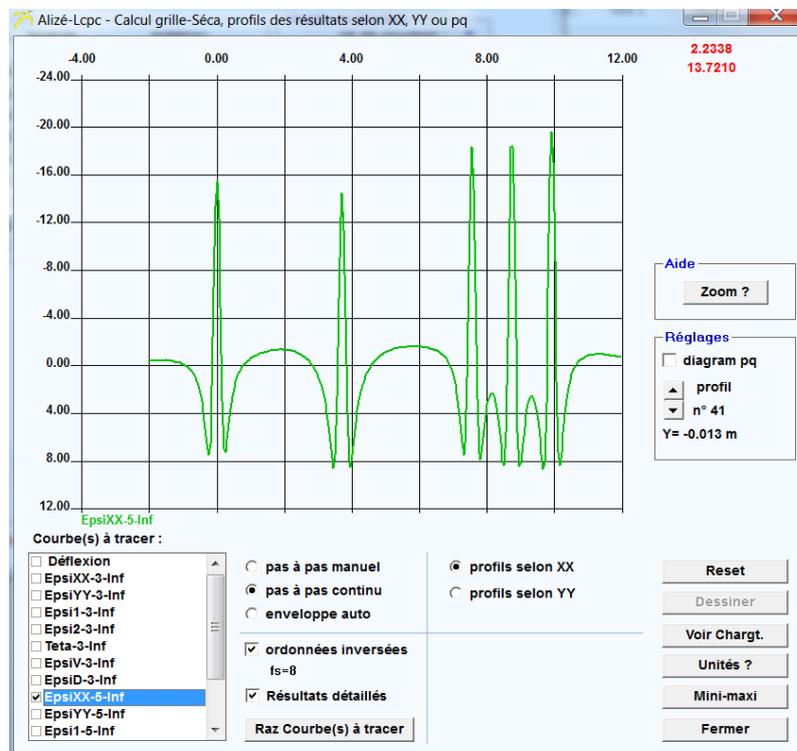


Figure 1.46. Résultats obtenus avec l'option calcul étendu d'ALIZE-LCPC (déformation longitudinale sous passage d'un poids-lourd à 5 essieux)

1.6.2.2 Viscoroute©

Basé sur le modèle de Huet-Sayegh (1965), le logiciel Viscoroute© est un programme qui permet de modéliser le comportement thermo-visco-élastique des chaussées sous une charge mobile (Chabot, et al., 2006). L'hypothèse d'un régime permanent permet d'éviter l'introduction d'un pas de temps en transposant le problème dans le repère de la charge roulante ($x = X - Vt$). Le modèle de Huet-Sayegh est décrit dans la partie précédente de ce chapitre (paragraphe 1.6.1.5)

1.6.2.2.1 Définition de la structure de chaussée

La structure d'une chaussée est définie dans le module « Structure » de Viscoroute. Les paramètres décrivant les matériaux des couches de chaussée dépendent du comportement choisi, élastique linéaire ou viscoélastique. Le matériau ayant un comportement élastique est caractérisé par son épaisseur, son module élastique, sa masse volumique et son coefficient de Poisson. Le matériau ayant un comportement viscoélastique est caractérisé par son épaisseur, sa masse volumique, son coefficient de Poisson et les différents paramètres du modèle de Huet-Sayegh (E_{∞} , E_0 , k , h , δ , A_0 , A_1 , A_2). Ces paramètres sont obtenus à partir d'essais de module complexe à différentes fréquences et températures, réalisés en laboratoire. Contrairement à ALIZE-LCPC, le logiciel ne dispose pas d'une bibliothèque de matériaux de chaussées. En ce qui concerne les interfaces entre couches de chaussées, celles-ci peuvent être considérées collées ou glissantes.

	Z (m)	Epais. (m)	Module E (MPa)	Coef. de Poisson	Mas. Vol. (kg/m3)	Type de matériau	Comport.	Type de liaison	Module E0 (MPa)	T (°C)	k (loi H-S)	h (loi H-S)	delta (loi H-S)	A0	A1	A2
1	0.025	0.025	19644.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastiqu	collée	18.93370	15.000	0.213	0.628	2.535	3.072	-0.382	0.001652
2	0.075	0.050	11000.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastiqu	collée	11.00000	15.000	0.190	0.590	2.240	2.943	-0.397	0.001950
3	0.085	0.010	11000.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastiqu	collée	11.00000	15.000	0.190	0.590	2.240	2.943	-0.397	0.001950
4	0.145	0.060	31008.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastiqu	collée	21.77900	15.000	0.186	0.599	2.064	5.865	-0.388	0.001668
5	0.155	0.010	31008.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastiqu	collée	21.77900	15.000	0.186	0.599	2.064	5.865	-0.388	0.001668
6	0.235	0.080	5000.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
7	0.535	0.300	14000.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
8	1.035	0.500	150.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
9		infini	00000.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000

Figure 1.47. Définition d'une structure de chaussée avec Viscoroute

1.6.2.2.2 Définition d'un chargement

Le chargement est défini dans le module « Chargement », par les caractéristiques suivantes

- La vitesse de chargement
- Les niveaux de calcul
- La géométrie de la charge, et la force appliquée

Trois types de géométrie de la charge sont proposés dans Viscoroute: charge ponctuelle, rectangle et ellipse. Les composantes de la force dans les directions x,y et z doivent également être précisées. Cette force est convertie en une contrainte uniforme, répartie sur la surface de contact de la charge (rectangle ou ellipse).

Structure Chargement Résultats

D:\A63\Viscoroute\Chargement tridem\chargement Alize A63.cha

LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Vitesse de charge 25,0 Nombre de 12 Nb cas 5

	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Type de charge	a (m)	b (m)	x (m)	y (m)
1	0.000	0.000	33500.000	Ellipse	0.125	0.125	0.000	1.080
2	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	1.080
3	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	0.705
4	0.000	0.000	38000.000	Ellipse	0.125	0.125	7.550	1.080
5	0.000	0.000	40000.000	Ellipse	0.125	0.125	8.730	1.080
6	0.000	0.000	41000.000	Ellipse	0.125	0.125	9.910	1.080
7	0.000	0.000	33500.000	Ellipse	0.125	0.125	0.000	-1.080
8	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	-1.080
9	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	-0.705
10	0.000	0.000	38000.000	Ellipse	0.125	0.125	7.550	-1.080
11	0.000	0.000	40000.000	Ellipse	0.125	0.125	8.730	-1.080
12	0.000	0.000	41000.000	Ellipse	0.125	0.125	9.910	-1.080

	Cote (m)	Sortie
1	0.07500	epsxx (microde
2	0.07500	epsyy (microde
3	0.14500	epsxx (microde
4	0.14500	epsyy (microde
5	0.15500	uz (m)

Figure 1.48. Définition d'un chargement

La Figure 1.49 montre un exemple de déformation longitudinale calculée avec Viscoroute à la base de la couche de base d'une structure bitumineuse épaisse, sous passage d'un poids lourd à 5 essieux.

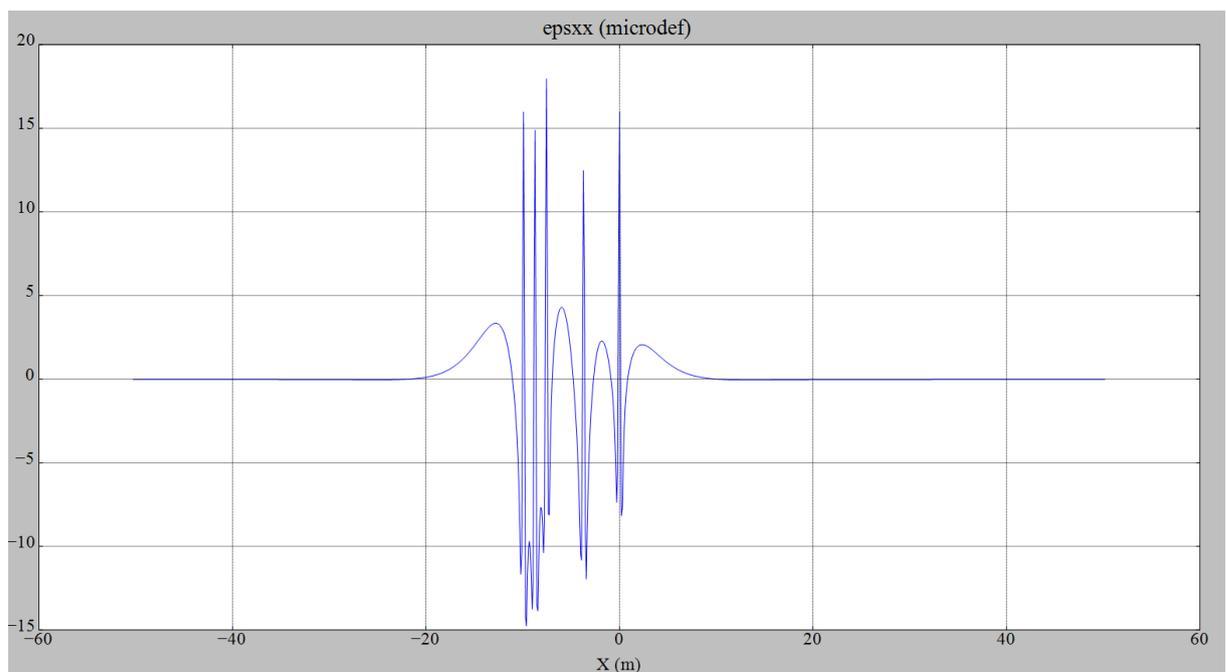


Figure 1.49. Résultats obtenus avec Viscoroute (déformation longitudinale sous passage d'un poids-lourd à 5 essieux)

1.7 Conclusion

Les travaux réalisés dans cette thèse portent sur le suivi de chaussées instrumentées, et l'exploitation des données de mesure de cette instrumentation. Après avoir rappelé les principales caractéristiques des structures de chaussées, on s'est donc principalement intéressé, dans cette étude bibliographique aux capteurs utilisés pour l'instrumentation des chaussées, et aux expérimentations sur chaussées instrumentées

En ce qui concerne les capteurs, ceux qui sont le plus souvent utilisés pour l'instrumentation des chaussées sont :

- les jauges de déformation, permettant de mesurer les déformations dans les différentes couches de chaussées. Les niveaux de déformation constituent sont des paramètres importants pour le comportement des différentes couches de chaussée, et sont souvent utilisées comme critères pour définir la durée de vie des matériaux (critères de fatigue, ou d'orniérage, basés sur les déformations).
- les capteurs de pression (ou de contraintes totales) qui sont utilisés pour mesurer les contraintes verticales dans les couches de chaussées.
- les sondes de température ; La connaissance des températures est notamment indispensable pour analyser le comportement des matériaux bitumineux, qui est très sensible à la température.
- Les capteurs de déplacement, qui permettent de mesurer la déflexion au passage d'une charge, ou le tassement de différentes couches de la chaussée (déformations permanentes, responsables de l'orniérage). La déflexion constitue un paramètre très intéressant pour évaluer de façon globale les caractéristiques structurelles d'une chaussée, puisqu'elle prend en compte les déformations de toutes les couches de la chaussée.

A côté de ces capteurs classiques, on s'est également intéressé aux géophones et accéléromètres, qui permettent de mesurer respectivement des vitesses de déplacement et des accélérations, et dont les mesures peuvent être intégrées, pour mesurer des déplacements.

L'instrumentation des chaussées est utilisée depuis longtemps, pour suivre le comportement de structures de chaussées, et l'évolution de leur comportement sous l'effet des conditions environnementales (températures, variations de teneur en eau des matériaux non liés, etc). Dans les études que nous avons recensées, la réponse de la chaussée était généralement mesurée au passage d'un ou plusieurs véhicules de référence, de charge connue. L'utilisation d'une charge connue est intéressante pour modéliser la réponse de la chaussée, et comparer mesures et modélisation. Néanmoins, ce type de mesures avec un véhicule de référence est relativement lourd à organiser, et ne peut se faire que de manière ponctuelle (mesures espacées de quelques semaines à quelques mois.), ce qui ne permet pas de suivre de manière fine l'évolution de la réponse de la chaussée (sous les variations thermiques journalières, par exemple). La réalisation de mesures en continu de la réponse de la chaussée, sur une longue durée, sous trafic réel, telles que celles effectuées dans cette thèse, apparaît donc comme une approche originale.

Les résultats de suivi de sections instrumentées mettent en particulier en évidence la grande sensibilité des déformations dans les couches de chaussée bitumineuses à la température et aux conditions hydriques dans la plate-forme et les matériaux non traités. Le caractère visco-élastique de la réponse des chaussées bitumineuses a également bien été mis en évidence par les mesures sur chaussées instrumentées.

Enfin, la dernière partie de la bibliographie a été consacrée aux modèles de calcul et de dimensionnement des structures de chaussées, et particulièrement aux logiciels ALIZE-LCPC (logiciel de dimensionnement de chaussée, basé sur une modélisation élastique linéaire) et Viscoroute© (qui permet la prise en compte du comportement thermo-visco-élastique des matériaux bitumineux). Ces logiciels seront utilisés dans ce travail pour l'interprétation des mesures sur chaussées instrumentées.

Chapitre 2 - Présentation des deux sites instrumentés sur les autoroutes A10 et Ax

Sommaire

2	Chapitre 2 - Présentation des deux sites instrumentés sur les autoroutes A10 et Ax.....	64
2.1	Introduction	65
2.2	Présentation du site instrumenté sur l'autoroute A10.....	65
2.2.1	Objectifs de l'expérimentation	65
2.2.2	Structure de chaussée	66
2.2.3	Instrumentation.....	67
2.2.4	Programme de suivi	71
2.3	Présentation du site instrumenté sur l'autoroute Ax.....	73
2.3.1	Objectifs de l'expérimentation	73
2.3.2	Structure de chaussée	73
2.3.3	Instrumentation.....	74
2.4	Présentation du dispositif d'acquisition et de transmission des données à distance	77
2.4.1	Principe de la plate-forme PEGASE	77
2.4.2	Généricité matérielle.....	78
2.4.3	Généricité logicielle.....	78
2.4.4	Application aux deux sites instrumentés	79
2.4.5	Acquisition des données	80
2.5	Conclusion.....	81

2.1 Introduction

Ce chapitre présente les 2 sites instrumentés qui seront étudiés dans la thèse. Le premier site réalisé sur l'autoroute A10, a fait l'objet d'un projet de collaboration avec Cofiroute, et visait à instrumenter une chaussée autoroutière innovante, qui a fait l'objet d'un retraitement en place. Pour cette chaussée, il s'agissait de vérifier, grâce à l'instrumentation, les performances des matériaux mis en œuvre, et leur évolution dans le temps. Le second site, réalisé sur l'autoroute Ax, en collaboration avec Colas, avait davantage pour but de tester l'utilisation de différents types de capteurs, et d'une acquisition de données en continu, sous trafic réel, et de proposer des méthodes d'interprétation des mesures réalisées sous trafic réel, pour le suivi de la chaussée.

Dans ce chapitre, on présente les principales caractéristiques des deux sites instrumentés, à savoir :

- Les caractéristiques des structures de chaussées
- Les capteurs utilisés pour l'instrumentation, leur positionnement et les méthodes utilisées pour leur mise en place
- Les systèmes d'acquisition des données.
- Les programmes de réalisation des mesures.

L'analyse des différents résultats des mesures fera l'objet des chapitres suivants.

2.2 Présentation du site instrumenté sur l'autoroute A10

2.2.1 Objectifs de l'expérimentation

La Société Cofiroute est gestionnaire de 1200 kilomètres d'autoroutes, répartis sur l'A10, A11, A28, A71, A85 et le Duplex d'A86 en région parisienne. A ce titre, l'entretien des chaussées, dont les plus anciennes ont 42 ans, est une préoccupation majeure et un enjeu important pour pérenniser ces structures. (Hug, et al., 2015) (Sohm, et al., 2012)

C'est dans cette optique que d'importants travaux ont été initiés sur le tronç commun A10/A11, en région parisienne, depuis 2009, qui consistent à reconstruire en totalité la voie lente soumise au trafic poids lourds. Cette section de 25 kms construite initialement en 1972 a été élargie à 2x4 voies en 1994 et supporte un trafic journalier de 80 000 véhicules dont 8500 PL. C'est cette quatrième voie qui pose des problèmes structurels et qui a incité Cofiroute, après de nombreuses investigations et réparations localisées, à envisager sa reconstruction.

De plus, dans un souci de développement durable et d'économie des ressources, Cofiroute à volontairement visé à réhabiliter cette voie en utilisant principalement les matériaux du site par un retraitement en place ou en centrale, au ciment, pour la couche de fondation et un recyclage à fort taux des couches supérieures. C'est à Eurovia que Cofiroute a choisi de confier d'une part les études permettant de trouver une solution à leurs hypothèses et par la suite les travaux, réalisé par l'agence EJJ des Mureaux.

La totalité de la structure en place de la voie lente a été déconstruite couche par couche afin de récupérer les fraissats stockés eux aussi suivant leur origine. Les couches d'assise (couches de sable-bitume) ont été totalement réutilisées pour être traitées en-place avec un liant hydraulique routier afin de réaliser une couche de fondation de 30 cm d'épaisseur (une couche de 35 cm a été

réalisée, puis 5 cm ont été fraisés) appelé Recyvia® et qui fait l'objet d'une charte innovation (Figure 2.1).



Figure 2.1. Retraitement en place au ciment de la couche de sable bitume, chantier de réhabilitation de la voie lente du tronc commun A10-A11 en 2011

Lors du chantier réalisé en 2011, le Recyvia®, qui constituait la couche de fondation, a été traité en place, sans pré-fissuration après la mise en œuvre. Cette couche non pré-fissurée a été surmontée de deux couches de 11 cm d'EME + 2,5 cm de BBTM. Chaque fois, l'EME intégrait 40% d'agrégats d'enrobés et le BBTM un taux de 20%.

En parallèle, afin de se rassurer sur ces choix ambitieux et innovants et suivre dans le temps l'évolution de ces matériaux, Cofiroute s'est rapproché du laboratoire LAMES (laboratoire Auscultation, Modélisation et Expérimentation des infrastructures de transport) de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Techniques des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) afin de mettre au point l'instrumentation d'une section, au moyen de différents capteurs, placés dans les couches de chaussée, afin de suivre son comportement mécanique. En effet, les appareils d'auscultation classiques n'étaient pas assez précis pour étudier l'évolution du module du Recyvia, et Cofiroute interdisait la réalisation de carottages dans la structure. (Sohm, et al., Mai 2012)

2.2.2 Structure de chaussée

La structure construite en septembre 2011 est composée de (Figure 2.2) :

- un sol support constitué de sable de Fontainebleau
- 30 cm de matériaux traités aux liants hydrauliques : Recyvia®
- 22 cm d'enrobé à module élevé (EME), mis en deux couches de 11 cm
- 2,5 cm de béton bitumineux très mince (BBTM)

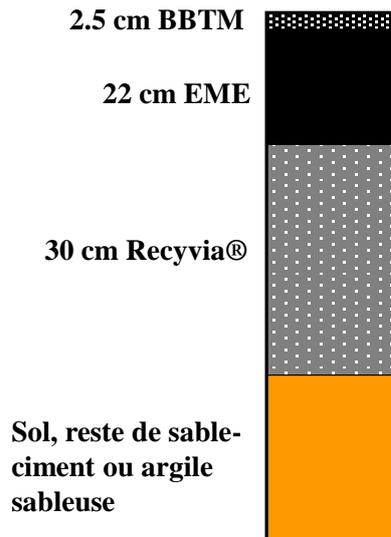


Figure 2.2. Structure de la section instrumentée sur l'A10

2.2.3 Instrumentation

2.2.3.1 Profils instrumentés avec des jauges de déformation

2.2.3.1.1 Implantation des capteurs

Cinq profils distants de quelques centaines de mètres, ont été instrumentés avec des jauges de déformation classiques, placées dans la couche de Recyvia, et en partie supérieure du sol support. Le schéma de l'instrumentation mise en place est présenté sur la Figure 2.3.

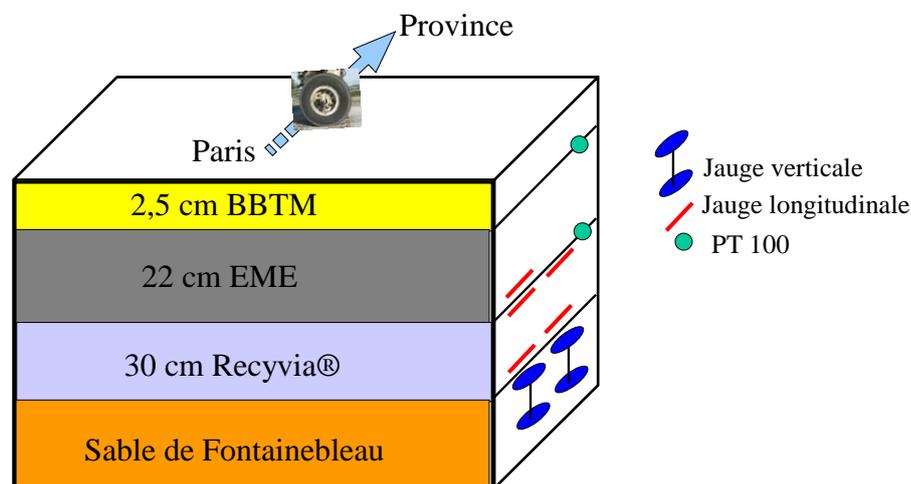


Figure 2.3. Schéma de l'instrumentation mise en place sur l'un des profils de l'A10

Les jauges ont été placées dans la bande de roulement de la voie lente de l'autoroute. Les sondes de températures ont été placées hors de la bande de roulement.

2.2.3.1.2 Type de capteurs

Les jauges mises en place sont des jauges d'extensométrie de type Kyowa KM-120-120-H211W1M3 (décrites dans le Chapitre I Bibliographie, paragraphe 1.3.2.5). Les jauges suivantes ont été mises en place :

- Jauges verticales au sommet du sol (Figure 2.4a)
- Jauges horizontales à la base et au sommet de la couche de Recyvia® (Figure 2.4b)
- Jauge longitudinale à la base de l'EME
- 2 Sondes de températures à la base de l'EME et du BBTM

Les profils instrumentés sont situés aux PK (point kilométrique) suivants: PK 15+750 ; PK 15+900 ; PK 16+850 ; PK 17+100 ; PK 17+250. Pour toute la suite de ce rapport, les profils instrumentés seront appelés par leur « point kilométrique, PK ».



Figure 2.4. Jauge de déformation verticale (a) et jauge de déformation horizontale (b) (longitudinale ou transversale)

Les plans d'instrumentation détaillés de chaque section sont donnés en annexe A. Les jauges suivantes ont été mise en place sur chaque section:

- PK 15+700 : 2 jauges verticales au sommet du sol, 2 jauges longitudinales à la base du Recyvia.
- PK 15+900 : 2 jauges verticales au sommet du sol, 2 jauges longitudinales à la base du Recyvia.
- PK 16+850 : 2 jauges verticales au sommet du sol, 2 jauges longitudinales à la base du Recyvia, 2 jauges longitudinale au sommet du Recyvia.
- PK 17+100 : 2 jauges verticales au sommet du sol, 2 jauges longitudinales à la base du Recyvia.
- PK 17+250 : 1 jauge longitudinale à la base de l'EME.

On remarque qu'il n'y a qu'une seule jauge longitudinale à la base de l'EME (sur le PK 17+250). En effet, les autres jauges mises en place dans l'EME sur les autres sections ont toutes été endommagées durant la construction.

2.2.3.1.3 Mise en place des capteurs

Les jauges verticales dans le sol ont été mises en place après la mise en œuvre du Recyvia (mais avant le compactage). Une mini pelle a excavé le Recyvia jusqu'au sol. Ensuite, les capteurs ont été placés verticalement dans la partie supérieure du sol, en faisant un trou, puis en recompressant manuellement le sol autour du capteur (voir Figure 2.5).



Figure 2.5. Mise en place des jauges verticales au sommet du sol

Les jauges de déformations longitudinales à la base du Recyvia ont été installées après la mise en place des jauges au sommet de sol, juste avant que le Recyvia soit remis en place au niveau de l'excavation, puis compacté. Les jauges de déformations longitudinales au sommet du Recyvia ont été mise en place 15 jours après la mise en œuvre de la couche de Recyvia, avant la pose de l'EME. Une petite excavation a été faite au burin et les jauges de déformations ont été mise en place et fixées avec de la résine (voir Figure 2.6).



Figure 2.6. Mise en place des jauges longitudinales au sommet de la couche Recyvia

Sur ces 4 sections, l'acquisition des données a été faite avec des centrales d'acquisition de type « Spider » de la marque HBM, deux fois par an, en se rendant sur place pour faire les mesures, sous passage d'un camion de référence, de charge connue.

2.2.3.2 Profil instrumenté avec suivi à distance

Un autre profil, situé au PK 16+016 a été instrumenté avec deux géophones et deux sondes de température. L'acquisition des données enregistrées sur ce profil se fait avec un dispositif d'acquisition et de transmission des données à distance. Ce système d'acquisition est présenté dans le paragraphe 2.4 de ce chapitre. Les données sont donc enregistrées en continu, sous le trafic réel. L'objectif était d'évaluer les possibilités d'utiliser ce type d'instrumentation, par des géophones, pour l'évaluation du comportement structurel de la chaussée et du trafic qui y circule.

2.2.3.2.1 Implantation des capteurs

Sur ce profil, deux géophones ont été mis en place au sommet du Recyvia. Deux sondes de températures ont aussi été mises en place à la base du BBTM et à la base de l'EME. Les géophones ont été placés dans la bande de roulement de la voie lente de l'autoroute, espacés de 30 cm. Les sondes de températures ont été placées hors de la bande de roulement (voir Figure 2.7).

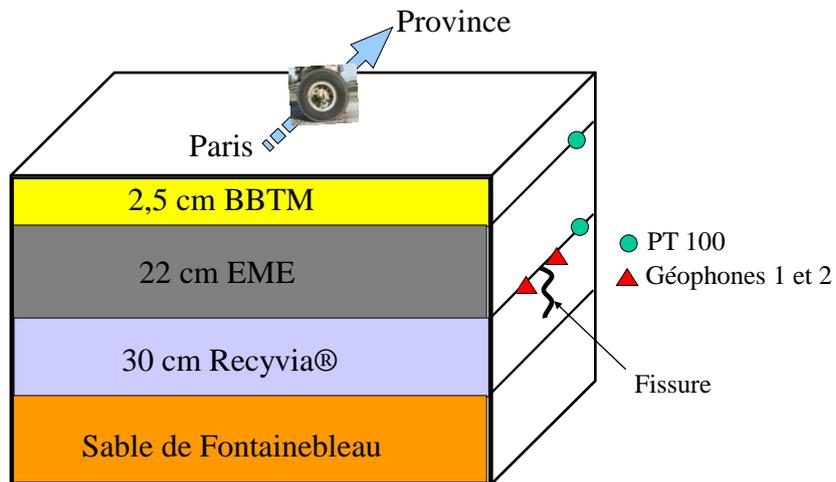


Figure 2.7. Schéma de l'instrumentation du PK 16+016

2.2.3.2.2 Types de capteurs

Les géophones mis en place sont de type GS11D 4000 avec une résistance de fermeture de 47 k Ω . Les géophones utilisés sont de marque Geospace modèle GS-11D associés à une résistance de fermeture de 47 k Ω , de sorte à ce que la fréquence propre soit calée sur une fréquence de 4.5 Hz, avec un amortissement relatif de « l'overshoot » (excédent de la réponse à la fréquence propre) (Figure 2.8a). Le coefficient donné par le fabricant est de 94.4 V/ms⁻¹ (Tableau 1.2)

Les deux sondes de température sont de type PT 100 (Figure 2.8b).

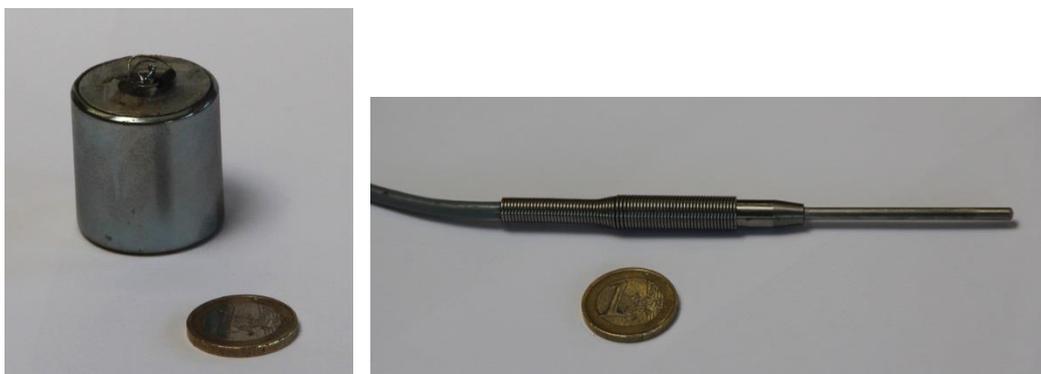


Figure 2.8. Géophone (a) et Capteur de mesure de température (PT100) (b).

2.2.3.2.3 Mise en place des capteurs

Sur cette section, la couche de fondation traitée au ciment n'a pas été préfissurée, comme cela se fait généralement avec des matériaux hydrauliques plus rigides, pour éviter une fissuration anarchique. Pour cette raison, afin de pouvoir amorcer une fissure en un point précis, un trait de scie a été réalisé sur toute la largeur de la voie lente (Figure 2.9), sur une profondeur de 5 cm, 15 jours après la mise en œuvre de la couche de Recycvia®, avant la pose de l'EME.

Les géophones (Figure 2.8a), capteurs très sensibles mesurant la vitesse de déplacement vertical, ont été placés de part et d'autre de cette fissure créée par sciage (espacés de 30 cm) en partie supérieure du matériau traité au liant hydraulique. Afin de mettre en place les géophones, des trous ont été percés à la perceuse au sommet de la couche de Recycvia. Les géophones ont été positionnés dans ces trous, puis scellés avec de la résine.

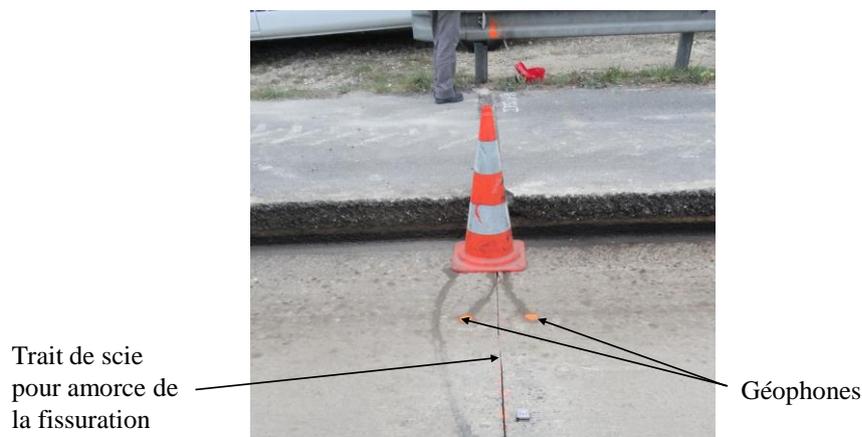


Figure 2.9. Implantation des géophones en partie supérieure du Recycvia®.

Deux sondes de température de type PT 100 (Figure 2.8b) ont aussi été mise en place, l'une à la base de la couche d'EME (donc au même niveau que les géophones), l'autre à la base de la couche de BBTM. Elles ont été placées au moment du répandage des matériaux bitumineux.

2.2.4 Programme de suivi

Les mesures sur les 4 sections instrumentées au moyen de jauges de déformations ont été faites uniquement sur site. Toutes ces mesures ont été réalisées sous passage de poids lourds de charge connue, alors que la voie lente était coupée à la circulation. Les poids-lourds utilisés pour les mesures ont donc pu circuler à vitesse très réduite (environ 3 km/h).

Les mesures ont été effectuées sur site aux dates suivantes :

- 15 novembre 2011 (après 29 jours de trafic)
- 23 avril 2012 (190 jours de trafic)
- 18 décembre 2012 (429 jours de trafic)
- 18 février 2014 (856 jours de trafic)

Pour les 3 premières séries de mesures, un déflectographe de la société Vectra a été utilisé (Figure 2.10). Il s'agit d'un camion à 2 essieux, avec un essieu arrière à roues jumelées, chargé à 130 kN.

La roue avant droite et le jumelage arrière droit chargé à 65 kN ont circulé au ralenti (3 km/h) au droit des capteurs pendant l'acquisition des signaux.

La dernière série de mesures a été effectuée de la même manière, mais avec un poids lourd semi-remorque à 5 essieux, chargé à 46 tonnes environ. Les charges des différents essieux ont été contrôlées avant les mesures (Figure 2.11).

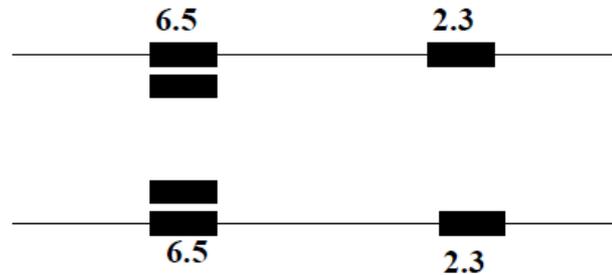


Figure 2.10. Charges (en tonnes) des essieux du déflectographe Lacroix utilisé pour les mesures sur site

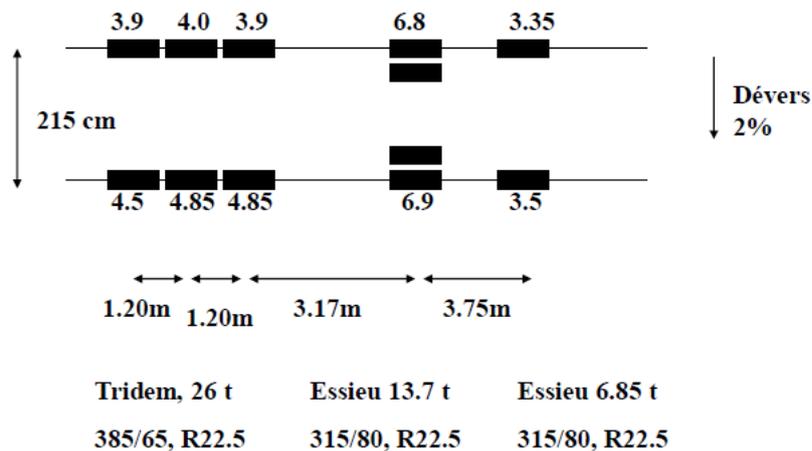


Figure 2.11. Charges (en tonnes) du poids lourd à 5 essieux de type T2S3 utilisé pour les mesures sur site.

Les mesures réalisées avec le dispositif d'acquisition et de transmission des données à distance, sur la section équipée de géophones, ont été enregistrées du 24 novembre 2011 jusqu'au 27 février 2014. Les mesures de température ont été réalisées en continu, avec une mesure toutes les 5 minutes. En ce qui concerne les mesures des géophones, celles-ci ont été déclenchées uniquement au passage des véhicules, en utilisant un seuil de déclenchement réglé pour n'enregistrer que les signaux correspondant aux poids lourds. La fréquence d'échantillonnage de l'acquisition est 2000 Hz. L'acquisition est déclenchée au passage des poids lourds, avec une durée d'acquisition de 4 secondes, avec un pré trigger de 1s et un post trigger de 3s. Les signaux des géophones sont enregistrés s'ils dépassent un certain seuil (dont le niveau est réglable), qui a été fixé forfaitairement au chargement d'un véhicule ayant au moins un essieu provoquant une déflexion de 5 mm/100. Ce traitement permet de limiter le nombre de signaux enregistrés à environ 100 à 120 signatures de poids lourds par jour (le trafic journalier peut atteindre 5000 PL/jour). Toutefois une acquisition d'une centaine de poids lourds par jour a semblé suffisante pour tester le fonctionnement des géophones, et mesurer la réponse de la chaussée. L'objectif n'était pas de suivre la totalité du trafic.

2.3 Présentation du site instrumenté sur l'autoroute Ax

2.3.1 Objectifs de l'expérimentation

Colas a effectué en 2013 des travaux de réhabilitation sur l'autoroute Ax. Au vu du bon fonctionnement du système d'acquisition et de transmission des données à distance mis en place sur l'A10, Colas a souhaité tester un dispositif similaire, mais avec un nombre plus important de capteurs, afin d'étudier les possibles applications pour le suivi en continu du comportement des structures de chaussées.

Le retour d'expérience de l'A10 a permis de mettre au point une instrumentation devant permettre de suivre :

- L'évolution des modules des couches de chaussée, à partir des mesures des jauges de déformation.
- Les types de silhouettes des poids lourds et le balayage latéral des poids lourds, avec des géophones répartis transversalement dans la structure.
- La vitesse des poids lourds, avec des géophones écartés d'un mètre dans le sens longitudinal.
- les déplacements verticaux à différentes profondeurs dans la structure, au moyen des géophones placés dans les différentes couches de chaussée.

L'instrumentation a été réalisée au moment du chantier, en septembre 2013.

2.3.2 Structure de chaussée

La section instrumentée sur l'autoroute Ax se situe au PK 12 dans le sens Bayonne-Bordeaux. Cette section est constituée de 6 couches. (Figure 2.12)

- 2.5 cm de BBTM
- 6 cm de BBME
- 7 cm d'EME
- 8 cm de GB fissurée
- 30 cm environ de sable-ciment
- Sol support

Le sable-ciment et la GB fissurée sont des anciennes couches de chaussée. Les couches de BBTM, de BBME et d'EME sont des nouvelles couches qui ont été mises en place lors des travaux de renforcement de septembre 2013.

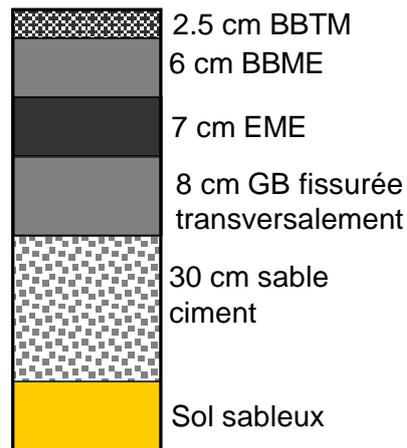


Figure 2.12. Structure de l'Ax

2.3.3 Instrumentation

2.3.3.1 Implantation des capteurs

Les capteurs mis en place sont :

- 8 jauges de déformation de type TML :
 - 2 jauges longitudinales et 2 jauges transversales à la base de la couche d'EME.
 - 2 jauges longitudinales et 2 jauges transversales à la base de la couche de BBME.
- 8 sondes de température (2 sondes à la base de chaque couche bitumineuse).
- 8 géophones placés à la base des couches de BBME, d'EME et de GB:
 - 1 géophone (G7) à la base de la couche de GB.
 - 4 géophones (G1, G2, G3, G4) à la base de la couche d'EME. Les géophones G1, G3 et G4 ont été placés dans le sens latéral (espacés de 20 cm) afin d'étudier l'effet de balayage des charges sur les mesures des capteurs. Deux géophones G1 et G2 ont été placés à 1 mètre de distance dans le sens longitudinal.
 - 2 géophones (G5, G6) à la base de la couche de BBME (avec 1 mètre d'écart dans le sens longitudinal).

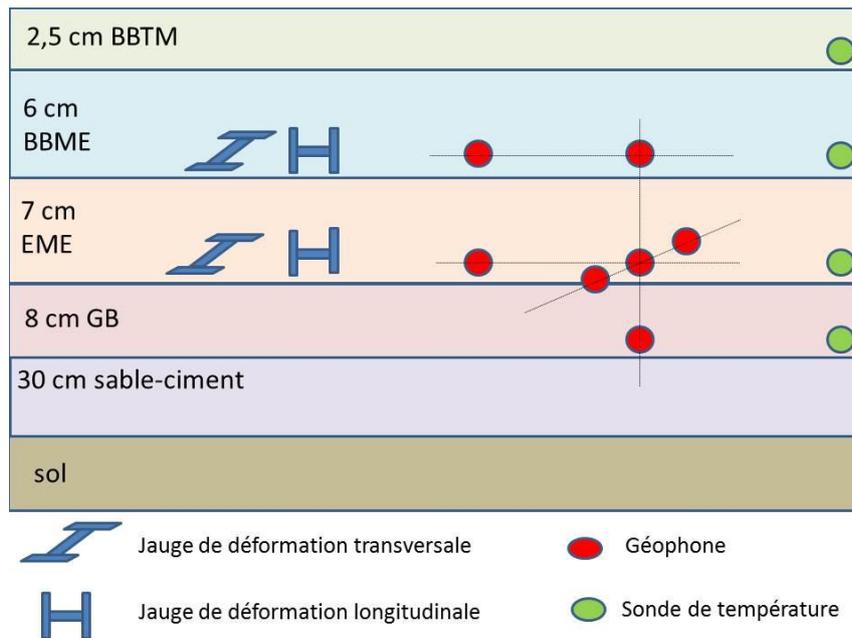


Figure 2.13. Plan d'instrumentation sur l'Ax

Les jauges, ainsi que les géophones, ont été placés au centre de la bande de roulement de la voie lente de l'autoroute. Les sondes de températures ont été placées hors de la bande de roulement. Les jauges longitudinales à la base du BBME ont été endommagées durant la construction (probablement par l'effet du compactage intense de ce matériau), et leurs mesures ne pourront donc pas être exploitées.

2.3.3.1.1 Les types de capteurs

Les jauges de déformation mises en place dans les couches bitumineuses sont les jauges de la marque TML, de type KM-100HAS (Tokyo Sokki Kenkyujo) (décrites au chapitre 1 Bibliographie – paragraphe 1.3.2.3).

Les sondes de température sont de type PT100. Les géophones sont de type GS11D 4000 avec une résistance de fermeture de 47 k Ω . Ce sont les mêmes que ceux qui ont été mis en place sur la section instrumentée de l'autoroute A10 (Figure 2.14).

2.3.3.1.2 Mise en place des capteurs

Les jauges ont été mises en place selon la procédure décrite dans le paragraphe 1.3.2.5 du chapitre I « Bibliographie » (Figure 2.14).

Les géophones et les sondes de températures ont été mis en place de la même manière que sur la section de l'autoroute A10 (Paragraphe 2.2.3.2.3 – Chapitre II).



Figure 2.14. Mise en place des jauges sur l'Ax

2.3.3.1.3 Programme de suivi

La première campagne de mesure sur l'autoroute Ax a été réalisée le 18 mars 2014. L'objectif était d'effectuer une première série de mesures de référence, sous un poids lourds de charge connue, afin de pouvoir déterminer les caractéristiques de la structure instrumentée (et notamment les modules des anciennes couches), avant de démarrer le suivi par les mesures sous trafic réel.

Les mesures ont été réalisées sous différents passages d'un poids lourds. C'est un camion semi-remorque de type T2S3 chargé à environ 44 tonnes qui a été utilisé (Figure 2.15). Les relevés des distances inter-essieux associés aux enregistrements effectués en fonction du temps ont permis de mesurer précisément la vitesse de passage.



Figure 2.15. Semi-remorque chargé servant de référence pour les mesures sur l'Ax.

Les mesures de charges sous chaque roue et sous chaque jumelage ont été effectuées au moyen d'une balance type Haenni 10 Tonnes. Une série de mesures a été réalisée avant les essais et une autre en fin d'essai. La précision de la balance est de +/- 100 kg, on remarque que le camion a globalement un poids total en charge de 43 tonnes (Figure 2.16)

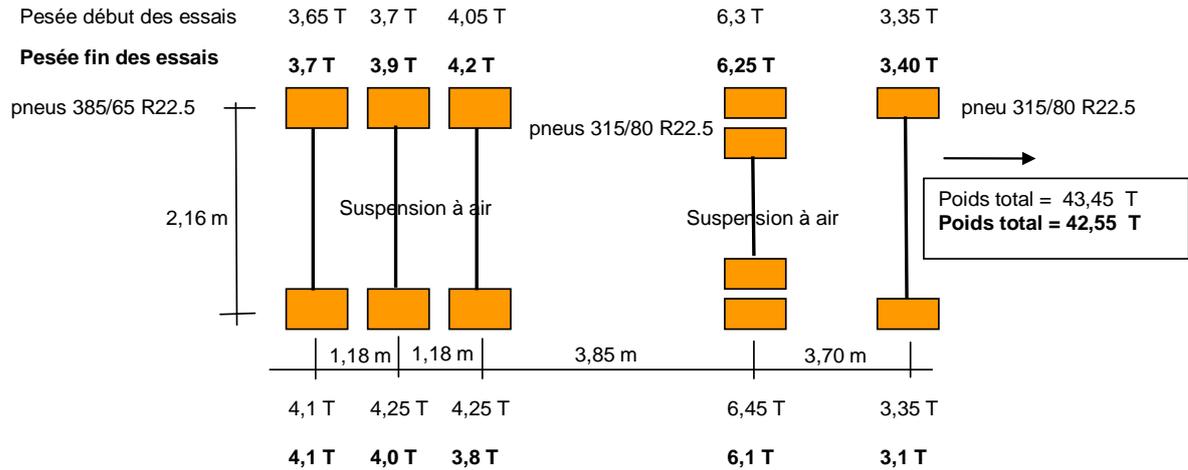


Figure 2.16. Dimensions et charges du camion utilisé pour les mesures de référence sur l'Ax (avec les résultats des deux pesées effectuées, en tonnes)

Les mesures ont été réalisées alors que la voie lente n'était pas fermée. Le poids lourds utilisé pour les mesures roulait donc à une vitesse de 80 km/h environ.

Les mesures ont été réalisées sur site, avec un système d'acquisition de type « MGC » de la marque HBM. 6 passages ont été effectués. Sur ces 6 passages, seules les mesures de 5 passages ont pu être exploitées.

Les différents capteurs ont ensuite été câblés au système d'acquisition et de transmission des données à distance. Les mesures avec ce dispositif ont été réalisées à partir de mars 2014. A partir de cette date, l'acquisition de tous les capteurs est réalisée en continu, sous trafic réel, comme décrit ci-dessous.

2.4 Présentation du dispositif d'acquisition et de transmission des données à distance

La plate-forme utilisée pour l'acquisition de données à distance sur les autoroutes A10 et Ax est appelée PEGASE. Cette plate-forme a été développée par l'Ifsttar (Le Cam, et al., 2010) (Le Cam, et al., 2008) (Le Cam, 2011) (Le Cam & Martin, s.d.) et est commercialisée par la société A3IP (<http://www.pegase-instrumentation.com>).

2.4.1 Principe de la plate-forme PEGASE

PEGASE (Plate-Forme Experte Générique pour Applications Sans-fil Embarquées) est un concept issu de l'instrumentation intelligente et sans fil. La plate-forme PEGASE a été développée par le département « Mesures, Auscultation et Calcul Scientifique » de l'IFSTTAR. Ce système a été conçu pour favoriser les besoins d'instrumentations tels que la communication sans fil, la datation, le traitement de signal.

La solution 100% sans fil peut être obtenue en assurant l'alimentation de PEGASE par un couple batterie et panneau solaire. Dans le cas des deux sections routières instrumentées, la solution 100% sans fil n'était pas nécessaire puisqu'il était possible de disposer d'une alimentation 220V sur site.

2.4.2 Généricité matérielle

Afin de couvrir un spectre d'applications le plus large possible, PEGASE s'articule autour d'un processeur DSP (Digital Signal Processor) c'est-à-dire d'un processeur orienté traitement de signal, possédant de nombreux ports d'entrées/sorties. Outre la variété de ses ports, le Blackfin 537 d'Analog Device est un processeur 32 bits basse consommation dont le routage est optimisé pour adresser des mémoires RAM et FLASH et un module PCMCIA Wifi pour la communication sans fil.

Sur une carte dite carte mère (Figure 2.17), PEGASE intègre le processeur Blackfin 537, de la mémoire, un module de communication sans fil Wifi 802.11g et un module GPS, utilisé notamment pour définir une base de temps pour les mesures.



Figure 2.17. Carte PEGASE

Ainsi, pour une application donnée, l'utilisateur aura à spécifier et à concevoir une carte électronique dite carte fille mettant simplement en œuvre les fonctionnalités d'acquisition (voire d'action) et le conditionnement associé. En général, la carte fille comprend :

- Des capteurs : accéléromètres, jauges d'extensométrie, jauges de températures,...
- Des convertisseurs analogique/numérique et leur conditionnement ;
- Des actionneurs ;
- Des relais ;
- Etc.

2.4.3 Généricité logicielle

La carte PEGASE utilise un noyau LINUX pré-flashé et configuré pour les ressources de la carte. Le mode de communication de PEGASE est l'IP (Internet Protocol), protocole mondial et pérenne natif au noyau LINUX. Ce moyen de communication en fait une plateforme télé opérable via son réseau wifi ou une connexion 3G/4G et permet à l'utilisateur d'ouvrir une session distante.

L'intérêt essentiel du système PEGASE est donc, pour le développeur comme l'utilisateur final, de pouvoir télécharger à distance des applications d'acquisition et de traitement des données sur la plateforme, de les modifier, de les arrêter ou de les supprimer sans avoir à démonter la plateforme de son lieu d'usage et à la reprogrammer physiquement.

Aussi, sauf panne ou évolution matérielle sur la conception du produit, le système devient totalement téléopérable et permet d'envisager des économies vis-à-vis des coûts liés aux opérations d'installation/démontage de tels systèmes.

2.4.4 Application aux deux sites instrumentés

Pour les deux sites, les capteurs ont été reliés par des fils au coffret contenant le dispositif d'acquisition. Celui-ci contient les conditionneurs des capteurs, la carte PEGASE et le système de transmission à distance (Figure 2.18). Le coffret est étanche et dispose d'un système de chauffage intégré, de façon à permettre un fonctionnement de longue durée sur site, quelles que soient les conditions météorologiques.



Figure 2.18. Boîtier contenant le système de conditionnement et de transmission des données sur l'A10

Pour l'A10, ce coffret a été fixé derrière la barrière de sécurité de l'autoroute au pied de l'antenne de transmission (Figure 2.19). Pour l'Ax, le coffret a été fixé sur une plate-forme en béton, située derrière la barrière de sécurité (Figure 2.20). Sur les deux sites, il a été possible de disposer directement d'une alimentation électrique en 220V.



Figure 2.19. Photo de la section instrumentée sur l'autoroute A10.



Figure 2.20. Photo de la section instrumentée sur l'autoroute Ax.

2.4.5 Acquisition des données

La carte PEGASE permet de réaliser un dispositif d'acquisition performant, combinant des acquisitions en continu à basse fréquence, des acquisitions à haute fréquence, sous passage des poids lourds (avec un déclenchement au passage des véhicules), et un pré-traitement en temps réel des données, permettant de réduire la quantité de données à transmettre, et de faciliter leur exploitation.

Les géophones sont utilisés pour suivre la réponse de la chaussée au passage du trafic. Ils nécessitent des fréquences d'acquisition élevées, car leur fréquence minimale de réponse est d'environ 4.5 Hz. La fréquence d'échantillonnage de l'acquisition a donc été fixée à 2000 Hz pour les deux sites. L'acquisition est déclenchée au passage des poids lourds, avec une durée d'acquisition réglable, avec un pré trigger et un post trigger réglables eux aussi. Pour les données enregistrées sur l'A10, le pré-trigger a une durée de 1 seconde. Le signal est enregistré durant 4 secondes. Pour les données enregistrées sur l'Ax, le pré-trigger a une durée de 1 seconde. Le signal est enregistré pendant 6 secondes.

Les signaux des géophones sont enregistrés s'ils dépassent un seuil (dont le niveau est réglable) qui a été fixé forfaitairement au chargement d'un véhicule ayant au moins un essieu provoquant une déflexion de 5 mm/100. Ce traitement permet de limiter le nombre de signaux enregistrés à environ 100 à 150 signatures de poids lourds par jour pour l'A10 et l'Ax.

Sur le site de l'Ax, les cartes Pégase jauges et géophones sont synchronisées. C'est à dire que les mesures des jauges sont réalisées quand il y a dépassement de seuil pour les géophones.

Contrairement aux géophones, les mesures de températures sont enregistrées en continu, avec des fréquences d'acquisition lentes d'une mesure toutes les 5 minutes sur l'A10 et d'une mesure toute les 15 minutes sur l'Ax.

Les signaux de mesure sont stockés temporairement sur la carte PEGASE, et transférés automatiquement toutes les 4 heures sur un serveur de données, en utilisant le réseau 3G. Un téléchargement des signaux sélectionnés est possible à tout instant sur le serveur, via une page web (Figure 2.21).

Il est possible de configurer à distance la (ou les) cartes (fréquence d'échantillonnage, durée d'enregistrement du signal, post et pré-trigger, seuil de déclenchement, sensibilité des capteurs, période de transfert vers le serveur, ...).

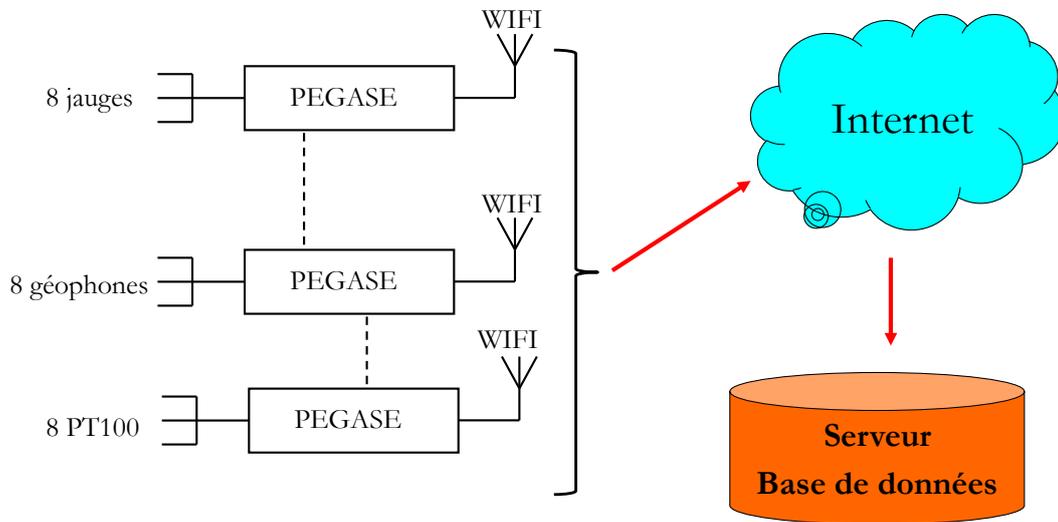


Figure 2.21. Schéma récapitulatif du dispositif d'acquisition et de transmission des données sur l'Ax

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'instrumentation et les systèmes d'acquisition installés sur les 2 sites instrumentés qui seront utilisés dans cette thèse.

Le premier site instrumenté situé sur l'autoroute A10, a été conçu principalement pour suivre les performances (modules) des matériaux de chaussées, et notamment de la couche de Recyvia (ancienne assise de chaussée retraitée au liant hydraulique). Pour cela, 5 sections ont été instrumentées à l'aide de jauges et de capteurs de température. Pour ces sections, l'acquisition des mesures a été effectuée sur site, de façon ponctuelle. A titre expérimental, une sixième section a été équipée de 2 géophones, et de 2 sondes de température, reliées à un système d'acquisition à distance, utilisant une carte PEGASE. Ce système a été utilisé pour tester les possibilités de mesurer les déflexions de la chaussée à l'aide de géophones, et également les possibilités de traitement de mesures réalisées en continu sous trafic réel, pour suivre le comportement de la chaussée ; enfin, il s'agissait également de tester la fiabilité du système PEGASE, permettant la transmission des données de mesure à distance, et également la reconfiguration à distance du système d'acquisition.

Le fonctionnement du système d'acquisition à distance sur l'A10 a donné satisfaction, notamment à ce qui concerne l'accès à distance aux données, et la programmation à distance du système. Une seconde instrumentation, avec suivi à distance, a donc été installée sur l'autoroute Ax. Sur ce site, en profitant des enseignements de l'A10, il a été décidé d'installer une instrumentation plus complète, visant à suivre :

- Les déformations dans les couches bitumineuses, pour le suivi des modules de ces couches.

- Les types de silhouettes des poids lourds, leurs positions latérales et leurs vitesses de passage, au moyen de géophones répartis longitudinalement et transversalement.
- Les déplacements verticaux, également à partir des mesures des géophones.
- Les températures, indispensables à l'analyse du comportement des couches bitumineuses

Enfin, l'originalité de l'instrumentation de l'Ax (qui reprend le principe testé sur l'A10) est de réaliser un suivi en continu de la chaussée, au passage du trafic réel, en déclenchant les acquisitions au passage des charges (avec un seuil minimum réglable). Ce dispositif permet un suivi fin des variations du comportement de la chaussée : évolutions journalières liées aux variations de température, évolutions saisonnières, etc.. Il génère, en contrepartie, de grandes quantités de données (plusieurs centaines de passages de poids lourds enregistrés par jour), et il faut donc définir des méthodes de traitement de ces mesures, permettant d'en déduire des indicateurs pertinents, pour le suivi du comportement de la chaussée. C'est au développement de ces méthodes de traitement des données issues de l'instrumentation que sont consacrés les chapitres suivants de la thèse.

Chapitre 3 - Etudes réalisées sur l'autoroute A10

Sommaire

3	Chapitre 3 - Etudes réalisées sur l'autoroute A10.....	83
3.1	Introduction	84
3.2	Description des campagnes expérimentales sur site.....	84
3.3	Résultats des mesures des jauges (mesures sur site).....	86
3.3.1	Exemple de mesures obtenues lors de la campagne de mesures d'avril 2012..	86
3.3.2	Evolution des mesures de jauges durant les différentes campagnes de mesures.....	89
3.4	Analyse des mesures sur site et estimation des modules des couches de chaussées	91
3.5	Analyse des mesures issues du système d'acquisition à distance	101
3.5.1	Analyse des mesures de température.....	101
3.5.2	Mesures des géophones.....	105
3.5.3	Analyse des mesures des géophones	109
3.6	Conclusion.....	112

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse des mesures effectuées sur les sections instrumentées de l'autoroute A10. Après la présentation des différentes campagnes de mesure, on s'intéressera d'abord à l'analyse des mesures réalisées sur site, sur les sections équipées de jauges d'extensométrie. Sur ces sections, après une présentation des mesures réalisées, on a cherché à caler un modèle de comportement élastique linéaire de la structure sur les mesures réalisées sur les différentes sections instrumentées, en utilisant le logiciel ALIZE-LCPC. Ensuite, ce modèle initial a été utilisé pour essayer de caractériser l'évolution dans le temps des performances (modules) du Recyvia.

Dans un deuxième temps, on s'est intéressé aux mesures des sondes de température et des géophones issues de l'instrumentation à distance. Pour les températures, une analyse des variations de température dans la chaussée sur différentes échelles (journalière, saisonnière) est présentée. Pour les géophones, une méthode d'intégration est proposée pour passer des signaux bruts, de vitesse de déplacement, enregistrés, à l'estimation des déplacements verticaux de la chaussée. On montre ensuite que ces données de déplacements peuvent être utilisées à la fois pour identifier les silhouettes des poids-lourds passant sur la chaussée, et pour estimer une valeur « moyenne » de déplacement vertical de la chaussée au passage des poids lourds. Ce déplacement vertical moyen peut constituer un indicateur de la rigidité globale de la chaussée, et de son évolution au cours du temps.

3.2 Description des campagnes expérimentales sur site

Les différentes sections instrumentées sur l'autoroute A10, ainsi que les différents capteurs mis en place sont détaillés dans le chapitre II de ce rapport.

Quatre campagnes de mesures sur site ont été effectuées sur l'autoroute A10:

- **Première campagne de mesure (novembre 2011):** Les mesures ont été réalisées sur deux jours différents: le 15 novembre 2011 pour les PR 15+700 et 15+900 ($T=12^{\circ}\text{C}$) et le 16 novembre 2011 pour les PR 16+850, 17+100, 17+250 ($T=2^{\circ}\text{C}$). Les sections expérimentales ont été chargées en utilisant un déflectographe Lacroix (essieu arrière chargé à 13 tonnes). Il y a eu trois passages du déflectographe sur chaque profil instrumenté. La vitesse du déflectographe était d'environ 3 km/h.
- **Deuxième campagne de mesures (avril 2012):** Les mesures ont été réalisées le lundi 23 avril 2012 sur tous les profils instrumentés ($T=11^{\circ}\text{C}$). Elles ont été effectuées avec un déflectographe Lacroix. Il y a eu deux passages du déflectographe sur chaque profil instrumenté. La vitesse du déflectographe était d'environ 3 km/h.
- **Troisième campagne de mesures (décembre 2012):** Les mesures ont été réalisées le mardi 18 décembre 2012 sur tous les profils instrumentés ($T=11^{\circ}\text{C}$). Elles ont été effectuées avec un déflectographe Lacroix. Il y a eu deux passages du déflectographe sur chaque profil instrumenté. La vitesse du déflectographe était d'environ 3 km/h.
- **Quatrième campagne de mesures (février 2014):** Les mesures ont été réalisées le mardi 19 février 2014 sur tous les profils instrumentés ($T=10^{\circ}\text{C}$). Elles ont été effectuées avec un poids lourd semi-remorque de type T2S3 chargé à 46.55 tonnes. L'essieu le plus chargé est l'essieu moteur (second essieu) chargé à 13.7 tonnes. Il y a eu deux passages du poids lourd sur chaque profil instrumenté. La vitesse du poids lourd était d'environ 10 km/h.

Les véhicules utilisés pour les mesures sont décrits dans le paragraphe 2.2.4 du chapitre II.

Lors de chaque campagne expérimentale, les charges du poids lourd utilisé pour réaliser les mesures ont été vérifiées. Le positionnement du poids lourd a également été choisi de façon à ce que ses roues gauches soient centrées sur la position des capteurs. Pour cela, l'emplacement des capteurs a préalablement été repéré sur la chaussée par un trait réalisé avec une bombe de peinture. (Figure 3.1).



Figure 3.1. Repérage de l'emplacement des capteurs par un trait de bombe de peinture (mesures effectuées le 15 novembre 2011)

Lors des mesures, la voie lente a été fermée. Cette fermeture est uniquement matérialisée avec des cônes de chantier orange. Les véhicules qui circulent sur la voie médiane roulent donc à 90 km/h environ (voire plus, car les limitations de vitesse ne sont pas toujours respectées). Pour des raisons de sécurité, le véhicule utilisé pour les mesures a donc roulé avec ses roues gauches centrées sur la ligne des capteurs, afin de se décaler le plus possible par rapport à la voie médiane (Figure 3.2).



Figure 3.2. Réalisation des mesures de jauges sous le passage d'un déflectographe sur l'autoroute A10 (avril 2012)

Rappelons que, outre les mesures sur site, l'acquisition des données à distance (mesures des géophones et des sondes de température) a été réalisée sur le profil PR 16+016 du 24 novembre 2011 au 27 février 2014.

3.3 Résultats des mesures des jauges (mesures sur site)

3.3.1 Exemple de mesures obtenues lors de la campagne de mesures d'avril 2012

La Figure 3.3 présente un exemple des mesures des jauges de déformations verticales. Ces jauges sont placées au sommet du sol. Les mesures ont été faites sur la section PR 16+850 sous le passage du déflectographe Lacroix à 3 km/h (11°C) en avril 2012. Des pics en contraction ont été observés au passage de chaque essieu. Les deux pics du signal correspondent au passage des deux essieux du déflectographe sur la chaussée. La valeur maximale de la déformation correspond au passage du deuxième essieu (l'essieu le plus chargé). Les deux signaux sont proches. L'écart temporel des signaux est dû à l'écart des positions des jauges dans la chaussée. La durée du signal de chargement est d'environ 15 s.

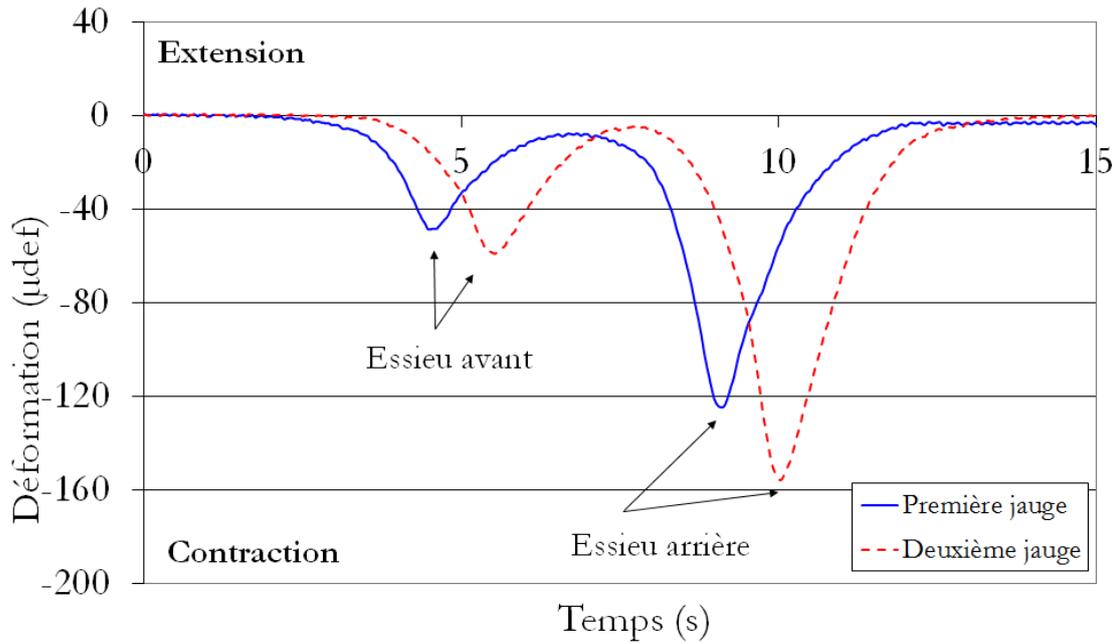


Figure 3.3. Déformations verticales au sommet du sol sur la section PR 16+850 sous le passage du déflectographe Lacroix à 3 km/h, T=11°C le 23 avril 2012

Un exemple de mesures des jauges de déformations longitudinales est présenté sur la Figure 3.4. Ces jauges sont placées à la base et au sommet de la couche de matériau traité au ciment sur la section PR 16+850. La déformation longitudinale à la base de cette couche a été enregistrée sous le passage du déflectographe à 3 km/h le 23 avril 2012. Des pics en extension ont été observés au passage de chaque essieu. Les deux pics de chaque signal correspondent au passage des deux essieux du poids lourd sur la chaussée. La déformation maximale est enregistrée sous le passage de l'essieu arrière (l'essieu le plus chargé ; qui est un essieu à roues jumelées, chargé à 130 kN). Les deux signaux des jauges placées à la même profondeur ont des formes très similaires. L'écart en temps entre les signaux de déformations est dû à l'écart entre les positions des jauges sur site. Les signaux sont nuls avant et après le passage du poids lourd. La durée du signal de chargement est d'environ 15 s.

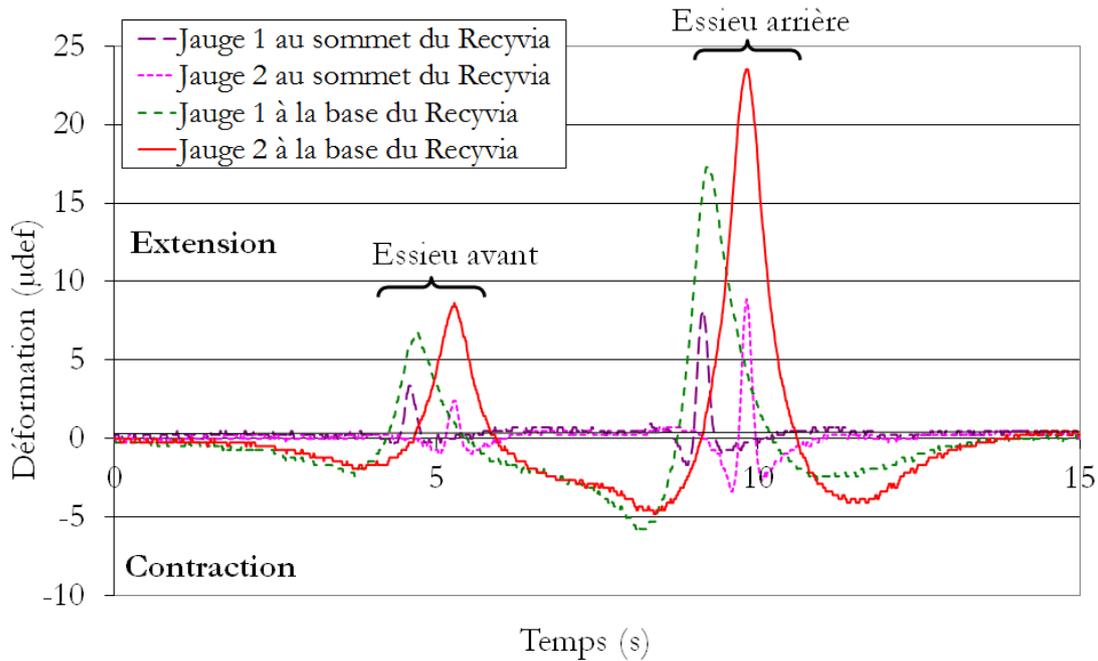


Figure 3.4. Déformations longitudinales à la base et au sommet de la couche Recyvia sur la section PR 16+850 sous le passage du déflectographe Lacroix à 3 km/h, T=11°C le 23 avril 2012

Un exemple de mesures de la jauge de déformation longitudinale à la base de la couche d'EME est présenté sur la Figure 3.5. Cette jauge est placée à la base de la couche d'EME sur la section PR 17+250. Cette jauge est la seule jauge à la base de l'EME qui n'a pas été endommagée durant la construction. La déformation longitudinale à la base de cette couche a été enregistrée sous le passage du déflectographe à 3 km/h le 23 avril 2012. Des pics en extension ont été observés au passage de chaque essieu. Les deux pics de chaque signal correspondent au passage des deux essieux du poids lourd sur la chaussée. La déformation maximale est enregistrée sous le passage de l'essieu arrière (l'essieu le plus chargé; qui est un essieu à roues jumelées, chargé à 130 kN). La déformation maximale est de l'ordre de 9 µdef, ce qui est quasiment semblable à la déformation maximale mesurée au sommet de la couche de Recyvia sur la section PR 16+850 (voir Figure 3.4). Les deux couches d'EME et de Recyvia semblent donc parfaitement collées.

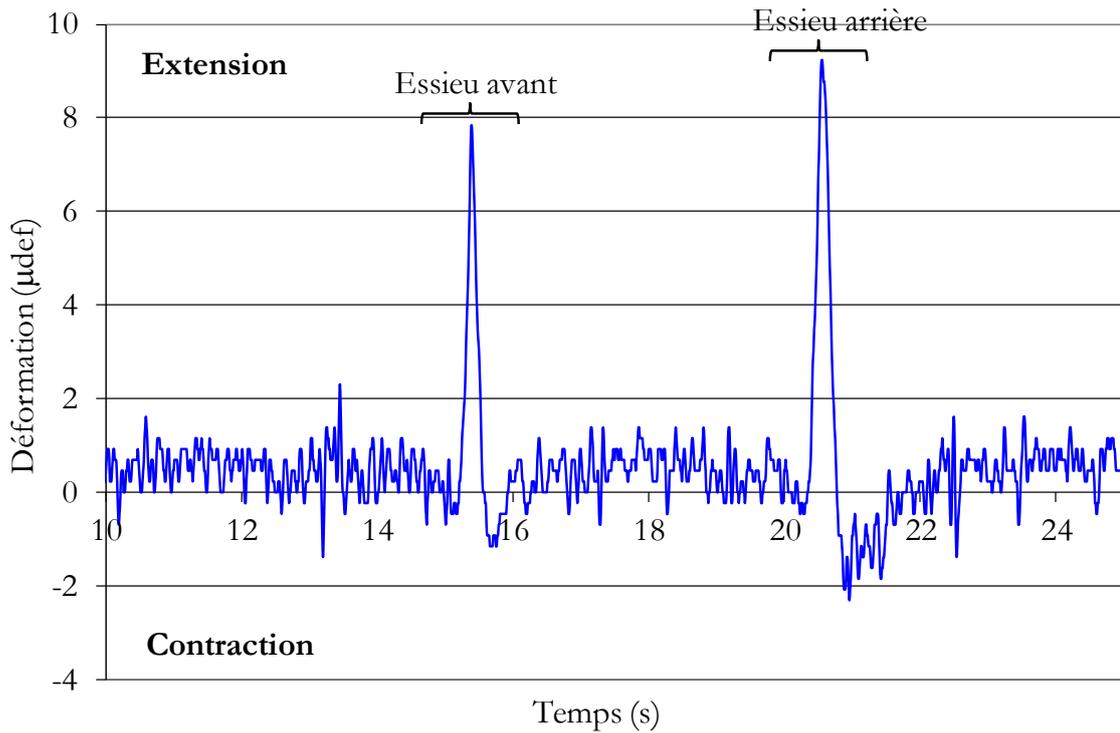


Figure 3.5. Déformation longitudinale à la base de la couche d'EME section PR 17+250 sous le passage du déflectographe Lacroix à 3 km/h, T=11°C le 23 avril 2012

3.3.2 Evolution des mesures de jauges durant les différentes campagnes de mesures

3.3.2.1 Evolution des déformations verticales au sommet du sol

Sur chacun des 4 profils instrumentés, deux jauges verticales sont placées au sommet du sol. La moyenne des déformations verticales maximales (en contraction) obtenues, sur chaque profil instrumenté, sous le passage du déflectographe, pour les trois premières campagnes de mesures est présentée sur la Figure 3.6. Il n'y a pas eu de mesures réalisées avec ces jauges lors de la quatrième campagne de mesures, car elles ne fonctionnaient plus.

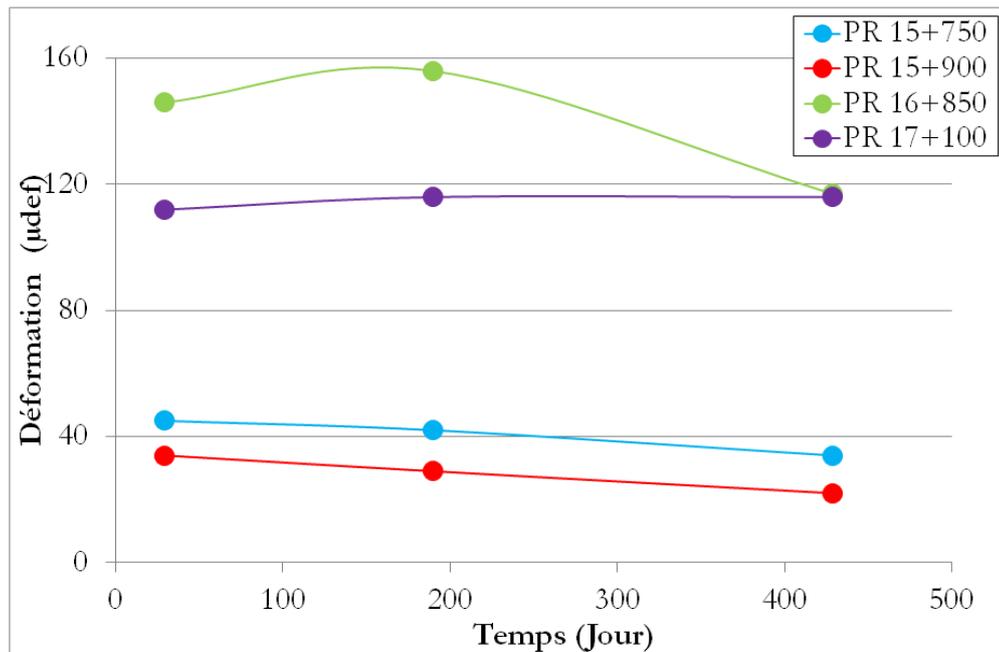


Figure 3.6. Evolution des valeurs maximales des déformations verticales (en contraction) au sommet du sol, lors des 3 campagnes de mesures avec le déflectographe.

Les mesures de déformations verticales au sommet du sol montrent que:

- Les sections PR16+850 et PR 17+100 présentent les valeurs de déformations verticales les plus grandes (entre 120 et 160 µdef environ)
- Les sections PR15+700 et PR15+900 présentent des valeurs de déformations verticales 3 fois plus petites (entre 20 et 40 µdef environ)
- Pour les quatre sections, les déformations diminuent généralement au cours du temps.

Il est important de préciser qu'il avait été remarqué, lors de la mise en place des capteurs, que le sol était très argileux aux PR 16+850 et 17+100. Aux PR 15+700 et 15+900 le sol était plus rigide, car il avait été traité avec du ciment (lors d'un précédent chantier). Les mesures sont donc cohérentes avec les observations expérimentales. En effet, les déformations les plus importantes sont obtenues sur les profils dont le sol est composé de sable argileux. Pour les profils PR 15+700 et PR 15+900, les maximums des déformations verticales diminuent au cours du temps. Pour les profils PR 16+850 et PR 17+100, les maximums des déformations verticales augmentent légèrement entre la première et la deuxième série de mesures, puis diminuent.

3.3.2.2 Evolution des déformations longitudinales à la base de la couche de Recyvia

Sur chaque profil instrumenté, deux jauges longitudinales ont été placées à la base du Recyvia. La moyenne des déformations longitudinales maximales (en extension) obtenues, sur chaque profil instrumenté, pour les quatre campagnes de mesures est présentée sur la Figure 3.7. Les trois premières campagnes de mesures ont été effectuées sous le passage du déflectographe dont l'essieu arrière est chargé à 13 tonnes. La dernière campagne de mesures a été effectuée sous le passage du poids lourd de type T2S3 dont l'essieu moteur (second essieu) est chargé à 13.7 tonnes. La déformation maximale se trouve sous le passage de cet essieu.

Pour les quatre profils étudiés, une diminution significative des maximums des déformations longitudinales à la base du Recyvia est observée, au cours des 856 jours de suivi, après la réhabilitation de la structure de chaussée. Cette diminution des déformations s'explique par la prise progressive du matériau Recyvia, traité avec un liant hydraulique routier à prise lente. On constate que cette prise continue même après 856 jours, ce qui se traduit par une augmentation progressive du module du matériau.

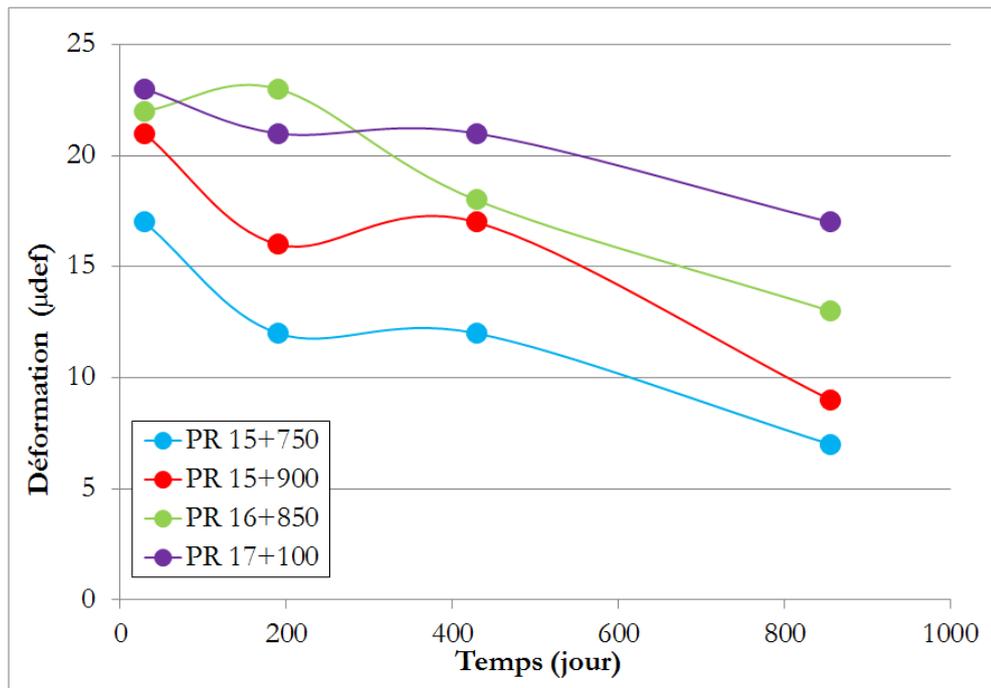


Figure 3.7. Evolution des déformations longitudinales maximales mesurées à la base de la couche de Recyvia (extension)

3.4 Analyse des mesures sur site et estimation des modules des couches de chaussées

Un des premiers objectifs des mesures réalisées sur site, sur les différentes sections de l'A10, était d'évaluer les caractéristiques des couches de chaussée. Pour cela, des analyses des mesures ont été réalisées avec le logiciel ALIZE (<http://www.lcpc.fr/en/produits/alize/index.dml>). Ce logiciel, utilisé pour le dimensionnement des chaussées, permet de réaliser des calculs de structures de chaussées en élasticité linéaire. Il a été présenté en détail dans le paragraphe 1.6.2.1 du chapitre I.

Le principal objectif des calculs réalisés avec Alizé était de valider les propriétés in-situ du matériau traité au ciment, en définissant un modèle mécanique de la chaussée et en estimant le module de la couche de Recyvia et son évolution dans le temps. Les calculs ont été réalisés avec les hypothèses suivantes :

- Pour le sol, conformément aux résultats de la Figure 3.6, il a été décidé de distinguer deux zones, avec des niveaux de rigidité différents du sol:
 - Une première zone, correspondant aux deux profils avec un sol composé de sable argileux, présentant les niveaux de déformation les plus élevés (entre 160 et 120 μdef environ au passage des poids-lourds).

- Une deuxième zone, correspondant aux deux profils avec un sol traité au ciment en partie supérieure de la plate-forme, présentant des niveaux de déformations beaucoup plus faibles (entre 20 et 40 μ def environ, au passage des poids lourds).
- Pour les deux types de sol, les calculs avec ALIZE ont été utilisés pour estimer le module du sol et son épaisseur en se basant sur les mesures des jauges verticales au sommet du sol.
- Pour les couches en enrobés, seule la couche d'EME avait été instrumentée et toutes les jauges ont été cassées. Il n'était donc pas possible d'utiliser les mesures pour déterminer le module de la couche d'EME. Pour cette raison, les valeurs minimales des modules imposés par la norme NF P-98-086 ((AFNOR, 2011)) ont été utilisées pour les couches bitumineuses neuves de la structure (BBTM et EME). Dans la norme, ces valeurs sont données à la température de 15°C et à la fréquence de 10Hz. Dans les calculs que nous avons réalisés, ces valeurs de modules ont été corrigées en fonction des valeurs de température et de fréquence réellement obtenues lors de la réalisation des mesures. (des corrections de ce type sont proposées dans le logiciel ALIZE).
- Pour le Recyvia, les déformations longitudinales mesurées à la base et au sommet de la couche ont été utilisées pour déterminer le module de ce matériau.
- Enfin, les coefficients de Poisson de toutes les couches de chaussée ont été supposés égaux à 0.35, et les interfaces entre toutes les couches de la structure ont été supposées collées.

Un exemple de la structure de chaussée modélisée avec Alizé est présenté sur la Figure 3.8. Les modules des enrobés sont donnés à la température de 2°C et à la fréquence de 0.5Hz.

	épais. (m)	module (MPa)	Nu	matériau type
collé	0.025	3220.0	0.350	autre
collé	0.110	11294.0	0.350	autre
collé	0.110	11294.0	0.350	autre
collé	0.300	6500.0	0.350	autre
collé	0.500	100.0	0.350	autre
collé	infini	99999.0	0.350	autre

Figure 3.8. Structure de la chaussée définie dans Alizé ($T^{\circ}=2^{\circ}\text{C}$ et $f=0.5\text{Hz}$)

Le chargement du déflectographe tel qu'il est défini dans Alizé est présenté sur la Figure 3.9.

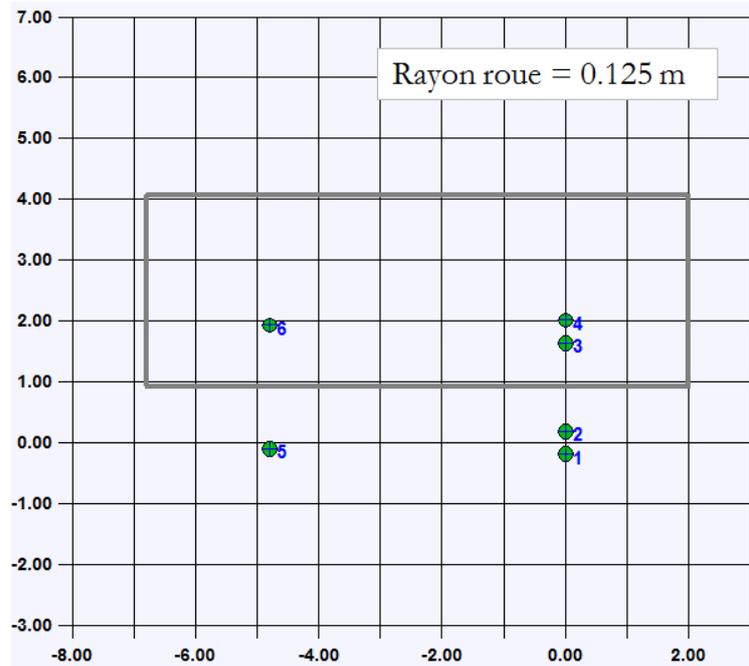


Figure 3.9. Chargement du déflectographe défini dans Alizé (échelle en m)

Un résultat de calcul de la déformation longitudinale à la base de la couche de Recyvia sous le passage du déflectographe (2°C , 0.5Hz) sous forme de contours avec Alizé est présenté sur la Figure 3.10.

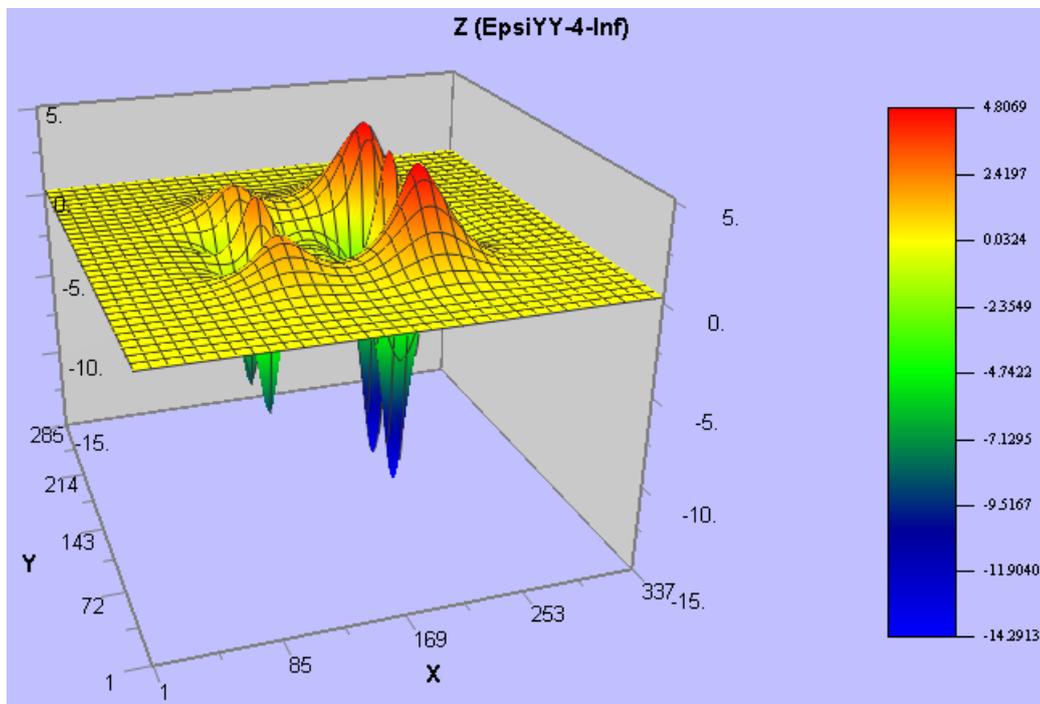


Figure 3.10. Résultat de calcul de la déformation longitudinale à la base de la couche de Recyvia sous le passage du déflectographe (2°C , 0.5Hz) sous forme de contours avec Alizé

Dans un premier temps, les calculs avec le logiciel Alizé ont été réalisés pour la première campagne de mesures de novembre 2011, afin de fixer un modèle de référence de la structure.

Deux séries de mesures, réalisées à 2°C et 0.5Hz (3km/h) et à 12°C et 0.5Hz (3km/h) respectivement, ont été utilisées pour cela. La démarche a consisté à faire varier les paramètres inconnus du problème, à savoir le module de la couche de Recyvia, ainsi que le module et l'épaisseur du sol, jusqu'à obtenir une bonne concordance entre les déformations mesurées par les jauges et calculées. Ces paramètres du modèle ont été ajustés pour les deux zones, correspondant aux deux types de sol, de rigidité différente.

Les deux modèles de structures de référence, ainsi obtenus par calage avec ALIZE sont présentés dans le Tableau 3.1. Les modules obtenus pour le sol sont de 100 MPa dans le cas du sol naturel et de 800 MPa dans le cas du sol traité. Les modules obtenus pour le Recyvia sont de 6500 MPa pour la zone avec le sol naturel et 6000 MPa pour la zone avec le sol traité.

Tableau 3.1. Structures de chaussées calées avec le logiciel Alizé

Couche	Structure avec sol naturel (2°C, 0.5 Hz)			Structure avec sol traité au ciment (12°C, 0.5 Hz)		
	Epaisseur (m)	E (MPa)	ν	Epaisseur (m)	E (MPa)	ν
BBTM	0.025	3220	0.35	0.025	1886	0.35
EME	0.11	11294	0.35	0.11	7882	0.35
EME	0.11	11294	0.35	0.11	7882	0.35
Recyvia	0.3	6500	0.35	0.3	6000	0.35
Sol	0.5	100	0.35	1	800	0.35

La première zone, avec un sol naturel, correspond aux sections PR 16+850 et PR 17+100. Les déformations à la base de la couche Recyvia, au sommet de la couche de Recyvia et au sommet du sol, mesurées avec les jauges et calculées avec Alizé, pour les profils avec le sol naturel sont présentées respectivement sur les Figure 3.11, Figure 3.12, Figure 3.13. La température de mesure est de 2°C et la fréquence est de 0.5Hz (3km/h). Les déformations sont mesurées sous le passage d'un déflectographe. Ce sont les caractéristiques de ce véhicule qui ont été utilisé pour calculer les déformations.

On remarque qu'il y a une bonne concordance entre les valeurs de déformations mesurées et calculées avec Alizé. Le modèle prédit bien les valeurs maximales des déformations, mais aussi la forme des signaux de déformations, ce qui montre que pour la structure semi-rigide de l'A10, avec une fondation en matériau traité au ciment, l'hypothèse d'un comportement élastique de la chaussée est satisfaisante.

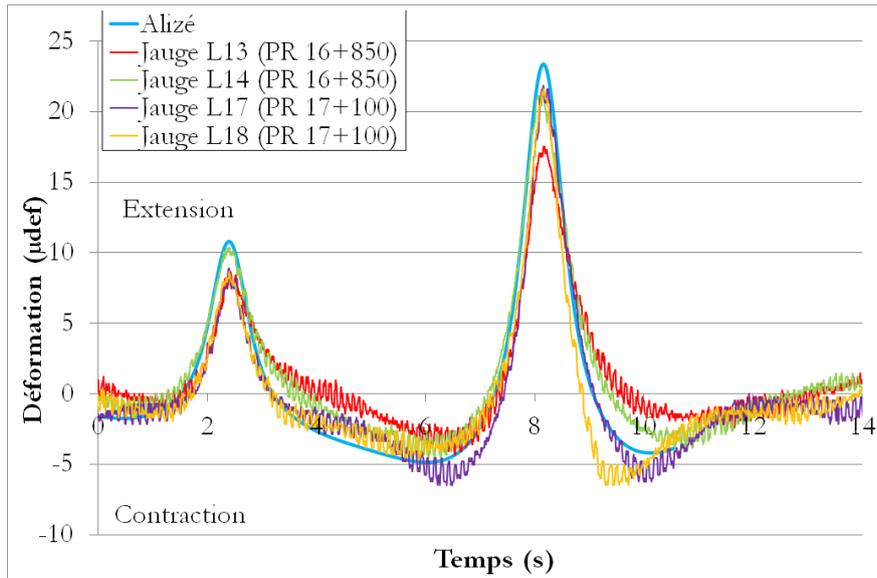


Figure 3.11. Déformations longitudinales à la base de la couche de Recyvia, sous le passage du déflectographe, calculées avec Alizé et mesurées par les jauges (structure avec sol naturel à 2°C, 0.5 Hz)

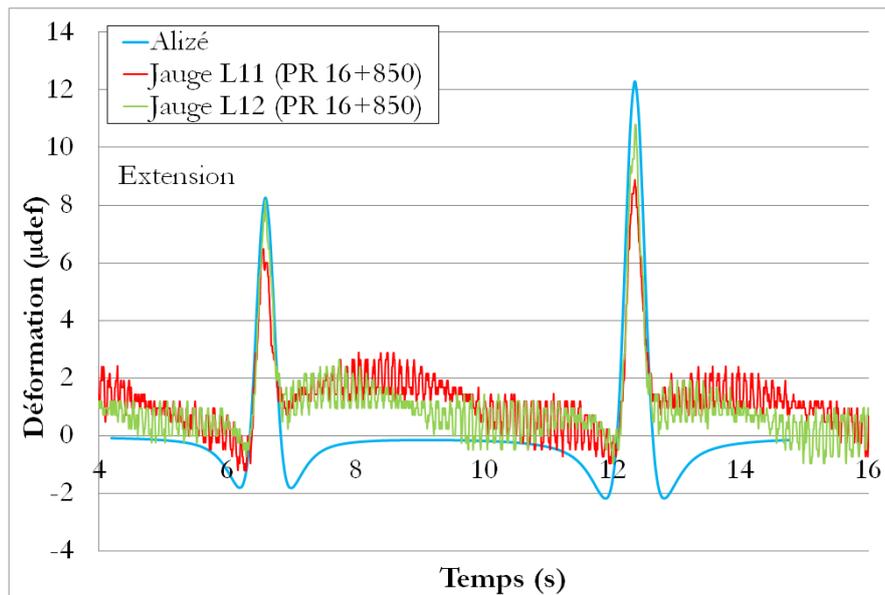


Figure 3.12. Déformations longitudinales au sommet de la couche de Recyvia, sous le passage du déflectographe, calculées avec Alizé et mesurées par les jauges (structure avec sol naturel à 2°C, 0.5 Hz)

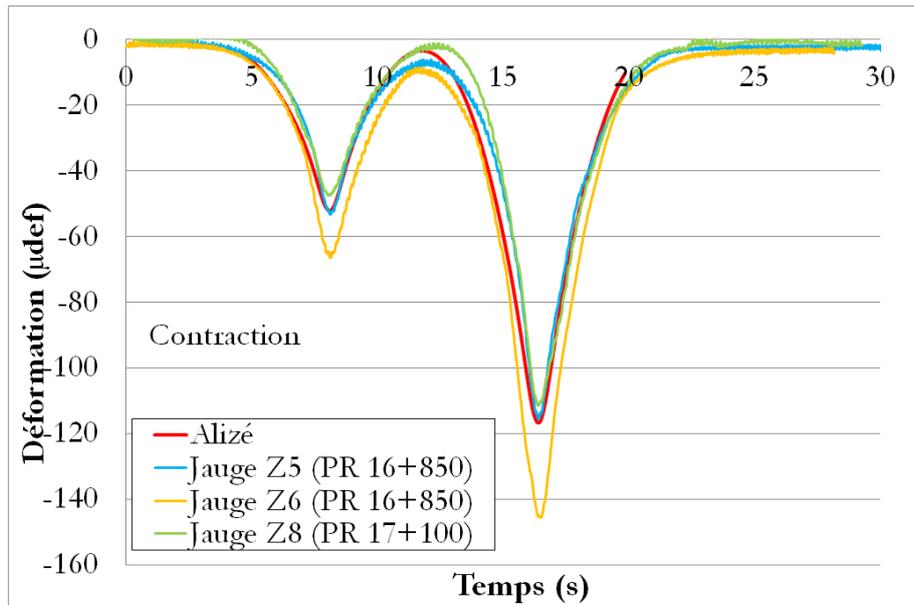


Figure 3.13. Déformations verticales au sommet de la couche du sol, sous le passage du déflectographe, calculées avec Alizé et mesurées par les jauges (structure avec sol naturel à 2°C, 0.5 Hz)

La deuxième structure avec un sol traité au ciment correspond aux profils PR 15+700 et PR 15+900. Les déformations à la base de la couche de Recyvia et au sommet du sol, mesurées avec les jauges et calculées avec Alizé, pour les profils avec le sol traité au ciment sont présentées respectivement sur les Figure 3.14, Figure 3.15. La température des mesures est de 12°C et la fréquence est de 0.5 Hz (3km/h). Les déformations sont mesurées sous le passage d'un déflectographe. C'est ce même véhicule qui a été utilisé pour calculer les déformations.

A nouveau, on constate un bon accord entre les valeurs de déformations mesurées et calculées avec Alizé, avec des niveaux de déformations plus faibles sur ces sections.

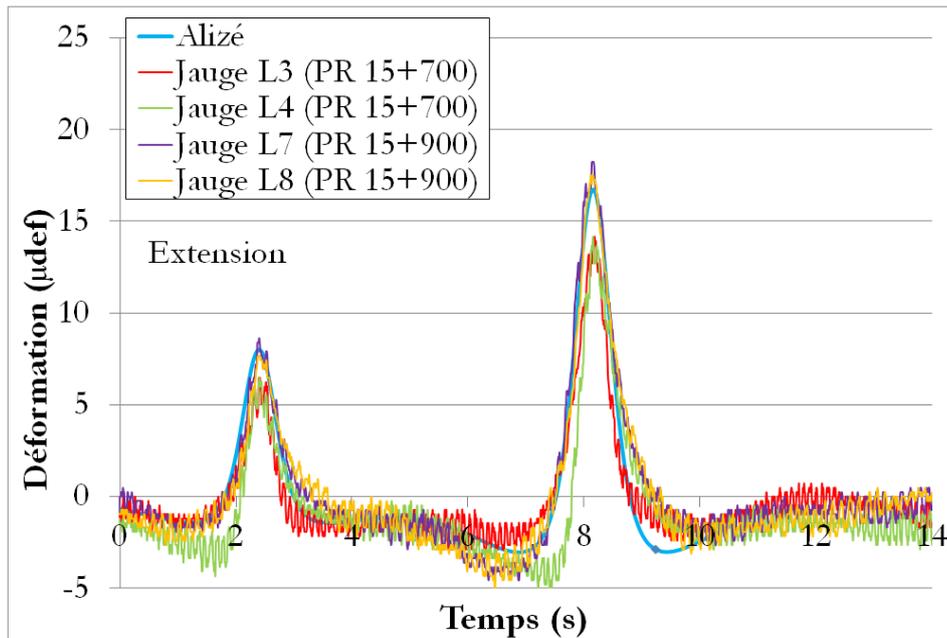


Figure 3.14. Déformations longitudinales à la base de la couche de Recyvia, sous le passage du déflectographe, calculées avec Alizé et mesurées par les jauges (structure avec sol traité au ciment – 12°C, 0.5 Hz)

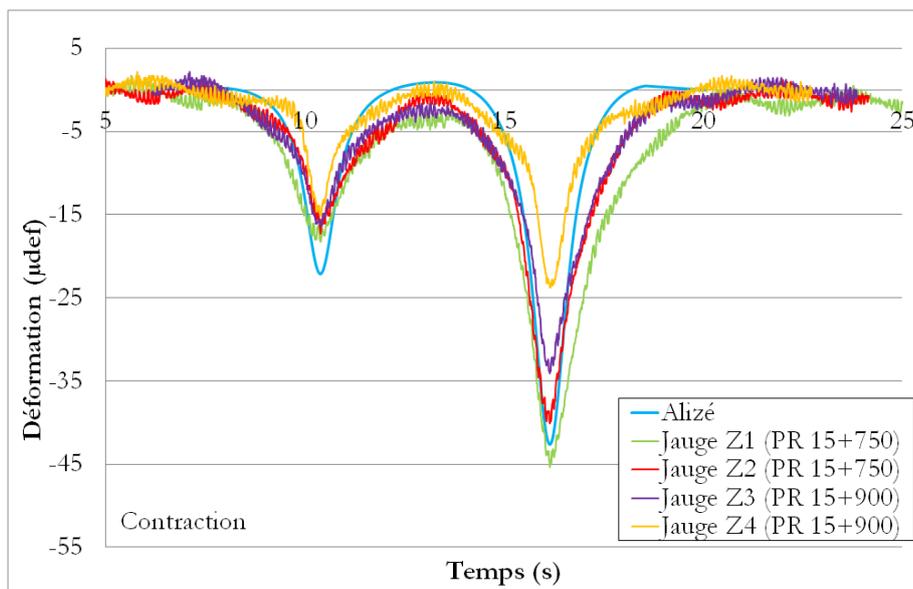


Figure 3.15. Déformations verticales au sommet du sol calculées avec Alizé, sous le passage du déflectographe, et mesurées par les jauges (structure avec sol traité au ciment – 12°C, 0.5 Hz)

Ensuite, des calculs similaires avec le logiciel Alizé ont été réalisés en utilisant les mesures des jauges obtenues lors des trois campagnes de mesure suivantes, effectuées entre avril 2012 et février 2014. Pour ces calculs, l'objectif était d'estimer le module du Recyvia. On a donc supposé que les caractéristiques de la couche de sol et des couches bitumineuses restaient constantes (excepté en ce qui concerne les variations de module des couches bitumineuses avec la température, qui ont été prises en compte), et seul le module de la couche de Recyvia a été calé sur les mesures. Les mesures ont été effectuées sous le passage du poids lourd de type T2S3 chargée à 46 tonnes (cf. paragraphe 2.2.4 du chapitre II) à 10 km/h et 10°C. Le chargement de ce

ponds-lourd modélisé avec le logiciel Alizé est présenté sur la Figure 3.16 (pour des raisons de symétrie, seuls des demi-essieux sont modélisés).

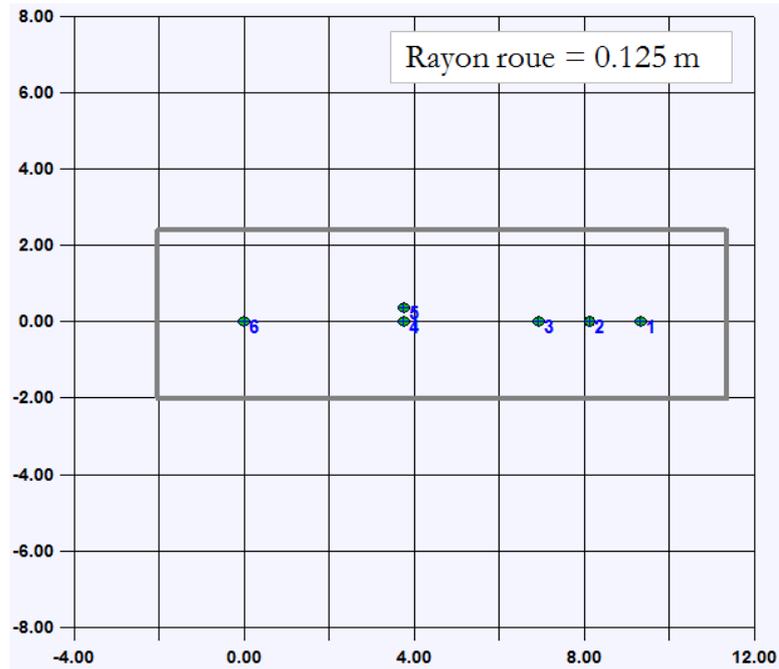


Figure 3.16. Chargement du poids lourd T2S3 défini dans Alizé (échelle en m)

Les Figure 3.17, Figure 3.18, Figure 3.19 présentent le calage des mesures de déformation à la base de la couche de Recyvia pour la structure avec sol traité au ciment; à la base et au sommet de la couche de Recyvia pour la structure avec sol naturel.

On remarque qu'il y a une bonne concordance entre les valeurs de déformations mesurées et calculées avec Alizé à la base de la couche de Recyvia pour les deux structures. Le calcul avec Alizé surestime la déformation calculée au sommet de la couche de Recyvia de la section PR 16+850 (structure avec sol naturel). Les formes des déformations mesurées et calculées sont cependant similaires.

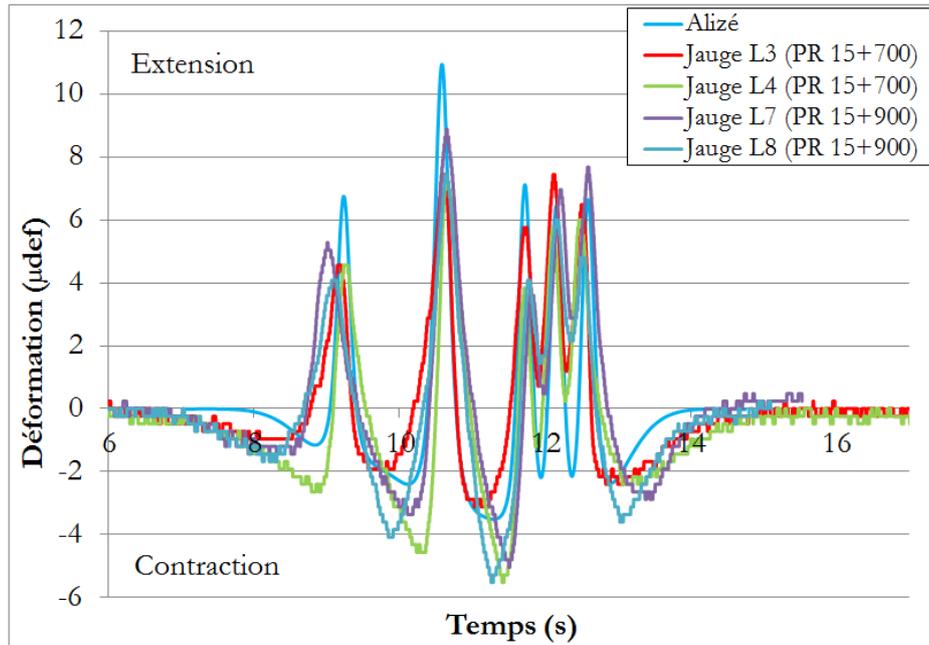


Figure 3.17. Déformations longitudinales à la base de la couche de Recyvia, sous le passage du poids-lourd de type T2S3, calculées avec Alizé et mesurées par les jauges (structure avec sol traité au ciment – 10°C, 1.5 Hz)

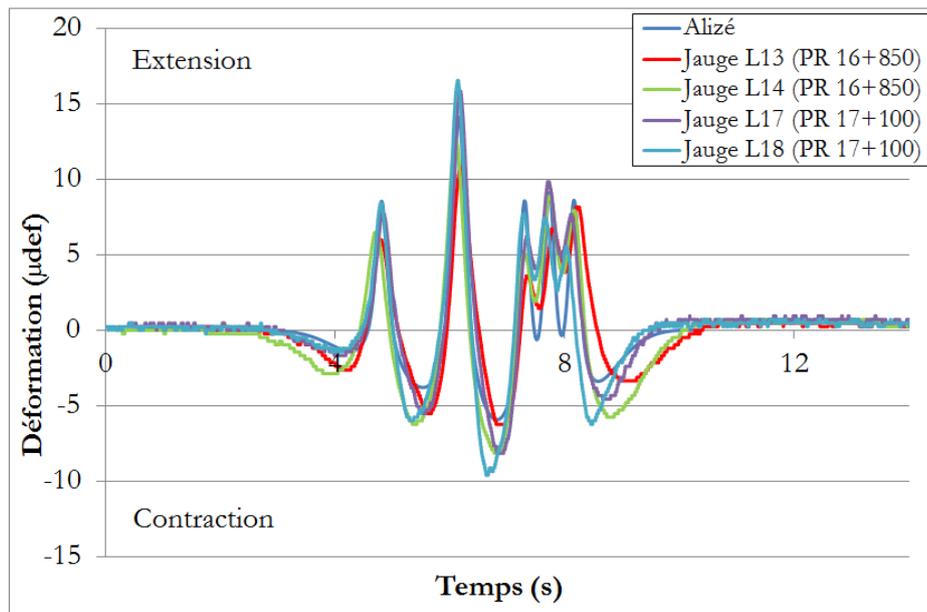


Figure 3.18. Déformations longitudinales à la base de la couche de Recyvia, sous le passage du poids-lourd de type T2S3, calculées avec Alizé et mesurées par les jauges (structure avec sol naturel – 10°C, 1.5 Hz)

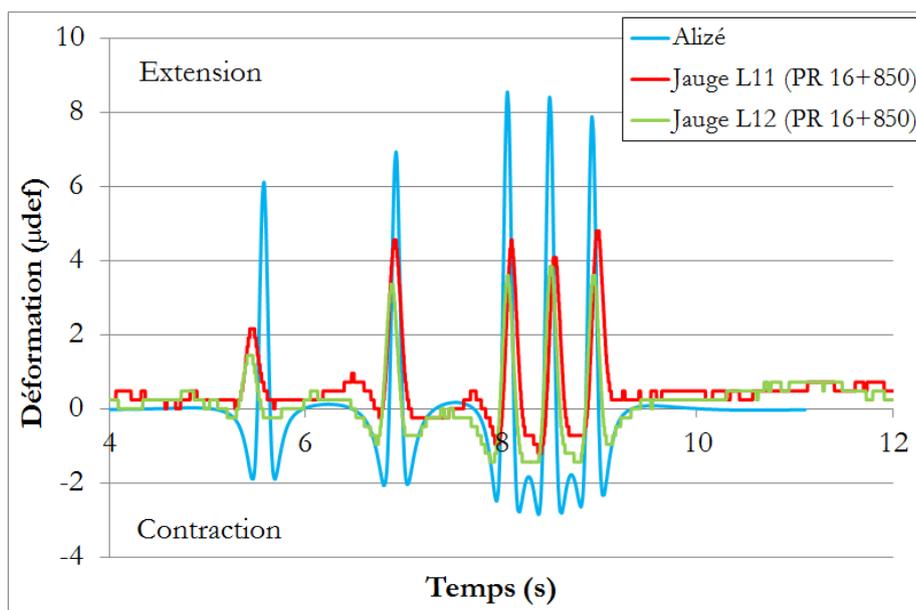


Figure 3.19. Déformations longitudinales au sommet de la couche de Recyvia, sous le passage du poids-lourd de type T2S3, calculées avec Alizé et mesurées par les jauges (structure avec sol naturel, section PR 16+850 – 10°C, 1.5 Hz)

Les valeurs de module de la couche de Recyvia ainsi obtenues avec les calculs ALIZE, pour les quatre campagnes de mesure, sont présentées sur la Figure 3.20.

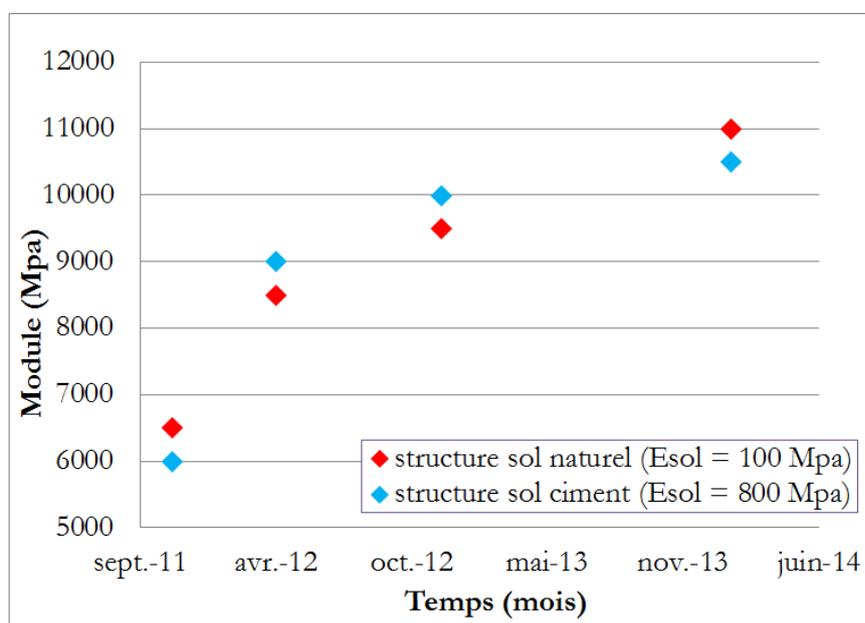


Figure 3.20. Evolution du module de la couche Recyvia des deux structures, au cours des quatre campagnes de mesures sur site.

Les résultats montrent que le module de la couche de Recyvia augmente au cours du temps, et que les mesures obtenues sur les deux types de structures, avec sol naturel et sol traité, sont cohérentes. Ce module varie entre 6000 et 6500 MPa sur les deux structures, lors de la première campagne de mesures (novembre 2011) et augmente jusqu'à 10500 et 11000 MPa en février 2014. Cela confirme que le Recyvia est un matériau à prise lente et montre que son module continue

d'augmenter lentement deux ans après la construction. De plus, les résultats obtenus en novembre 2011 (deux mois après la construction) sont en bon accord avec les modules mesurés sur le Recyvia à 90 jours en laboratoire (6000 MPa). Cela confirme que les propriétés in-situ du matériau sont cohérentes avec la formulation réalisée en laboratoire.

Ces différentes campagnes de mesures sur site, sur les sections équipées de jauges ont donc permis de caler, avec une précision satisfaisante, un modèle de la structure, et en particulier de déterminer, pour les différentes campagnes de mesure, les niveaux de module de la couche de Recyvia. Ces informations ont permis de confirmer les résultats des études en laboratoire, et de montrer que la mise en œuvre du Recyvia sur site a bien permis d'atteindre les niveaux de module de l'étude de formulation en laboratoire (6000 MPa à 90 jours). Le suivi des sections en place a également mis en évidence un gain de module supplémentaire du Recyvia au cours du temps, avec des valeurs de module de 10500 à 11000 MPa après environ 2 ans, apportant une marge de sécurité supplémentaire par rapport au dimensionnement. Ces résultats ont permis de conforter le maître d'ouvrage dans son choix de solution de renforcement de la structure. La modélisation a également confirmé que l'interface entre la couche de Recyvia et les couches bitumineuses est collée, ce qui est également important pour la durabilité de la structure.

3.5 Analyse des mesures issues du système d'acquisition à distance

3.5.1 Analyse des mesures de température

Des sondes de température ont été placées à la base des couches de BBTM (à 2,5 cm de profondeur) et d'EME (à 24,5 cm de profondeur) sur la section du PR 16+016, avec acquisition à distance. Les mesures de température ont été enregistrées toutes les 5 minutes. La Figure 3.21 présente un exemple de mesures des températures des couches bitumineuses réalisées pendant deux jours consécutifs (les 10 et 11 juillet 2012). Ces résultats montrent qu'il est possible de suivre très précisément la température dans les deux couches d'enrobé. Logiquement, les variations de température sont plus importantes et plus rapides à la base de la couche de BBTM, située en surface, qu'à la base des couches d'assise en EME, soit à une profondeur de 24,5 cm.

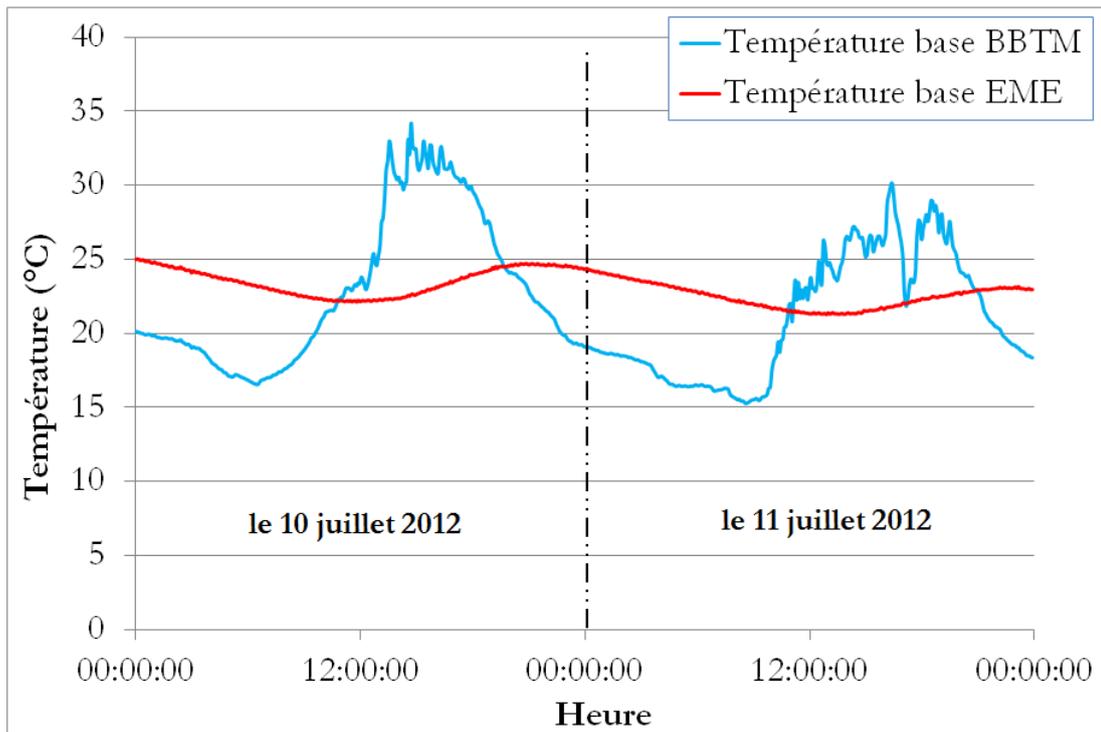


Figure 3.21. Mesures de température des couches de BBTM et d'EME pendant deux jours consécutifs (du 10/07/2012 au 11/07/2012)

Les variations de température des couches de BBTM et d'EME durant un mois complet (juin 2012) sont présentées sur la Figure 3.22. On constate ainsi que la variation journalière de la température de la couche de BBTM est beaucoup plus importante que celle de la couche d'EME. Durant le mois de juin 2012, la température de la couche de BBTM peut atteindre 45°C le jour, et diminuer jusqu'à 10°C la nuit, alors que la température de la couche d'EME varie entre 17°C et 28°C. (les différences de température entre les deux couches s'inversent entre le jour et la nuit).

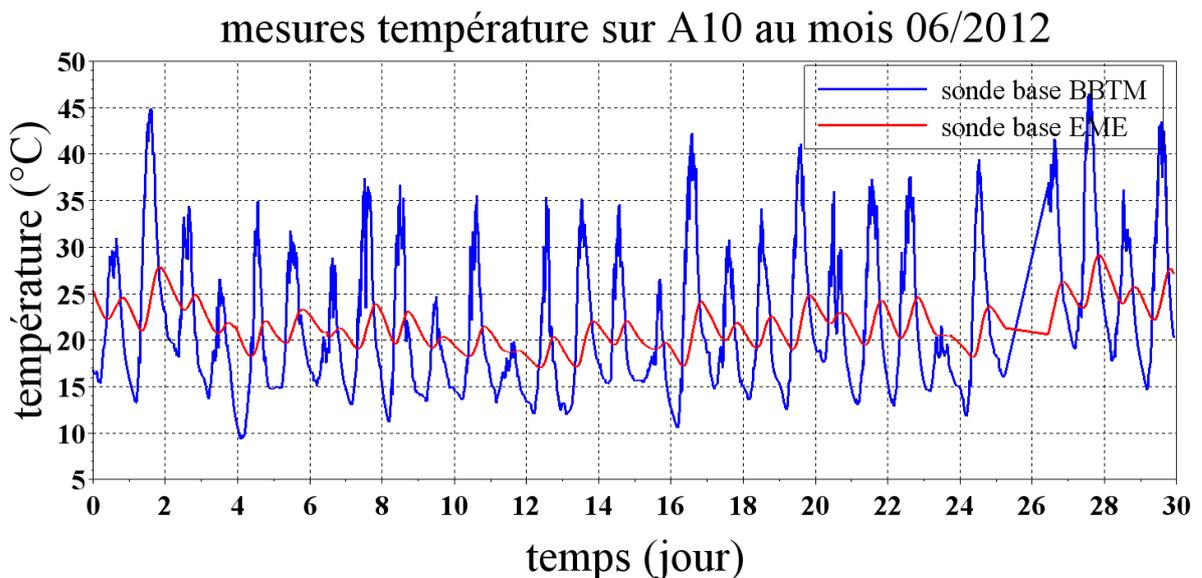


Figure 3.22. Températures des couches de BBTM et d'EME au mois de juin 2012

La température moyenne journalière des couches de BBTM et d'EME au mois de juin 2012 est présentée sur la Figure 3.23. Les résultats confirment la variation plus importante de température de la couche de BBTM (représentée par les barres verticales) par rapport à celle de la couche d'EME. Les températures moyennes, elles, sont assez proches.

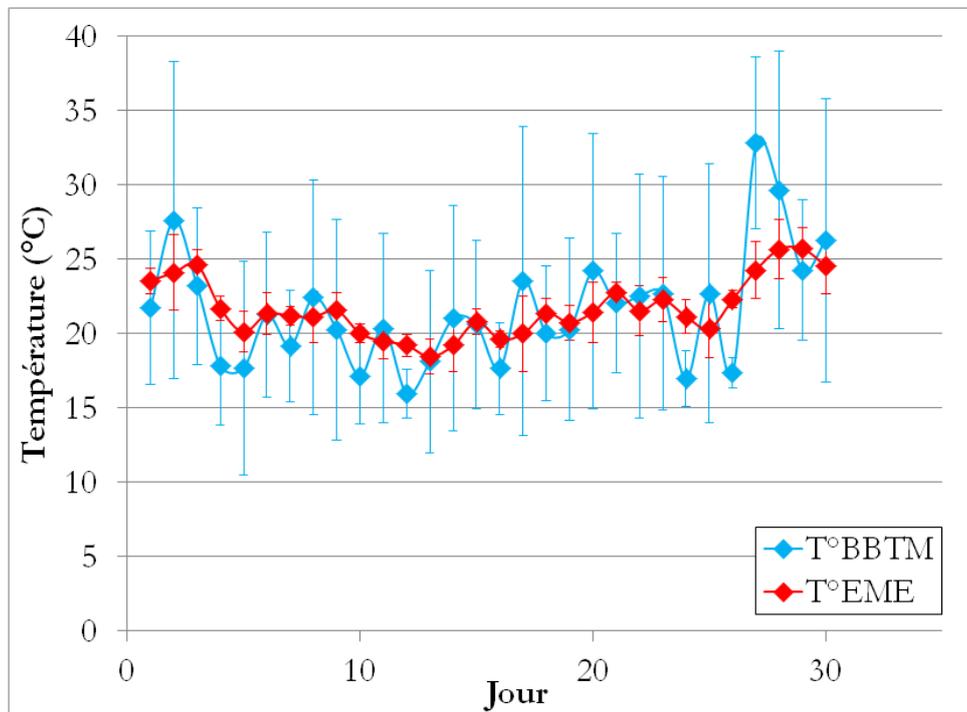


Figure 3.23. Températures moyennes journalières des couches de BBTM et d'EME en juin 2012

La Figure 3.24 présente l'évolution des températures moyennes mensuelles dans les deux couches bitumineuses, pendant la durée totale du suivi de la section (856 jours). Cette figure donne un bon aperçu des cycles de température subis par les couches bitumineuses au cours de ces deux années de suivi. Les températures des couches de BBTM et d'EME évoluent de la même façon :

- Les températures maximales sont obtenues en été. En 2012, la température moyenne mensuelle maximale des couches bitumineuses est de 25°C en août. En 2013, la température moyenne mensuelle maximale est de 30°C en juillet.
- Les températures minimales sont obtenues en hiver, avec cette fois une certaine différence entre les valeurs mensuelles minimales dans le BBTM et dans l'EME. Dans le BBTM, les valeurs minimales sont de 3 à 5 °C suivant les hivers. Dans la couche d'EME, ces valeurs se situent entre 5 et 8 °C environ.

Figure 3.24 montre également que les variations journalières de température (représentées par les barres verticales) sont plus importantes pendant la période estivale où l'ensoleillement joue un rôle plus important. Comme déjà remarqué, les variations journalières de température sont aussi plus importantes dans la couche de BBTM que dans la couche d'EME. Enfin, on constate qu'en été, les températures moyennes mensuelles sont très proches dans les deux couches bitumineuses, alors qu'en hiver, la température moyenne est un peu plus élevée dans la couche d'EME.

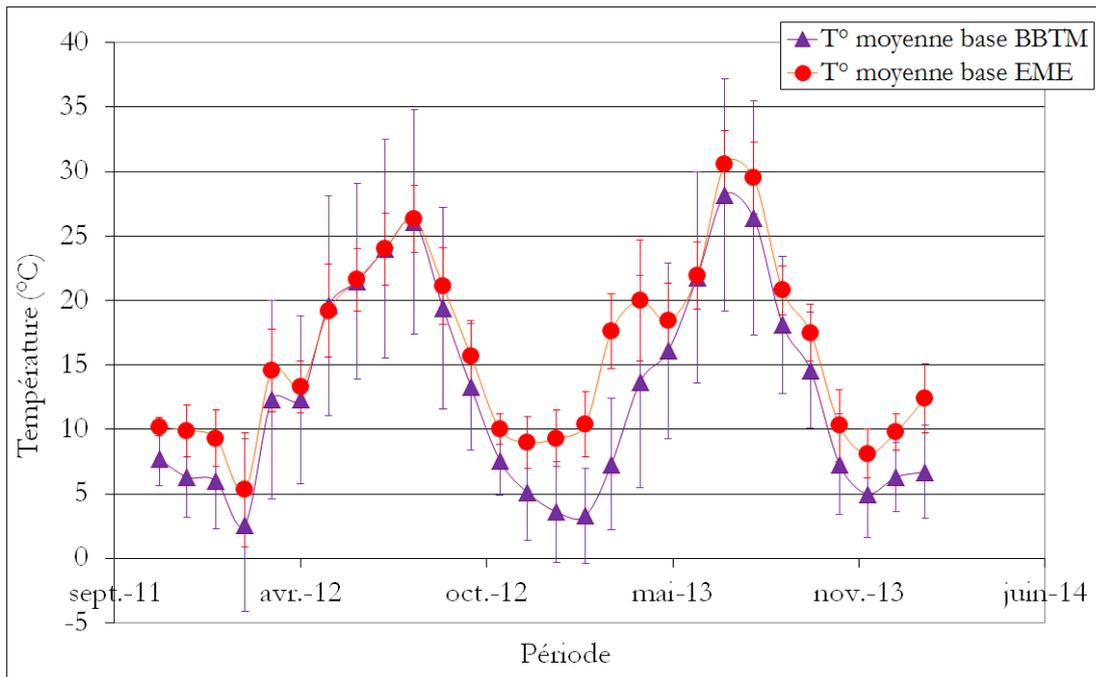


Figure 3.24. Températures moyennes mensuelles des couches de BBTM et d'EME pendant les 856 jours de suivi de la section

Les valeurs maximales des gradients journaliers de températures dans les couches bitumineuses pendant les 856 jours de suivi sont représentées sur la Figure 3.25. Ces gradients sont déterminés en calculant la différence maximale, sur un jour donné, entre la température à la base de la couche de BBTM et la température à la base de la couche d'EME, divisée par la hauteur séparant les 2 points de mesure, soit 22 cm.

La Figure 3.25 montre que les gradients maximaux de température sont généralement positifs pendant les périodes estivales (la température décroît de la surface de la chaussée à sa base) et négatifs pendant les périodes hivernales. Les gradients de température se situent généralement entre $0^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ et $+1,1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ pendant les périodes estivales, et entre $0^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ et $-1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ pendant les périodes hivernales. Les gradients les plus importants atteignent donc environ $1,1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.

Les variations des températures mesurées dans les couches de chaussées peuvent permettre d'utiliser une approche incrémentale pour le calcul de l'endommagement de la chaussée, prenant en compte les variations de température. Une telle approche a été appliquée aux mesures réalisées sur l'Ax, et est présentée dans le chapitre 5 de la thèse. Pour l'A10, un tel calcul n'a pas été réalisé, car la structure de l'A10, avec une assise en matériaux hydrauliques, présente une sensibilité à la température nettement moindre. Un tel calcul reste cependant tout à fait possible avec les données disponibles.

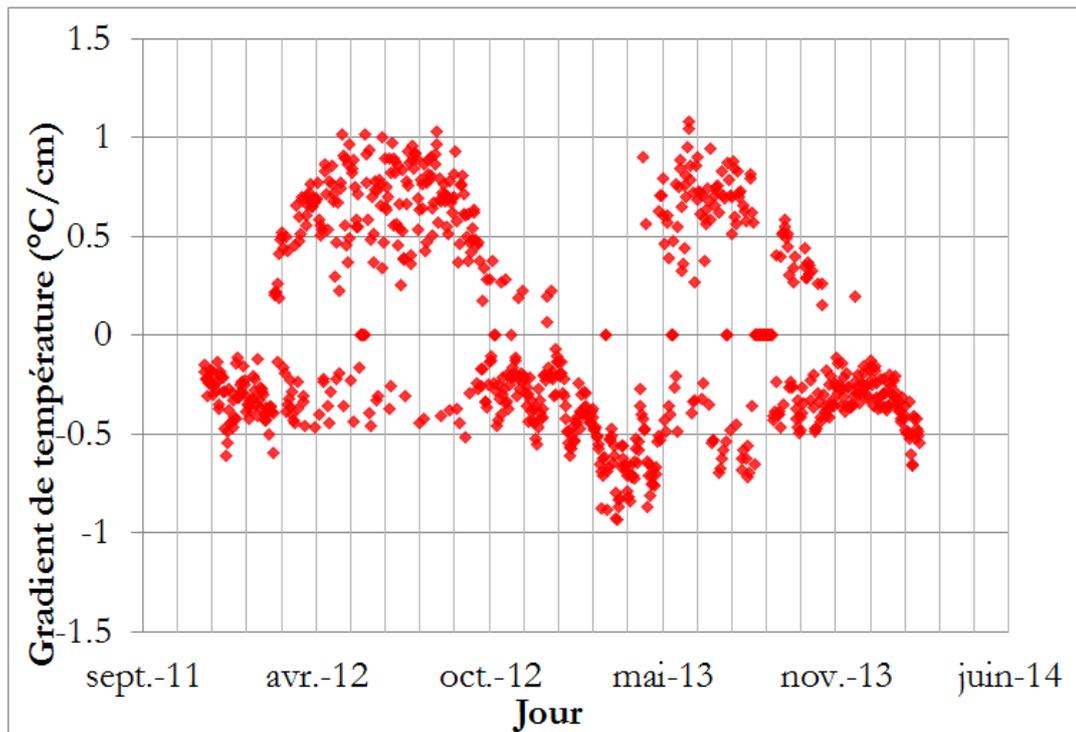


Figure 3.25. Variations des gradients de température maximaux entre les couches de BBTM et d'EME pendant les 856 jours de suivi de la section

3.5.2 Mesures des géophones

Les géophones sont des capteurs qui permettent de mesurer une vitesse de déplacement verticale, comme expliqué dans la bibliographie. L'idée d'utiliser des géophones pour le suivi de la structure de l'A10 visait à tester la possibilité d'utiliser ces géophones pour évaluer les déplacements verticaux (se rapprochant d'une mesure de déflexion) dans la structure de chaussée, à partir de leurs signaux intégrés.

Dans le cadre du projet de l'A10, on rappelle que deux géophones de type GS11D avec une résistance de 47 k Ω ont été mis en place sur la section PR 16+016. La bande passante des géophones varie entre 4 Hz et 400 Hz. Ces géophones ont été placés au sommet de la couche de Recyvia, de part et d'autre d'une fissure réalisée manuellement au lapidaire. L'écart entre les deux géophones est de 30 cm.

Sur le système d'acquisition, un seuil de déclenchement a été défini, de façon à enregistrer les mesures des géophones uniquement au passage des poids lourds les plus chargés, dans le but d'enregistrer environ une centaine de poids lourds par jour. Avec ce seuil, environ 100 fichiers ont donc été enregistrés chaque jour, pour chaque géophone. Les signaux des géophones ont été intégrés par une opération numérique classique d'intégration (méthode des rectangles) pour obtenir un déplacement vertical après intégration (Figure 3.26).

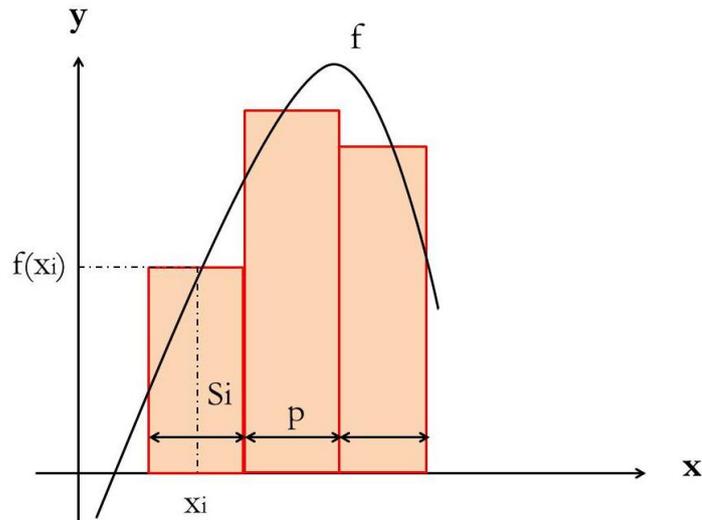


Figure 3.26. Méthode des rectangles pour l'intégration des mesures des géophones

Dans la méthode des rectangles, l'intégration d'une fonction f dans un intervalle $[x_1, x_n]$ est déterminée par la somme des aires S_i de hauteur $f(x_i)$ et de largeur p .

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n f(x_i) * p$$

La Figure 3.27 présente un exemple de signaux bruts et intégrés des mesures des deux géophones installés sur la section instrumentée. Ces signaux ont été enregistrés sous le passage d'un poids-lourd de charge inconnue, le 23 avril 2013, à 12h59min5s.

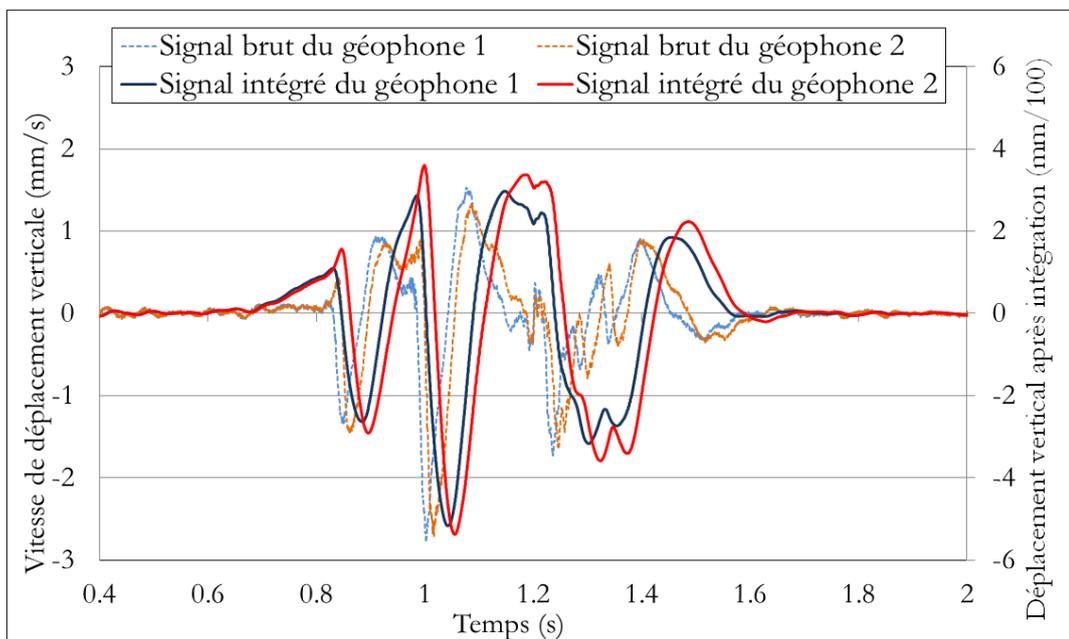


Figure 3.27. Exemple des signaux bruts et intégrés des géophones (signaux enregistrés à 12h59min05s, le 23 avril 2013)

Les résultats montrent que:

- Les signaux bruts des deux géophones sont proches, ce qui montre une bonne répétabilité des mesures.
- Après intégration, on constate que les 2 signaux (de déplacement vertical) restent très similaires, et présentent une forme régulière. Ils montrent cinq pics de déplacement vers le bas. On peut en conclure que le signal correspond au passage d'un poids-lourd à 5 essieux (semi-remorque de type T2S3 avec 3 essieux sur la remorque).
- L'amplitude maximale de déplacement vertical, crête-à-crête, est de 0.09 mm environ, et correspond au passage du deuxième essieu, qui est bien l'essieu le plus chargé sur un poids-lourd T2S3 (essieu moteur).
- On constate toutefois que les signaux de « déplacement » obtenus par intégration directe des signaux des géophones ne sont pas complètement réalistes, puisqu'ils comportent des parties positives, indiquant un déplacement vers le haut (entre les essieux), et des parties négatives, indiquant un déplacement vers le bas (sous chacun des essieux). Les déplacements positifs correspondraient à un soulèvement de la chaussée, ce qui ne semble pas réaliste.

A partir de ces premiers résultats, on a donc conclu que :

- La réponse des géophones est très sensible aux faibles déplacements produits par le passage des poids-lourds (de l'ordre de 10/100 mm). Leurs signaux intégrés permettent d'identifier clairement les déplacements produits par les différents essieux du poids lourd, et donc d'identifier qualitativement les silhouettes de poids lourds (le nombre d'essieux, et leur position).
- En revanche, la simple intégration des signaux des géophones ne suffit pas pour obtenir des valeurs de déplacement fiables. En effet, si on examine les bassins de déflexion obtenus par calcul avec le logiciel ALIZE, ou les bassins mesurés à l'aide du curviamètre (qui a réalisé des mesures sur le site), on constate que ceux-ci sont toujours dirigés vers le bas, et ne montrent pas de soulèvement. A titre d'exemple, la Figure 3.28 présente une comparaison entre la déflexion de la chaussée sous le passage du poids lourd T2S3 chargé à 46 tonnes calculée avec Alizé (15°C et 10Hz) et des signaux intégrés des géophones (signaux enregistrés à 12h59min05s, le 23 avril 2013). Ces signaux ont été enregistrés sous le passage d'un poids-lourd de type tridem mais de charge inconnue. On constate que le niveau de déflexion calculée avec Alizé est de l'ordre de 0.08 mm. Ce bassin est dirigé vers le bas. L'amplitude maximale du déplacement vertical, crête-à-crête, donné par les géophones est de 0.09 mm environ. Ces signaux présentent cependant des oscillations vers le haut. Les 5 pics correspondant au passage des essieux du poids lourds de type T2S3 sont bien observés sur les signaux calculés et mesurés.

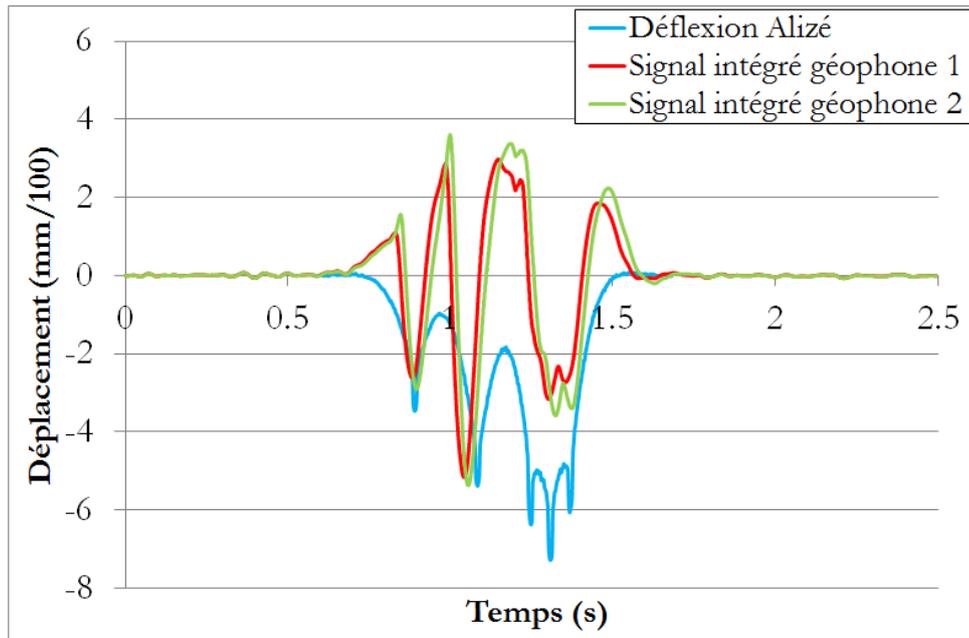


Figure 3.28. Comparaison entre la déflexion de la chaussée sous le passage du poids lourd T2S3 chargé à 46 tonnes calculée avec Alizé (15°C et 10Hz) et les signaux intégrés des géophones sous le passage d'un poids-lourd de type tridem mais de charge inconnue (signaux enregistrés à 12h59min05s, le 23 avril 2013)

- En conclusion, d'autres approches devront être étudiées pour corriger les mesures des géophones, et parvenir à une meilleure estimation des déplacements de la chaussée au passage des charges. Ces approches seront présentées dans le Chapitre VI de la thèse.

Toutefois, d'après les analyses faites ici, il semble possible de proposer une première application des mesures des géophones, qui consiste à détecter et compter les différentes silhouettes des poids lourds. Les Figure 3.29, Figure 3.30 illustrent cette application, en présentant les signaux intégrés obtenus pour deux types de véhicules: un poids lourds à trois essieux et un poids lourd semi-remorque de type T2S3, à cinq essieux. On voit que dans les deux cas, les différents essieux des véhicules peuvent être facilement identifiés. On remarque aussi, dans les deux exemples, la très bonne concordance entre les mesures des deux géophones utilisés.

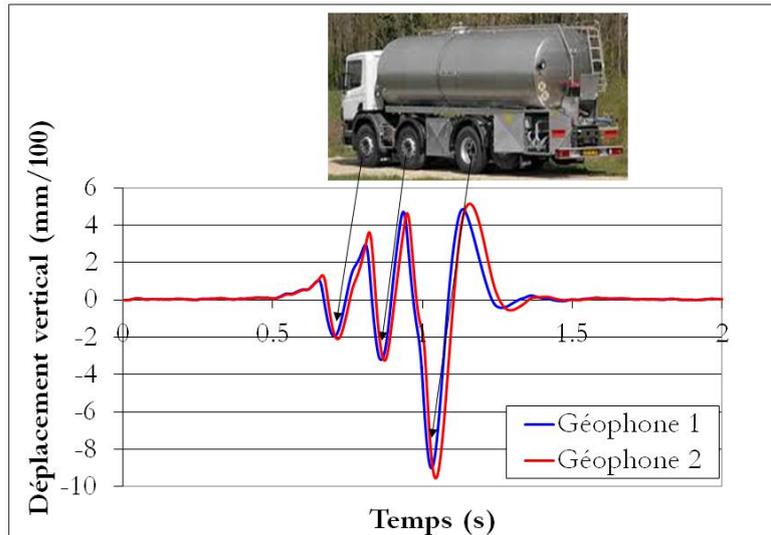


Figure 3.29. Signaux intégrés des géophones sous le passage d'un poids lourd à 3 essieux

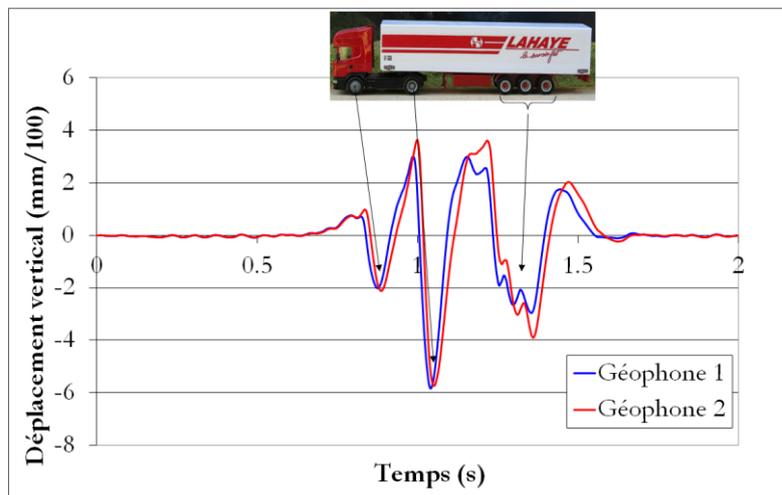


Figure 3.30. Signaux intégrés des géophones sous le passage du poids lourd semi-remorque de type T2S3, à cinq essieux

3.5.3 Analyse des mesures des géophones

Comme discuté dans le paragraphe précédent, une application possible des mesures des géophones consiste à intégrer les mesures brutes de vitesse de déplacement pour remonter aux déplacements verticaux de la structure. En réalisant une intégration « directe », sans autre correction des signaux, on obtient des amplitudes de déplacement qui ont un ordre de grandeur raisonnable, mais avec des formes de signaux pas complètement satisfaisantes.

De manière préliminaire, et avant d'étudier une approche plus réaliste de correction des mesures des géophones, on a analysé les valeurs de déplacement obtenues par cette intégration directe des mesures, afin de voir quel type d'exploitation de ces mesures pourrait être réalisé.

Pour cela, des comparaisons entre les signaux intégrés des géophones obtenus sur l'A10, et les déplacements verticaux calculés avec Alizé, sur la structure de référence calée précédemment (Tableau 3.1) ont d'abord été réalisées.

Sur la section PR 16+016, équipée du dispositif d'acquisition des mesures à distance, seule une mesure a été faite sous le passage d'un poids-lourd de charge connue. En effet, pour faire des mesures avec les géophones, il est nécessaire que la vitesse de passage du poids-lourd soit assez élevée (dans les 70-80 km/h environ). Il est cependant très dangereux de faire circuler un poids-lourd à cette vitesse, sur une voie lente fermée, avec un balisage réalisé uniquement avec des cônes de chantier, et avec des poids-lourds qui circulent à 90 km/h sur la voie médiane. Cette mesure a donc été effectuée une seule fois le 15 novembre 2011, sous le passage d'un déflectographe circulant à 80 km/h.

La Figure 3.31 présente un exemple de comparaison entre les valeurs de déplacements mesurés lors des essais sur site, et calculées avec ALIZE. Cette comparaison correspond aux mesures réalisées sur site sous le passage rapide du déflectographe (poids lourd de deux essieux, l'essieu arrière est chargé à 130 kN). Les mesures ont été faites le 15 novembre 2011 à 12°C et 80 km/h.

Sur la Figure 3.31, on constate que les amplitudes crête-à-crête des déplacements mesurés par les géophones G1 et G2 sont de 6.8 mm/100 et 6.5 mm/100 sous le passage de l'essieu arrière du déflectographe respectivement. Le déplacement calculé avec Alizé est de 5.8 mm/100. Les valeurs mesurées et calculées sont donc du même ordre de grandeur. Cependant, la forme des signaux des géophones est très différente de celle des déplacements calculés. Ces signaux présentent une partie positive, non réaliste car elle correspond à un déplacement vers le haut de la chaussée. Le déplacement calculé est toujours négatif (déplacement vers le bas). La réponse du géophone qui est atténuée à basse fréquence, et les erreurs dues au processus d'intégration des signaux peuvent sans doute expliquer l'altération des signaux des géophones.

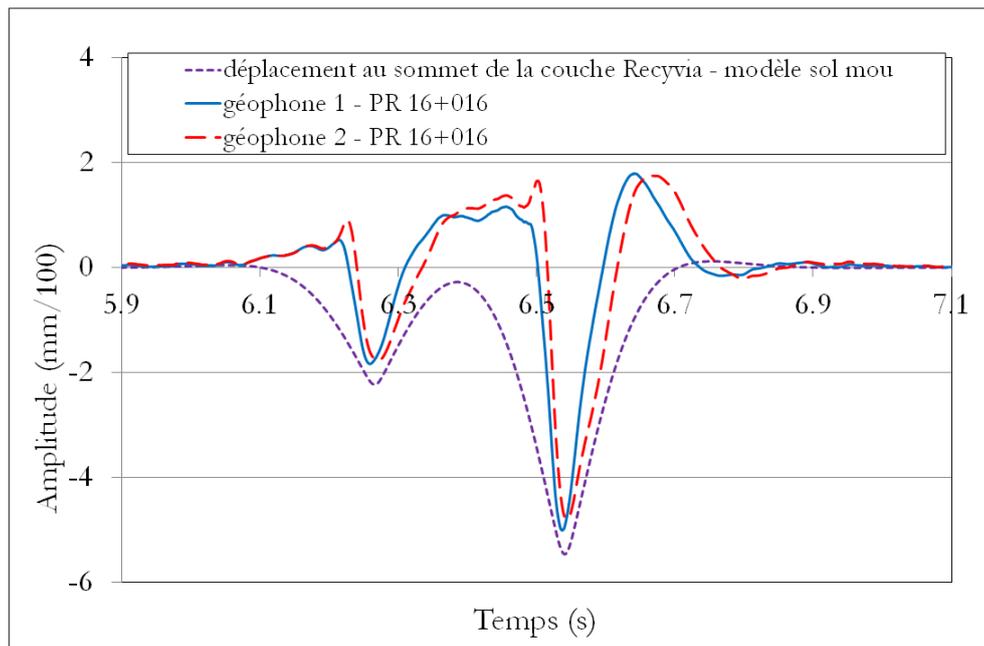


Figure 3.31. Comparaison des déplacements mesuré et calculé au sommet de la couche de Recyvia. Les mesures ont été faites le 15 novembre 2011 (12°C et 10 Hz)

Malgré une restitution imparfaite des signaux de déplacement, les mesures de déflexion semblent donner des amplitudes de déplacement du même ordre de grandeur que celles estimées par les calculs ALIZE. On s'est donc intéressé à l'évolution de ces déplacements au cours de la période de monitoring. Le système de monitoring enregistre les mesures des géophone sous le trafic réel, avec environ 100 à 150 mesures par jour. Ces mesures ont été enregistrées de novembre 2011 à février 2014. Pour chaque signal, on a calculé l'amplitude maximale, crête à crête, des

déplacements mesurés. A partir de ces valeurs, on a ensuite calculé des valeurs moyennes mensuelles de ces déplacements.

La Figure 3.32 présente l'évolution de ces valeurs moyennes mensuelles de déplacement (crête-à-crête) obtenues à partir des géophones et également les températures moyennes mensuelles enregistrée au sommet de la couche de Recyvia. Les résultats montrent que:

- Malgré la variabilité des charges du trafic, la moyenne mensuelle des amplitudes des déplacements verticaux présente une évolution cohérente.
- Les amplitudes des déplacements varient entre 7 mm/100 et 10 mm/100. Une diminution progressive des amplitudes est observée au cours des deux ans. Cette tendance est cohérente avec l'augmentation du module de la couche traitée au ciment au cours du temps.
- La différence entre les signaux des 2 géophones est petite (environ 0.5 mm/100) et l'évolution des mesures est très similaires, ce qui confirme la bonne précision des mesures.
- Une augmentation de déflexion est observée lors de chaque période estivale. Cette observation est cohérente avec la diminution des modules des couches bitumineuses lorsque la température de la chaussée augmente.

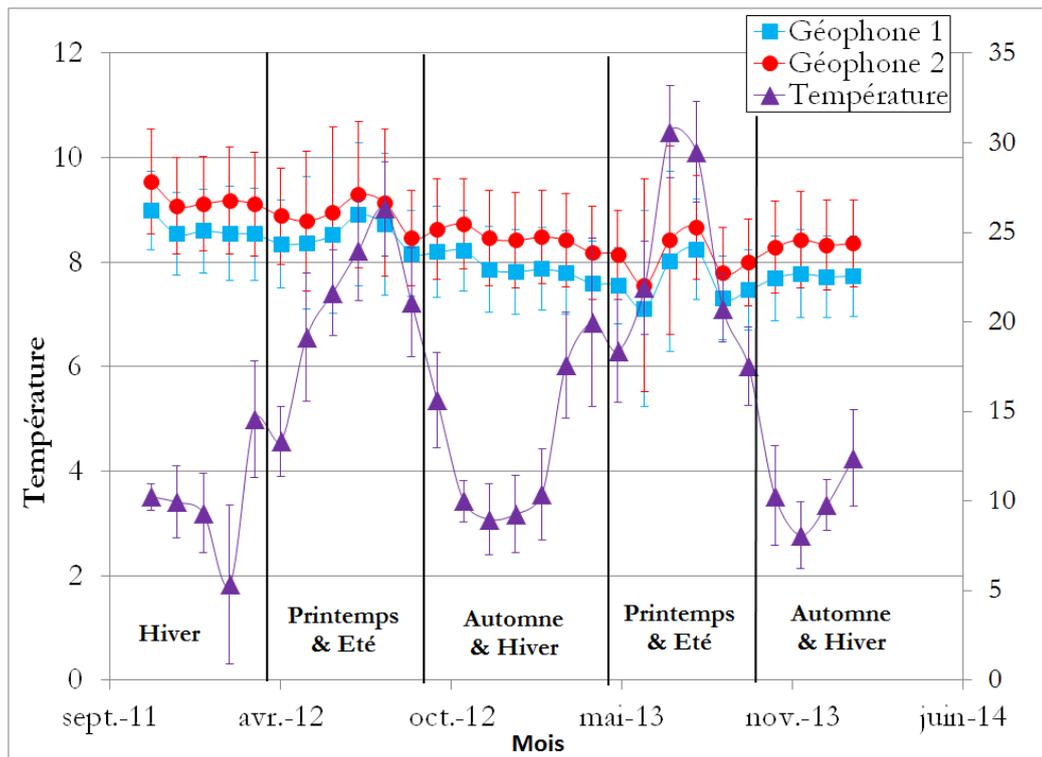


Figure 3.32. Evolution de la moyenne mensuelle des amplitudes de déplacement mesurées par les géophones et de la température à la base de la couche d'EME (de novembre 2011 à février 2014)

Ces résultats montrent que les « déplacements » approchés mesurés par les géophones peuvent constituer un indicateur de la rigidité globale de la chaussée, et de son évolution dans le temps. L'avantage des géophones, par rapport à des mesures réalisées avec le FWD ou le déflectographe, est que le monitoring permet de réaliser des mesures en continu, et de suivre l'évolution saisonnière de la rigidité de la chaussée.

3.6 Conclusion

Le chantier de retraitement en place de l'autoroute A10 a fait l'objet à la fois d'un suivi par des mesures de déflexion (au déflectographe) et de l'instrumentation qui a été décrite dans ce chapitre, au moyen de jauges, de géophones, et de sondes de température.

Les résultats des auscultations ont montré que les mesures au déflectographe ne sont pas suffisamment précises pour évaluer les modules élastiques de la couche Recyvia, rigide et de forte épaisseur. La déflexion de la chaussée sous un essieu de 130 kN est de l'ordre de $10/100^{\text{e}}$ de mm, voir inférieure, et on atteint là les limites de mesure d'un déflectographe, où d'un curviamètre. De plus, le gestionnaire n'a pas autorisé la réalisation de carottage in-situ pour vérifier les performances de cette couche en laboratoire. Dans ce contexte, l'instrumentation combinée avec la modélisation de la structure avec Alizé, a apporté une solution intéressante pour évaluer le comportement mécanique de cette section expérimentale (Blanc, et al., 2015) (Duong, et al., 2016). La bonne corrélation entre les mesures et les calculs avec Alizé a permis d'estimer le module de la couche Recyvia et son évolution. Cela a permis de confirmer que les valeurs initiales des modules in situ du Recyvia étaient en bon accord avec les études de formulation en laboratoire, et de mettre également en évidence un gain de performances du Recyvia dans le temps. La modélisation a également confirmé le collage de l'interface entre le Recyvia et l'EME.

L'analyse des mesures de géophone a montré leur bonne sensibilité à de petits déplacements (de l'ordre de 0,1 mm) et une bonne répétabilité des mesures. On a également montré leur intérêt pour caractériser les silhouettes des poids lourds, et évaluer les déflexions de la chaussée. Cependant, un meilleur traitement des signaux des géophones (dont la réponse a basse fréquence est non linéaire) devra être recherché pour corriger les mesures et obtenir des valeurs de déplacement plus réalistes. Ce travail fait l'objet du chapitre 6 de la thèse.

En conclusion, l'instrumentation du site de l'A10 permet de suivre l'état structurel de la chaussée, et en particulier de la couche de matériau innovant Recyvia. Les résultats montrent le comportement satisfaisant de cette couche, et ont permis de conforter le maître d'ouvrage sur la solution de renforcement choisie. On a également pu tirer certains enseignements concernant l'instrumentation mise en place sur le site, qui était assez réduite, et mettre en évidence certaines de ses limitations :

- Le suivi des jauges n'a été réalisé que par des mesures ponctuelles sur site, pour des questions de budget. Il aurait été intéressant de mettre en place une acquisition en continu à distance de ces mesures, comme pour les géophones, afin de pouvoir suivre en continu le comportement des couches de chaussée.
- Les capteurs ont été installés uniquement dans la couche de fondation et au niveau de la plate-forme, car le gestionnaire souhaitait principalement vérifier le comportement de cette couche de fondation. Aucune mesure n'a été réalisée dans les couches supérieures de la chaussée.
- Seuls deux géophones ont été installés dans la chaussée, à titre de test, et ils ont été placés au même niveau, au sommet de la couche de Recyvia. Il aurait été intéressant de réaliser

une instrumentation plus complète, avec des géophones placés à plusieurs positions verticales et transversales, afin de caractériser plus précisément les déplacements à différentes positions dans la chaussée.

- L'expérimentation a finalement aussi montré la fiabilité du système d'acquisition PEGASE, et la possibilité de l'utiliser pour un suivi en continu de la chaussée, sur une période assez longue, d'environ 2 ans et demi.

Ces résultats prometteurs, mais aussi ces limitations, ont conduit à lancer le projet de site instrumenté de l'autoroute Ax, dont l'objectif était de tester une instrumentation plus complète, avec un suivi en continu de l'ensemble des capteurs. Les résultats obtenus sur ce second site sont présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre 4 - Analyse des mesures des jauges sur l'autoroute Ax

Sommaire

4	Chapitre 4 - Analyse des mesures des jauges sur l'autoroute Ax.....	114
4.1	Introduction	115
4.2	Analyse des mesures sur site.....	115
4.2.1	Chargements réalisés.....	115
4.2.2	Exemples de signaux de mesure.	116
4.2.3	Modélisation de la structure de chaussée initiale avec Alizé.....	119
4.3	Mesures enregistrées avec le système d'acquisition à distance.....	123
4.3.1	Bilan sur le fonctionnement des capteurs.....	123
4.3.2	Exemples de signaux de mesures des jauges.....	124
4.3.3	Première analyse des mesures des jauges sans tri des signaux.....	127
4.3.4	Développement d'une procédure de tri des signaux des jauges.....	133
4.3.5	Evolution des mesures de déformation.....	142
4.4	Modélisation du comportement mécanique de la chaussée	145
4.4.1	Différents scénarios de modélisation avec Alizé et Viscoroute	145
4.4.2	Résultats des modélisations élastiques linéaires.....	146
4.4.3	Résultats des Modélisations viscoélastique avec Viscoroute	152
4.4.4	Evaluation des performances des interfaces de chaussée à différentes températures.....	159
4.5	Conclusion.....	166

4.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse des mesures effectuées avec les jauges de déformation sur la section instrumentée de l'Ax. Le site instrumenté a été décrit en détail dans le paragraphe 2.3 du chapitre II.

Dans ce chapitre, on présente tout d'abord les campagnes de mesure effectuées sur la section instrumentée de l'Ax. Ces campagnes comprennent des mesures initiales réalisées sur site, puis un suivi en continu du comportement de la section sous trafic réel. L'analyse des mesures effectuées sur site visait à valider les réponses des capteurs, et à caler un premier modèle de la structure de chaussée, à partir de mesures réalisées sous une charge de référence connue.

Dans un deuxième temps, on s'intéresse aux mesures des jauges sous trafic réel. Ces mesures ont été réalisées sur une période d'environ 2 ans, entre mai 2015 et juin 2017. Le nombre important de données de mesure, et la variabilité des mesures obtenues sous trafic réel (en raison de la variation des charges des poids lourds qui passent, et de leur position sur la chaussée par rapport aux jauges) a conduit à proposer une procédure originale de tri des signaux des jauges, basée sur plusieurs critères : type de poids lourd, position latérale du poids lourd sur la chaussée, qualité du signal, niveau de charge.

L'analyse des signaux des jauges a porté essentiellement sur les signaux triés. Deux types d'analyses ont été réalisés:

- Une analyse basée sur des valeurs moyennes mensuelles de déformations (calculées à partir des déformations mesurées sous un seul type de poids lourds). Cette analyse a permis d'étudier l'évolution des déformations dans les couches de chaussée instrumentées, au cours de la période de monitoring, en fonction du temps et des variations de températures.
- Un travail de modélisation, qui a consisté à caler différents modèles de comportement (élastique ou viscoélastique) sur des signaux de déformation sélectionnés, afin de définir le modèle permettant de mieux décrire la réponse mécanique de la chaussée, et d'estimer les performances mécaniques des différentes couches, et de leurs interfaces. Ces modélisations ont notamment conduit à proposer différentes hypothèses permettant de mieux prendre en compte le comportement des interfaces entre couches de chaussées dans la modélisation.

4.2 Analyse des mesures sur site

4.2.1 Chargements réalisés

Après la construction et l'instrumentation de la section fin 2013, une première campagne de mesures sur site a été effectuée le 18 mars 2014, dans le but de caractériser la réponse de la chaussée sous une charge de référence connue. Pour ces chargements, on a utilisé un camion de référence, dont les caractéristiques ont été décrites en détail dans le paragraphe 2.2.3.1.3 du chapitre II. Les dimensions et les charges du camion utilisé pour les mesures sont rappelées sur la Figure 4.1.

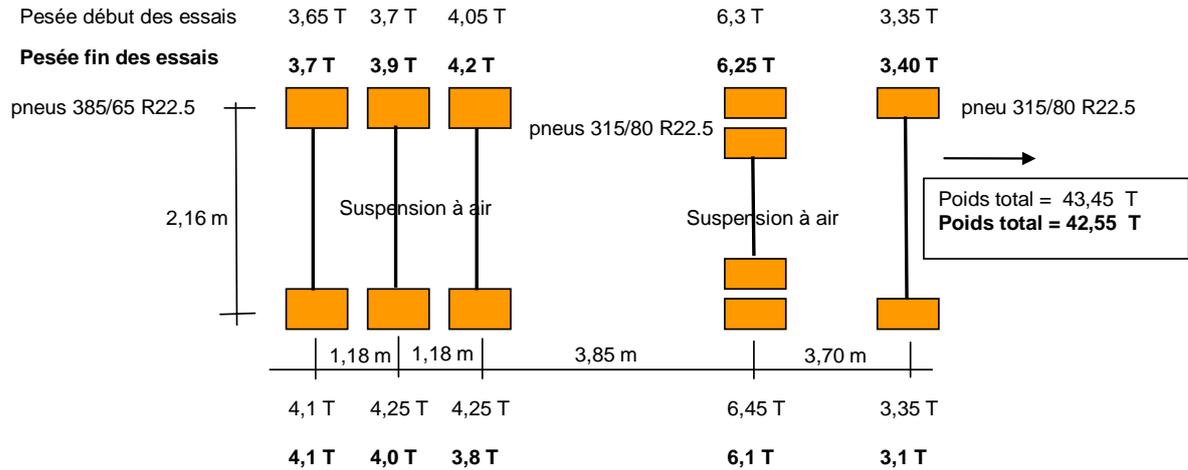


Figure 4.1. Dimensions et charges du camion utilisé pour les mesures de référence (avec les résultats des deux pesées effectuées, en tonnes)

Les mesures ont été réalisées alors que la voie lente n'était pas fermée. Le poids lourds utilisé pour les mesures roulait donc à une vitesse variant entre 90 et 80 km/h en fonction des passages.

Les mesures ont été réalisées en étant sur place. 6 passages ont été effectués. Sur ces 6 passages, seules les mesures de 5 passages ont pu être exploitées. A chaque passage, la réponse de l'ensemble des jauges, des sondes de température (et également des géophones) a été enregistrée. Le camion a circulé avec ses roues droites situées pratiquement à l'aplomb des capteurs installés dans la structure.

Des exemples de signaux de mesures, enregistrés lors de cette campagne de mesures sur site sont présentés dans les deux paragraphes suivants. Les signaux enregistrés lors des autres passages sont présentés en annexe C.

4.2.2 Exemples de signaux de mesure.

4.2.2.1 Exemple de signaux des jauges situées à la base de la couche EME

Un exemple de signal de déformation longitudinale à la base de la couche d'EME est présenté sur la Figure 4.2. La vitesse du poids lourd était de 90 km/h et la température dans la structure était de 16°C. Seul le signal d'une des jauges longitudinales est présenté. Les signaux des autres jauges sont cependant très proches. On remarque que les déformations longitudinales sont en extension à la base de la couche d'EME. Les valeurs de déformations enregistrées sont faibles (16 μ def au maximum) malgré la charge importante du poids lourd T2S3 (43 tonnes)

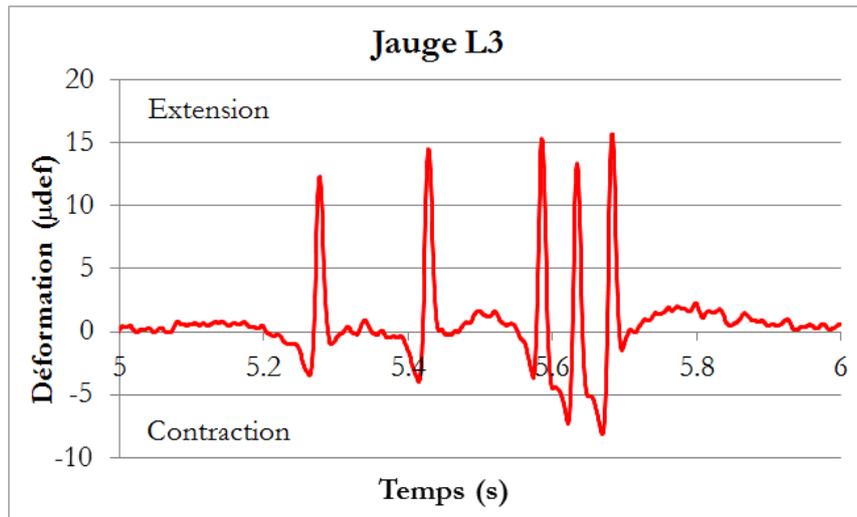


Figure 4.2. Exemple de mesure de la jauge longitudinale L3 à la base de la couche d'EME sous un camion de type T2S3 chargé à 43 tonnes, vitesse 90 km/h, température 16°C

Un exemple de signal de déformation transversale à la base de la couche d'EME est présenté sur la Figure 4.3. La vitesse du poids lourd était de 90 km/h et la température dans la structure était de 16°C. Seul le signal d'une des jauges transversales est présenté. Les réponses des autres jauges sont cependant très similaires. On remarque que les déformations transversales sont en extension à la base de la couche d'EME. Les valeurs de déformations enregistrées sont faibles (15 µdef au maximum) malgré la charge importante du poids lourd T2S3.

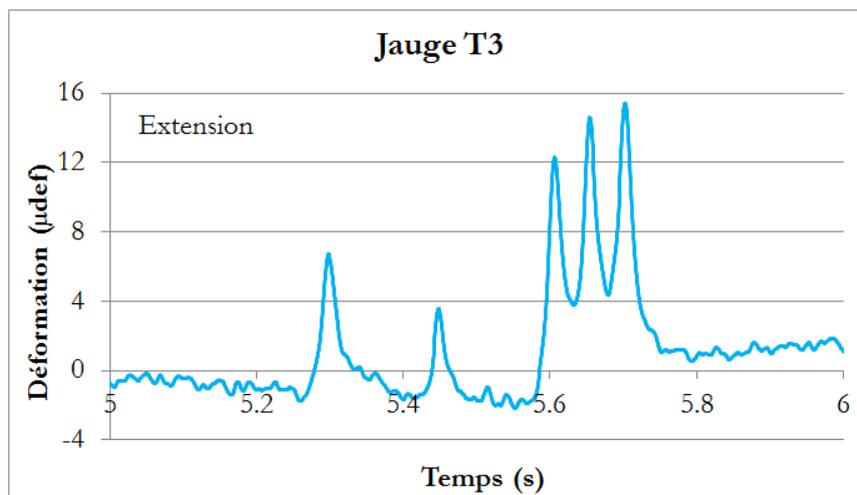


Figure 4.3. Exemple de mesure de la jauge transversale T3 à la base de la couche d'EME sous un camion de type T2S3 chargé à 43 tonnes, vitesse 90 km/h, température 16°C

4.2.2.2 Exemple de signaux des jauges situées à la base de la couche BBME

Un exemple de signal de déformation longitudinale à la base de la couche de BBME est présenté sur la Figure 4.4, pour des conditions identiques aux précédentes (vitesse du poids lourd 90 km/h, température 16°C). Seul le signal d'une des jauges longitudinales est présenté. Les signaux des autres jauges sont cependant très similaires. On remarque que les déformations longitudinales sont en contraction à la base de la couche de BBME. Les valeurs de déformations

enregistrées sont faibles (8 μdef en contraction). Les signaux des jauges sont très dépendants de la position des roues, de la charge, de la vitesse et de la température du matériau.

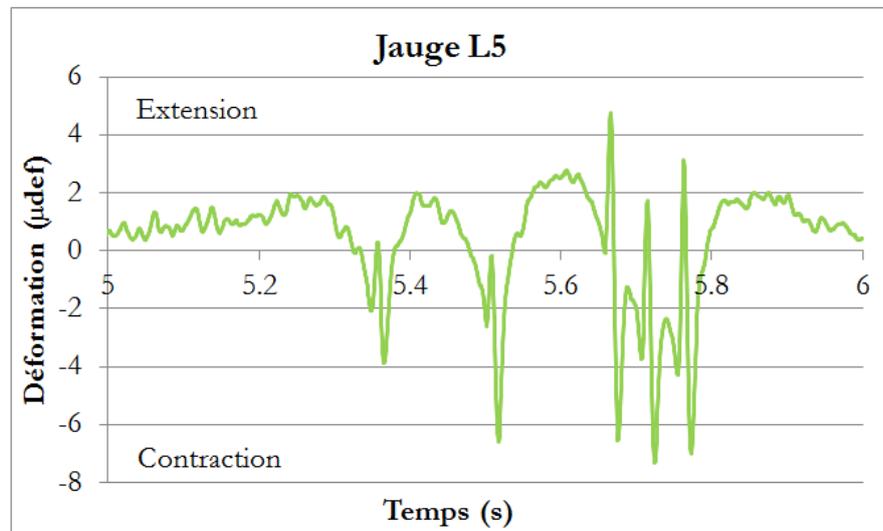


Figure 4.4. Exemple de mesure de la jauge longitudinale L5 à la base de la couche de BBME sous un camion de type T2S3 chargé à 43 tonnes, vitesse 90 km/h, température 16°C

Un exemple de signal de déformation transversale à la base de la couche de BBME est présenté sur la Figure 4.5. Comme précédemment, la vitesse du poids lourd était de 90 km/h et la température de 16°C. Seul le signal d'une des jauges transversales est présenté mais les autres jauges donnent des résultats quasi-identiques. On remarque que les déformations transversales sont en extension à la base de la couche de BBME. Les valeurs de déformations enregistrées sont faibles (5 μdef en extension).

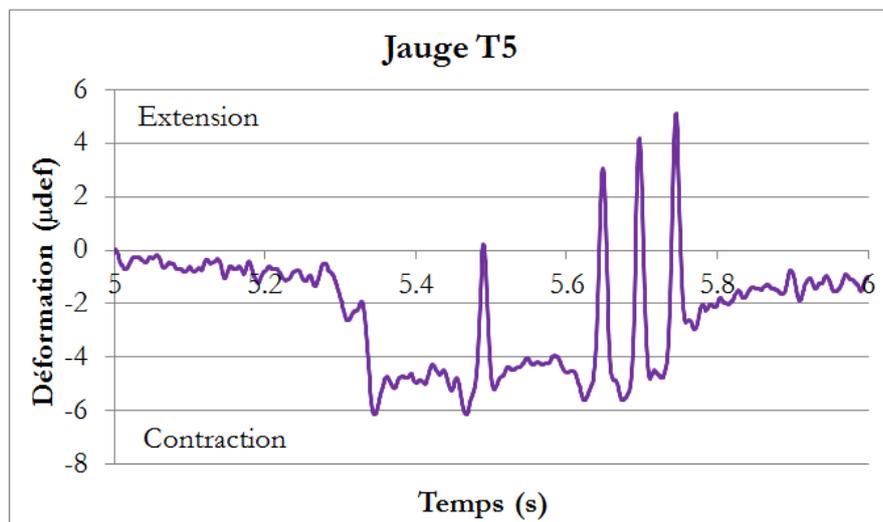


Figure 4.5. Exemple de mesure de la jauge transversale T5 à la base de la couche de BBME sous un camion de type T2S3 chargé à 44 tonnes, vitesse 90 km/h, température 16°C

4.2.3 Modélisation de la structure de chaussée initiale avec Alizé

L'objectif de cette campagne de mesure sur site était de mesurer les valeurs des déformations à la base des couches bitumineuses afin de pouvoir déterminer, à l'aide d'un rétro calcul effectué avec le logiciel Alizé, les valeurs de module initiales des différentes couches de chaussée.

Ne disposant pas de résultats d'essais de module sur les matériaux bitumineux en place, il a été considéré, afin de réduire le nombre de valeurs de inconnues à caler, que les valeurs des modules des couches de BBTM, d'EME et de BBME étaient les valeurs minimales données par la norme NF P 98-086. A 15°C et 10Hz, les modules sont donc :

- 14 000 MPa pour l'EME
- 11 000 MPa pour le BBME
- 3000 MPa pour le BBTM

Lors des calculs, ces valeurs de modules ont bien sûr été corrigées en fonction des fréquences et températures des mesures.

Lors de la mise en place des géophones, la couche de grave-bitume située sous l'EME a été entièrement percée. La présence d'une couche de grave-ciment a été observée sous la couche de GB. De plus, cette couche de GB était fissurée. Lors du calage avec le logiciel ALIZE, on a donc cherché à déterminer le module de la couche de grave-ciment, le module de la couche de GB fissurée et le module du sol support.

Les modules élastiques des anciennes couches ont donc été ajustés, de façon itérative, jusqu'à ce que les déformations calculées soient identiques aux déformations mesurées in-situ. Ces calculs ont été réalisés en supposant toutes les couches de la structure collées.

Les calculs ont été effectués avec le camion de référence T2S3 chargé à 43 tonnes circulant à une vitesse de 90 km/h (fréquence équivalente 13 Hz), et avec une température constante sur toute l'épaisseur de la structure, égale à 16°C. Les valeurs finales des modules des couches de chaussées obtenues avec ALIZE, après calage sur les mesures, sont présentées sur la Figure 4.7.

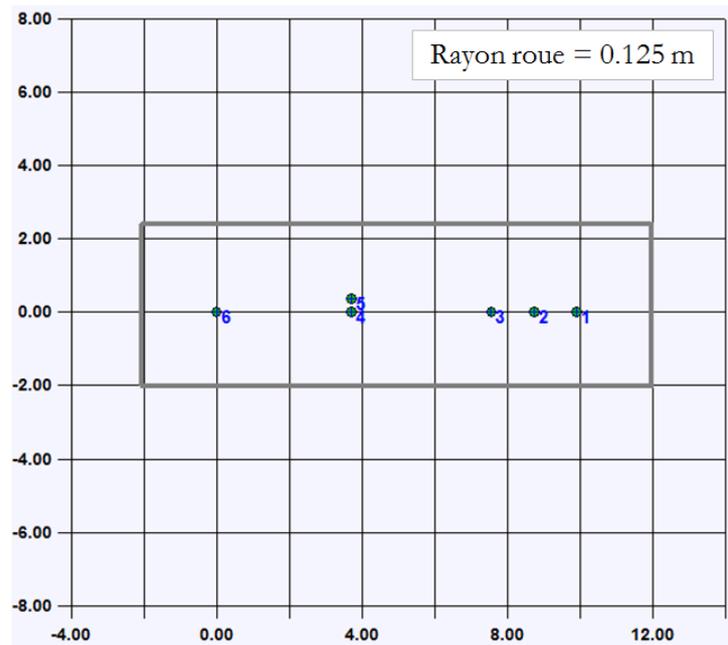


Figure 4.6. Schéma du chargement du poids lourd T2S3 dans Alizé (échelle en m)
(la moitié du poids-lourd est modélisée)

	épais. (m)	module (MPa)	Nu	matériau type
collé	0.025	2890.0	0.350	bbtm
collé	0.050	10757.0	0.350	eb-bbme2
collé	0.010	10757.0	0.350	eb-bbme2
collé	0.060	14043.0	0.350	eb-eme2
collé	0.010	14043.0	0.350	eb-eme2
collé	0.080	5000.0	0.350	autre
collé	0.300	14000.0	0.350	autre
collé	0.500	150.0	0.350	autre
	infini	10000.0	0.350	autre

Figure 4.7. Structure de la chaussée utilisée pour la modélisation avec Alizé.

Les déformations horizontales à la base des couches d'EME et de BBME calculées avec Alizé et mesurées avec les jauges sont comparées sur les Figure 4.8 à Figure 4.11.

Les déformations longitudinales et transversales sous le poids lourd de type T2S3, calculées avec Alizé et mesurées avec les jauges à la base de la couche d'EME, à 13 Hz et 16°C, sont présentées sur les Figure 4.8, Figure 4.9.

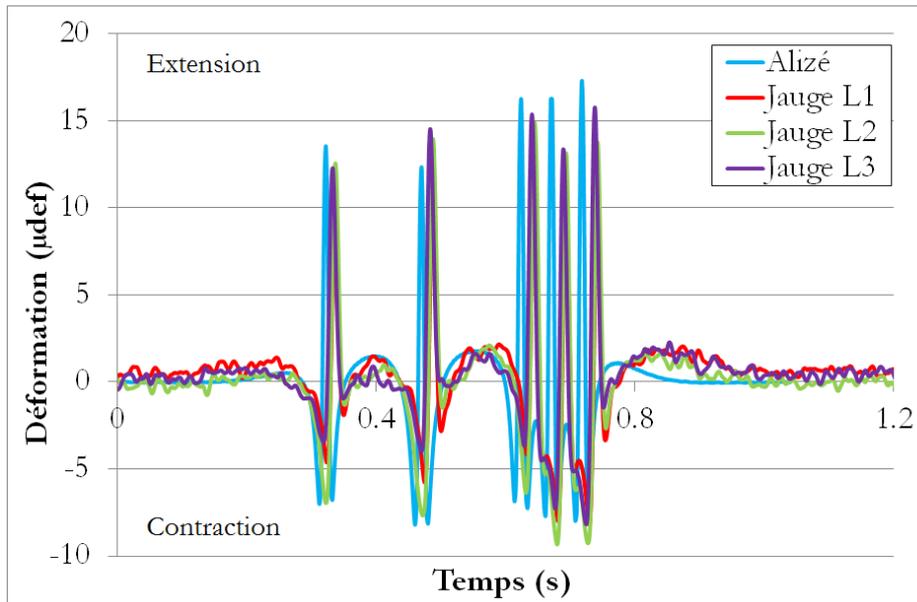


Figure 4.8. Déformations longitudinales calculées avec Alizé et mesurées par les jauges à la base de la couche d'EME (16°C, 13 Hz), sous le passage du T2S3 de référence.

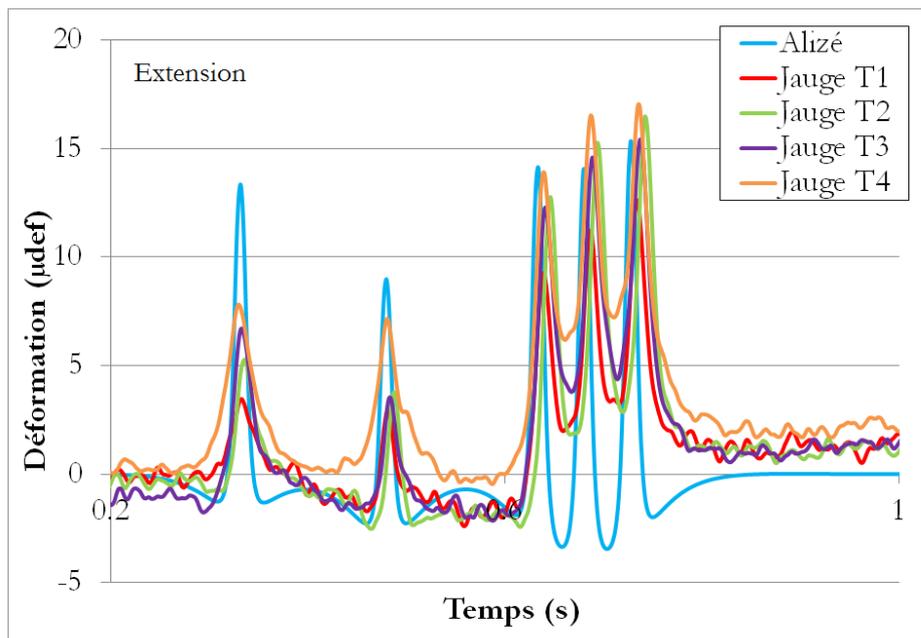


Figure 4.9. Déformations transversales calculées avec Alizé et mesurées par les jauges à la base de la couche d'EME (16°C, 13 Hz), sous le passage du T2S3 de référence.

Les déformations longitudinales et transversales sous le poids lourds de type T2S3, calculées avec Alizé et mesurées avec les jauges à la base de la couche de BBME, à 13 Hz et 16°C, sont présentées sur la Figure 4.10 et la Figure 4.11

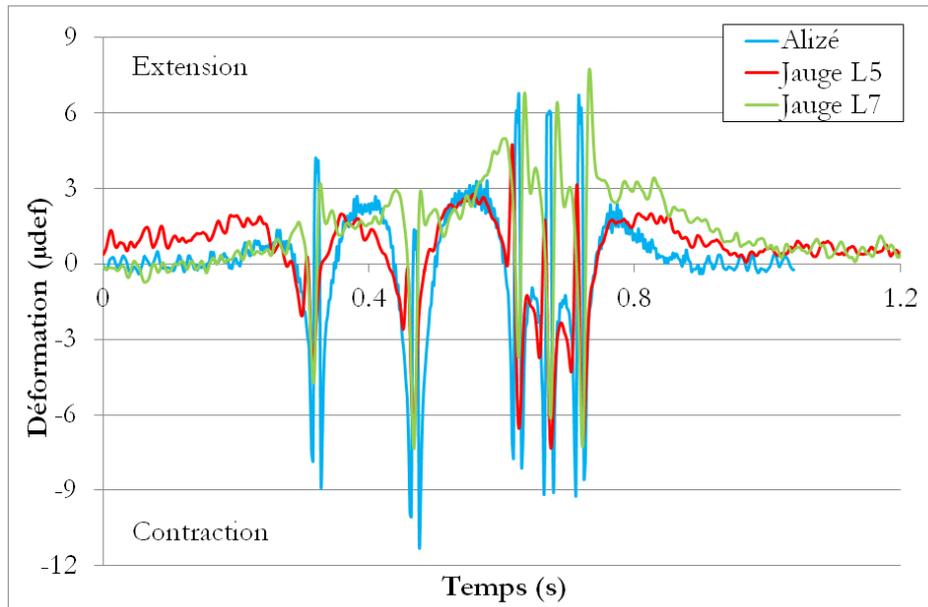


Figure 4.10. Déformations longitudinales calculées avec Alizé et mesurées par les jauges à la base de la couche de BBME (16°C, 13 Hz), sous le passage du T2S3 de référence.

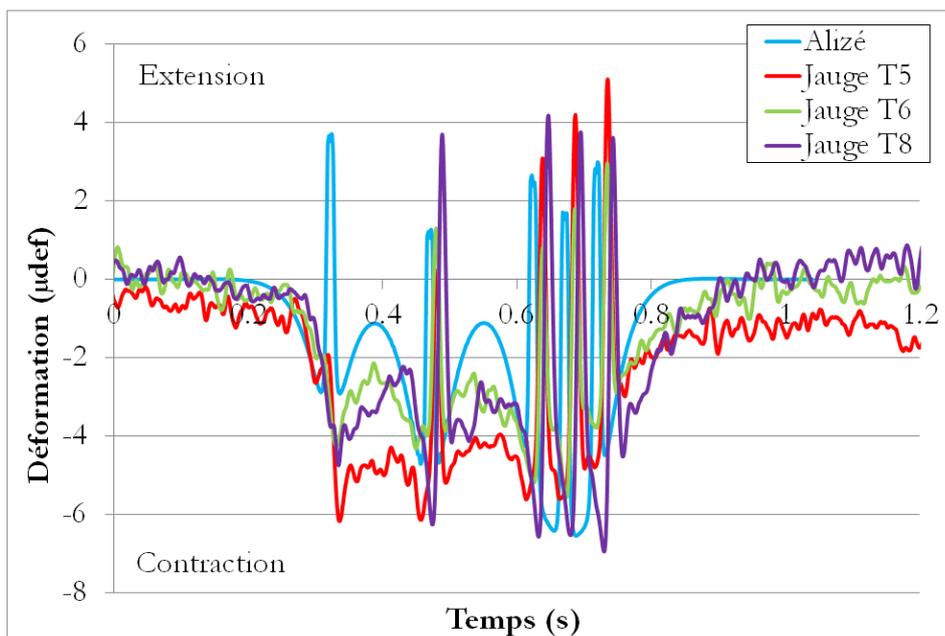


Figure 4.11. Déformations transversales calculées avec Alizé et mesurées par les jauges à la base de la couche de BBME (16°C, 13 Hz), sous le passage du T2S3 de référence.

Les résultats montrent que les calculs élastiques linéaires permettent d'approcher correctement les amplitudes des signaux de déformations longitudinales. Les amplitudes des signaux des déformations transversales sont correctes mais la forme des signaux n'est pas tout à fait la même. En particulier, les mesures de déformations transversales augmentent progressivement sous les trois essieux du tridem et les signaux ne reviennent pas à zéro entre les passages des roues. Ce phénomène est dû au comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, ce qui ne peut pas être reproduit avec le modèle élastique. Des modélisations en viscoélasticité, permettant de mieux approcher les signaux mesurés, seront présentées dans la suite du chapitre.

La structure de la section expérimentale et les modules calés des différentes couches de chaussée, obtenus par la modélisation avec ALIZE (ramenés à 15 °C et 10 Hz) sont synthétisés dans le Tableau 4.1. On constate que les ordres de grandeur des modules obtenus pour la couche de GB fissurée, le sable-ciment et le sol support sont raisonnables.

Tableau 4.1. Caractéristiques de la structure de la section Ax obtenues après calage avec ALIZE (à 15 °C et 10 Hz)

Matériaux	Module élastique (MPa) à 15 °C, 10 Hz	Epaisseur (cm)
BBTM	3000	2.5
BBME	11000	6
EME	14000	7
GB fissurée	5000	8
Sable ciment	14000	30
Sol	150	50

En conclusion, ce premier calage a permis de définir des valeurs initiales des modules des différentes couches de la chaussée, en particulier des modules des anciennes couches de chaussées en place (GB fissurée, sable ciment, et sol support), qui n'étaient pas connues. Ensuite, lors de l'analyse des mesures avec acquisition à distance, on s'intéressera en particulier à l'évolution de ces modules initiaux des matériaux sous les effets du trafic et des conditions climatiques.

4.3 Mesures enregistrées avec le système d'acquisition à distance

Après la campagne de mesure réalisée sur site, les différents capteurs ont été câblés au système d'acquisition et de transmission des données à distance en mars 2014. Cependant, suite à différents incidents techniques (un modem défectueux qui ne permettait pas de faire la transmission des données, puis l'endommagement de certaines cartes d'acquisition par la foudre), le système d'acquisition n'a fonctionné qu'à partir de septembre 2014 pour les mesures des températures et à partir de mai 2015 pour les mesures des jauges et des géophones. A partir de mai 2015, l'acquisition de tous les capteurs est réalisée en continu sous trafic réel. Les mesures au passage des véhicules ne sont déclenchées que si un certain seuil de déflexion de la chaussée (défini pour l'un des géophones) est dépassé (cf paragraphe 2.4.5 du chapitre II). Cela conduit à n'enregistrer que les mesures au passage des poids lourds les plus chargés.

4.3.1 Bilan sur le fonctionnement des capteurs

Concernant le fonctionnement des différentes jauges installées dans la chaussée, entre la construction, et la fin de l'exploitation des données dans cette thèse (juin 2017), on peut faire le bilan suivant :

Durant la construction, les deux jauges longitudinales à la base du BBME ont été endommagées. Il n'y a donc pas de mesures disponibles avec ces capteurs.

Concernant le fonctionnement des autres jauges, la situation est la suivante :

- Les deux jauges longitudinales à la base de l'EME (L2 et L3) fonctionnent toujours en juin 2017.
- Les deux jauges transversales à la base de l'EME (T2 et T3) fonctionnent toujours. Cependant, il y a un écart entre les mesures de ces deux jauges, qui s'accroît au cours du temps. Les mesures de la jauge T2 évoluent de la même façon en fonction de la température au cours de toute la période de suivi alors que les mesures de la jauge T3 semblent diminuer au cours du temps. La forme des signaux de ces deux jauges sont identiques, mais les amplitudes sont différentes.
- La jauge transversale T5 à la base du BBME fonctionne toujours. La jauge transversale T8 à la base du BBME ne fonctionne plus à partir d'avril 2016.
- Des exemples de signaux de mesures des différentes jauges sont présentés en annexe D.

Suites à ces constatations, pour les graphiques présentés dans la suite de ce chapitre, les mesures de la jauge transversale T8 à la base du BBME ne seront plus présentées à partir d'avril 2016.

Les mesures de la jauge transversale T3 à la base de l'EME sont présentées jusqu'en juin 2017, mais avec un doute sur la fiabilité des mesures.

4.3.2 Exemples de signaux de mesures des jauges

Deux exemples des mesures de signaux des jauges de déformation enregistrées sous le passage de poids lourds semi-remorques à 5 essieux, sélectionnés parmi les signaux enregistrés sous trafic réel à basse (15°C) et haute température (30°C) sont présentés sur les Figure 4.12, Figure 4.13. Il est à noter que la valeur positive correspond aux déformations en extension. Six signaux de déformation sont présentés:

- Deux signaux de jauges longitudinales à la base de la couche d'EME (15 cm de profondeur): L2 et L3
- Deux signaux de jauges transversales à la base de la couche d'EME (15 cm de profondeur): T2 et T3
- Deux signaux de jauges transversales à la base de la couche de BBME (8 cm de profondeur): T5 et T8

Les deux jauges longitudinales à la base de la couche de BBME ont été endommagées pendant la construction et ne fonctionnent donc pas. Pour ces signaux, les caractéristiques des poids lourds (vitesse, chargement, distance entre les essieux) ne sont pas connues. Cependant, les vitesses sont généralement autour de 80 km/h.

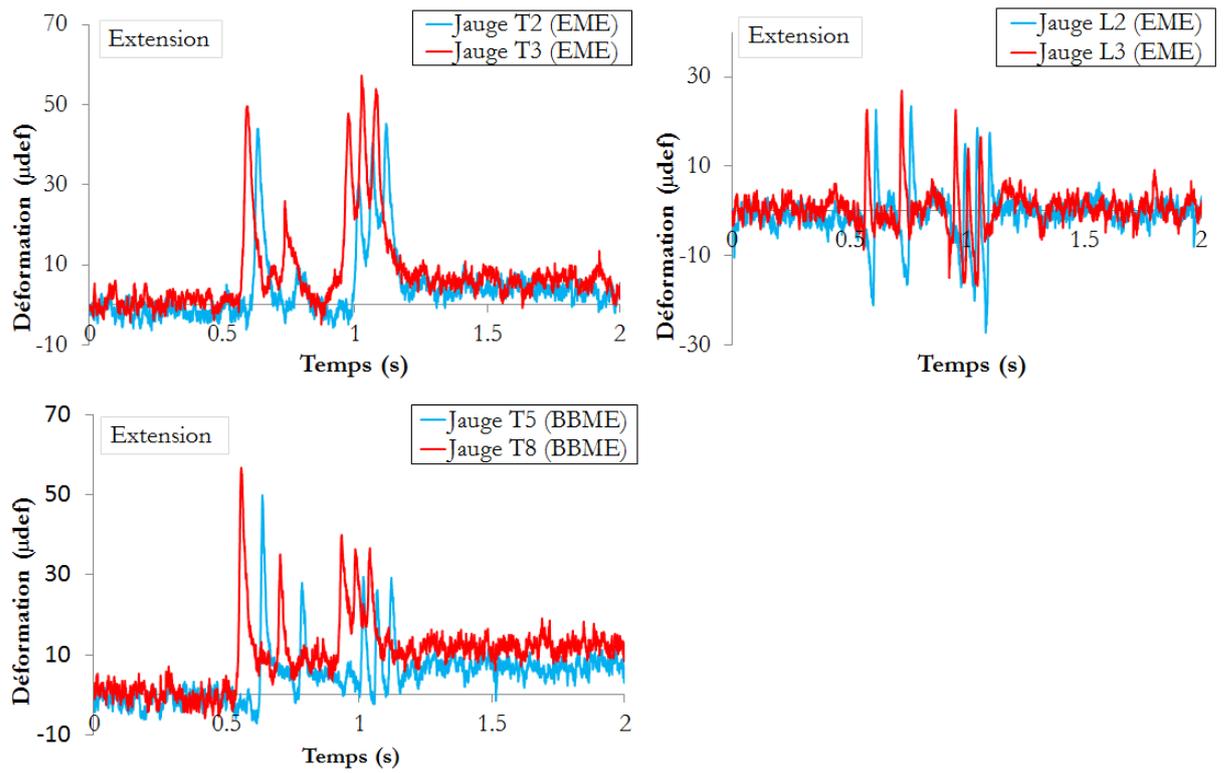


Figure 4.12. Exemple des signaux des jauges à la base des couches de BBME et d'EME à 15°C (signal enregistré le 09h55 le 04 novembre 2015 – poids lourd à 5 essieux)

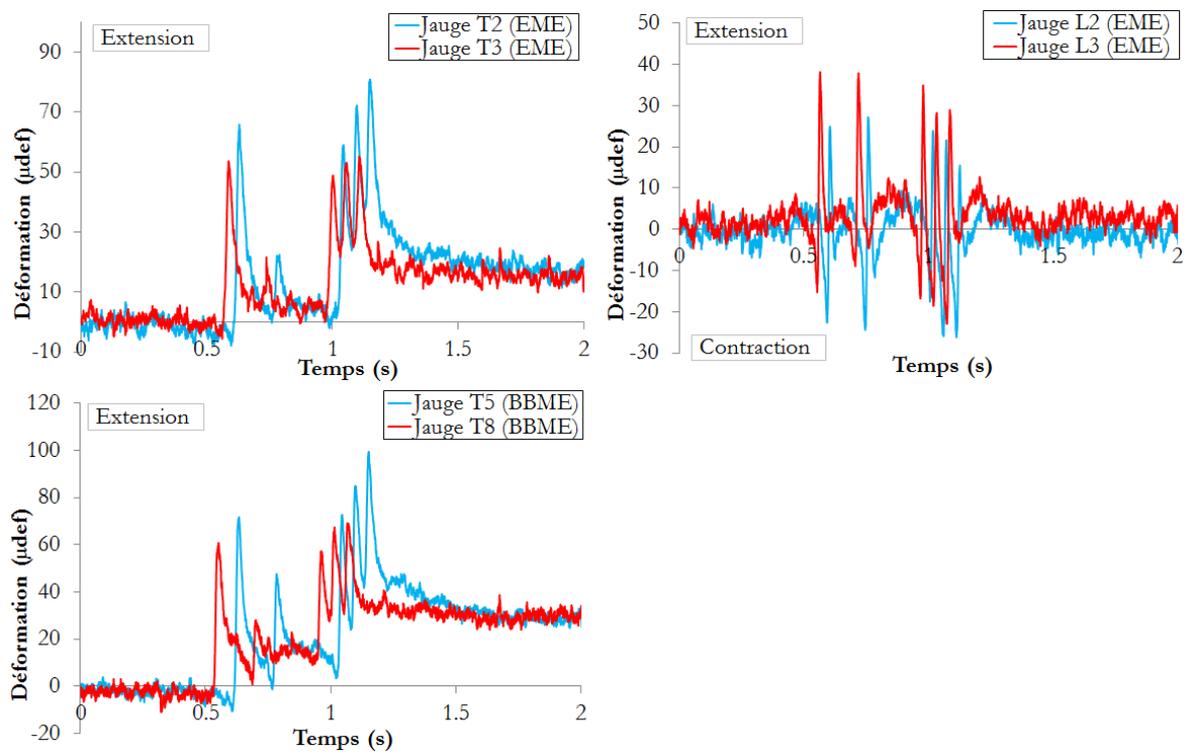


Figure 4.13. Exemple des signaux des jauges à la base des couches de BBME et d'EME à 30°C (signal enregistré à 04h44, le 08 juin 2015 – poids lourd à 5 essieux)

Les signaux ont tous cinq pics, qui correspondent aux cinq essieux d'un poids-lourd. Il est donc possible, au vu de la forme des signaux, d'identifier le type de poids-lourd ayant déclenché l'acquisition.

Il est également à noter qu'à basse température, la couche d'EME travaille en extension dans les deux directions longitudinale et transversale. La couche de BBME travaille en extension dans la direction transversale.

A haute température, les signaux de déformation changent significativement: les amplitudes des déformations sont beaucoup plus importantes et les déformations transversales peuvent atteindre jusqu'à 160 μdef à la base de la couche de BBME. La forme des signaux des déformations transversales à la base des couches bitumineuses est également modifiée: le retour à zéro est lent à la fin des signaux, après le passage du poids-lourd (voir Figure 4.14 et Figure 4.15 qui montrent l'évolution des déformations à la base de l'EME). Ce retard dans la réponse des signaux est dû au comportement viscoélastique des couches bitumineuses. Il est clairement observé sous le passage des trois essieux du tridem et à haute température.

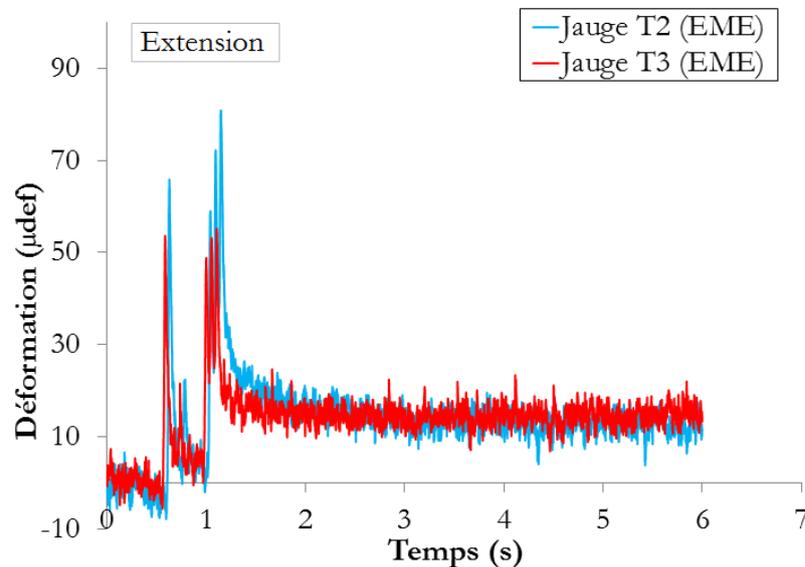


Figure 4.14. Exemple des signaux complets des jauges à la base de la couche d'EME jusqu'à la fin de l'enregistrement à 30°C (signal enregistré à 04h44, le 08 juin 2015)

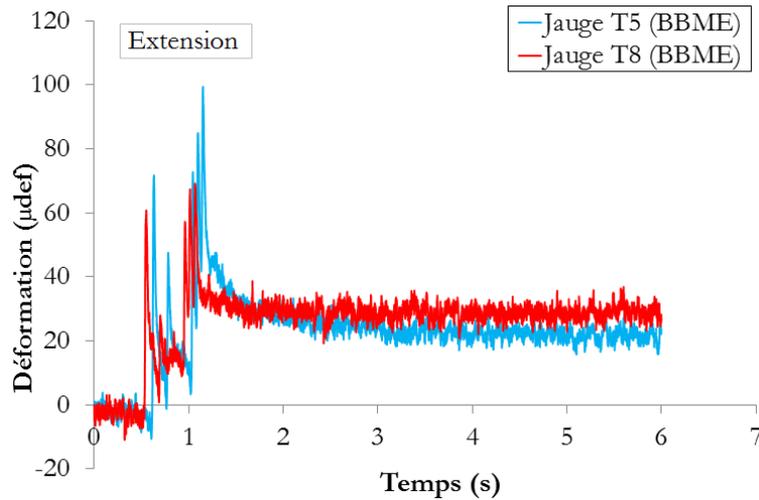


Figure 4.15. Exemple des signaux complets des jauges à la base de la couche de BBME jusqu'à la fin de l'enregistrement à 30°C (signal enregistré à 04h44, le 08 juin 2015)

Des résultats similaires ont été précédemment obtenus sur des essais réalisés sur le manège de fatigue à l'Ifsttar (Grellet, et al., 2016). La structure testée était une structure souple constituée de deux couches d'enrobés bitumineux (de 7 cm et 6 cm d'épaisseur respectivement). Ces deux couches étaient placées sur une couche de fondation granulaire de 30 cm. Dans ces tests, de grandes déformations en extension (300 µdef) ont été mesurées à la base de la couche de roulement sous le chargement d'une roue simple à 40°C. Les signaux revenaient également lentement à zéro après chargement. Le phénomène viscoélastique a été clairement observé à haute température. La Figure 4.16 présente les mesures de déformation transversale sous le passage d'une roue simple à 40°C de la part et d'autre de l'interface entre deux couches d'enrobés bitumineux sur les essais au manège de fatigue. Le signe positif correspond à l'extension.

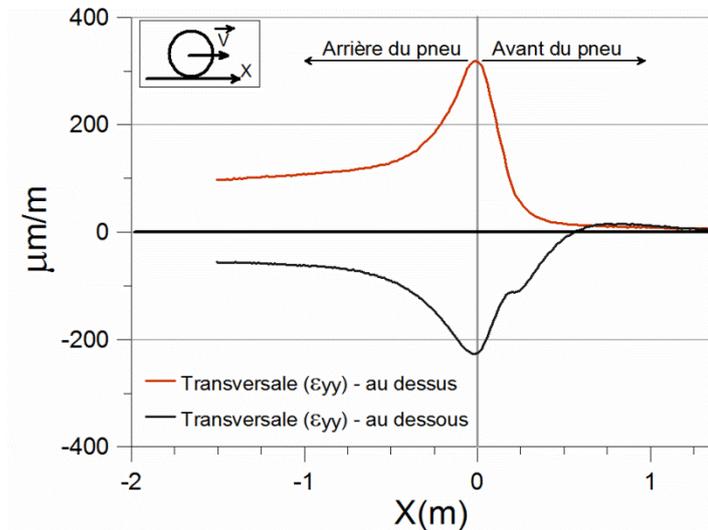


Figure 4.16. Déformations transversales mesurées sous une roue simple à 40°C de la part et d'autre de l'interface entre deux couches d'enrobés bitumineux (Grellet, et al., 2016)

4.3.3 Première analyse des mesures des jauges sans tri des signaux

La procédure d'acquisition qui a été choisie consiste à n'enregistrer que les signaux de poids lourds dont les mesures dépassent un certain seuil de déflexion. Ceci permet d'éliminer les

mesures des véhicules légers, et de n'enregistrer que les mesures des poids lourds les plus chargés. Cette procédure a conduit à enregistrer, sur le site de l'Ax, entre 100 et 300 signaux de poids lourds par jour environ, pendant la période de suivi.

Cette procédure permet donc d'enregistrer chaque jour un nombre assez élevé de signaux (entre 100 et 300 fichiers par jour pour chaque jauge), représentatifs de la variabilité des poids lourds passant sur la section instrumentée (en se limitant aux poids lourds dépassant le seuil de déclenchement des mesures). Il semble donc possible de s'affranchir du manque d'information concernant les poids-lourd ayant déclenchés une acquisition (vitesse, charge, type), et de proposer une première méthode d'analyse simplifiée, qui consiste à calculer des valeurs de mesures moyennes, à partir de l'ensemble de ces signaux sur une période donnée (ici on a choisi une période d'un mois). Cela revient à supposer que d'un mois à l'autre, la distribution des charges du trafic, au sens large (c'est-à-dire les types de poids lourds, niveaux de charges, vitesse) varie peu, et conduit à une charge « moyenne » à peu près identique. C'est ce type d'analyse simplifiée qui a été réalisé dans l'étude présentée dans ce paragraphe. A titre d'exemple, la Figure 4.17 présente la distribution des valeurs maximales de déformation transversale à la base de la couche d'EME pendant deux mois de mai et septembre 2015. Sur ces deux mois, la distribution de température est similaire et le nombre des poids lourds enregistrés est du même ordre de grandeur (autour de 5000 fichiers).

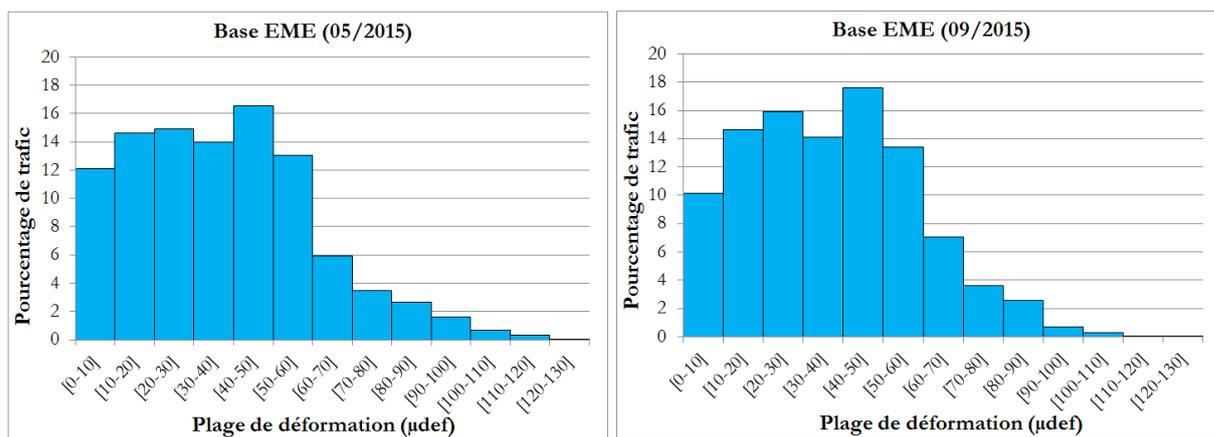


Figure 4.17. Distribution des valeurs maximales de déformation transversale à la base de la couche d'EME pendant deux mois de mai et septembre 2015

Pour cette étude, tous les signaux de jauges enregistrés ont été utilisés. Aucune sélection des signaux n'a été effectuée. Pour chaque jauge, on a choisi comme indicateur de suivi la moyenne des valeurs maximales de déformations enregistrées au passage de chaque poids-lourd. Cet indicateur a donc été calculé comme suit (pour une jauge donnée):

- Pour chaque signal enregistré, on a déterminé la valeur maximale de la déformation au passage du poids lourd, sans tenir compte du type de poids lourd, ni de l'essieu qui produit la déformation maximale. Des exemples de valeurs maximales de déformations, correspondant à plusieurs signaux, enregistrés dans l'EME, sont présentés sur la Figure 4.18
- On a ensuite calculé les moyennes de ces valeurs maximales de déformation, par périodes d'un mois.

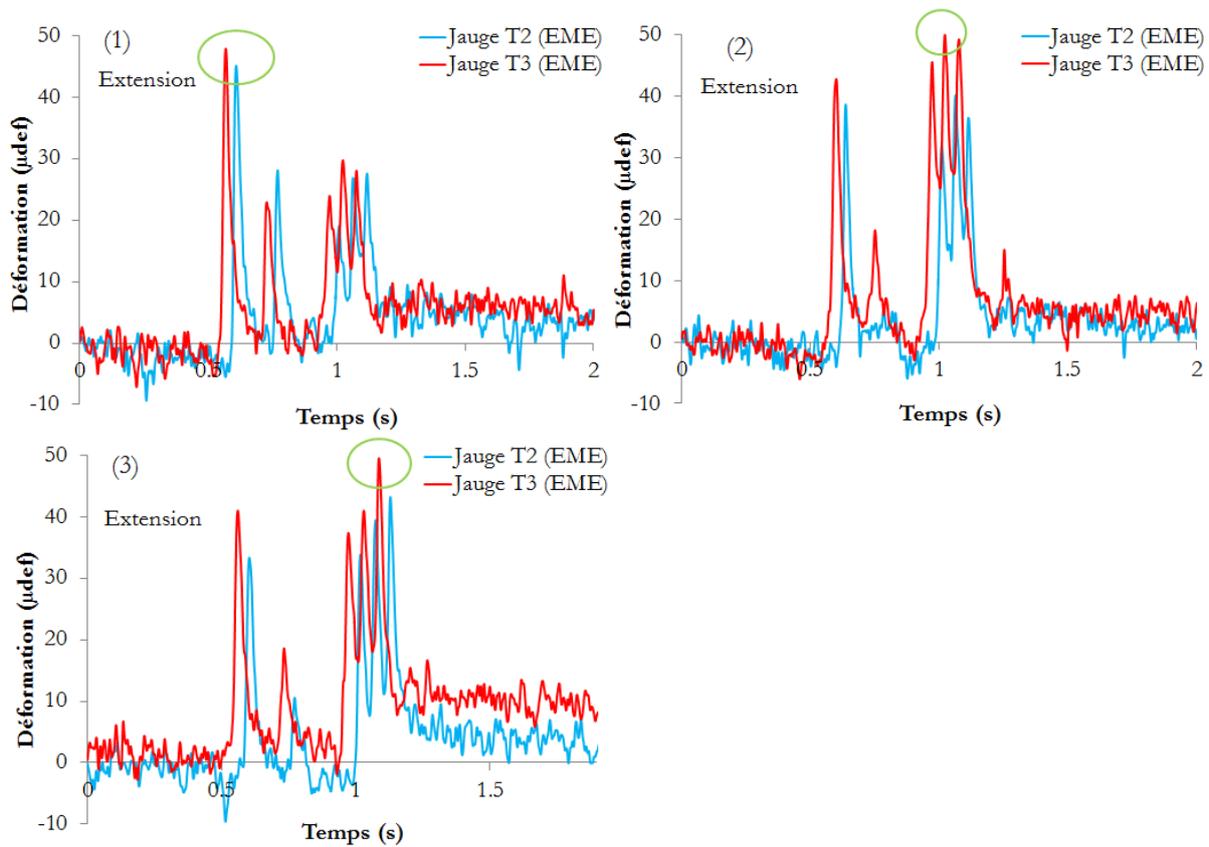


Figure 4.18. Exemple de signaux de déformations transversales dans l'EME – détermination des déformations maximales pour plusieurs cas de poids lourds T2S3, avec des répartitions de charge différentes ((1): essieu 1 le plus chargé; (2): essieu 4 le plus chargé; (3): essieu 5 le plus chargé).

Sur les Figure 4.19 et Figure 4.20, on a représenté l'évolution des moyenne mensuelle des valeurs de déformations maximales des jauges longitudinales et transversales à la base de la couche d'EME de mai 2015 jusqu'à juin 2017. L'évolution de la température moyenne mensuelle à la base de cette couche est également représentée sur ces figures. Les barres sur les courbes représentent l'écart-type de chaque valeur.

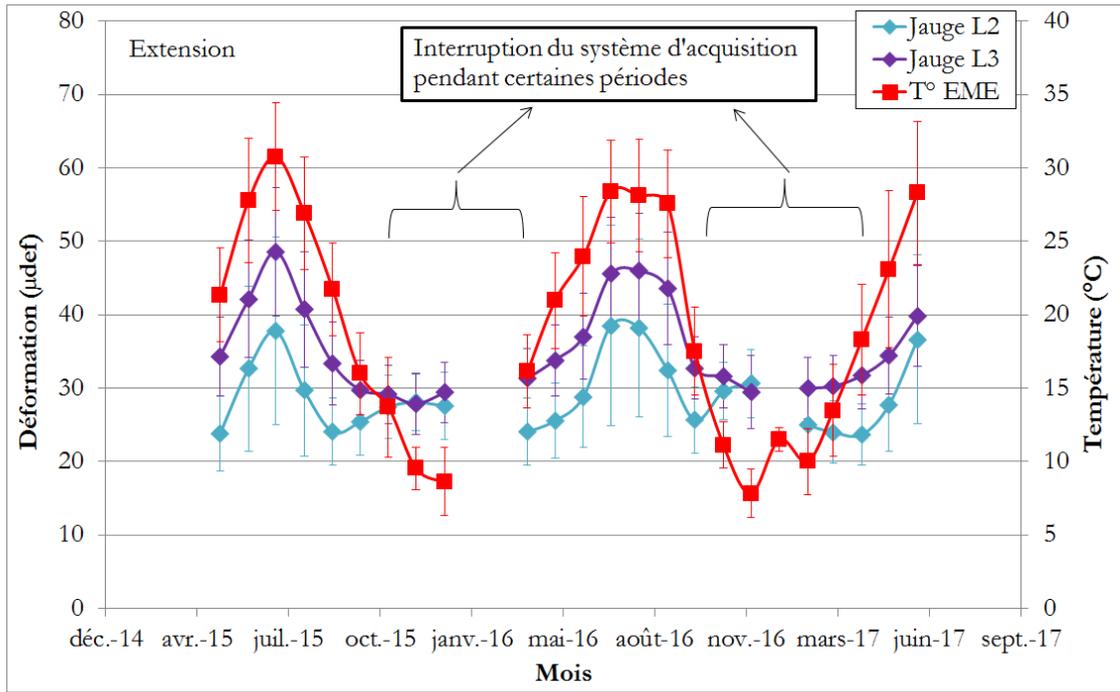


Figure 4.19. Moyennes mensuelles des valeurs maximales de déformation longitudinale mesurées par les jauges et de la température à la base de la couche d'EME.

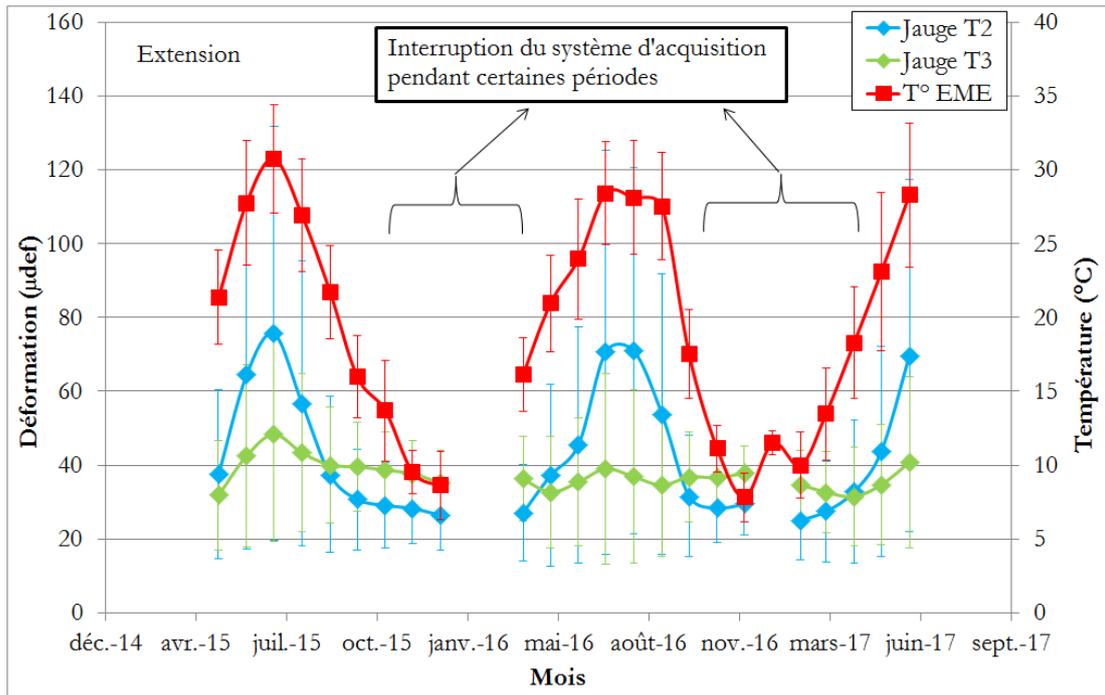


Figure 4.20. Moyennes mensuelles des valeurs maximales de déformation transversale mesurées par les jauges et de la température à la base de la couche d'EME

Sur les Figure 4.19 et Figure 4.20 on constate que :

- Les déformations maximales dans la couche d'EME sont en extension. Ces déformations sont fortement corrélées avec les variations de température. Le pic des courbes de

déformation est obtenu en juillet, où la température de la couche d'EME est la plus élevée (température moyenne de 28 à 30 °C).

- Pour les déformations longitudinales, l'écart entre les mesures des 2 jauges est de l'ordre de 5 à 10 μdef ; il est plus important à haute température qu'à basse température.
- Pour les déformations transversales, l'écart entre les mesures des 2 jauges est beaucoup plus important (jusqu'à 30 μdef), et les mesures de la jauge T3 varient beaucoup moins avec la température que celles de la jauge T2. Comme expliqué dans le paragraphe 4.3.1, les mesures de la jauge T3 sont présentées mais avec une doute sur la fiabilité des mesures. Comme déjà noté en début de chapitre, Il faut aussi noter que les mesures des jauges transversales sont très sensibles à la position latérale des roues des poids-lourds, ce qui peut également être une cause de variation des mesures.
- Les déformations transversales sont plus élevées que les déformations longitudinales, notamment en période chaude. Par exemple, en juillet 2015, la déformation longitudinale à la base de la couche d'EME est de 49 μdef alors que la déformation transversale à la base de la même couche est de 76 μdef .

La Figure 4.21 présente l'évolution des moyennes mensuelles des valeurs de déformations transversales maximales mesurées par les jauges à la base de la couche de BBME. L'évolution de la température moyenne mensuelle à la base de cette couche est également représentée sur ces figures. Les mesures sont représentées entre mai 2015 et juin 2017, sauf pour la jauge transversale T8 à la base du BBME, dont les mesures ne sont disponibles que jusqu'en janvier 2016, car elle a cessé de fonctionner après cette date.

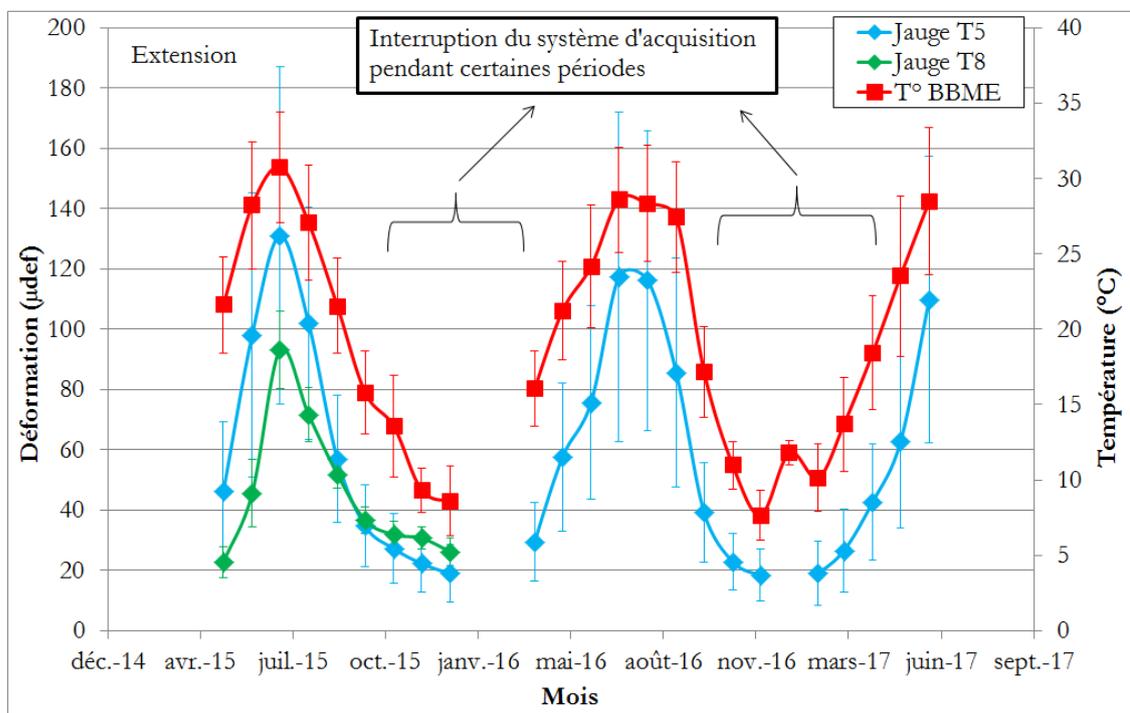


Figure 4.21. Moyennes mensuelles des valeurs maximales de déformations transversales mesurées par les jauges et de la température à la base de la couche de BBME

Les mesures dans le BBME montrent que :

- Pour la couche de BBME, comme pour la couche d'EME, les valeurs de déformation varient fortement avec la température, et sont maximales pendant la période estivale.
- L'écart entre les mesures des 2 jauges est faible en période hivernale (moins de 10 μdef) et augmente en période chaude (jusqu'à 40 μdef)
- Les déformations transversales à la base du BBME sont en extension. Ces déformations sont plus élevées que les déformations transversales à la base de l'EME notamment en période chaude.

Afin de mettre en évidence l'effet de la température, la Figure 4.22 résume, pour toutes les jauges, l'évolution des déformations moyennes mensuelles en fonction de la température, pour toute la période de mesure (2015 à 2017). Les points correspondent aux mesures des deux jauges sur chaque graphique. On peut noter que :

- Dans cette première analyse, où l'on travaille sur les déformations maximales de l'ensemble des signaux, sans tri, l'évolution des déformations avec la température est assez régulière ; il n'y a pas non plus de changement de tendance en fonction de l'année de mesure.
- Toutes les déformations maximales sont en extension.
- Les déformations longitudinales à la base de l'EME sont celles qui présentent l'amplitude de variation la plus faible avec la température, avec des valeurs de l'ordre de 25 à 30 μdef à 10 °C, et 40 à 50 μdef à 30 °C.
- Les déformations transversales à la base de l'EME présentent une amplitude de variation plus forte (25 à 35 μdef à 10 °C, entre 50 et 75 μdef environ à 30 °C).
- L'amplitude de variation la plus forte est celle obtenue pour les déformations transversales à la base du BBME (environ 10 à 30 μdef à 10 °C, jusqu'à 130 μdef à 30°C).

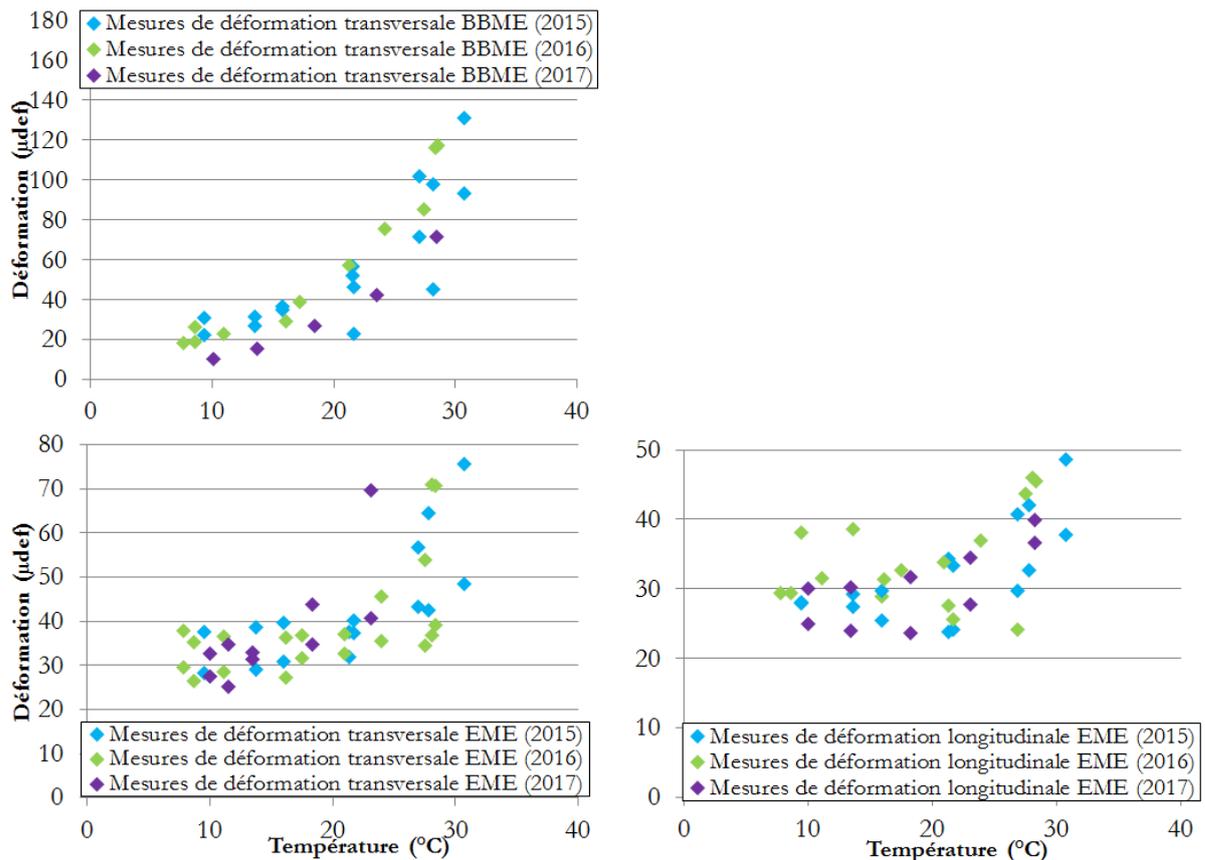


Figure 4.22. Moyennes mensuelles des valeurs maximales de déformation des signaux des jauges à la base des couches de BBME et d'EME pendant les trois années de monitoring

L'exploitation des mesures de toutes les jauges, sans tri des signaux, permet d'évaluer des niveaux « moyens » de déformation, sous passage du trafic, et leur évolution avec la température. Cependant, les résultats sont assez dispersés, avec des écart-types très importants des mesures des jauges de déformation, surtout à haute température (période estivale). L'écart-type des mesures de déformation transversale à la base de la couche d'EME peut atteindre 56 μdef en juillet 2015. Cette variabilité importante des mesures est probablement due au fait que l'on ne prend pas en compte le type de poids lourds passant sur la chaussée, ni la position transversale des charges, qui va avoir une grande influence sur les niveaux des déformations. Une autre limitation de ce type d'analyse est que les charges n'étant pas connues, il n'est pas possible de modéliser la réponse de la chaussée, pour estimer les valeurs de module des couches à partir des niveaux de déformation, afin de mettre en évidence une évolution éventuelles de ces modules en fonction du temps (pouvant traduire un vieillissement ou un endommagement du matériau). Pour cette raison, une procédure de tri des signaux des jauges a été développée, afin de se ramener à des cas de chargement présentant une plus grande homogénéité (un seul type de poids lourds, par exemple), ce qui permettra une meilleure interprétation des mesures. Cette procédure de tri est présentée dans la suite de ce chapitre.

4.3.4 Développement d'une procédure de tri des signaux des jauges

4.3.4.1 Procédure d'acquisition des mesures sous trafic réel

L'acquisition des données sur la section expérimentale de l'Ax est effectuée sous le trafic réel. Les mesures de température sont enregistrées en continu, toutes les 15 minutes. Les mesures des jauges de déformation et des géophones qui doivent être enregistrées à fréquence élevée (2000

Hz) ne peuvent pas être enregistrées en continu. On a donc choisi d'utiliser une procédure de déclenchement de l'acquisition sur seuil, qui consiste à enregistrer les mesures uniquement lorsque le niveau de la vitesse de déplacement vertical enregistrée par le géophone G1 placé dans la couche d'EME dépasse un seuil de déclenchement (réglable). Les signaux des capteurs sont alors enregistrés, pendant une durée de 6 secondes, suffisante pour enregistrer le passage du poids-lourd complet.

Avec cette procédure de déclenchement sur seuil, seuls les signaux correspondant aux poids lourds sont donc enregistrés (pas des signaux correspondant aux véhicules légers). De plus, seuls les poids-lourds présentant des charges à l'essieu suffisamment élevées (donc fortement chargés) sont enregistrés. Lorsque ce seuil est dépassé, les mesures de tous les géophones et de toutes les jauges de déformation sont enregistrées, de façon synchronisée. Un module GPS, intégré à la carte PEGASE, fournit une mesure précise du temps d'acquisition.

Tous les signaux sont transférés sur un serveur via réseau 3G par le système d'acquisition des données. Avec le seuil utilisé, le système enregistre environ 2000 à 10 000 fichiers (correspondant aux passages des poids lourds) chaque mois. Par jour, cela représente entre 70 et 300 poids lourds enregistrés à peu près, soit environ 1.5 et 7 pourcents du trafic poids lourd total, estimé à 4500 PL par jour sur cette autoroute.

La Figure 4.23 présente le nombre de fichiers enregistrés chaque mois (pour chacune des jauges), pendant la période de suivi sous trafic réel. Pour les périodes de décembre 2015 jusqu'en avril 2016 et de septembre 2016 jusqu' à janvier 2017, le nombre de fichiers est plus petit car l'acquisition des données s'est interrompue pendant certaines périodes de monitoring en raison de problèmes techniques liées au système d'acquisition.

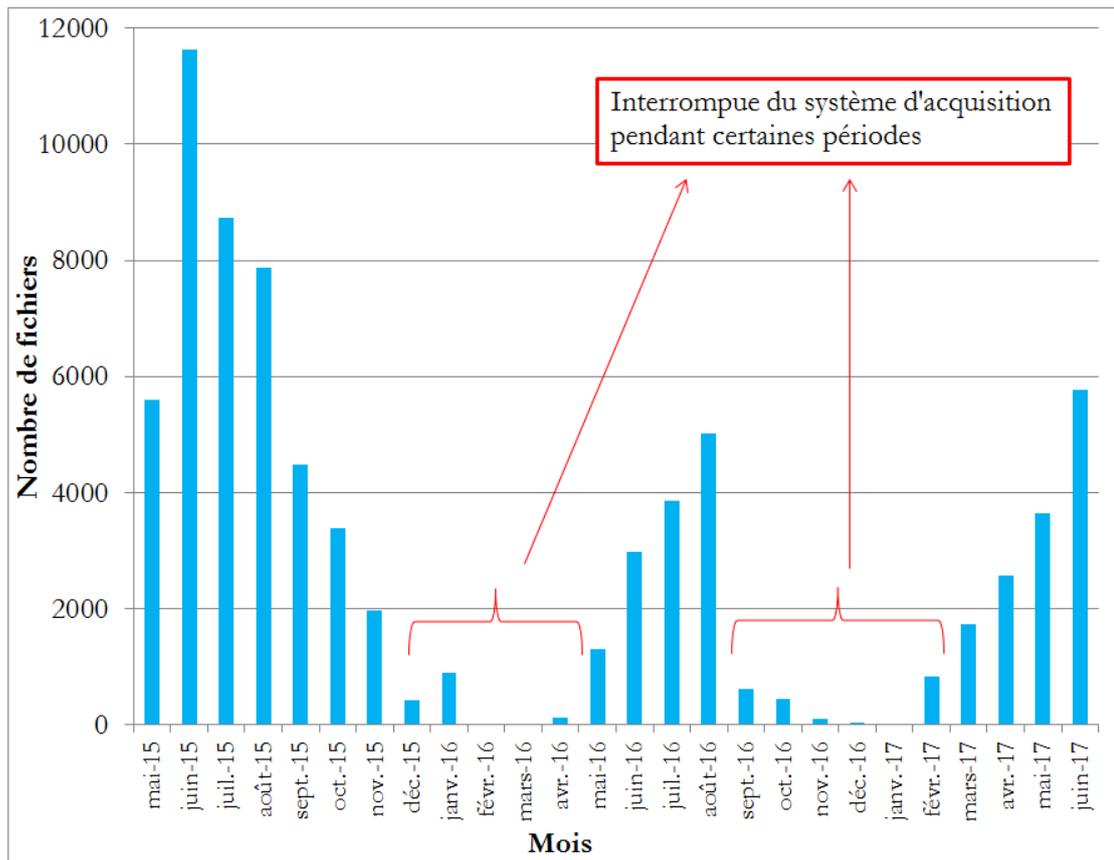


Figure 4.23. Nombre de fichiers de jauges enregistrés par mois

Ainsi, pour la période totale de mesure (entre mai 2015 et juin 2017), on dispose pour chacun des capteurs installés sur la section, d'une base de données d'environ 254000 fichiers, représentant environ 207 GO de données. A notre connaissance, c'est la première fois qu'un tel suivi de chaussée, sous trafic réel, avec une telle densité de mesures, est réalisé en France.

Une telle quantité de données a nécessité la mise au point de procédures automatisées de traitement des signaux, qui ont été développées avec le logiciel SCILAB (<http://www.scilab.org/fr/>). Pour cela, 14 procédures principales de traitement ont été réalisées avec SCILAB afin de traiter les mesures des jauges de déformation, des sondes de température et des géophones pendant la période de monitoring. Ces procédures de traitement réalisent les opérations suivantes:

1. Tracer l'évolution de température pendant une journée
2. Calculer les moyennes journalières et mensuelles des mesures de température à la base des couches bitumineuses
3. Calculer le gradient de température maximal journalier dans la chaussée pour tous les jours du suivi
4. Tracer les signaux bruts et intégrés des géophones
5. Sélectionner les fichiers des géophones et des jauges de déformation où les poids lourds passent à l'aplomb des capteurs
6. Identifier les silhouettes des poids lourds et calculer la vitesse du passage des poids lourds

7. Calculer les moyennes mensuelles des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones
8. Tracer les signaux des géophones après avoir appliqué la méthode de correction décrite dans le chapitre 6, pour l'estimation des déflexions.
9. Calculer les moyennes mensuelles des valeurs de déflexion sous le passage du premier essieu des poids lourds de type T2S3 après correction
10. Tracer les signaux de déformations enregistrés sous passage des poids lourds
11. Calculer les moyennes mensuelles des valeurs maximales de déformation des signaux des jauges sans processus de tri
12. Calculer les moyennes mensuelles des valeurs maximales de déformation des signaux des jauges avec un tri sur la position latérale du chargement
13. Réaliser un tri des signaux des jauges, qui comprend 3 étapes, consistant à :
 - Sélectionner les poids lourds qui passent à l'aplomb des jauges de déformation;
 - Identifier les silhouettes des poids lourds (avec un test sur la fiabilité de la procédure) et ne sélectionner que les poids lourds de type T2S3;
 - Eliminer les signaux des jauges de déformation qui ont un niveau de bruit de mesure trop élevé;
14. Calculer les moyenne mensuelle des valeurs de déformation obtenues après ce processus de tri (déformations correspondant au premier essieu des poids lourds de type T2S3).

Les différentes procédures de traitement des signaux sont détaillées dans l'annexe E.

Comme expliqué précédemment, les signaux enregistrés sur l'Ax correspondent à un trafic réel, composé de différents types de poids lourds passant à différentes positions latérales sur la chaussée. Afin de pouvoir utiliser ces données pour la modélisation, et évaluer les propriétés des couches de chaussée, un processus de tri s'est avéré nécessaire. A partir des différentes mesures disponibles, et en tenant compte des besoins pour la modélisation, on a défini une procédure de tri basée sur 4 critères de sélection principaux :

- Le type de poids-lourd : On a choisi de ne traiter que les signaux correspondant à des poids-lourds de type semi-remorque à 5 essieux (T2S3), qui présentent des géométries et configurations d'essieux très similaires
- La position latérale des poids lourds : celle-ci a une grande influence sur les niveaux de déformations mesurés par les différents capteurs (dont la position latérale est fixe dans la chaussée)
- La qualité du signal (niveau de bruit, identification aisée des pics de déformation)
- Le niveau de charge, dont la connaissance est nécessaire pour des comparaisons avec la modélisation de la chaussée

4.3.4.2 Critères de tri des signaux des jauges

La procédure de tri, en 4 étapes, est décrite ci-dessous.

La première idée consiste à sélectionner uniquement les signaux des poids lourds passant à une position latérale constante, avec leurs roues centrées sur les jauges. Pour cela, on a utilisé les

mesures des trois géophones G1, G3 et G4, placés à différentes positions latérales dans le sens transversal (à 15 cm d'écart), à la base de la couche d'EME. Les jauges de déformation sont alignées avec le géophone G1, placé au centre (voir Figure 4.24). Pour cette raison, lorsque la mesure du géophone G1 est maximale, cela signifie que les roues du poids-lourd sont centrées sur ce géophone, et donc aussi sur les jauges de déformation (avec une précision de ± 8 cm environ).

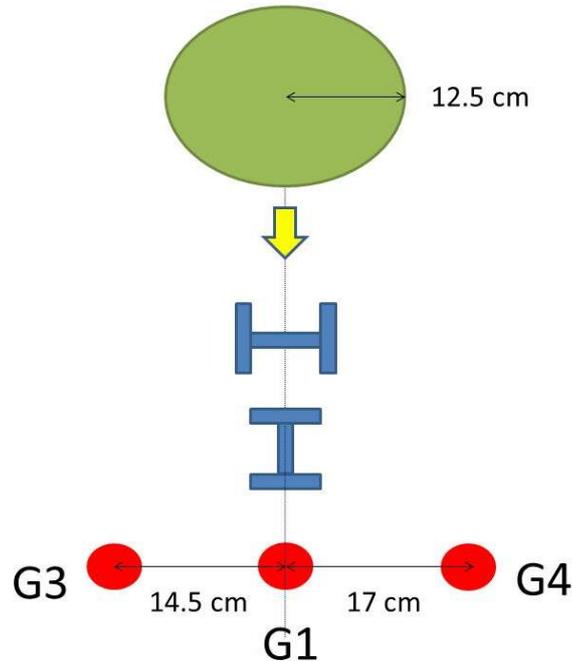


Figure 4.24. Position des géophones placés dans le sens latéral à la base de la couche d'EME

Pour illustrer l'effet de la position latérale des roues des poids lourds sur la réponse de la chaussée, trois signaux de déformations transversales correspondant aux passages de poids-lourds à 5 essieux avec leurs roues centrées sur les géophones G1, G3 et G4 respectivement, sont présentés sur la Figure 4.25. Les résultats montrent que les signaux de déformation sont très différents suivant la position latérale des roues :

- Lorsque les roues sont centrées sur le géophone G1 (et donc également sur les jauges), les valeurs de déformations transversales correspondant aux différents essieux sont toutes positives (en extension).
- Un décalage des roues par rapport aux géophones conduit rapidement à une modification des signaux, et à un changement de signe des déformations.

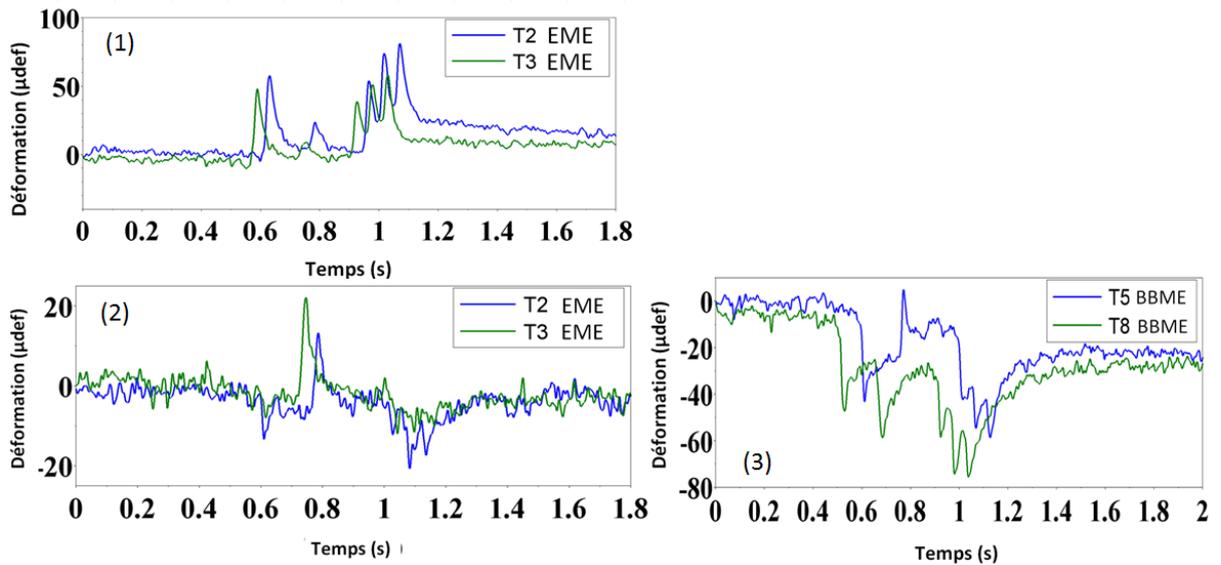


Figure 4.25. Signaux des déformations transversales à la base de l'EME enregistrés sous le passage de poids lourds qui passent à l'aplomb des géophones G1 (1), G3 (2) et G4 (3)

Pour vérifier les observations expérimentales, des calculs ont été effectués avec le logiciel Alizé, en simulant différentes positions latérales des roues du poids lourd, par rapport à la position des jauges. Les résultats de calcul sont présentés sur la Figure 4.26. Ils confirment que la déformation transversale est très sensible à la position des véhicules. La déformation transversale peut changer le signe (extension ou contraction) lorsque le véhicule passe à différentes positions latérales par rapport aux capteurs.

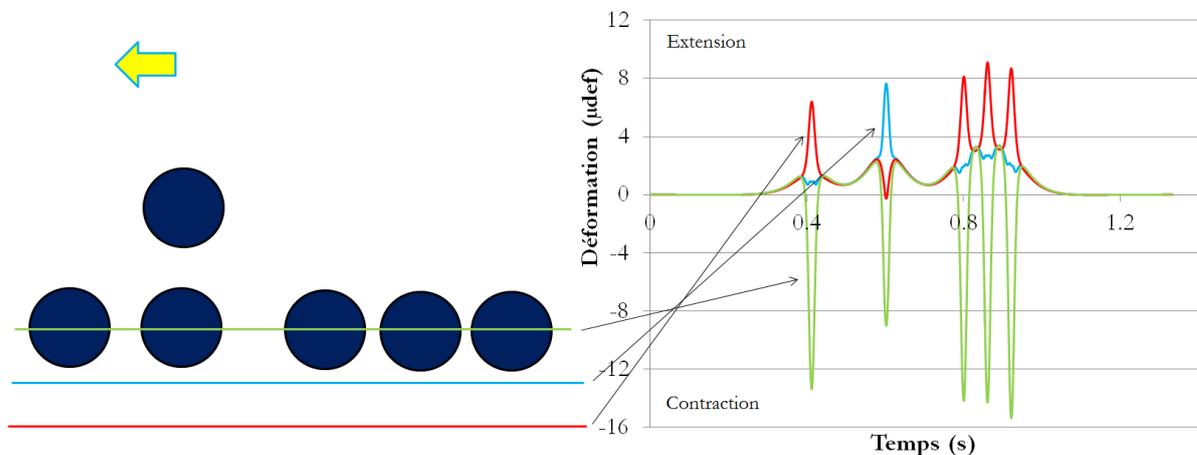
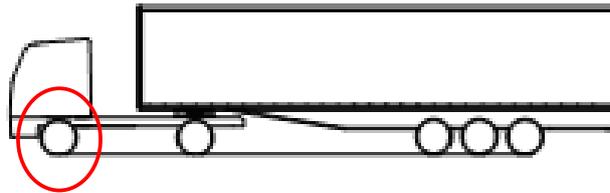


Figure 4.26. Etude de l'influence de la position latérale des roues sur les signaux de déformations transversales, avec Alizé (distance latérale des centres des roues par rapport au point de calcul 0 cm (ligne verte), 15 cm (ligne bleu), 30 cm (ligne rouge)).

L'autre difficulté concernant l'analyse des données sous trafic réel est liée au manque d'information concernant les charges des poids-lourds (aucun système de mesure des charges des essieux n'a été installé sur le site). Pour résoudre ce problème, on a adopté une approche utilisée par les fabricants de capteurs de pesage en marche pour contrôler et recalibrer les mesures des capteurs de pesage. Ces fabricants utilisent pour cela les valeurs de charge mesurées sous le premier essieu de semi-remorques standards européennes à 5 essieux (T2S3). En effet, ces poids lourds T2S3 présentent tous des caractéristiques très voisines, et en particulier, leur premier

essieu (essieu directeur du tracteur) présente toujours des niveaux de charge très similaires, et quasi indépendants de la charge transportée dans la remorque. En moyenne, la valeur de charge de ce premier essieu (à roues simples) est de 65 kN environ (Schmidt, et al., 2016) (Figure 4.27).

Par conséquent, si on analyse uniquement les déformations mesurées par les jauges sous le premier essieu des poids lourd de type T2S3, on peut considérer, de façon approchée que ces déformations correspondent à un chargement produit par un essieu à roues simples isolé, chargé à 65 kN. La charge étant connue, il devient alors possible de modéliser la réponse de la chaussée, et de comparer les déformations mesurées et calculées, afin d'évaluer les propriétés mécaniques des couches de chaussée.



Premier essieu à roues simples – charge moyenne de 6,5 tonnes

Figure 4.27. Caractéristiques d'un poids-lourd de type T2S3

En se basant sur ce principe, on a donc développé une deuxième étape de tri, qui consiste d'abord à sélectionner uniquement les signaux de déformation des poids lourds à 5 essieux (comportant 5 pics identifiables), puis à retenir et analyser uniquement les déformations mesurées sous le premier essieu.

Finalement, une dernière étape de tri a été rajoutée ; celle-ci consiste à éliminer les signaux dont le premier pic à une amplitude trop faible, par rapport au bruit de mesure. D'après l'analyse de ce bruit, le seuil, en dessous duquel l'amplitude de déformation est considérée trop faible a été fixé à 3 μdef à basses températures et à 8 μdef à hautes températures (c'est-à-dire pour les mois de juin, juillet et août). En effet, à hautes températures, les mesures de déformation sont plus élevées et les signaux sont plus bruités. Le niveau de bruit est donc plus important pour pouvoir détecter les pics des signaux.

En conclusion, le processus de tri, prenant en compte le type de poids lourd et sa position latérale, se déroule donc comme suit (Figure 4.28) :

- Dans un premier temps, les signaux des poids-lourds dont les roues sont centrés sur les jauges, sont sélectionnés. La sélection est basée sur l'information donnée par les géophones G1, G3, G4 placés à différentes positions latérales.
- Le nombre de pics de chaque signal est ensuite compté et seuls les signaux correspondant aux poids lourds à 5 essieux de type T2S3 sont sélectionnés.
- Enfin, l'amplitude des signaux est analysée. Seuls les fichiers dont l'amplitude du premier pic est plus importante qu'un certain niveau de bruit sont retenus.

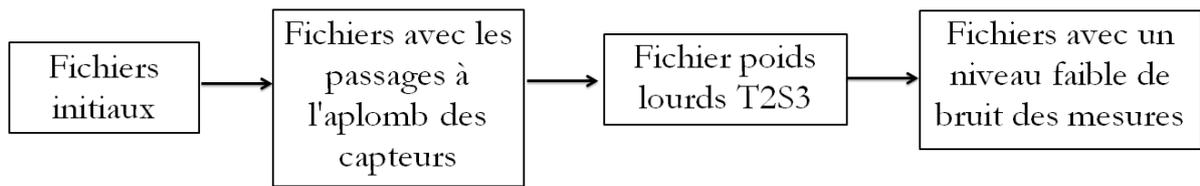


Figure 4.28. Processus de tri des signaux des jauges

La Figure 4.29 présente un exemple de signaux de déformation enregistrés au passage d'un poids lourd de type T2S3 retenus après le tri. Les Figure 4.30, Figure 4.31 présentent des exemples de signaux « rejetés » lors la procédure de tri, dont les premiers pics ont une amplitude trop faible, pour au moins une des jauges de déformation.

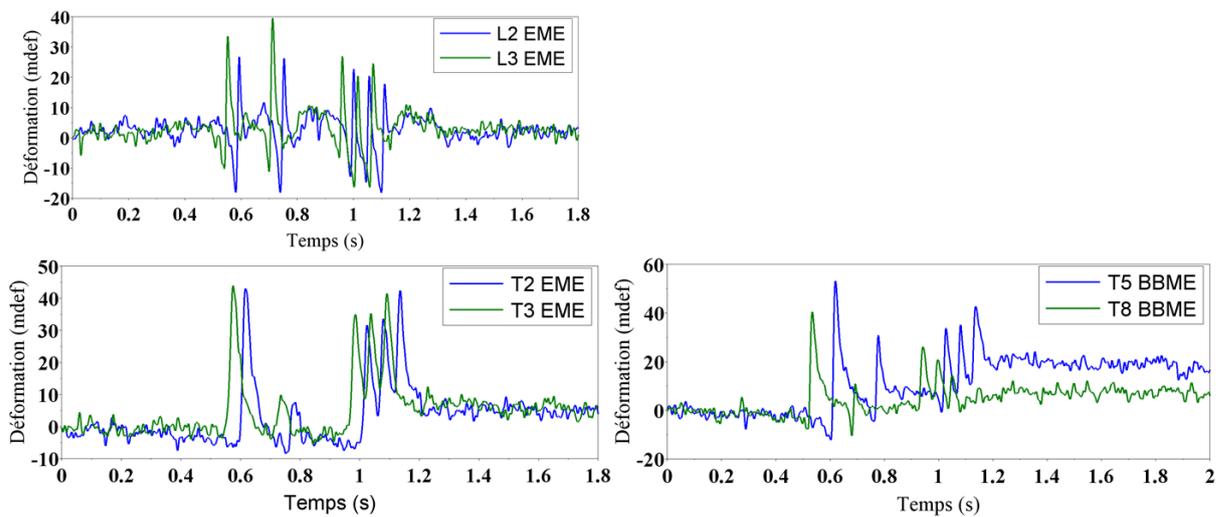


Figure 4.29. Exemple du signal d'un poids lourd de type T2S3 avec le passage à l'aplomb des capteurs (signal enregistré à 10h27min le 29/05/2015).

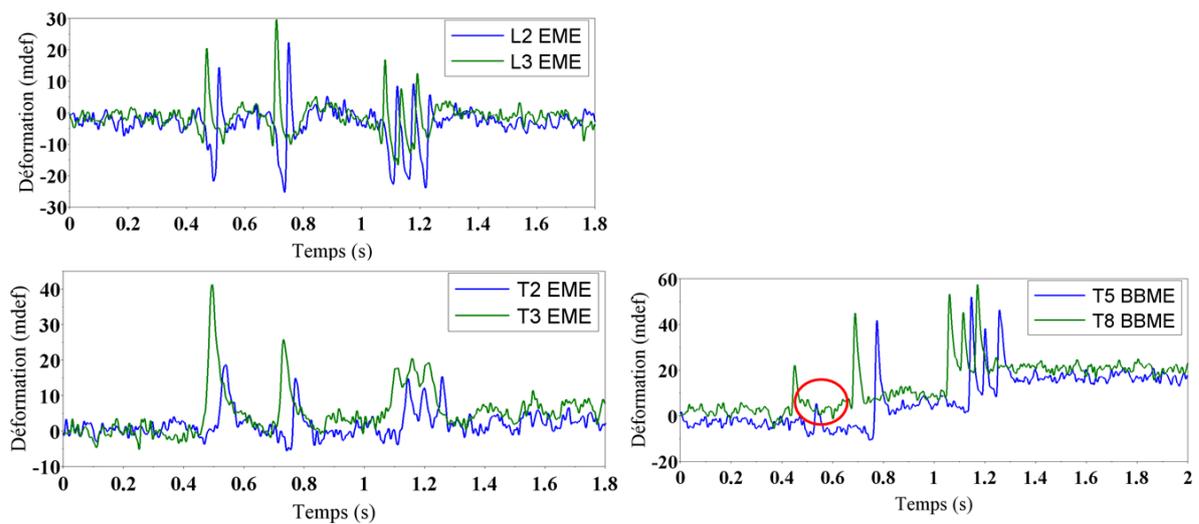


Figure 4.30. Exemple d'un signal rejeté lors du tri - premier pic de la jauge T5 non trouvé (signal enregistré à 11h36min le 01/10/2015).

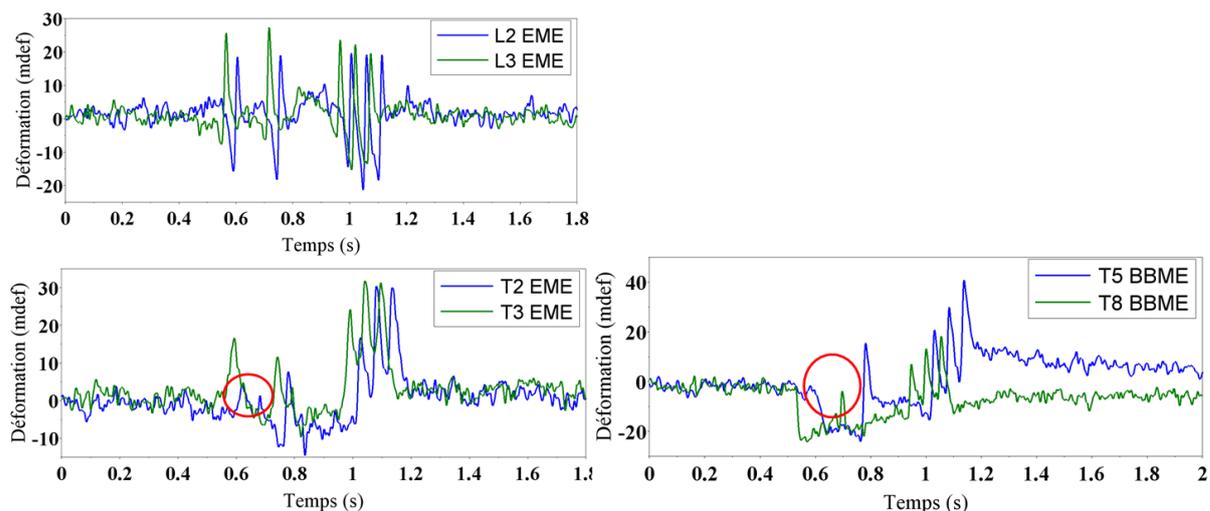


Figure 4.31. Exemple d'un signal rejeté lors du tri - premier pic des jauges T3, T5 et T8 non trouvé (signal enregistré à 10h05min le 16/06/2015)

Le nombre de fichiers retenus à chaque étape du processus de tri des données, à partir des fichiers enregistrés initialement, est présenté sur la Figure 4.32. Le processus de tri a pu être appliqué seulement jusqu'à mai 2016, car à partir de cette date, certains géophones ne fonctionnaient plus correctement.

On constate que le plus grand nombre de fichiers a été sélectionné pendant la période estivale. Le rapport entre le nombre des fichiers après tri et le nombre total des fichiers est quasiment constant au cours de toute la période d'analyse (9% environ). En moyenne, environ 400 fichiers sont retenus chaque mois pour la période hivernale et environ 800 fichiers chaque mois pour la période estivale, après le processus de tri. Ce nombre de fichiers semble suffisant, statistiquement, pour analyser et modéliser la réponse de la chaussée.

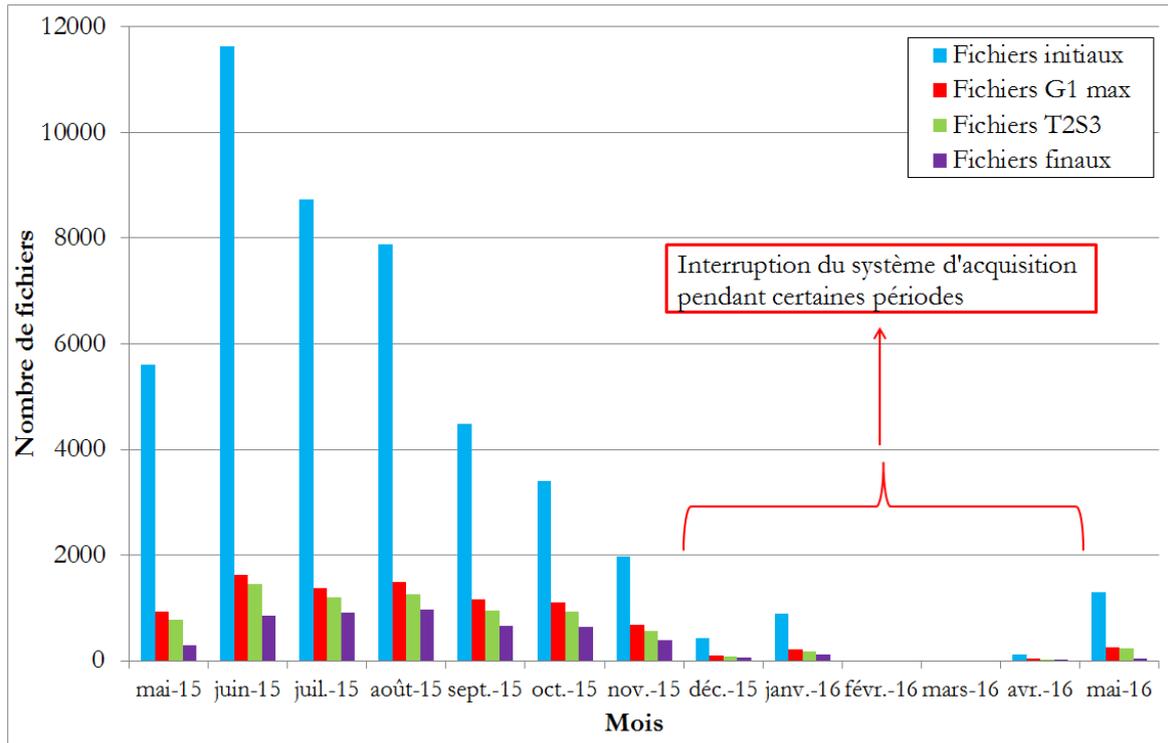


Figure 4.32: Nombre de fichiers retenus à chaque étape du processus de tri des données

4.3.5 Evolution des mesures de déformation

Après avoir trié et sélectionné les signaux, les déformations longitudinales et transversales correspondant au premier pic (donc au premier essieu) ont été déterminées pour chaque signal.

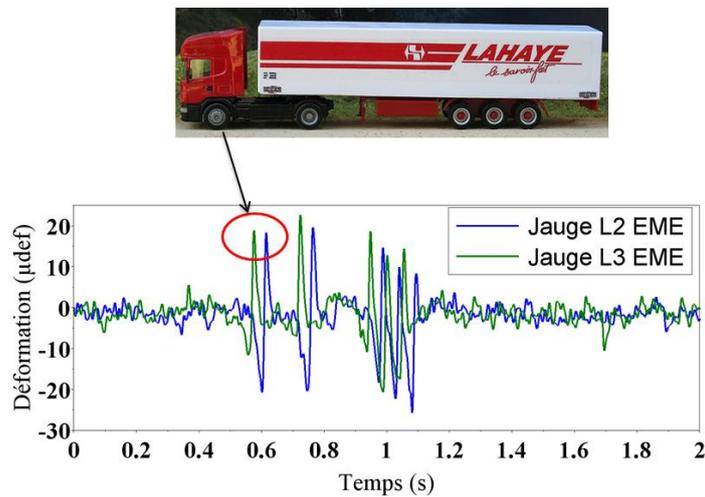


Figure 4.33. Valeurs de déformations du premier pic (correspondant au premier essieu) sélectionnées pour l'analyse des déformations.

Comme pour les signaux non triés, analysés au § 4.3.3, on a calculé ici des moyennes mensuelles des déformations maximales correspondant au « premier pic » des signaux des jauges. Ces valeurs moyennes ont été calculées pour les déformations à la base de la couche d'EME (à 15 cm de

profondeur, voir Figure 4.34) et à la base de la couche de BBME (8 cm de profondeur, voir Figure 4.35).

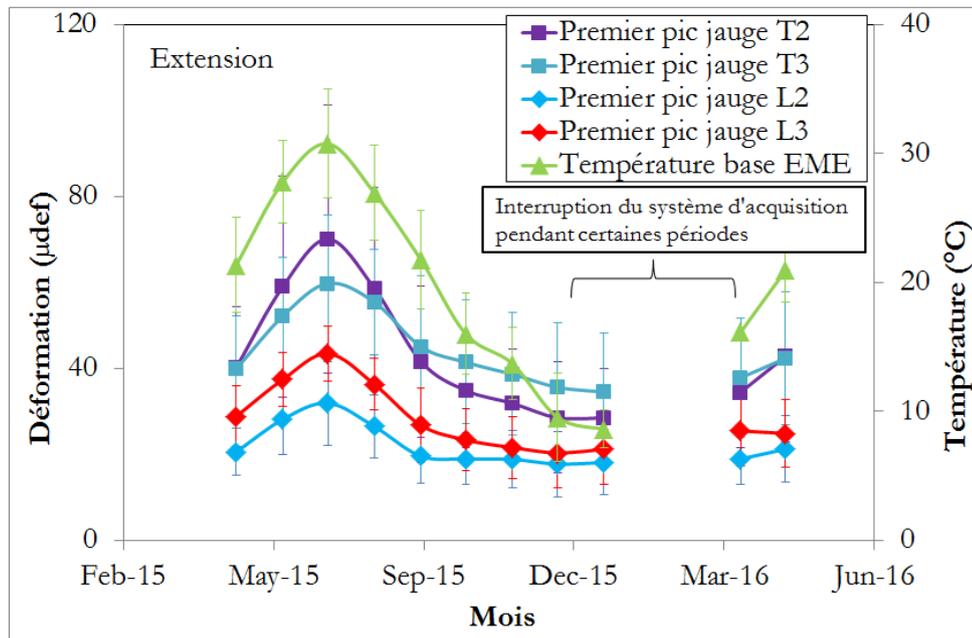


Figure 4.34. Moyennes mensuelles des déformations maximales mesurées pour le premier pic des signaux des jauges horizontales et de la température à la base de la couche d'EME

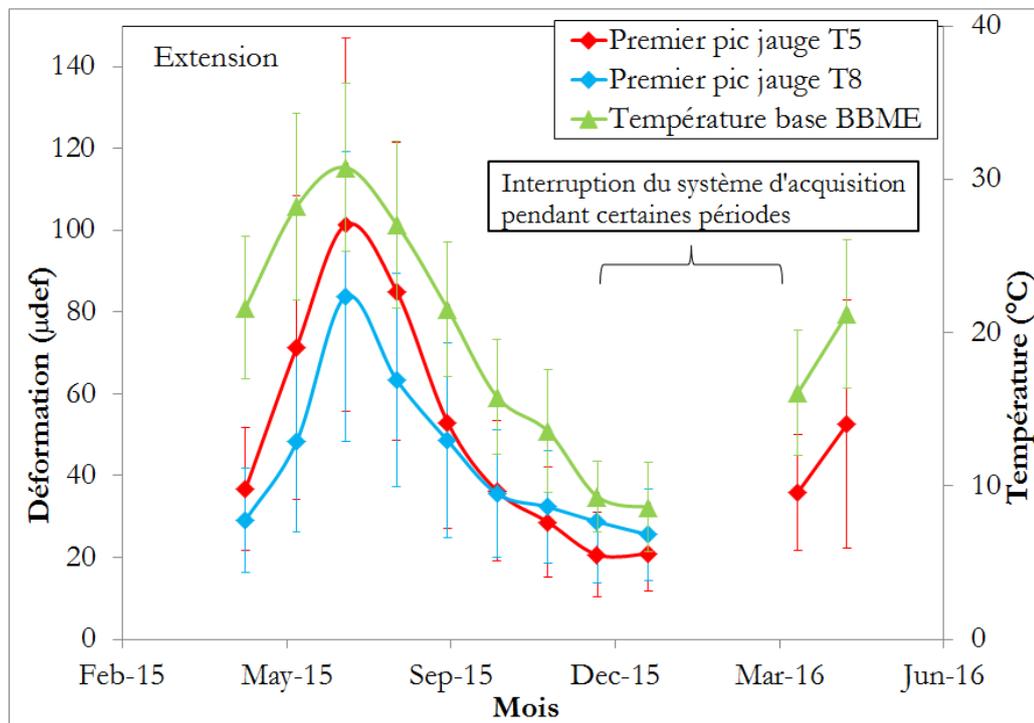


Figure 4.35. Moyennes mensuelles des valeurs maximales de déformations transversales mesurées pour le premier pic et de la température à la base de la couche de BBME

Les résultats montrent que les déformations transversales à la base des 2 couches de BBME et d'EME sont en extension et varient fortement avec la température.

Les déformations moyennes obtenues ici après tri sont à comparer avec les déformations sans tri, présentées sur les Figure 4.19 à Figure 4.21. On constate que la procédure de tri permet d'obtenir des variations plus régulières des déformations, et réduit les écarts entre jauges. En effet, ici on compare des déformations obtenues sous des essieux de même type (essieu à roues simple), et pour des niveaux de charge similaires (environ 65 kN), alors qu'en l'absence de tri, les valeurs maximales de déformations pouvaient correspondre à des types d'essieu, et des valeurs de charges très différents.

Les niveaux maximum de déformations obtenus (pour un essieu chargé à 65 kN) sont aussi plus faibles que précédemment :

- Dans le BBME, les déformations transversales moyennes les plus importantes (environ 100 μ def) sont enregistrées en juillet 2015. Ces valeurs diminuent jusqu'à 20 μ def en janvier 2016. La différence maximale entre les mesures des deux jauges est de 20 μ def (en été).
- Dans l'EME, les déformations les plus élevées sont de 40 μ def environ dans la direction longitudinale et 70 μ def dans la direction transversale. Ces valeurs sont obtenues en juillet 2015, lorsque la température moyenne mensuelle à la base de l'EME atteint 30°C. Les déformations longitudinale et transversale diminuent jusqu'à 20 μ def et 30 μ def respectivement, en janvier 2016. Les mesures des déformations de deux jauges avec la même orientation sont cohérentes (différence maximale de 10 μ def environ).

Comme précédemment, on constate que les déformations transversales sont supérieures aux déformations longitudinales, et que les variations saisonnières des déformations horizontales (de l'hiver à l'été) à la base de la couche de BBME (couche de liaison) sont beaucoup plus grandes que celles à la base de la couche d'EME (couche de base).

La Figure 4.36 présente les évolutions des valeurs moyennes mensuelles de déformation calculées avec la procédure décrite au-dessus, en fonction de la température moyenne, dans chaque couche, pour les deux années de monitoring (2015 et 2016). Les résultats montrent que:

- Après tri, la dispersion des résultats diminue, et les variations des déformations à la base des couches bitumineuses avec température sont plus régulières, et présentent une forme non-linéaire.
- Les évolutions des déformations en fonction de la température sont très similaires pour les années 2015 et 2016 (les résultats obtenus à la même température se superposent). Ces résultats semblent indiquer qu'il n'y a pas d'évolution des propriétés des matériaux (pas de fatigue) pendant la période de monitoring. Cela semble logique car la chaussée a été reconstruite récemment, en 2013.

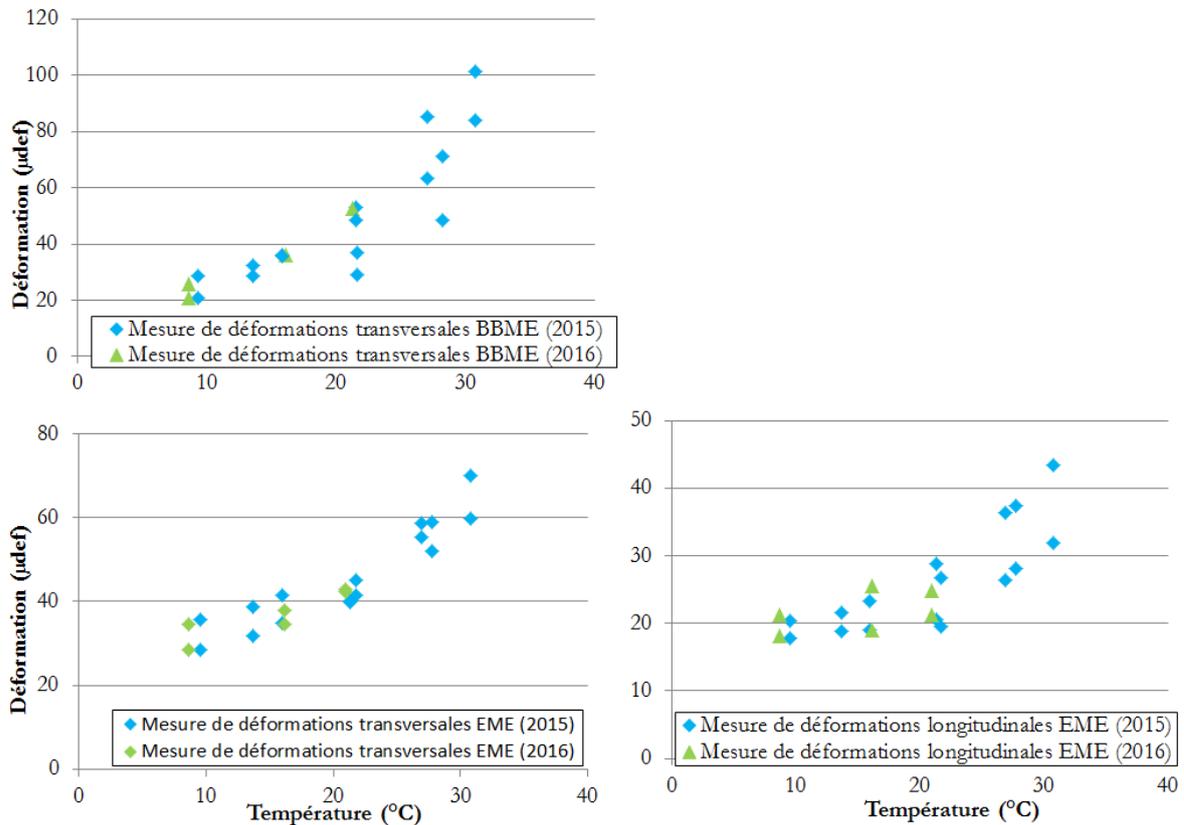


Figure 4.36. Variations des valeurs moyennes mensuelles de déformations au premier pic à la base des couches de BBME et d'EME en fonction de la température, pendant les deux années de monitoring.

4.4 Modélisation du comportement mécanique de la chaussée

4.4.1 Différents scénarios de modélisation avec Alizé et Viscoroute

Afin d'analyser le comportement de la section de chaussée instrumentée, des modélisations de la réponse de la chaussée ont été effectués, tout d'abord en utilisant un modèle élastique, puis un modèle viscoélastique, afin de mieux prendre en compte certains comportements observés (accumulation de déformations sous le chargement de plusieurs essieux consécutifs, forme non symétrique des signaux de déformations).

Les calculs élastiques ont été effectués, comme précédemment, avec le logiciel ALIZE (<http://media.lcpc.fr/ext/pdf/prod/alize.pdf>). Ce dernier est le logiciel de référence pour le calcul de dimensionnement de chaussées en France. Les calculs viscoélastiques ont été effectués avec le logiciel Viscoroute© (Chabot, et al., 2010) développé à l'IFSTTAR. Celui-ci permet de calculer la réponse d'une structure de chaussée multicouche, avec des matériaux viscoélastiques, sous l'effet d'une charge roulante, se déplaçant à vitesse constante. Viscoroute© permet d'utiliser, pour les matériaux soit le modèle viscoélastique de Huet-Sayegh (Huet, 1965) (Sayegh, 1966), soit un modèle élastique linéaire. Les deux logiciels ont été décrits dans le chapitre 1 de la thèse, consacré à la bibliographie.

Pour chaque logiciel, plusieurs cas de modélisation ont successivement été considérés, en modifiant en particulier les conditions d'interfaces entre les différentes couches de chaussées, afin de mieux simuler les déformations mesurées.

4.4.2 Résultats des modélisations élastiques linéaires

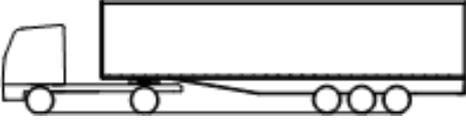
4.4.2.1 Hypothèses de calcul

Les modélisations ont été réalisées en deux temps. Dans un premier temps, on s'est intéressé aux signaux complets de déformations sous le passage des poids lourds de type T2S3, et on a cherché à modéliser les signaux complets, pour différentes températures. Dans cette première phase, l'objectif était de comparer différentes hypothèses de modélisation (comportement élastique et viscoélastique, conditions d'interfaces...). Dans un deuxième temps, on a analysé les déformations obtenues sous le premier essieu (de charge connue), dans le but d'évaluer, de manière plus quantitative, les performances mécaniques des matériaux.

Dans la méthode française de dimensionnement de chaussées, comme dans la plupart des autres méthodes, des conditions simplifiées sont considérées pour les interfaces entre couches de chaussées: Ces interfaces sont supposées soit collées soit totalement glissantes. Dans un premier temps, les calculs ont été faits avec ALIZE, avec ces deux conditions d'interfaces, et avec les hypothèses suivantes :

- Les modules initiaux des couches de chaussées ont été choisis égaux aux valeurs déterminées à partir des mesures initiales sur site (cf Tableau 4.1), ajustées en fonction de la température, et correspondant à une fréquence de 10 Hz.
- Les calculs ont été effectués pour un poids-lourd de 5 essieux de type T2S3 chargé à 44 tonnes, avec les charges des essieux correspondant à celles du poids-lourd utilisé pour la campagne expérimentale des mesures sur site (cf Figure 4.1). Cette hypothèse a été faite car la procédure d'acquisition, avec déclenchement sur seuil, conduit à sélectionner uniquement des poids-lourds fortement chargés (même si leur charge précise n'est pas connue).

Tableau 4.2. Poids-lourds utilisés pour les mesures et pour la modélisation

	Modélisation	Mesures expérimentales
Type PL	 T2S3	 T2S3
Caractéristiques	Géométrie et charge connues	Inconnues, mais sélection des poids lourds T2S3 les plus chargés

En l'absence de connaissance précise des charges, on n'a donc pas cherché ici à caler parfaitement les amplitudes des déformations mesurées, mais surtout à restituer correctement la forme des signaux de déformation, en testant successivement différentes hypothèses de modélisation.

4.4.2.2 Modélisation des déformations mesurées à 15 °C et 35 °C.

Dans un premier temps, une série de modélisations ALIZE a été réalisée pour un signal de poids-lourd de type T2S3, enregistré le 30 octobre 2015 à 14h59min, à une température des couches bitumineuses de 15 °C.

Les Figure 4.37 à Figure 4.39 comparent les signaux de déformation expérimentaux et calculés à la base des couches de BBME et d'EME, pour la température de 15 °C. Dans un premier temps, les calculs ALIZE ont été réalisés avec les interfaces supérieures de la chaussée (interface entre le BBME et l'EME, et entre l'EME et l'ancienne couche de grave-bitume située en dessous collées). Avec cette hypothèse de couches collées, il est rapidement apparu que l'on n'arrivait pas à restituer correctement les déformations mesurées, et en particulier les déformations transversales (Figure 4.38 et Figure 4.39). Même en réduisant fortement les modules des couches de BBME et d'EME (jusqu'à des valeurs faibles, peu réalistes pour des matériaux récents, non endommagés), les déformations calculées avec ALIZE restaient inférieures aux déformations mesurées. Ces résultats nous ont conduit à considérer d'autres conditions d'interfaces :

- Tout d'abord des interfaces BBME / EME et EME / GB décollées.
- Ensuite des interfaces BBME / EME et EME / GB décrites par une couche mince (de 2 mm d'épaisseur), avec un module d'élasticité relativement faible, simulant les propriétés de la couche d'émulsion située à l'interface. Cette hypothèse, consistant à décrire l'interface par une couche mince élastique, avait déjà été utilisée avec succès, pour l'interprétation de mesures effectuées sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR (Grellet, et al., 2016).

Les résultats des simulations ALIZE avec les 3 conditions d'interfaces sont superposés sur les Figure 4.37, Figure 4.38 et Figure 4.39.

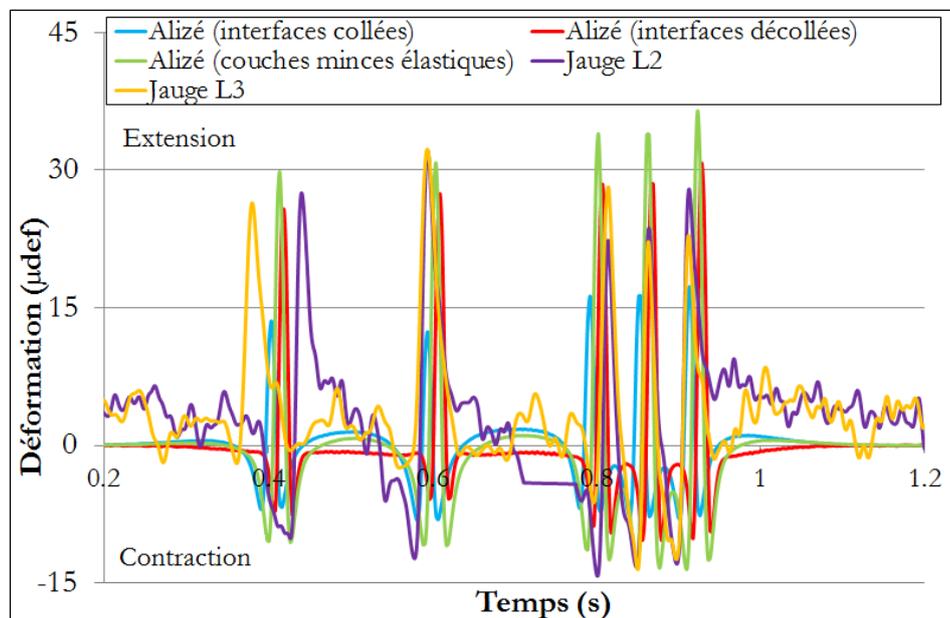


Figure 4.37. Comparaison des déformations longitudinales mesurées et calculées à la base de l'EME pour une température de 15°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 30 octobre 2015 à 14h59min)

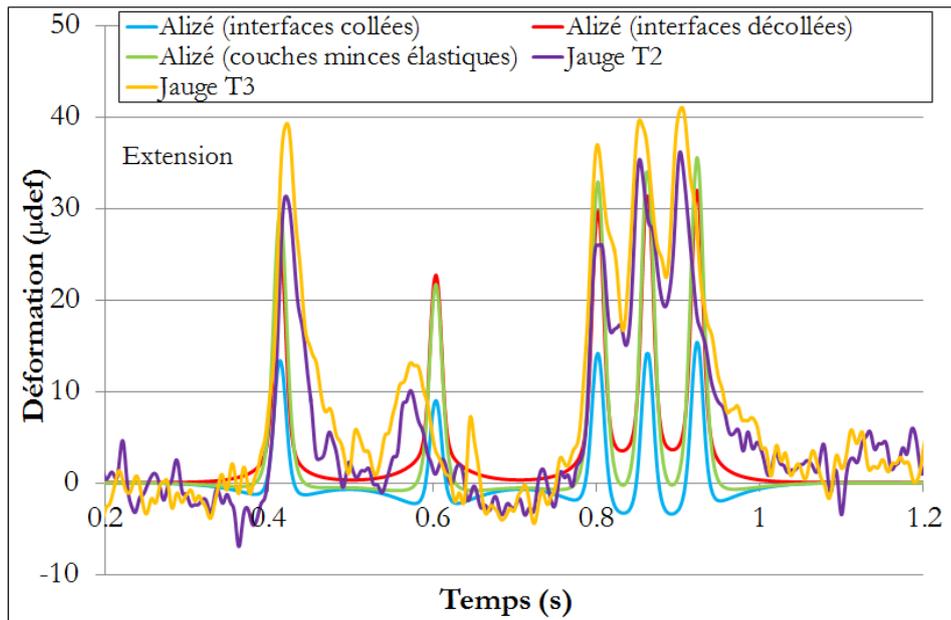


Figure 4.38. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées à la base de l'EME pour une température de 15°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 30 octobre 2015 à 14h59min).

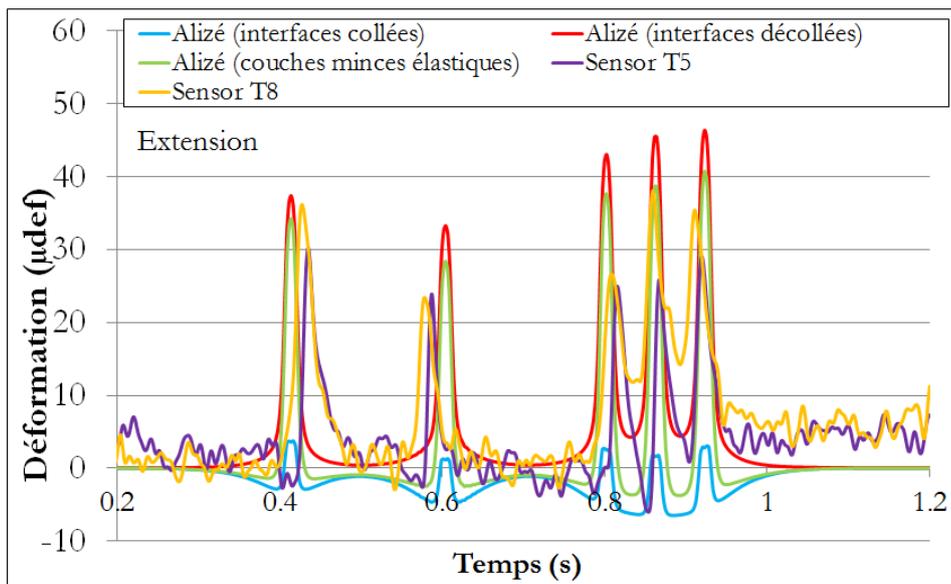


Figure 4.39. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées à la base du BBME pour une température de 15°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 30 octobre 2015 à 14h59min)

Les déformations maximales en extension obtenues avec les trois conditions d'interfaces sont également données dans le Tableau 4.3, et comparées avec les déformations mesurées.

Tableau 4.3. Comparaison des valeurs maximales en extension des déformations mesurées et calculées à la base des couches de BBME et d'EME à 15°C (calculs avec ALIZE)

	Déformation transversale EME (μdef)	Déformation longitudinale EME (μdef)	Déformation transversale BBME (μdef)
Mesures	40	28	35
Interfaces collées	15	18	5
Interfaces glissantes	32	30	46
Interfaces couches minces élastique 2 mm	35	36	41

Une deuxième série de modélisations, similaire à la précédente, a été réalisée pour une température des couches d'enrobé de 35°C. Pour ces simulations, on a choisi comme référence le passage d'un poids-lourd de type T2S3 (de charge non connue) enregistré le 09 juin 2015 à 23h57min. Comme pour la température de 15°C, les simulations ont d'abord été faites dans le cas d'interfaces collées, puis complétées par des simulations avec les interfaces décollées, et décrites par une couche élastique, de faible épaisseur (2 mm).

Les Figure 4.40 à Figure 4.42 comparent les signaux de déformation expérimentaux et calculés obtenus à la base des couches de BBME et d'EME à la température de 35°C.

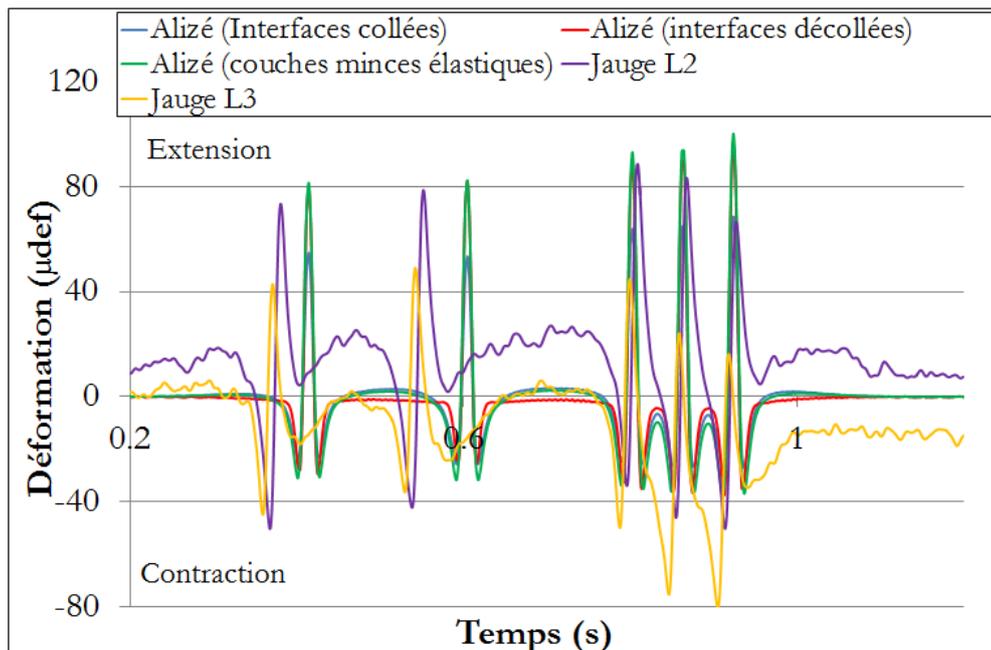


Figure 4.40. Comparaison des déformations longitudinales mesurées et calculées à la base de l'EME pour une température de 35°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 09 juin 2015 à 23h57min)

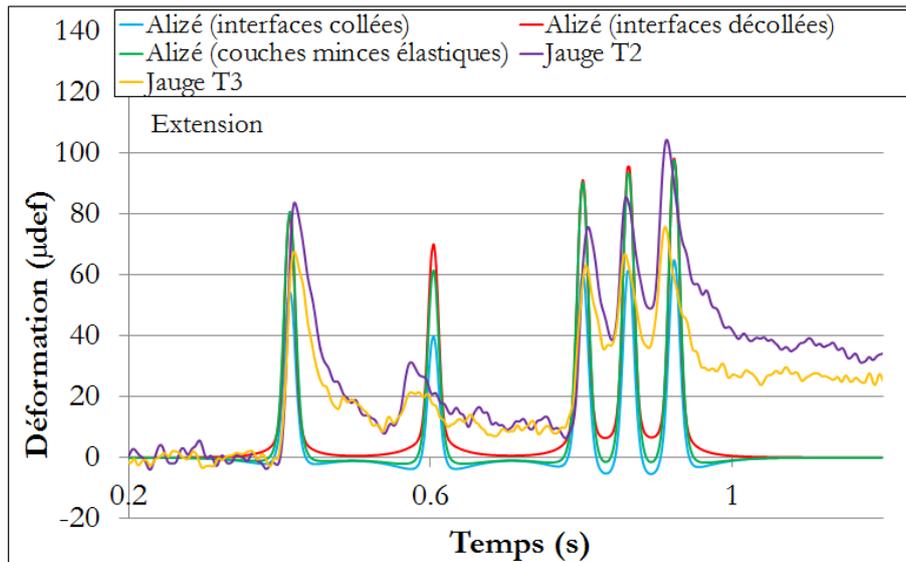


Figure 4.41. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées à la base de l'EME, pour une température de 35°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 09 juin 2015 à 23h57min)

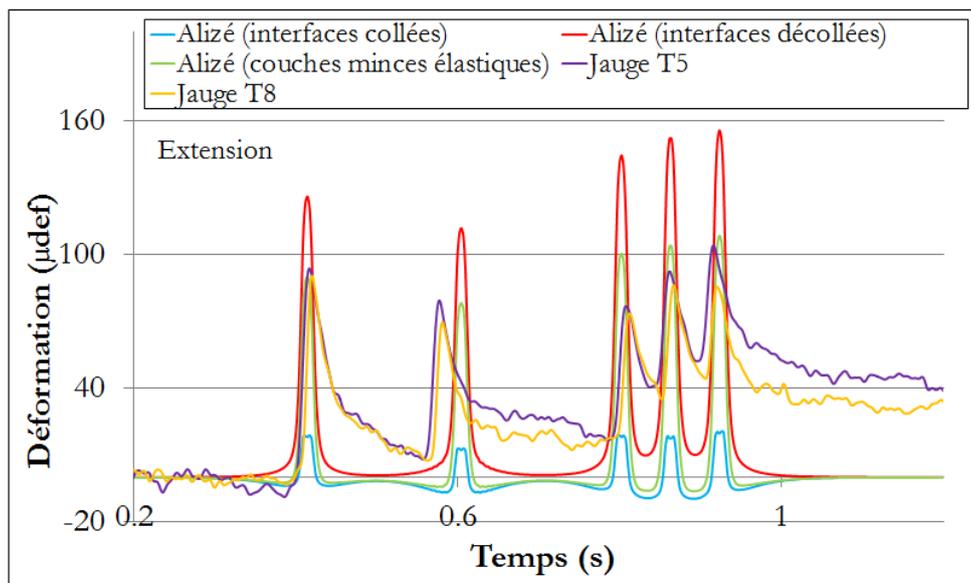


Figure 4.42. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées à la base du BBME, pour une température de 35°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 09 juin 2015 à 23h57min)

Le Tableau 4.4 résume les valeurs maximales en extension des déformations mesurées et calculées à 35°C, pour les différentes conditions d'interfaces: collées, glissantes ou couches minces élastique de 2 mm.

Tableau 4.4. Comparaison des valeurs maximales en extension des déformations mesurées et calculées à la base des couches de BBME et EME à 35°C (calculs avec ALIZE)

	Déformation transversale EME (μdef)	Déformation longitudinale EME (μdef)	Déformation transversale BBME (μdef)
Mesures	105	85	100
Interfaces collées	65	80	23
Interfaces glissantes	98	96	155
Interfaces couches minces élastique 2 mm	98	100	108

Pour les conditions d'interface généralement utilisées dans le dimensionnement des chaussées (collées ou glissantes), les résultats montrent que:

- Lorsque les deux interfaces à la base des couches de BBME et d'EME sont considérées comme collées, les déformations calculées sont beaucoup plus petites que les déformations mesurées, en particulier pour les déformations transversales. Cette remarque s'applique à la fois à basse température (15°C) et à haute température (35°C).
- Lorsque les interfaces sont considérées comme totalement décollées, les déformations horizontales calculées sont plus proches des déformations mesurées, mais sont parfois plus importantes que les déformations mesurées, surtout à la base de la couche de BBME, à basse et haute température.
- A haute température, les signaux de déformation montrent clairement la réponse viscoélastique des couches bitumineuses. Cette observation est particulièrement évidente pour les signaux de déformation transversale, à la base des deux couches. En effet, les déformations augmentent progressivement sous les trois essieux du tridem, et reviennent lentement à zéro après le passage du véhicule. Ce retard dans la réponse est typique des effets viscoélastiques, et ne peut pas être reproduit avec le modèle élastique linéaire.

En raison des difficultés pour simuler correctement toutes les mesures de déformation avec des conditions simples d'interfaces (collée ou totalement décollée), une troisième hypothèse a été faite avec ALIZE: les interfaces ont été modélisées comme des couches minces élastiques, d'épaisseur 2 mm avec des faibles valeurs de modules élastiques. Les valeurs des modules élastiques des interfaces ont été ajustées pour approcher les mesures de déformations. Les valeurs obtenues sont (à 16°C et 13 Hz):

- 85 MPa pour l'interface BBME/EME
- 25 MPa pour l'interface EME/GB

Les déformations calculées avec cette troisième hypothèse sont également présentées sur les Figure 4.37 à Figure 4.42. Avec les couches minces élastiques, une meilleure prédiction des

valeurs maximales des déformations longitudinales et transversales, en particulier à la base de la couche de BBME, est obtenue.

Ces différents résultats semblent donc montrer que même pour cette chaussée récente, les interfaces entre couches bitumineuses ne peuvent pas être considérées comme collées, et que des glissements peuvent se produire aux interfaces, probablement en raison de la présence de la couche d'accrochage (émulsion de bitume) à l'interface. L'estimation du module de cette couche d'accrochage conduit à des valeurs de module d'élasticité faibles, de l'ordre d'une centaine de MPa, qui sont de l'ordre de grandeur du module d'un bitume, et qui diminuent lorsque la température augmente. Ces glissements observés aux interfaces entre le BBME et l'EME, et entre l'EME et la GB modifient le fonctionnement de la structure, et génèrent des déformations de traction à la base des couches de BBME et d'EME, qui n'existeraient pas avec des couches collées. Ces déformations de traction restent relativement faibles à 15°C (30 à 40 μ def), mais deviennent significatives à 35°C (de l'ordre de 100 μ def), pouvant entraîner une fatigue des couches concernées.

Enfin, on peut aussi constater qu'avec le modèle élastique, la forme des signaux de déformation, et en particulier, le retour lent à zéro ne peut pas être exactement reproduit. Pour cette raison, des calculs supplémentaires avec Viscoroute© ont été effectués.

4.4.3 Résultats des Modélisations viscoélastique avec Viscoroute

4.4.3.1 Hypothèses de calcul

Avec le logiciel Viscoroute©, la chaussée est décrite comme une structure multicouche, et les couches sont considérées homogènes et infinies en plan. Chaque couche peut être décrite par un modèle élastique linéaire, ou par le modèle viscoélastique de Huet-Sayegh. Le calcul est effectué sous une charge roulante. Le contact entre la charge et la chaussée peut être ponctuel, circulaire, elliptique ou rectangulaire, et la charge appliquée (contrainte uniforme) peut être verticale ou horizontale.

Le modèle de Huet-Sayegh est un modèle thermo-visco-élastique linéaire, largement utilisé en France pour décrire le comportement des enrobés bitumineux dans le domaine des petites déformations, et il a fait l'objet de nombreuses validations (Sayegh, 1966). Ce modèle est détaillé dans le paragraphe 1.6.1.5 du chapitre I - Bibliographie.

Pour les modélisations avec Viscoroute, les calculs précédents ont conduit à considérer trois hypothèses différentes pour les interfaces à la base des couches de BBME et d'EME: Les interfaces ont été considérées comme collées, ou comme une couche mince (de 2 mm) avec un comportement élastique dans un premier temps, puis avec un comportement viscoélastique. Il est à noter que Viscoroute ne permet pas de simuler une interface décollée.

Ne disposant pas des essais de module nécessaires, les paramètres de Huet-Sayegh qui ont été choisis pour les couches bitumineuses sont des paramètres « moyens », obtenus pour des matériaux de même catégorie (BBME et EME). Ces paramètres sont issus d'études en laboratoire réalisées au LCPC (#Affaires 185D et 209). Les couches de l'ancienne chaussée (ancienne GB, sable ciment et sol), ont été considérées élastiques linéaires, et les mêmes module ont été utilisés pour ces couches que pour les calculs avec ALIZE. Les modules de la GB ont été ajustés en fonction de la température de calcul.

Les caractéristiques des différentes couches de chaussée utilisées pour les calculs avec Viscoroute© sont résumées dans le Tableau 4.5 et sur la Figure 4.43. Les signaux expérimentaux

choisis pour les comparaisons avec les calculs sont les mêmes que ceux utilisés au § 4.4. pour les calculs ALIZE. Comme précédemment les simulations ont été réalisées pour 2 températures, 15°C et 35 °C.

Tableau 4.5. Caractéristiques des couches de chaussée utilisées pour les calculs avec Viscoroute© ($T_{\text{réf}} = 15^\circ\text{C}$)

Matériaux	Comportement	Condition interface	Epaisseur (m)	E_∞ (MPa)	Coef Poisson	E_0 (MPa)	k	h	δ	A_0	A_1	A_2
BBTM	Visco-élastique	collée	0.025	19644	0.35	18.934	0.213	0.628	2.535	3.072	-0.382	0.0017
BBME	Visco-élastique	3 cas	0.06	11000	0.35	11	0.19	0.59	2.24	2.943	-0.397	0.002
EME	Visco-élastique	3 cas	0.07	31008	0.35	21.779	0.186	0.599	2.064	5.865	-0.388	0.002
GB	Elastique	collée	0.08	5000	0.35	-	-	-	-	-	-	-
Sable ciment	Elastique	collée	0.3	14000	0.35	-	-	-	-	-	-	-
Sol	Elastique	collée	0.5	150	0.35	-	-	-	-	-	-	-
Substratum	Elastique	-	Infini	10000	0.35	-	-	-	-	-	-	-

Pour les interfaces viscoélastiques, en absence de paramètres in-situ, les valeurs typiques des paramètres de Huet-Sayegh obtenues pour un bitume classique ont été utilisées dans les calculs (bitume de grade 50/70 – Elf/Donges, Production 2004). Leurs valeurs sont résumées dans le Tableau 4.6. Compte tenu des valeurs forfaitaires prises pour certains paramètres, l'objectif des comparaisons effectuées visera surtout à montrer, de manière qualitative, l'apport de la modélisation viscoélastique pour simuler la réponse de la chaussée.

	Z (m)	Epais. (m)	Module E (MPa)	Coef. de Poisson	Mas. Vol. (kg/m ³)	Type de matériau	Comport.	Type de liaison	Module E0 (MPa)	T (°C)	k (loi H-S)	h (loi H-S)	delta (loi H-S)	A0	A1	A2
1	0.025	0.025	19644.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastique	collée	18.93370	15.000	0.213	0.628	2.535	3.072	-0.382	0.001652
2	0.075	0.050	11000.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastique	collée	11.00000	15.000	0.190	0.590	2.240	2.943	-0.397	0.001950
3	0.085	0.010	11000.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastique	collée	11.00000	15.000	0.190	0.590	2.240	2.943	-0.397	0.001950
4	0.145	0.060	31008.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastique	collée	21.77900	15.000	0.186	0.599	2.064	5.865	-0.388	0.001668
5	0.155	0.010	31008.00000	0.350	2300.000	autre	Viscoelastique	collée	21.77900	15.000	0.186	0.599	2.064	5.865	-0.388	0.001668
6	0.235	0.080	5000.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
7	0.535	0.300	14000.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
8	1.035	0.500	150.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000
9		infini	0.0000.00000	0.350	2300.000	autre	Elastique	collée	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000

Figure 4.43. Structure de la chaussée utilisée pour la modélisation avec Viscoroute

Les calculs ont été effectués pour un poids-lourd de 5 essieux de type T2S3 chargé à 44 tonnes, en prenant comme pour les calculs ALIZE les charges des essieux correspondant à celles du poids-lourd utilisé pour la campagne expérimentale des mesures sur site (cf Figure 4.1). Les caractéristiques des charges correspondantes, utilisées dans les calculs Viscoroute, sont données sur la Figure 4.44. Les empreintes de roues ont été simulées par des charges circulaires (comme avec ALIZE).

Les déformations mesurées utilisées pour les comparaisons avec la modélisation sont les mêmes que pour les calculs ALIZE. Il s'agit de passages de poids-lourd de type de type T2S3 ayant déclenché une acquisition, mais dont la charge n'est pas connue, qui sont passés à des températures de 15 °C (le 30 Octobre 2015) et de 35°C (le 9 Juin 2015).

Vitesse de charge Nombre de

	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Type de charge	a (m)	b (m)	x (m)	y (m)
1	0.000	0.000	33500.000	Ellipse	0.125	0.125	0.000	1.080
2	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	1.080
3	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	0.705
4	0.000	0.000	38000.000	Ellipse	0.125	0.125	7.550	1.080
5	0.000	0.000	40000.000	Ellipse	0.125	0.125	8.730	1.080
6	0.000	0.000	41000.000	Ellipse	0.125	0.125	9.910	1.080
7	0.000	0.000	33500.000	Ellipse	0.125	0.125	0.000	-1.080
8	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	-1.080
9	0.000	0.000	32250.000	Ellipse	0.125	0.125	3.700	-0.705
10	0.000	0.000	38000.000	Ellipse	0.125	0.125	7.550	-1.080
11	0.000	0.000	40000.000	Ellipse	0.125	0.125	8.730	-1.080
12	0.000	0.000	41000.000	Ellipse	0.125	0.125	9.910	-1.080

Figure 4.44. Schéma du chargement du poids lourd T2S3 dans Viscoroute.

Tableau 4.6. Caractéristiques de la couche mince viscoélastique utilisée pour simuler les interfaces dans les calculs avec Viscoroute© ($T_{\text{réf}} = 15^{\circ}\text{C}$).

E_{∞} (MPa)	Coeff Poisson	E_0 (MPa)	k	h	δ	A_0	A_1	A_2
1968.21	0.35	0	0.27242	0.88316	9.0483	-1.6296	-0.39118	0.0024648

4.4.3.2 Modélisation des déformations mesurées à 15 °C et 35 °C.

Les Figure 4.45 à Figure 4.50 comparent les signaux de déformation expérimentaux et calculés avec Viscoroute, obtenus à la base des couches de BBME et d'EME à basse température (15°C) et à haute température (35°C).

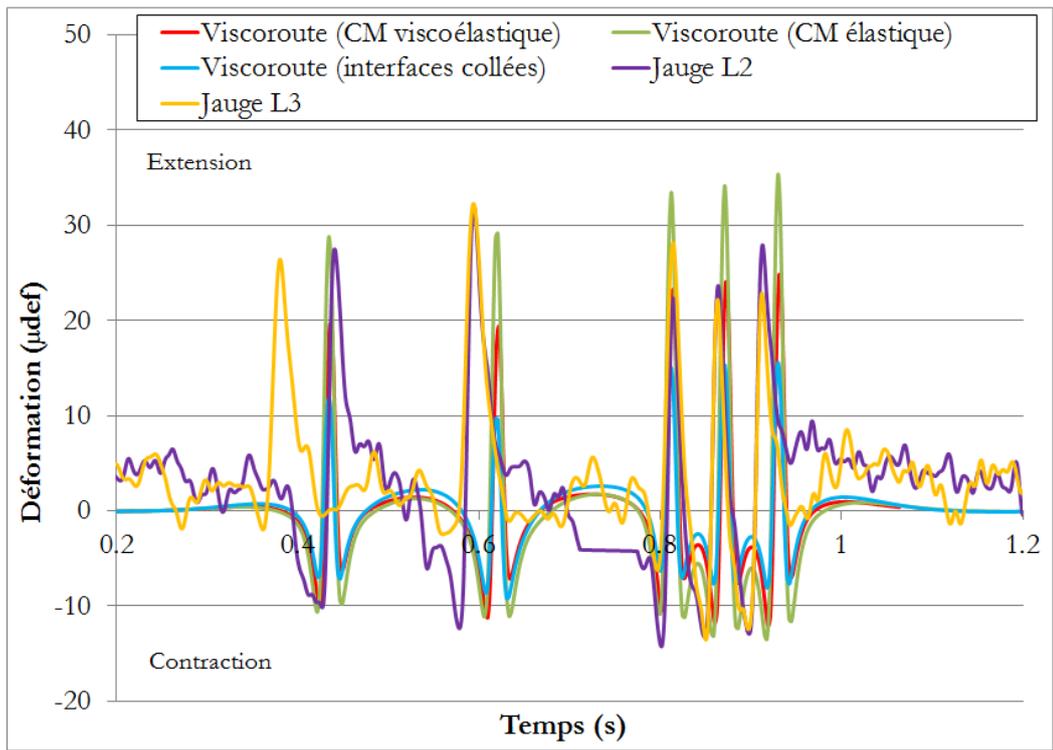


Figure 4.45. Comparaison des déformations longitudinales mesurées et calculées avec Viscoroute à la base de l'EME pour une température de 15°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 30 octobre 2015 à 14h59min)

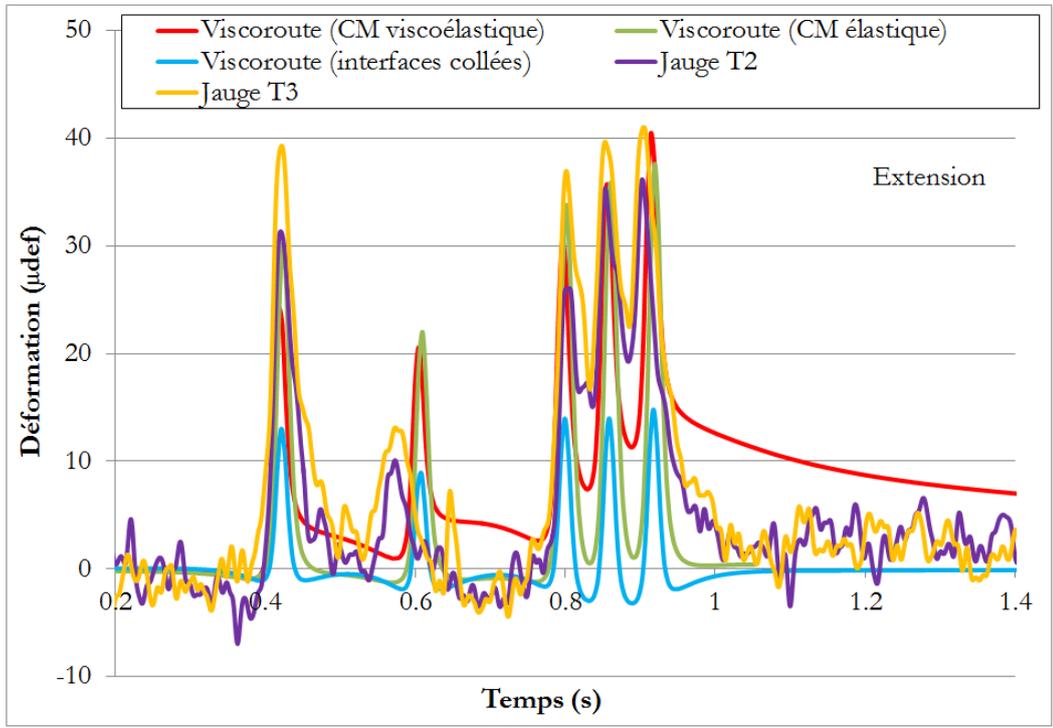


Figure 4.46. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées avec Viscoroute à la base de l'EME, pour une température de 15°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 30 octobre 2015 à 14h59min)

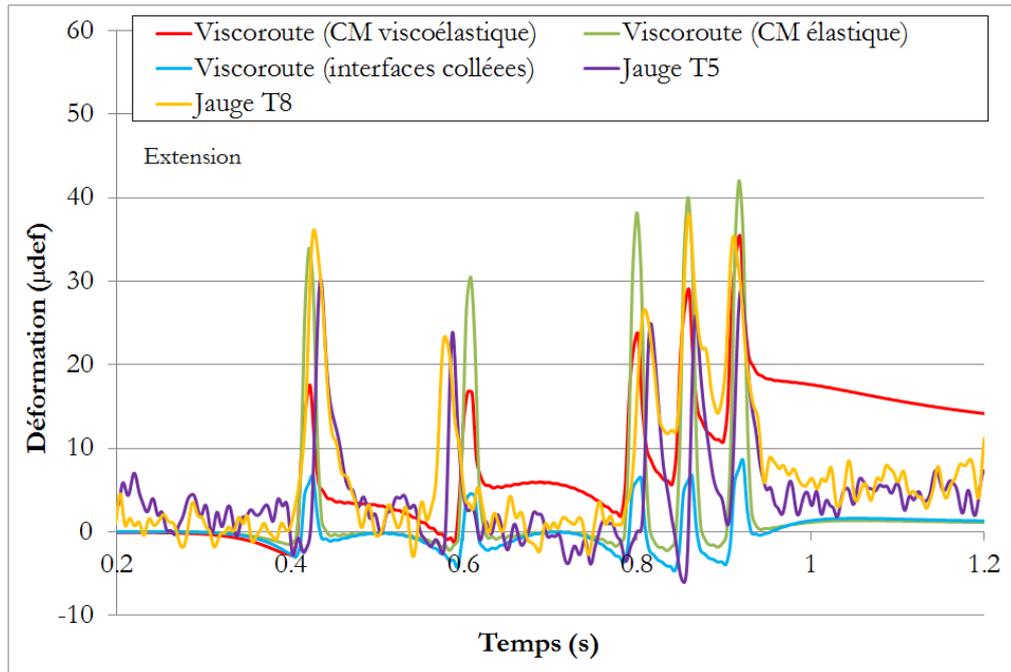


Figure 4.47. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées avec Viscoroute à la base du BBME, pour une température de 15°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 30 octobre 2015 à 14h59min)

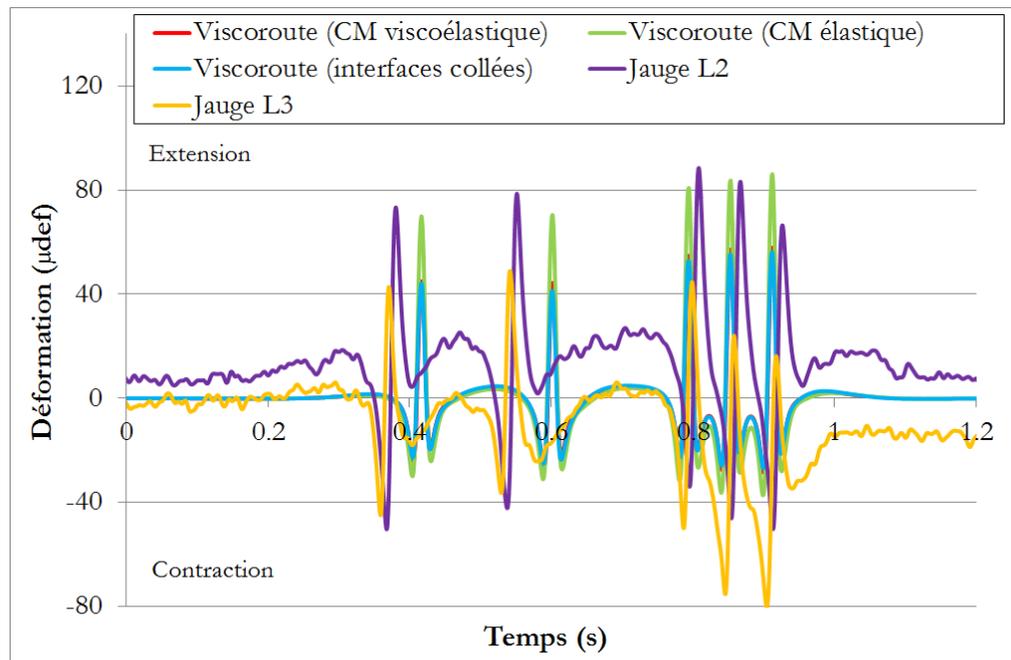


Figure 4.48. Comparaison des déformations longitudinales mesurées et calculées avec Viscoroute à la base de l'EME, pour une température de 35°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 09 juin 2015 à 23h57min26s)

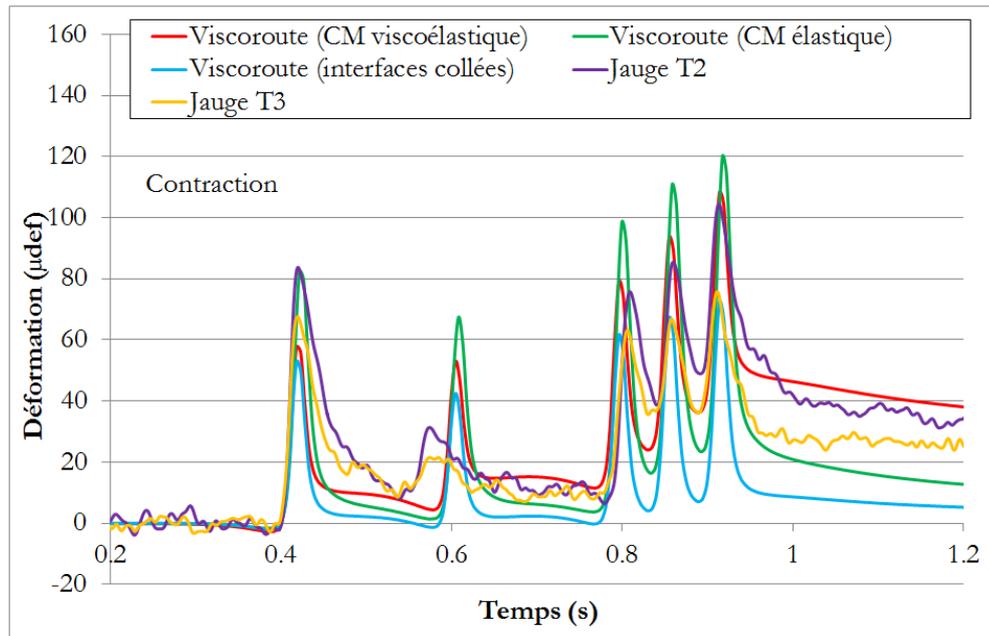


Figure 4.49. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées avec Viscoroute à la base de l'EME, pour une température de 35°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 09 juin 2015 à 23h57min26s)

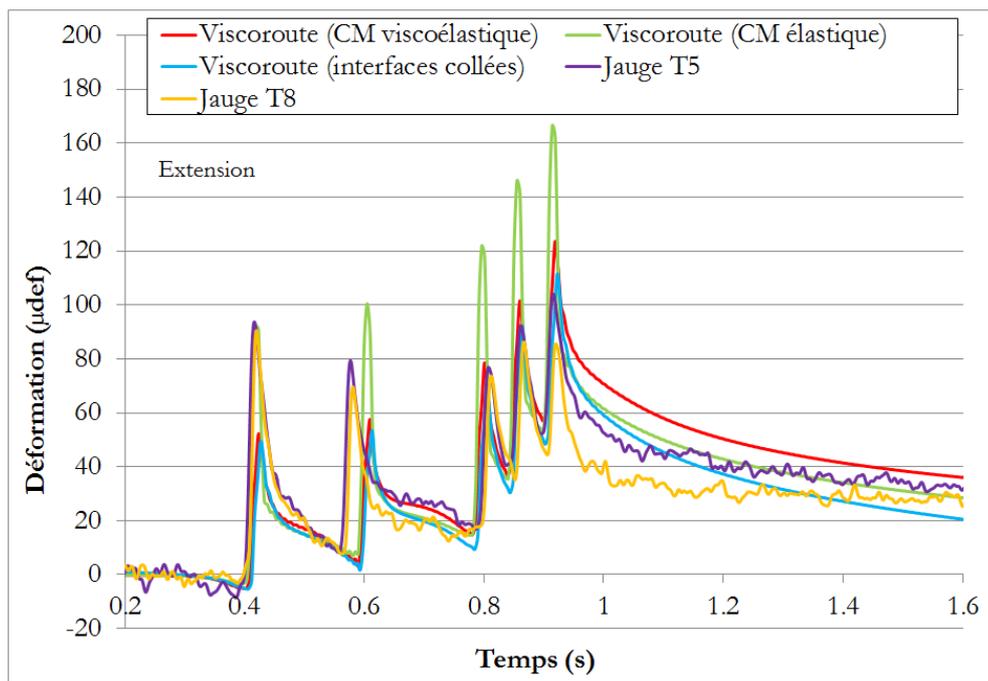


Figure 4.50. Comparaison des déformations transversales mesurées et calculées avec Viscoroute à la base du BBME, pour une température de 35°C (passage de poids-lourd de type T2S3 enregistré le 09 juin 2015 à 23h57min26s)

Le Tableau 4.7 et le Tableau 4.8 comparent les valeurs maximales en extension des déformations mesurées et calculées à 15°C et 35°C respectivement.

Tableau 4.7. Comparaison des valeurs maximales des déformations en extension mesurées et calculées à la base des couches de BBME et d'EME à 15°C (calculs avec Viscoroute©)

	Déformation transversale EME (μdef)	Déformation longitudinale EME (μdef)	Déformation transversale BBME (μdef)
Mesures	40	28	35
Interfaces collées	8	15	15
Interfaces couches minces élastiques (2 mm)	37.5	35	42
Interfaces couches minces viscoélastiques (2 mm)	41	25	35

Tableau 4.8. Comparaison des valeurs maximales des déformations en extension mesurées et calculées à la base des couches de BBME et d'EME à 35°C (calculs avec Viscoroute©)

	Déformation transversale EME (μdef)	Déformation longitudinale EME (μdef)	Déformation transversale BBME (μdef)
Mesures	105	85	100
Interfaces collées	100	55	70
Interfaces couches minces élastiques (2 mm)	120	86	167
Interfaces couches minces viscoélastiques (2 mm)	108	60	123

Les résultats obtenus avec Viscoroute© montrent que:

- Comme avec ALIZE, les calculs avec interfaces collées ne permettent pas de reproduire correctement les déformations en extension, de niveau assez élevé, mesurées sur site; Il est donc clair que le fonctionnement des interfaces ne peut être considéré comme collé, et que des glissements (générant des déformations en extension), se produisent à ces interfaces. L'introduction d'interfaces minces, élastiques ou viscoélastiques permet de restituer beaucoup mieux les déformations mesurées.
- Pour les calculs avec les interfaces élastiques linéaires, les déformations longitudinales sont relativement bien reproduites, mais les prédictions sont moins satisfaisantes pour les déformations transversales. En particulier, cette hypothèse ne permet pas de reproduire complètement la forme des signaux sous le passage des trois essieux du tridem, caractérisée par une diminution assez faible des déformations entre les 3 pics des essieux

du tridem, et également un retour à zéro lent des déformations après passage du dernier essieu.

- Les calculs avec les interfaces viscoélastiques permettent d'avoir une meilleure prédiction qualitative de la forme de l'ensemble des signaux de déformation. En particulier, lorsque la température est élevée, les déformations produites par essieux tridem, et retour lent à zéro après chargement est bien reproduit avec l'hypothèse de la couche mince viscoélastique.

4.4.4 Evaluation des performances des interfaces de chaussée à différentes températures

Dans les différents scénarios de modélisation avec Alizé et Viscoroute©, on a mis en évidence l'effet déterminant du comportement des interfaces entre le BBME et l'EME, et entre l'EME et la GB, sur la réponse mécanique de la chaussée. On a également montré que contrairement à ce qui est supposé dans les calculs de dimensionnement de chaussée, l'hypothèse d'interfaces collées n'est pas réaliste pour cette chaussée, en particulier à haute température. Cette hypothèse conduit à des déformations en extension calculées beaucoup plus petites que les déformations mesurées, notamment à haute température. Cette influence très forte du comportement des interfaces nous a conduit à adapter la stratégie de modélisation. Alors qu'initialement, l'objectif était surtout de caler les propriétés de couches de chaussées, on a été amené à examiner et caler plutôt différentes hypothèses de comportement des interfaces.

Les modélisations ont abouti à montrer que les déformations en extension peuvent être assez bien reproduites lorsque chaque interface est décrite comme une « couche mince intermédiaire », avec un comportement élastique ou viscoélastique, et une rigidité plus faible que celle des couches de BBME et d'EME. En comparant les calculs faits à 15°C et à 35°C, on a également constaté que la rigidité de cette « couche intermédiaire » diminue lorsque la température augmente.

Tous ces résultats suggèrent l'apparition de glissements aux interfaces, et montrent que le degré de collage des interfaces semble changer avec la température. Ce phénomène est probablement expliqué par le fait que la couche d'accrochage (émulsion bitumineuse) est très sensible à la température, et présente une faible rigidité à haute température. Cette observation est cohérente avec les résultats obtenus en laboratoire basés sur les tests de cisaillement de l'interface comme les résultats obtenus par (Bae, et al., 2010), qui confirment également une forte influence de la température sur la résistance des interfaces.

Pour cette raison, des modélisations additionnelles ont été réalisées afin de mieux caractériser la rigidité des interfaces, et leur variation avec la température, à la fois avec ALIZE et Viscoroute.

4.4.4.1 Modélisation du comportement des interfaces de chaussée avec Alizé

Dans un premier temps, les calculs pour évaluer l'influence de la température sur le comportement des interfaces ont été réalisés avec le logiciel ALIZE (calcul élastique linéaire).

Pour ces calculs, comme expliqué dans le paragraphe 4.3.4, seul le premier pic des signaux de déformation (correspondant au premier essieu des poids-lourds) a été utilisé, car la charge du premier essieu peut être estimée (environ 65 kN, pour les poids lourds de 5 essieux de type T2S3), ce qui permet de remonter des déformations aux valeurs de module des couches. Dans les calculs, la charge est modélisée comme une roue simple chargée à 32.5 kN (représentant un demi-

essieu du premier essieu, voir Figure 4.51). La vitesse utilisée pour la modélisation est de 80 km/h (correspondant à une fréquence de 10 Hz environ). Les calculs de vitesse à partir des mesures de géophone présentés dans le chapitre VI de ce rapport montrent que la vitesse des poids lourds est généralement proche de 80 km/h, ce qui est bien conforme avec la modélisation.

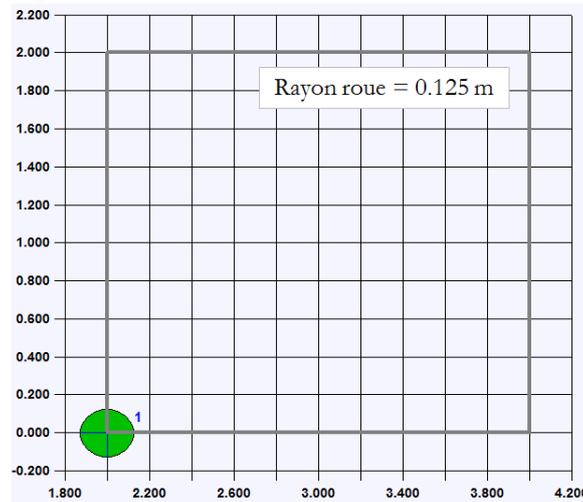


Figure 4.51. Schéma du chargement de la roue simple chargée à 32.5 kN (représentant la moitié du premier essieu) dans Alizé (échelle en m)

Les modules des différents matériaux de la chaussée utilisés pour les calculs sont ceux calés avec les mesures initiales, présentés dans le Tableau 4.1. Ces valeurs ont été ajustées en fonction des valeurs moyennes mensuelles des mesures de température. Les résultats de modélisation sont ensuite comparés avec les valeurs moyennes mensuelles des déformations maxi mesurées in-situ obtenues avec le système d'acquisition à distance. Les calculs ont été effectués à nouveau avec les différentes conditions d'interface considérées précédemment: interfaces collées, totalement décollée, et interfaces représentées par une couche mince élastique. Dans ce dernier cas, le module de chaque interface a été ajusté, pour chaque moyenne mensuelle de température, pour approcher au mieux les mesures in-situ.

Les Figure 4.52 à Figure 4.54 présentent les résultats de ces calculs respectivement pour les déformations longitudinales à la base de l'EME, pour les déformations transversales à la base de l'EME et pour les déformations transversales à la base du BBME. Sur chaque graphique, les moyennes mensuelles des déformations mesurées à la base des couches d'EME et de BBME sont comparées avec les déformations calculées avec Alizé pour différentes conditions d'interfaces: collées, décollées et interface considérée comme une couche mince élastique.

Les mesures de déformations utilisées sont les mesures enregistrées avec le système d'acquisition à distance à partir du mois de mai 2015 jusqu'au mois de juin 2016.

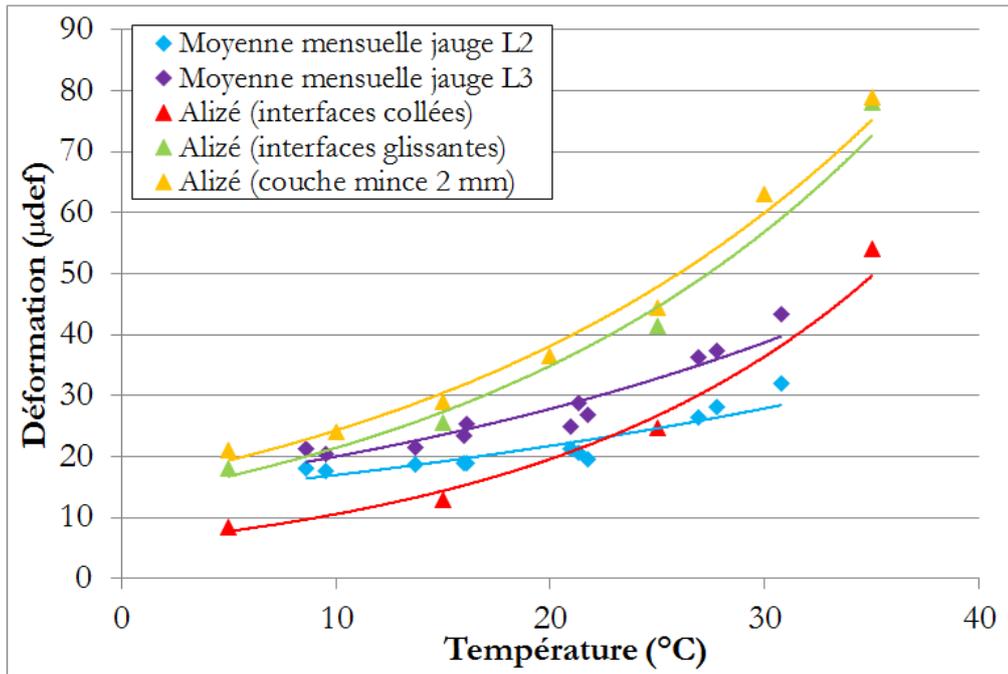


Figure 4.52. Comparaison entre les moyennes mensuelles des déformations longitudinales mesurées à la base de l'EME sous le premier essieu des poids-lourds de type T2S3 et calculées avec Alizé, à différentes températures, et pour différentes conditions d'interface.

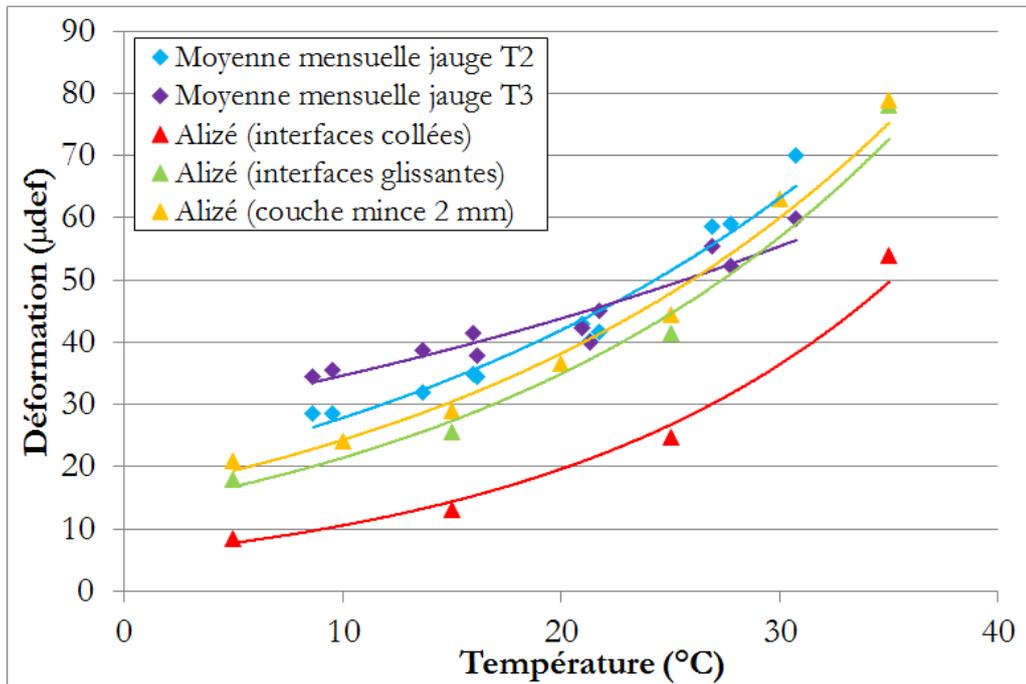


Figure 4.53. Comparaison entre les moyennes mensuelles des déformations transversales mesurées à la base de l'EME sous le premier essieu des poids-lourds de type T2S3 et calculées avec Alizé, à différentes températures, et pour différentes conditions d'interface.

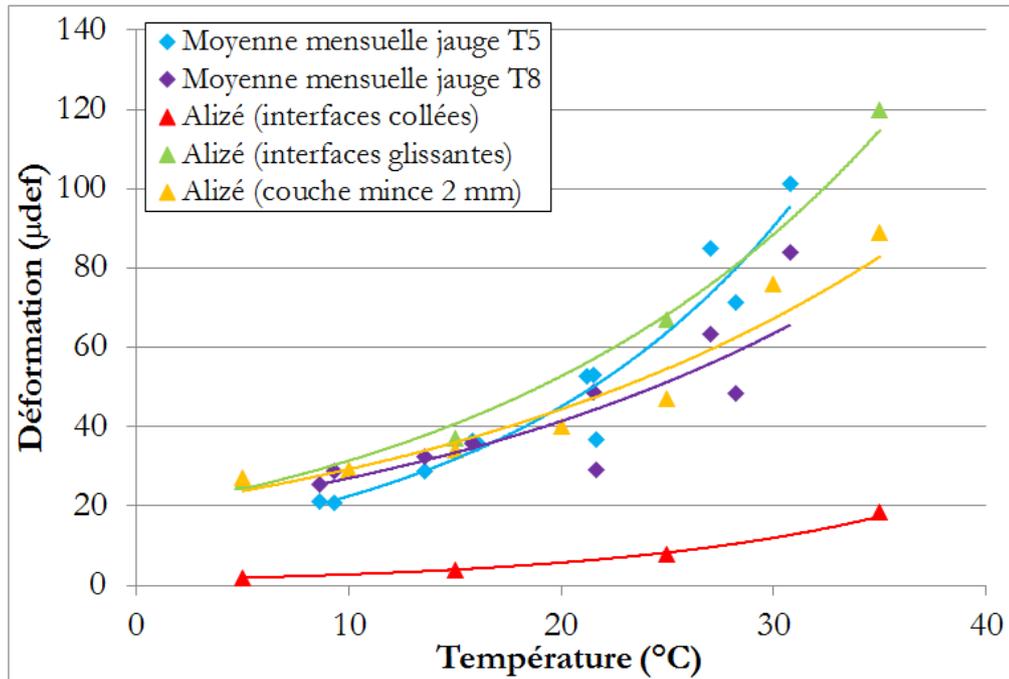


Figure 4.54. Comparaison entre les moyennes mensuelles des déformations transversales mesurées à la base du BBME, sous le premier essieu des poids-lourds de type T2S3, et calculées avec Alizé, à différentes températures, et pour différentes conditions d'interface.

Les résultats montrent que les valeurs calculées de déformation avec la condition des interfaces collées sont nettement plus petites que les mesures, pour toutes les températures. Cette approche basée sur l'hypothèse classique de la méthode française de dimensionnement, sous-estime clairement les déformations horizontales, en particulier les déformations transversales, à la base des couches de BBME et d'EME. Les déformations calculées avec les autres hypothèses (totalement décollée et couches minces élastiques) sont similaires, et proches des valeurs mesurées. Les déformations varient exponentiellement avec la température, ce qui est cohérent avec les mesures in-situ.

Les modules des couches minces élastiques obtenus à différentes températures sont présentés sur la Figure 4.55. Les modules des couches d'interface sont faibles (typiquement entre 20 et 100 MPa), et diminuent lorsque la température augmente. Cette diminution est particulièrement importante entre 25°C et 30°C. Ces résultats sont intéressants car ils suggèrent que même pour les chaussées neuves, les interfaces des couches ne sont pas parfaitement collées. Le glissement entre les couches apparaît, notamment à haute température, lorsque la rigidité de la couche mince est faible. La diminution du degré de collage entre les couches génère une augmentation des déformations en extension à la base des couches supérieures (les couches de BBME et d'EME), ce qui peut entraîner des phénomènes de fatigue, et donc affecter la durée de vie en fatigue de la chaussée.

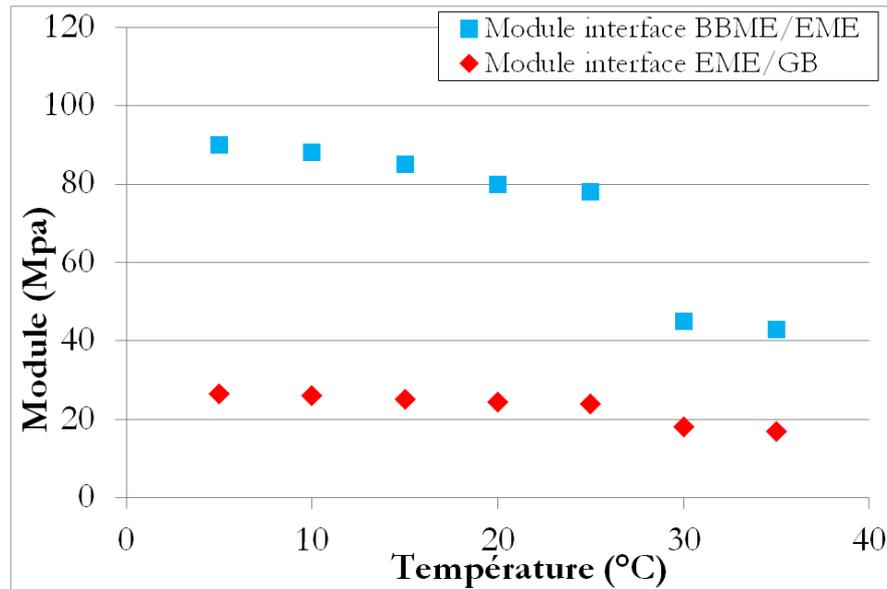


Figure 4.55. Modules estimés des couches minces représentant les interfaces entre couches bitumineuses calculés avec Alizé, en fonction de la température

4.4.4.2 Modélisation du comportement des interfaces de chaussées avec Viscoroute©

Les mêmes calculs, avec les différentes conditions de l'interface, et différentes températures, ont été réalisés avec Viscoroute©. Les caractéristiques des matériaux utilisées pour ces calculs sont les mêmes que précédemment, présentées dans le Tableau 4.5. Les conditions d'interface utilisées pour la modélisation sont: interfaces collées, couches minces élastiques et couches minces viscoélastiques. La charge considérée, et comme pour ALIZE, celle correspondant à la moitié du premier essieu (roue simple, chargée à 32,5 kN).

Les Figure 4.56 à Figure 4.58 présentent respectivement les calculs pour les déformations longitudinales à la base de l'EME, pour les déformations transversales à la base de l'EME et pour les déformations transversales à la base du BBME. Sur chaque graphique, les moyennes mensuelles des déformations mesurées à la base des couches d'EME et de BBME sont comparées avec les déformations calculées avec Viscoroute© pour différentes conditions d'interfaces: collées, interface considérée comme une couche mince élastique et interface considérée comme une couche mince visco-élastique. Les paramètres de Huet-Sayegh des interfaces visco-élastiques sont ceux déjà utilisés précédemment, présentés dans le Tableau 4.6.

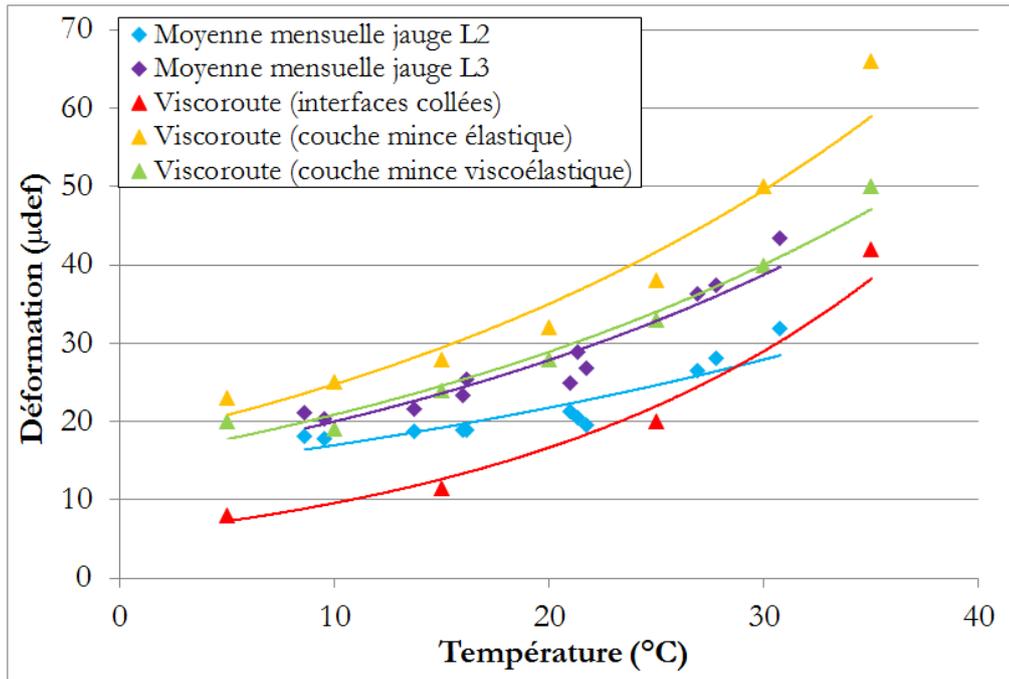


Figure 4.56. Comparaison entre les moyennes mensuelles des déformations longitudinales mesurées à la base de l'EME sous le premier essieu des poids-lourds de type T2S3 et calculées avec Viscoroute, à différentes températures, et pour différentes conditions d'interfaces.

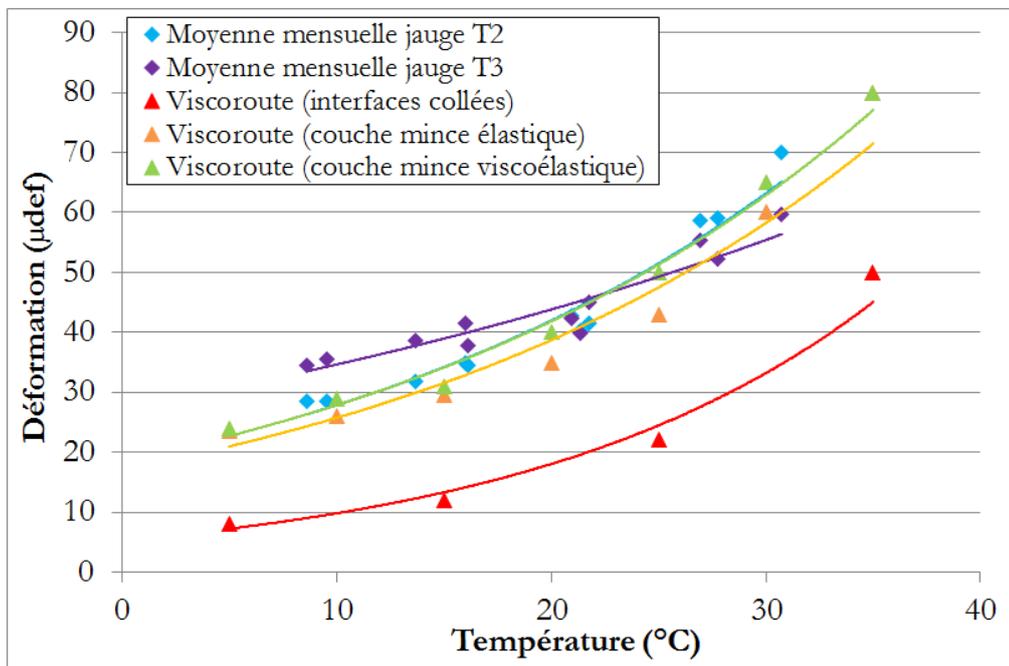


Figure 4.57. Comparaison entre les moyennes mensuelles des déformations transversales mesurées à la base de l'EME sous le premier essieu des poids-lourds de type T2S3 et calculées avec Viscoroute, à différentes températures, et pour différentes conditions d'interfaces.

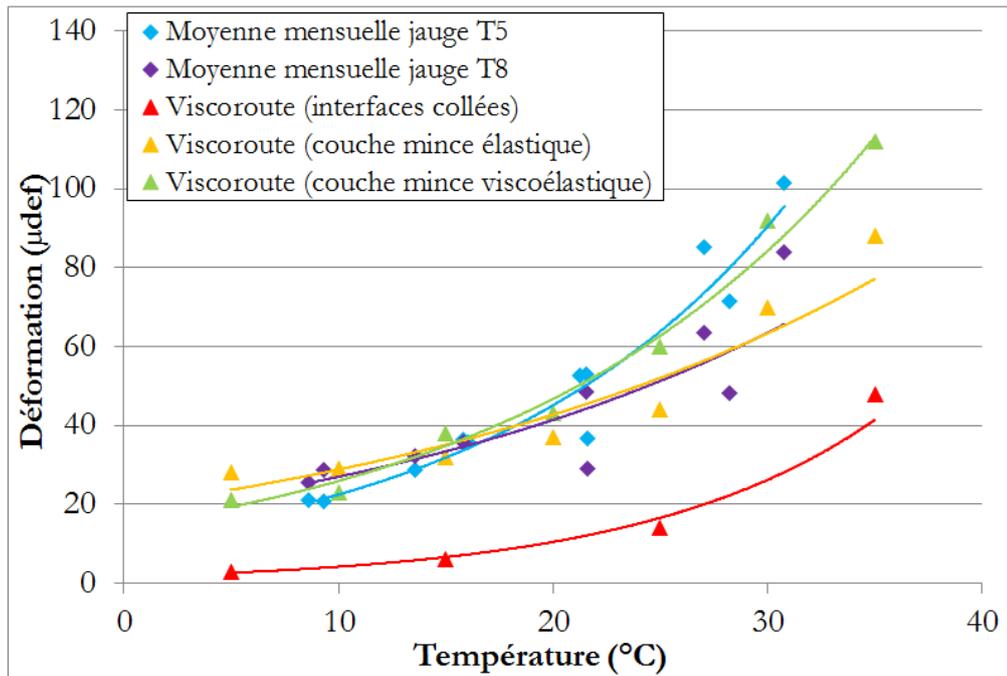


Figure 4.58. Comparaison entre les moyennes mensuelles des déformations transversales mesurées à la base du BBME, sous le premier essieu des poids-lourds de type T2S3, et calculées avec Viscoroute, à différentes températures, et pour différentes conditions d'interfaces.

Comme les calculs avec Alizé, les calculs avec Viscoroute© sous-estiment beaucoup la déformation horizontale dans le cas des interfaces collées. Les meilleures prédictions sont obtenues lorsque les interfaces de la chaussée sont décrites par des couches minces viscoélastiques.

La Figure 4.59 présente les modules obtenus avec l'hypothèse des interfaces décrites comme des couches minces élastiques, à différentes températures. On constate également que les modules des couches minces sont faibles et diminuent lorsque la température augmente. Comme dans les calculs avec Alizé, une chute importante des valeurs des modules est observée entre 25°C et 30°C. Les résultats obtenus avec Viscoroute© confirment ceux obtenus avec Alizé. Les faibles modules des interfaces montrent que le degré de collage entre les couches de chaussée est faible, notamment à hautes températures. Les valeurs de modules de l'interface entre la couche de BBME et la couche d'EME sont légèrement plus élevées que celles estimées à partir des calculs Alizé (80 MPa à 30°C, au lieu de 40 MPa). Cependant, la tendance générale est la même : les modules des couches minces d'interfaces sont beaucoup plus petits que ceux des matériaux bitumineux, BBME et EME (entre 20 et 160 MPa pour les différents conditions modélisées).

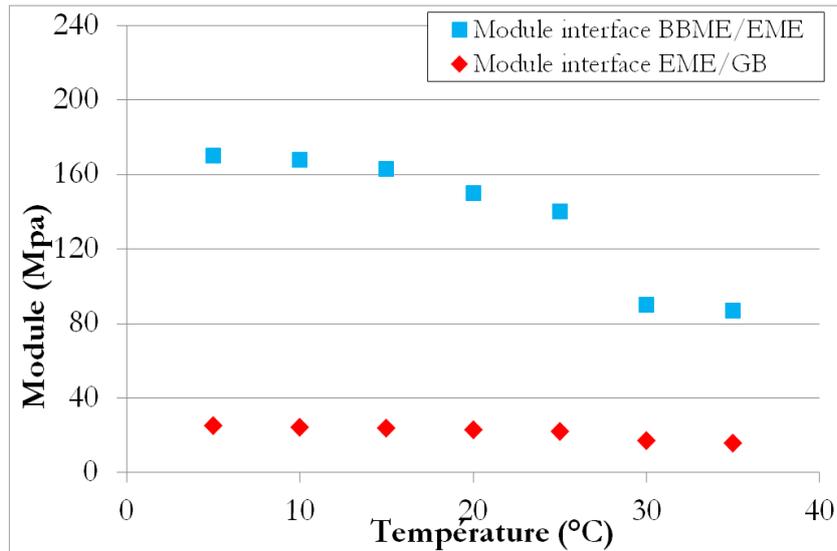


Figure 4.59. Valeurs estimées des modules des couches minces élastiques représentant les interfaces des couches bitumineuses, calculées avec Viscoroute©, en fonction de la température

4.5 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats des analyses des mesures des jauges de déformation mises en place sur une section de l'autoroute Ax. L'acquisition et le transfert sans-fil des mesures sont réalisés par le système PEGASE développé à l'IFSTTAR. Une grande quantité de données ont été enregistrées en continu sous trafic réel, pendant 24 mois. Ces mesures sont affectées par la variabilité des chargements du trafic (type de véhicules, charges des essieux, positions latérales sur la chaussée). Afin de pouvoir analyser la réponse mécanique de la chaussée, un processus de tri original a été proposé. Ce processus permet de réduire la variabilité du trafic, et également de limiter la quantité des données. Il inclut deux étapes principales:

- La première étape consiste à sélectionner uniquement les signaux correspondant aux poids lourds de 5 essieux de type T2S3. Les géophones placés à différentes positions latérales sur la chaussée permettent de sélectionner uniquement les poids lourds dont les roues sont centrées sur les jauges. Une évaluation de la qualité des signaux, basée sur le rapport signal / bruit est également réalisée afin d'éliminer les signaux dont le pic issu du passage du 1^{er} essieu pourrait être confondu avec un pic dû au bruit de mesure.
- La deuxième étape consiste à traiter uniquement les signaux mesurés sous le premier essieu, en tirant parti du fait que la charge de ces essieux varie peu, et peut être assimilée à une charge de 65 kN, pour les types de poids lourds sélectionnés (donc de type T2S3).

Après avoir sélectionné les signaux appropriés, les variations des déformations à la base de la couche de liaison (BBME) et à la base de la couche de base (EME) ont été analysées. Les résultats montrent une augmentation importante des déformations avec la température dans les deux couches. Le niveau maximal de déformation en extension à haute température (35°C) peut atteindre 160 μ def. Les résultats montrent également que les déformations transversales sont beaucoup plus grandes que les déformations longitudinales. Une réponse viscoélastique est clairement observée à hautes températures, avec l'accumulation des déformations sous les charges successives, et le retard de la réponse après chargement.

Afin de pouvoir analyser de manière globale l'évolution des déformations dans les couches de chaussées sur toute la période de monitoring, une analyse simplifiée, basée sur les déformations maximales observées sous le premier essieu, sur les signaux triés, a été proposée. Elle consiste à calculer les moyennes mensuelles de ces déformations mesurées sous le premier essieu, et à étudier leur évolution. Cela permet de caractériser l'évolution de la réponse de la chaussée dans le temps (augmentation des déformations à niveau de température constant, par exemple, qui pourrait traduire un endommagement), et en fonction de la température. Dans le cas de la section de l'Ax, aucune évolution dans le temps des déformations (à même température), donc aucun signe d'endommagement, n'a été mis en évidence.

Des calculs ont ensuite été réalisés afin d'évaluer le comportement des différentes couches de la chaussée et d'estimer leurs performances mécaniques. Ces calculs sont faits avec deux modèles: un modèle élastique linéaire (logiciel ALIZE) et un modèle viscoélastique (logiciel Viscoroute©). Dans l'objectif d'expliquer les grandes déformations en extension à la base des couches de BBME et d'EME, différentes conditions d'interfaces ont été considérées: collée, totalement décollée, interface décrite par une couche mince (2 mm) élastique et/ou viscoélastique. Les différentes modélisations ont montré que:

- Le modèle viscoélastique décrit mieux la forme des signaux de déformation dans les couches bitumineuses
- Dans le cas des interfaces collées, les déformations mesurées sont largement sous-estimées, notamment à hautes températures.
- Les meilleurs résultats sont obtenus avec des interfaces décrites par une couche mince élastique, avec un faible module qui varie avec la température (pour le modèle élastique) et par une couche mince viscoélastique (pour le modèle viscoélastique), qui restitue encore mieux la forme des signaux, notamment pour les déformations transversales.

Ces résultats montrent que même pour les chaussées neuves, les interfaces ne sont pas nécessairement parfaitement collées, comme supposé dans la méthode française de dimensionnement. Un glissement apparaît entre les couches de chaussée, surtout à hautes températures. Ce phénomène peut conduire à une augmentation des contraintes en extension à la base des couches bitumineuses et peut donc réduire la durée de vie en fatigue de la chaussée. Le glissement au niveau de l'interface des couches a également été observé lors de tests sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR et lors d'études réalisés en laboratoire.

En conclusion, le monitoring de la chaussée montre l'importance de la prise en compte du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux pour prévoir les niveaux de déformations dans les couches de chaussées et de décrire précisément le comportement des interfaces. Avec les modèles multicouches élastiques linéaires et viscoélastiques, la description des interfaces par des couches minces représente une solution possible, pour mieux prédire les niveaux de déformations réels. Ces résultats mettent aussi clairement en avant le besoin de développer des méthodes permettant de mesurer la qualité du collage entre couches de chaussées, à la fois en laboratoire, afin d'optimiser le choix des couches d'accrochage utilisées (nature et dosage) et également en place, afin de valider les performances obtenues lors de la construction.

L'analyse de ces résultats est poursuivie dans le chapitre 5, où l'on s'est intéressé à l'influence des différentes hypothèses de modélisation des matériaux et des interfaces entre couches sur l'endommagement en fatigue de la chaussée.

Chapitre 5 – Calcul d’endommagement de la structure de l’autoroute Ax

Sommaire

5	Chapitre 5 – Calcul d’endommagement de la structure de l’autoroute Ax	168
5.1	Introduction	169
5.2	Démarche de calcul de l’endommagement d’une chaussée	169
5.2.1	Notion de dommage appliquée aux chaussées	169
5.2.2	Application du calcul de dommage à la section de l’Ax	170
5.3	Hypothèses pour les calculs d’endommagement sur la section de l’Ax	177
5.4	Calculs des déformations maximales en extension.....	179
5.5	Résultats des calculs d’endommagement – influence des hypothèses de calcul	186
5.6	Conclusion.....	191

5.1 Introduction

Les résultats du monitoring de la section de l'Ax ont été présentés dans le chapitre 4. Ces résultats ont permis de définir l'évolution au cours du temps des températures dans la structure, et l'évolution des performances mécaniques des matériaux de chaussée, en prenant en compte différentes hypothèses de modélisation. D'autre part, l'une des finalités du monitoring d'une chaussée (à condition de disposer de l'ensemble des informations nécessaires), est de pouvoir suivre non seulement l'évolution dans le temps des performances de matériaux, mais également l'évolution de l'endommagement de la chaussée, en utilisant par exemple les lois de fatigue des matériaux, de façon à estimer son endommagement actuel, et également sa durée de vie résiduelle.

Dans ce chapitre, on a donc cherché à définir, puis à mettre en œuvre une démarche du calcul de l'endommagement de la section de l'Ax, permettant de prendre en compte les différents cas de modélisation évalués dans le chapitre 4 (notamment les différentes hypothèses de comportement des interfaces en fonction de la température), et de comparer l'effet de ces hypothèses sur l'endommagement de la chaussée, et donc sur sa durée de vie.

La démarche de calcul proposée présente cependant quelques limitations liées aux données disponibles pour l'Ax :

- Les données disponibles, de variation de température, et de variation des propriétés des couches de chaussées, sont limitées à une période de 10 mois (13 février 2015 au 12 décembre 2015).
- L'historique de chargement de la chaussée n'est pas totalement connu, puisque le système d'acquisition n'enregistre qu'une partie des poids lourds passant sur la chaussée (enregistrement sur seuil). Une estimation simplifiée du nombre de poids lourds, et de l'agressivité de ce trafic, a donc dû être faite.
- On ne dispose pas des lois de fatigue réelles des matériaux bitumineux de la chaussée, et en particulier de résultats concernant l'influence de la température sur le comportement en fatigue de ces matériaux. Les calculs ont donc été réalisés avec les lois de fatigue « standard » de la méthode française de dimensionnement.

Pour ces raisons, les calculs d'endommagement présentés sont des calculs simplifiés, réalisés sur une période limitée. Leur objectif est essentiellement de définir la démarche de calcul et de montrer sa faisabilité, à partir des résultats du monitoring, et également de comparer l'incidence des différentes hypothèses de modélisation, sur l'endommagement qui en résulte.

5.2 Démarche de calcul de l'endommagement d'une chaussée

5.2.1 Notion de dommage appliquée aux chaussées

La notion de dommage subi par une couche de chaussée se formalise de la façon suivante (Guide CEREMA-IDRRIM, 2016) :

Le dommage élémentaire causé à une couche donnée, sous le passage d'un essieu de référence, noté $d_{\text{élémentaire}}$ est défini par :

$$d_{\text{élémentaire}} = 1/NE_{\text{durée de vie}} \quad (5.1)$$

Avec :

$d_{\text{élémentaire}}$: dommage élémentaire subi par la couche au passage de l'essieu de référence.

$NE_{\text{durée de vie}}$: nombre équivalent de passage de l'essieu de référence conduisant à la ruine de la couche (définie à partir d'une loi de fatigue).

Le dommage cumulé subi par la couche considérée (noté $d_{\text{cumulé}}$) après ne_{subi} passages équivalents de l'essieu de référence (correspondant au trafic réel de poids lourds NPL déjà supporté par la couche) est donc :

$$d_{\text{cumulé}} = ne_{\text{subi}} \times d_{\text{élémentaire}} = \frac{ne_{\text{subi}}}{NE_{\text{durée de vie}}} \quad (5.2)$$

Avec :

ne_{subi} : nombre équivalent de passages de l'essieu de référence correspondant au trafic déjà supporté par la chaussée.

On constate alors que, lorsque $ne_{\text{subi}} = NE_{\text{durée de vie}}$, la couche a supporté un nombre équivalent de passages de l'essieu de référence égal à celui conduisant à sa ruine, et son dommage cumulé vaut alors 1 (ou 100%).

Loi de cumul des dommages

Une même couche de chaussée supporte au cours de sa durée de vie des niveaux de sollicitations divers, lui causant des dommages élémentaires distincts. Par exemple, les poids lourds qui circulent sur une chaussée sont de géométrie et de charge à l'essieu variables, et une même couche de chaussée voit son niveau de sollicitation diminuer après un rechargement, sous charge constante.

L'addition de ces dommages élémentaires divers accumulés en raison de conditions de chargement variables se fait à l'aide d'une loi de cumul des dommages. Dans le domaine du dimensionnement de chaussées, on utilise couramment celle de Miner (Miner, 1945) qui s'exprime par :

$$d_{\text{total cumulé}} = \sum_{i=1}^n d_{\text{total cumulé}}^i = \sum_{i=1}^n \frac{ne_{\text{subi}}^i}{NE_{\text{durée de vie}}^i} \quad (5.3)$$

Avec :

$d_{\text{total cumulé}}$: dommage total accumulé par la couche considérée, sollicitée à différents niveaux i ;

$d_{\text{total cumulé}}^i$: dommage cumulé correspondant au nombre d'applications du cas de chargement i .

i : numéro correspondant à un cas de chargement spécifique (i varie de 1 à n).

Par analogie au comportement d'une couche sous conditions de chargement constante, la ruine théorique de la couche est atteinte lorsque son dommage total cumulé vaut 1 (ou 100%).

5.2.2 Application du calcul de dommage à la section de l'Ax

Dans notre cas, il s'agit de calculer le dommage cumulé durant la période de 10 mois (13 février 2015 au 12 décembre 2015) pendant laquelle on dispose des données de température, de

chargement, et de comportement mécanique des couches de chaussée. Cette période de 10 mois correspond à la plus longue durée durant laquelle il n'y a eu aucune coupure (même minime) du système d'acquisition des données. Pendant cette période, les températures ont été mesurées toutes les 15 minutes. Une moyenne heure par heure a ensuite été effectuée. Les calculs de dommages seront effectués de la façon suivante :

- Les variations de température sont mesurées toutes les 15 minutes. Une moyenne heure par heure est ensuite effectuée. La température correspondant à chaque heure étant notée θ_i .
- Le trafic sera converti en nombre d'essieux de référence, et on définira le nombre d'essieux de référence qui passe à chaque heure de la période de calcul $n_i(\theta_i)$
- Pour chaque modèle de comportement considéré pour la chaussée (plusieurs hypothèses seront comparées), on va considérer que les propriétés mécaniques de la chaussée ne varient qu'en fonction de la température. C'est ce qui a été constaté dans le chapitre 4 (pas d'autre évolution dans le temps des modules, ou des propriétés des interfaces). Pour chaque température θ_i , un seul jeu de paramètres de comportement mécanique de la chaussée sera donc considéré (pour un modèle de comportement donné).

Le dommage cumulé peut donc être défini comme une somme des dommages subis pour chacune des valeurs de températures successives θ_i , ce qui conduit à la relation :

$$d_{cumulé} = \sum_{i=1}^n d(\theta_i) \quad (5.4)$$

Où :

θ_i est la température dans la couche de chaussée considérée sur un intervalle i de une heure

$d(\theta_i)$ est le dommage élémentaire subi par la couche de chaussée durant l'intervalle i

Calculs des dommages élémentaires

Le dommage élémentaire subi par la couche de chaussée durant l'intervalle i considéré est calculé avec la formule suivante :

$$d(\theta_i) = \frac{n_i(\theta_i)}{N_i(\theta_i)} \quad (5.5)$$

Où

θ_i est la température dans la couche de chaussée considérée sur un intervalle i de une heure.

$n_i(\theta_i)$ est le nombre de chargements d'essieux de référence appliqué à la chaussée dans l'intervalle i considéré.

$N_i(\theta_i)$ est le nombre d'essieux de référence qui conduisent à la ruine de la couche de chaussée à la température θ_i (défini par une loi de fatigue).

Calcul de $n_i(\theta_i)$

Le nombre d'essieux de référence subi par la chaussée dans l'intervalle i considéré peut être déterminé à partir du nombre de poids lourds, par la loi suivante, définie dans la méthode française de dimensionnement des chaussées neuves :

$$n_i(\theta_i) = N_PL_i * CAM \quad (5.6)$$

Où

CAM est le coefficient d'agressivité moyen. Ce coefficient d'agressivité traduit l'agressivité moyenne d'un poids lourd, par rapport à l'essieu de référence. Lorsqu'on dispose de données de pesage des poids lourds, le CAM peut être calculé précisément à partir de ces données de pesage. Lorsque ces données ne sont pas disponibles, comme c'est le cas pour l'Ax, la méthode de dimensionnement française donne des coefficients d'agressivité forfaitaires, qui peuvent être utilisés. Pour un trafic journalier tel que celui de l'Ax et la structure bitumineuse considéré, le coefficient CAM vaut 0.5.

N_PL_i est le nombre de poids lourds (véhicules de poids total supérieur à 5 tonnes) circulant dans l'intervalle i considéré.

Pour l'Ax, nous ne disposons pas de mesures précises sur le nombre de poids lourds circulant sur la section instrumentée, en fonction des heures, des jours, des saisons (le système d'acquisition fonctionne sur seuil, et n'enregistre que certains poids lourds). Pour estimer le nombre de poids lourds circulant à chaque heure sur la chaussée, nous utiliserons donc un diagramme moyen de répartition horaire du trafic, proposé par (Mauduit, et al., 2010), (voir Figure 5.1)

Pour établir ce diagramme, (Mauduit, et al., 2010) ont utilisé les mesures de 7 stations de pesage réparties sur la France, avec des trafics différents, variant de 250 à 5000 poids lourds par jour. Les mesures de comptage de poids lourds utilisées sont celles de l'année 2005. La Figure 5.1a présente les moyennes de répartition horaire du trafic poids-lourd pour ces 7 stations de pesage, exprimées en pourcent, par rapport au trafic total qui passe en 24 heures. On constate que les niveaux de trafic varient largement au cours de la journée : 90% du trafic circule entre 6 heures et 22h, et les plus forts trafics sont enregistrés sur les périodes de 8 h à 10 h le matin et de 16 h à 18 h le soir. Toutefois, on note que la forme générale de la distribution de trafic est très semblable pour les 7 stations, ce qui permet de calculer, à partir de ces données, une distribution horaire moyenne. Celle-ci est présentée sur la Figure 5.1b.

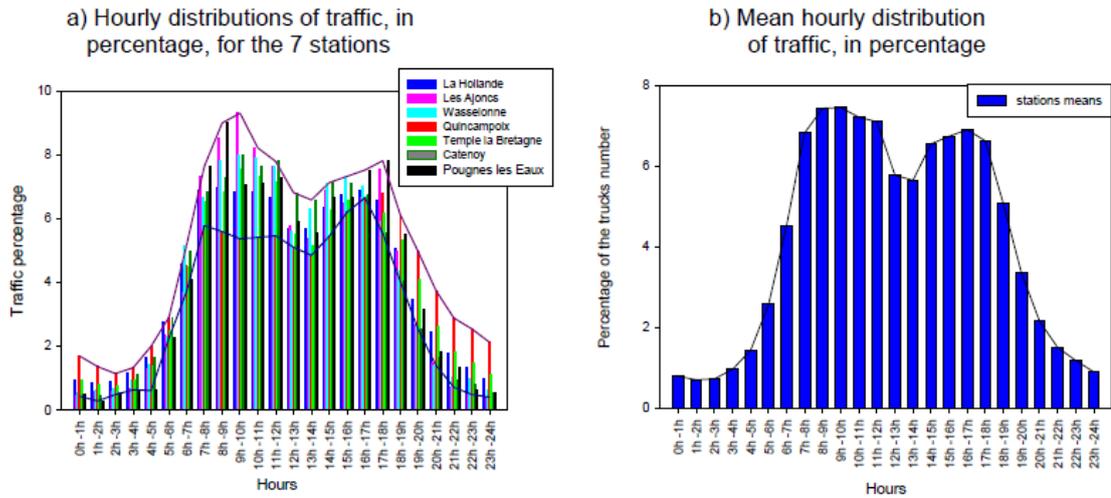


Figure 5.1. Distribution horaire du trafic, en pour cent, pour 7 stations de pesage (a), et distribution moyenne obtenue pour l'ensemble des 7 stations (b).

Sur la section étudiée de l'Ax, le trafic moyen est de 4500 poids lourd par jour (donnée Colas). A partir du graphique (b) de la Figure 5.1, on en a donc déduit le nombre de poids-lourds circulant chaque heure sur la section instrumentée. On a également supposé que ce trafic journalier est constant sur toute l'année.

Calcul de $N_i(\theta_i)$

Le calcul du nombre total d'essieux de référence $N_i(\theta_i)$ conduisant à la ruine de la couche de chaussée est basé sur l'approche de la méthode française de dimensionnement (AFNOR, 2011). Cette méthode de dimensionnement a été décrite dans le chapitre 1 de cette thèse, consacré à la bibliographie. Pour une chaussée bitumineuse, la détermination du nombre d'essieux conduisant à la ruine consiste à comparer :

- La déformation de traction maximale ε_t calculée à la base de la couche de chaussée, sous la charge de l'essieu de référence.
- Et une valeur de déformation de traction admissible $\varepsilon_{t,ad}$, déterminée à partir de la loi de fatigue du matériau correspondant.

La déformation de traction $\varepsilon_{t,ad}$ admissible à la base d'une couche bitumineuse est donnée par la relation :

$$\varepsilon_{t,ad}(\theta) = \varepsilon(NE, \theta, f)k_r k_c k_S \quad (5.7)$$

Où :

$\varepsilon(NE, \theta, f)$ est la déformation pour laquelle la rupture est obtenue lors d'un essai de fatigue en flexion sur éprouvette trapézoïdale, au bout de NE cycles, avec une probabilité de 50% pour la température θ et à la fréquence f caractéristique des sollicitations subies par la couche considérée.

k_r est un coefficient qui ajuste la valeur de la déformation admissible au risque de calcul r retenu, en fonction des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart type SN) :

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (5.8)$$

Avec :

u : variable centrée réduite associée au risque r

b : pente de la loi de fatigue du matériau

delta : écart-type de la distribution de logN à la rupture

$$\delta = [SN^2 + (c^2/b^2)Sh^2]^{0.5} \quad (5.9)$$

c coefficient reliant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée. Pour les structures courantes, c'est pris égal à 0.02 cm⁻¹.

Dans notre cas, le risque est choisi égal à 50%. Le coefficient kr est alors égal à 1.

k_c est un coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé de chaussées de même type. Pour les chaussées bitumineuses, et une couche inférieure d'enrobé en EME, le coefficient de calage vaut 1. Pour le BBME, le coefficient de calage vaut 1.1.

k_S est un coefficient minorateur, tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance d'une couche de sol support de faible rigidité supportant les couches liées. Dans notre cas, on prend k_S égal à 1.

La loi de fatigue des matériaux bitumineux est représentée par une relation du type :

$$\varepsilon(NE, \theta, f) = \varepsilon_6(\theta, f)(NE/10^6)^b \quad (5.10)$$

Dans cette relation:

$\varepsilon_6(\theta, f)$ représente la déformation conduisant à la rupture en fatigue pour 10⁶ cycles de chargement, pour la température θ et la fréquence f.

b représente l'exposant de la loi de fatigue.

Pour les structures en climat tempéré et les températures positives (ce qui est le cas de notre étude), l'influence de la température sur le comportement en fatigue peut être représentée de manière approchée par la relation :

$$\varepsilon_6(\theta)E(\theta)^{0.5} = \text{constante} \quad (5.11)$$

Où E(θ) est le module d'élasticité du matériau à la température θ .

La loi de fatigue est généralement établie expérimentalement pour une température de 10°C et une fréquence de 25Hz. On considère usuellement pour les couches d'assise que la fréquence caractéristiques de sollicitations (correspondant à la vitesse de circulation des charges) est de l'ordre de 10Hz est que la correction de fréquence entre 10 et 25Hz sur la valeur de ε_6 peut être négligée pour les températures moyennes.

Dans ces conditions $\varepsilon(NE, \theta, f)$ s'exprime sous la forme :

$$\varepsilon(NE, \theta, f) = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})[E(10^\circ\text{C})/E(\theta)]^{0.5}(NE/10^6)^b \quad (5.12)$$

En combinant les expressions précédentes, de la loi de fatigue et de la déformation admissible, on arrive donc à la relation :

$$\varepsilon_{t,ad}(\theta) = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})[E(10^\circ\text{C})/E(\theta)]^{0.5}(NE/10^6)^b k_r k_c k_s \quad (5.13)$$

Pour un niveau de déformation de traction $\varepsilon_t(\theta_i)$ obtenu à la base des couches bitumineuses, à la température θ_i , on peut donc en déduire $N_i(\theta_i)$, le nombre d'essieux de référence qui conduisent à la ruine de la couche de chaussée à cette température θ_i . Celui-ci est donné par :

$$N_i(\theta_i) = \left(\frac{\varepsilon_t(\theta_i)}{\varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) * k_s * k_c * k_r} * \sqrt{E(\theta_i)/E(10^\circ\text{C})} \right)^{1/b} * 10^6 \quad (5.14)$$

Pour calculer $N_i(\theta_i)$, il faut donc connaître la déformation $\varepsilon_t(\theta_i)$, calculée avec un modèle de comportement mécanique de la structure, les paramètres de la loi de fatigue du matériau, ainsi que la loi de variation du module du matériau $E(\theta_i)$ avec la température.

Pour déterminer la loi de variation du module complexe de l'EME et du BBME en fonction de la température, on a utilisé ici les valeurs de référence de modules à différentes températures fournies dans le logiciel Alizé. Les valeurs fournies par ALIZE ont été ajustées avec une courbe de tendance (courbe polynomiale de degré 3). On a ainsi obtenu la relation module fonction de la température illustrée sur les Figure 5.2, Figure 5.3.

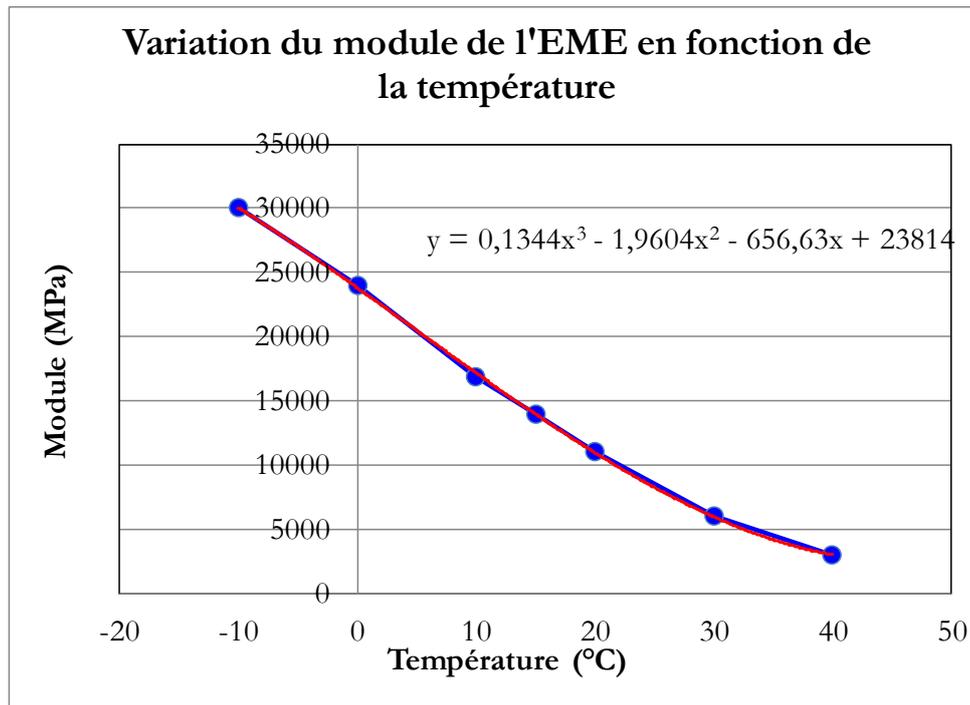


Figure 5.2. Loi de variation du module de l'EME en fonction de la température utilisée pour les calculs d'endommagement

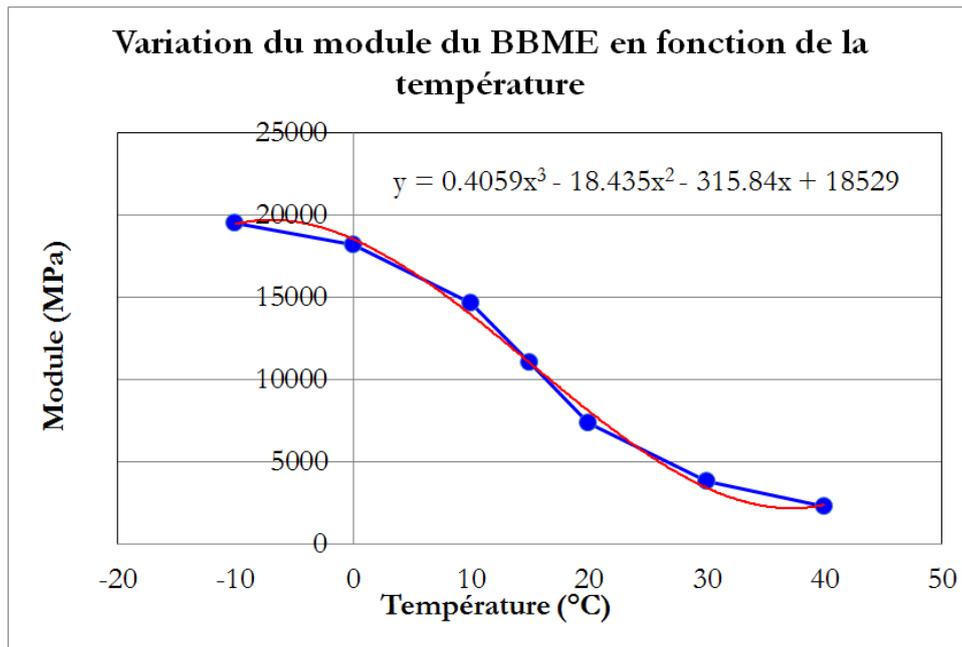


Figure 5.3. Loi de variation du module du BBME en fonction de la température utilisée pour les calculs d'endommagement

Les valeurs des autres paramètres utilisés pour le calcul de l'endommagement des couches d'EME et de BBME sont résumées dans les Tableau 5.1, Tableau 5.2 ci-dessous. Comme déjà dit, la plupart de ces paramètres sont des valeurs forfaitaires, issues de la méthode de dimensionnement.

Tableau 5.1. Paramètres utilisés pour les calculs d'endommagement en fatigue de la couche d'EME

Paramètres de fatigue de l'EME à 10 °C, 25 Hz		Coefficients correcteurs de la méthode de dimensionnement		
ϵ_6 (μdef)	b	k_r	k_s	k_c
130	-0,2	1	1	1

Tableau 5.2. Paramètres utilisés pour les calculs d'endommagement en fatigue de la couche de BBME

Paramètres de fatigue du BBME à 10 °C, 25 Hz		Coefficients correcteurs de la méthode de dimensionnement		
ϵ_6 (μdef)	b	k_r	k_s	k_c
100	-0.2	1	1	1.1

5.3 Hypothèses pour les calculs d'endommagement sur la section de l'Ax

Lors de notre étude, il y a eu des coupures du système d'acquisition de données sur l'Ax. Les données de température ne sont donc pas disponibles sur toute la durée de l'étude. La plus grande période sans coupure est du 13 février 2015 au 12 décembre 2015. C'est donc sur cette période que l'on a choisi d'effectuer les calculs de dommage (donc sur 10 mois). Les variations horaires, et moyennes mensuelles de la température sur cette période, dans les couches de chaussée, sont illustrées sur les Figure 5.4 et Figure 5.5.

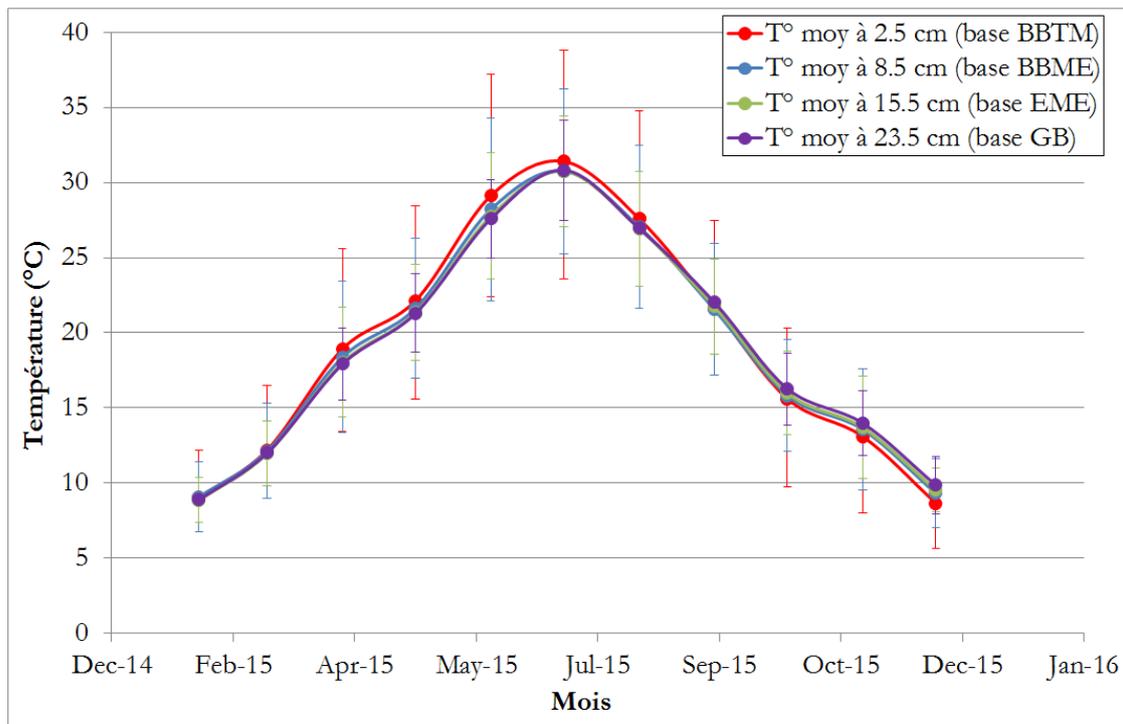


Figure 5.4. Distribution moyenne mensuelle de la température sur la période du 13 février 2015 au 12 décembre 2015

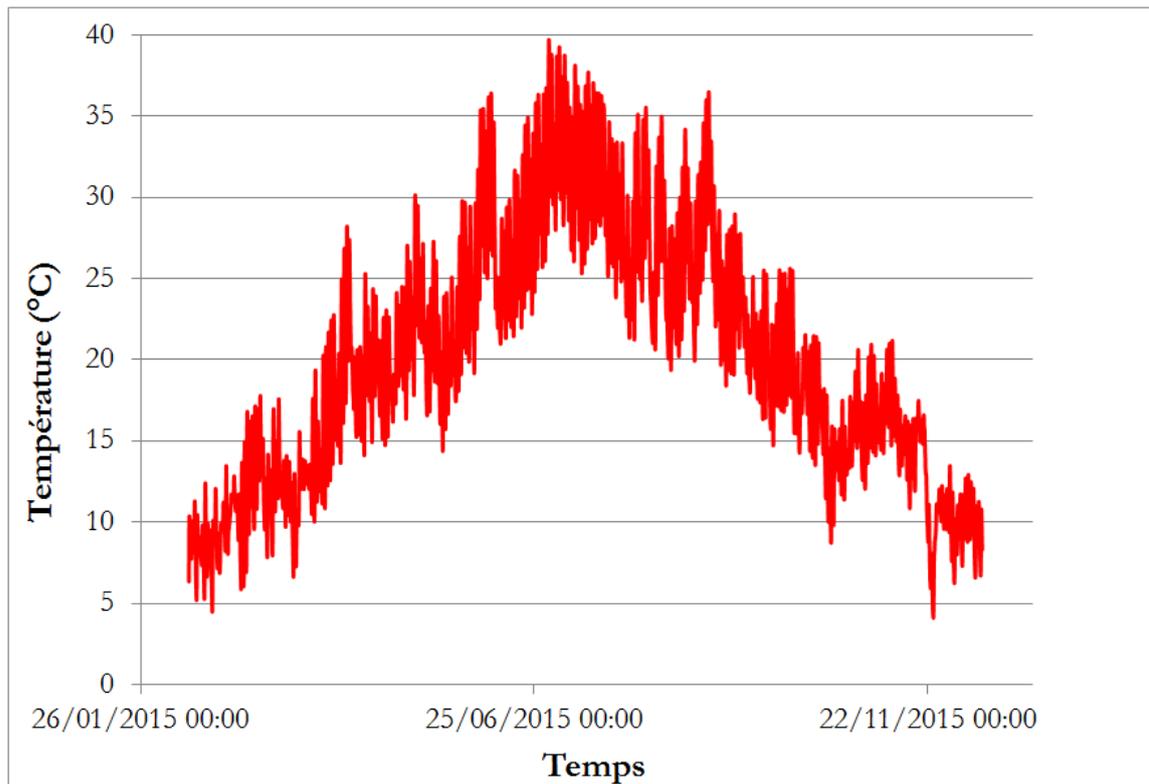


Figure 5.5. Distribution moyenne horaire de la température à la base de la couche d'EME sur la période du 13 février 2015 au 12 décembre 2015.

On a choisi de réaliser les calculs d'endommagement en comparant chacune des 6 hypothèses de comportement de la chaussée considérées dans le chapitre 4 :

- Calcul en élasticité, interfaces collées
- Calcul en élasticité, interfaces glissantes
- Calcul en élasticité, interfaces couches minces élastiques
- Calcul en visco-élasticité, interfaces collées
- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces élastiques
- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces visco-élastiques

Par rapport à ces hypothèses, il faut aussi préciser qu'aujourd'hui la méthode de dimensionnement est calée uniquement pour le cas d'un modèle de comportement élastique linéaire. Ce calage a été réalisé par comparaison entre les résultats de calcul et un nombre significatif de cas de terrain, et a conduit à définir les coefficients de calage actuels de la méthode (k_c), qui sont donc valables pour un modèle de calcul élastique linéaire. Ici, on a conservé les mêmes coefficients de calage dans le cas du modèle visco-élastique, car il n'était pas envisageable de revoir ces coefficients, pour les modélisations avec Viscoroute, mais il s'agit d'une approximation.

Pour ces calculs d'endommagement, il est nécessaire de connaître les lois d'évolution des paramètres de comportement des matériaux en fonction de la température. Pour les lois d'évolution des modules d'élasticité des matériaux, on s'est basé sur les lois disponibles dans le

logiciel ALIZE (voir l'exemple des Figure 5.2, Figure 5.3). Pour le modèle de Huet-Sayegh, les variations en fonction de la température sont définies par les paramètres A_0 , A_1 , A_2 (voir Tableau 4.5 du chapitre 4). Dans le cas des interfaces décrites par une couche mince élastique, on a considéré les lois d'évolution des modules d'élasticité des interfaces avec la température établies dans le chapitre 4 (Figure 4.55 dans le cas élastique, Figure 4.59 dans le cas viscoélastique).

En se basant sur la méthodologie décrite précédemment au § 4.4, les calculs d'endommagement ont été réalisés selon les 4 étapes suivantes :

1. Des calculs de déformations sous un jumelage standard de référence chargé à 65 kN ont été effectués pour chacune des 6 hypothèses de comportement, soit en élasticité linéaire (avec ALIZE), soit en viscoélasticité (avec Viscoroute). Ces calculs ont été réalisés à 4 températures différentes (5, 15, 25 et 35°C),
2. A partir de ces calculs, on a déterminé les déformations de tractions maximales $\varepsilon_t(\theta)$ obtenues à la base de la couche d'EME et de BBME pour chaque température, et chaque hypothèse de comportement. Ces déformations sont représentées sur les Figure 5.7 à Figure 5.14. Ensuite, des lois polynomiales ont été calées sur ces résultats, afin de pouvoir extrapoler les déformations calculées à toute la plage de températures considérée (voir Figure 5.7 à Figure 5.14)
3. A partir de ces valeurs de déformations, des valeurs de nombre de cycles $N_i(\theta_i)$ conduisant à la rupture pour chaque température θ_i ont été calculées, en utilisant la relation 5.14, pour chaque hypothèse de comportement,
4. Ces valeurs ont été converties en valeur de dommage élémentaire ; pour chaque température, par la relation : $d_{\text{élémentaire}}(\theta_i) = \frac{1}{N_i(\theta_i)}$
5. Finalement les valeurs de dommage élémentaire ont été cumulées, d'abord sur chaque période i , où la température vaut θ_i , puis sur l'ensemble des périodes i successives, correspondant à la période totale de calcul. On a ainsi obtenu, pour chacune des 6 hypothèses de comportement, un dommage cumulé $d_{\text{cumulé}}$, qui s'exprime par :

$$d_{\text{cumulé}} = \sum_{i=1}^n n_i(\theta_i) d_{\text{élémentaire}}(\theta_i) \quad (5.15)$$

5.4 Calculs des déformations maximales en extension

La première étape du calcul des dommages est le calcul des déformations sous un jumelage standard de référence chargé à 6.5 tonnes.

La structure de l'Ax utilisée pour les calculs est celle déterminée dans le chapitre 4. Elle est reprécisée sur le Tableau 5.3.

Tableau 5.3. Structure de chaussée considérée pour les calculs d'endommagement (dans le cas élastique, avec les valeurs de module à 15°C, 10 Hz).

Epaisseur (m)	Module à 15°C et 10 Hz (MPa)	coefficient de Poisson ν	Type de matériau
0.025	3000	0.350	BBTM
0.06	11000	0.350	BBME
0.07	14000	0.350	EME
0.08	50000	0.350	GB fissurée
0.30	14000	0.350	Grave ciment
0.50	150	0.350	Sol
Infinie	10000	0.350	Substratum de rigidité élevée

Les calculs sont effectués sous un jumelage standard de référence chargé à 65 kN (Figure 5.6)

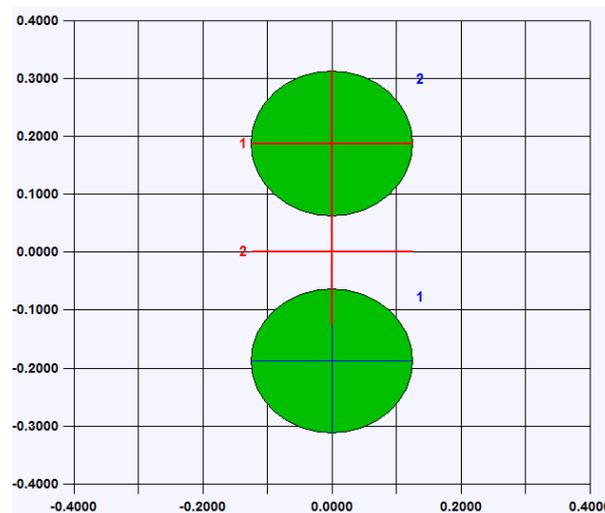


Figure 5.6. Schéma du chargement d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN (échelle en m, rayon des roues = 12.5 cm)

Les calculs des déformations longitudinales et transversales à la base de l'EME et du BBME sont ensuite effectués pour chacune des 6 hypothèses de comportement, soit en élasticité linéaire (avec ALIZE), soit en viscoélasticité (avec Viscoroute). Ces calculs ont été réalisés à 4 températures différentes (5, 15, 25 et 35°C). Les 6 hypothèses de comportement sont :

- Calcul en élasticité, interfaces collées
- Calcul en élasticité, interfaces glissantes

- Calcul en élasticité, interfaces couches minces élastiques
- Calcul en visco-élasticité, interfaces collées
- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces élastiques
- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces visco-élastiques

Les résultats de ces calculs de déformations sont présentés sur les Figure 5.7 à Figure 5.10 pour les calculs avec Alizé et sur les Figure 5.11 à Figure 5.14 pour les calculs avec Viscoroute. Des lois polynomiales ont été calées sur ces résultats, afin de pouvoir extrapoler les déformations calculées à toute la plage de températures considérée, soit de 4°C à 40°C (voir Figure 5.7 à Figure 5.14)

La déformation (longitudinale ou transversale) maximale en extension est ensuite utilisée pour réaliser le calcul de dommage. Dans notre cas, c'est toujours la déformation longitudinale maximale en extension qui est utilisée (les déformations transversales étant soit inférieures, soit en contraction).

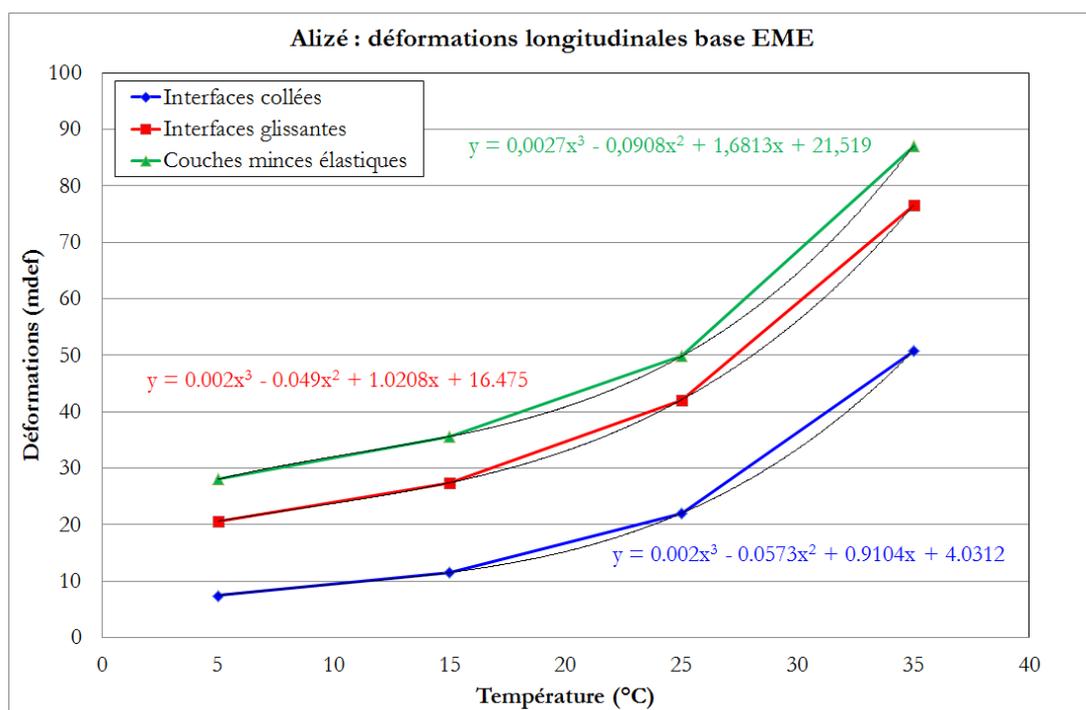


Figure 5.7. Variations des déformations longitudinales à la base de l'EME en fonction de la température, calculées avec Alizé, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

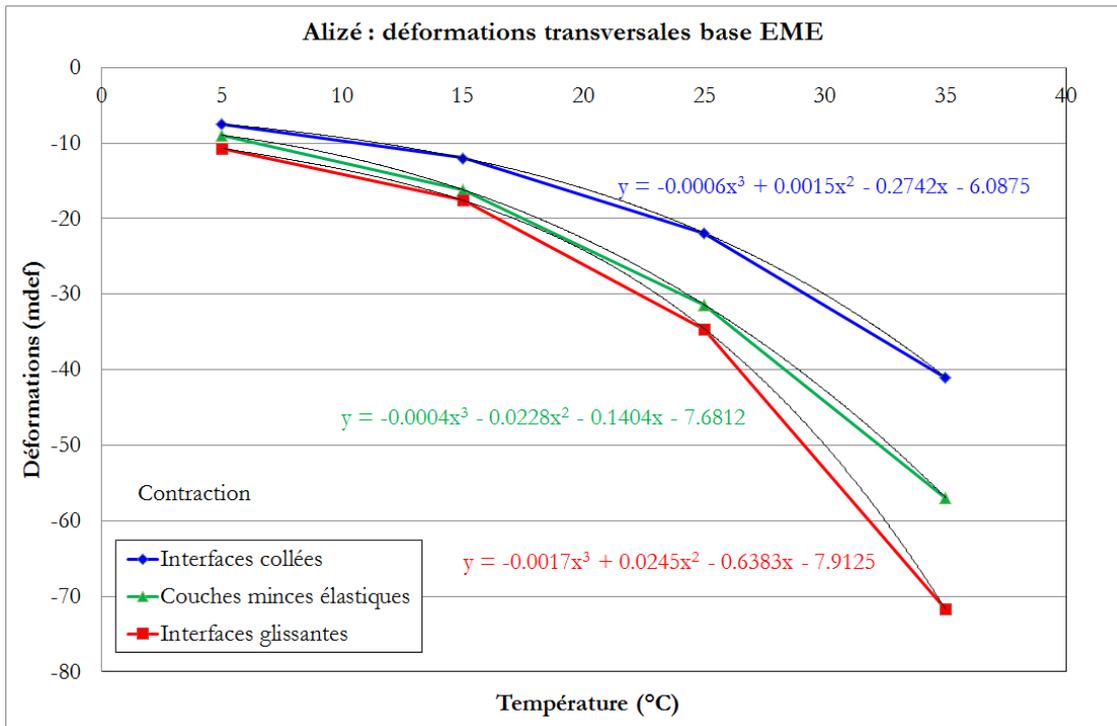


Figure 5.8. Variations des déformations transversales à la base de l'EME en fonction de la température, calculées avec Alizé, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

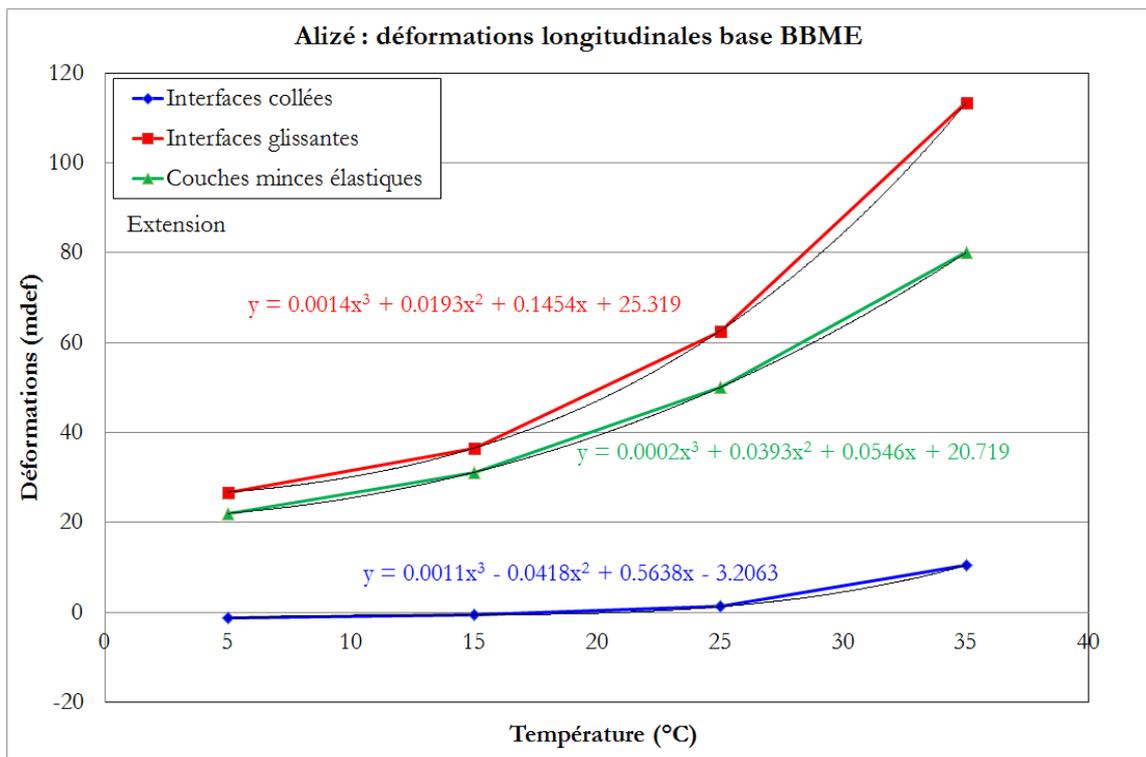


Figure 5.9. Variations des déformations longitudinales à la base du BBME en fonction de la température, calculées avec Alizé, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

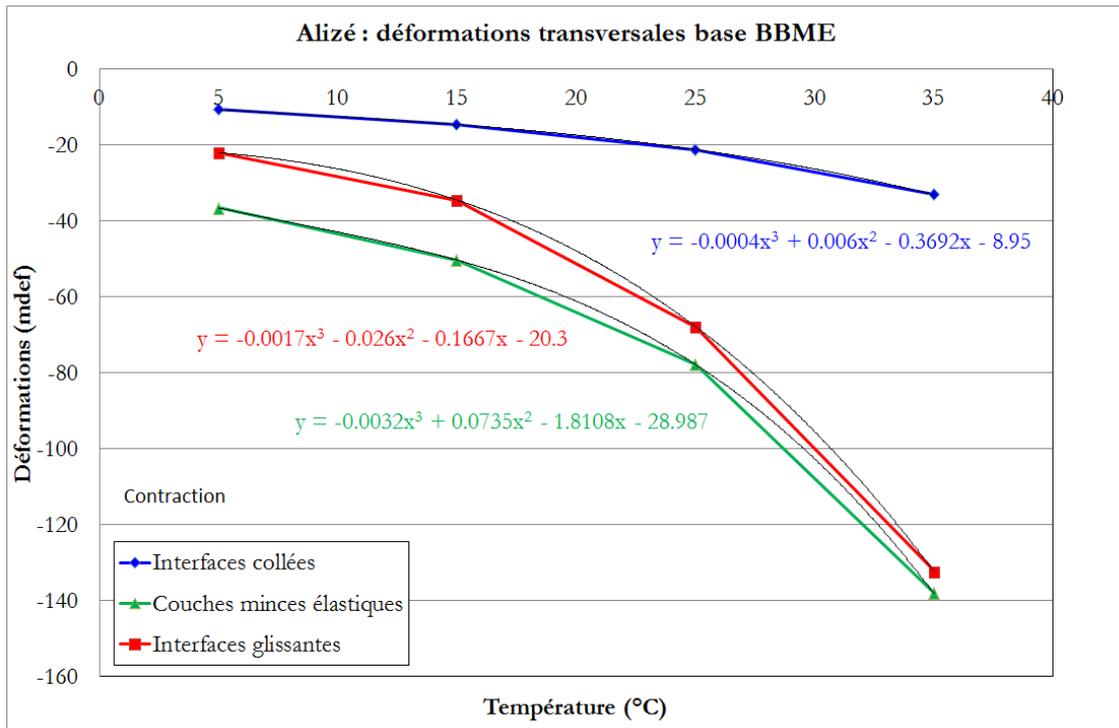


Figure 5.10. Variations des déformations transversales à la base du BBME en fonction de la température, calculées avec Alizé, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

Sur les Figure 5.7 et Figure 5.10, on note que l'hypothèse d'interface glissante conduit à des déformations plus faibles que l'interface décrite par une couche mince élastique. Ce résultat est dû au fait que l'on modélise 2 interfaces (entre le BBME et l'EME, puis entre l'EME et la GB), et qu'il peut y avoir une redistribution différente des déformations au niveau de ces 2 interfaces.

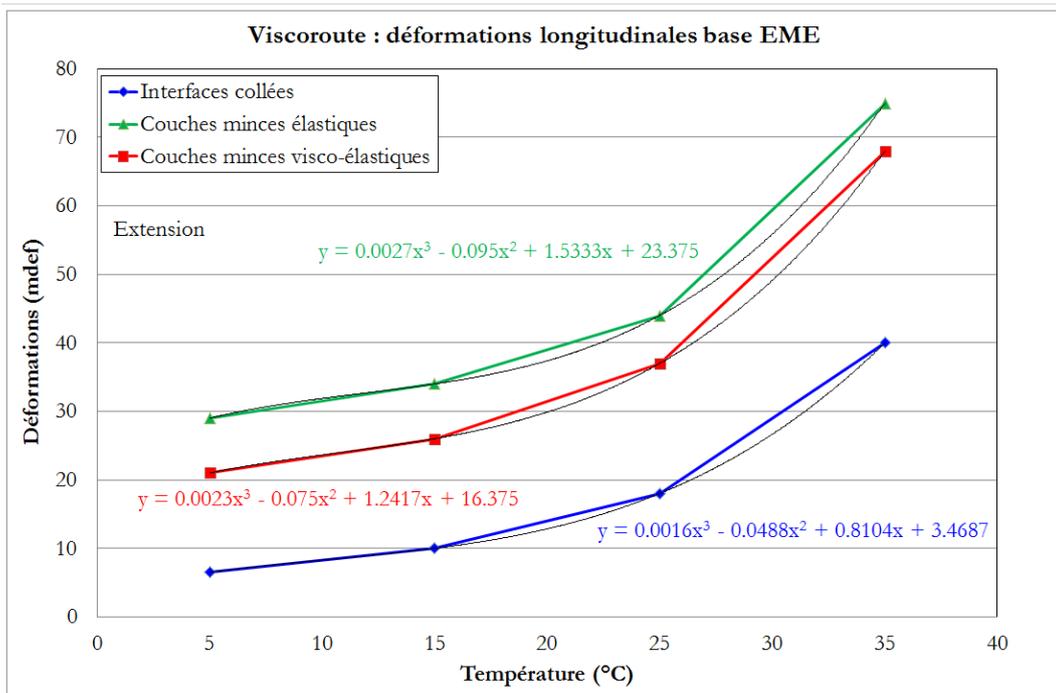


Figure 5.11. Variations des déformations longitudinales à la base de l'EME en fonction de la température, calculées avec Viscoroute, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

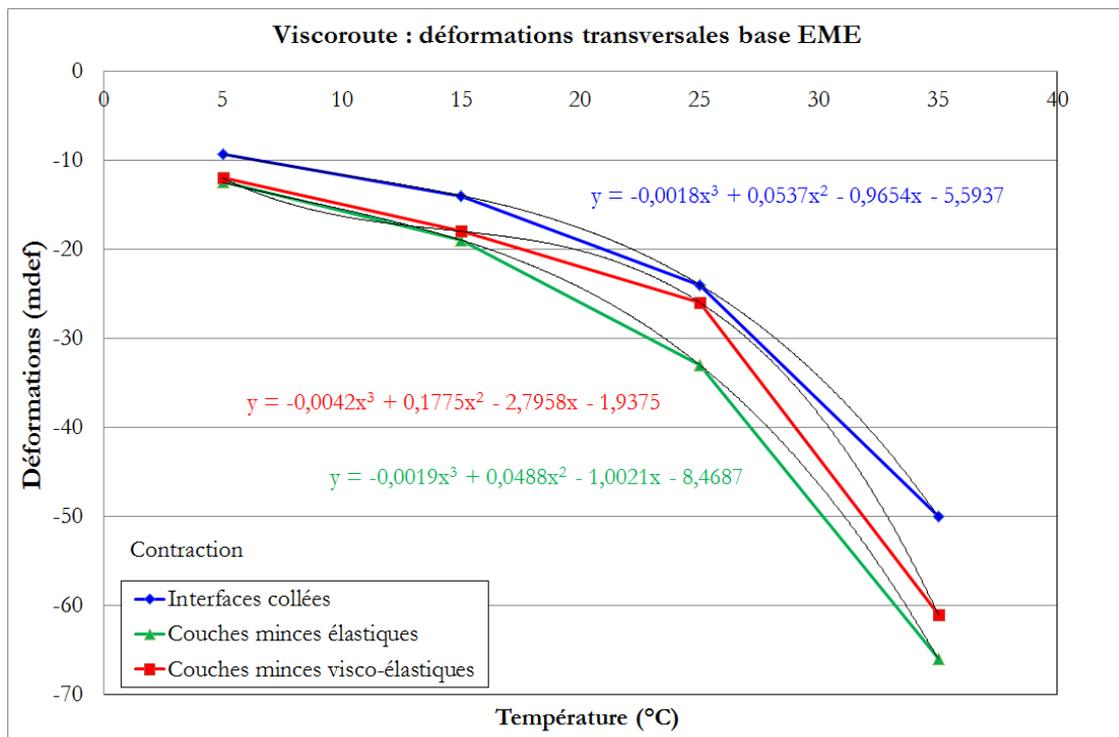


Figure 5.12. Variations des déformations transversales à la base de l'EME en fonction de la température, calculées avec Viscoroute, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

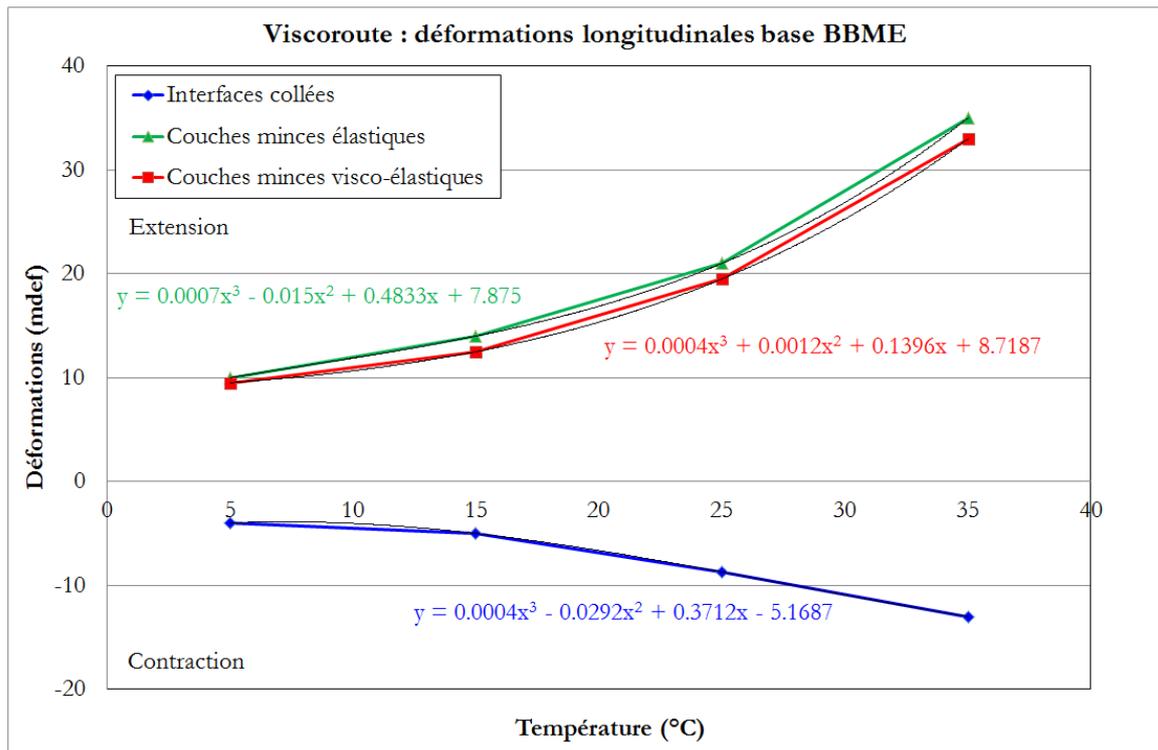


Figure 5.13. Variations des déformations longitudinales à la base du BBME en fonction de la température, calculées avec Viscoroute, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

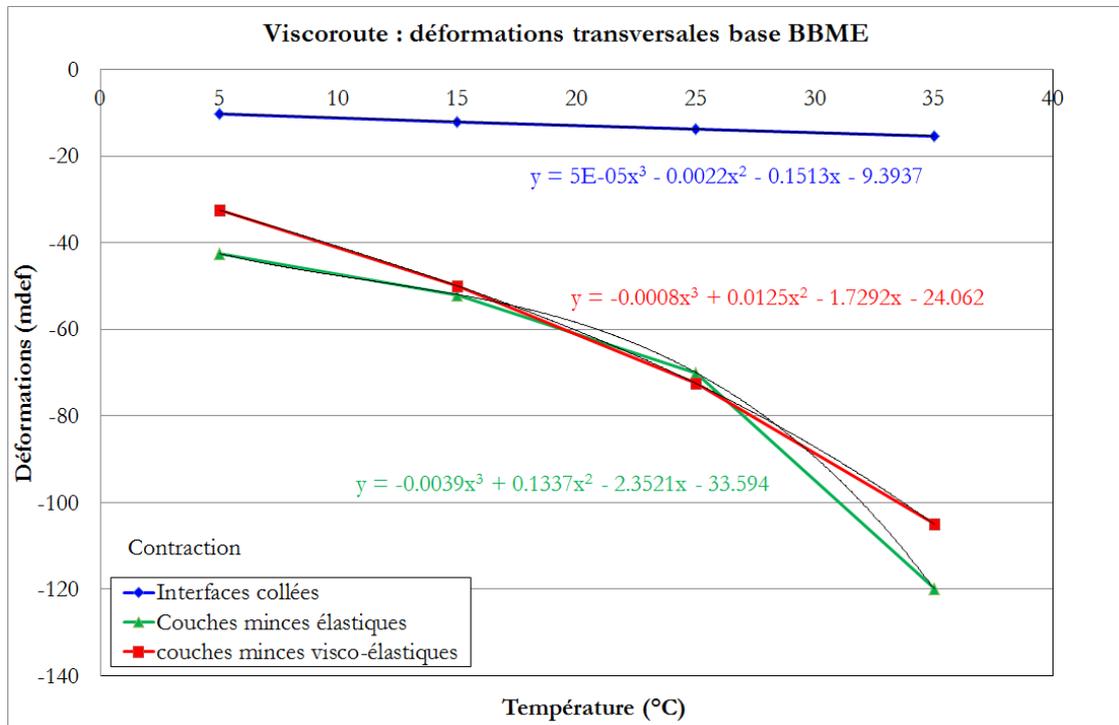


Figure 5.14. Variations des déformations transversales à la base du BBME en fonction de la température, calculées avec Viscoroute, sous le centre d'un jumelage standard de référence chargé à 65 kN.

5.5 Résultats des calculs d'endommagement – influence des hypothèses de calcul

Les calculs d'endommagement ont été réalisés suivant la démarche présentée précédemment, pour chacune des 6 hypothèses de comportement de la structure. A titre de comparaison, une 7^{ème} hypothèse de référence a été considérée, celle d'un calcul de dimensionnement classique, réalisé en élasticité linéaire, avec une température constante de 15°C (température équivalente) et des interfaces collées. Ce cas correspond au dimensionnement réalisé de façon forfaitaire, lorsqu'on ne connaît ni les distributions de température, ni les caractéristiques précises des matériaux et des interfaces (donc en l'absence de toute information issue du monitoring).

Dans un premier temps, on a déterminé, pour chaque hypothèse de comportement de la chaussée, l'évolution du dommage élémentaire en fonction de la température. Les courbes de dommage ainsi obtenues sont présentées sur la Figure 5.15 pour l'EME et la Figure 5.16 pour le BBME. On peut voir que les hypothèses de modélisation des interfaces ont une grande influence sur les valeurs de dommage élémentaire obtenues, et leur évolution avec la température.

Pour la couche d'EME, avec les interfaces collées, les 2 modèles de calcul, élastique et viscoélastique, conduisent à des valeurs de dommage très faibles à basse température (de l'ordre de 10^{-14} par cycle de chargement à 0°C), et qui augmentent de manière importante, et relativement linéaire avec la température, pour atteindre de valeurs de l'ordre de 10^{-10} par cycle à 35 °C. On notera qu'avec les interfaces collées, la différence entre calcul élastique et viscoélastique n'est pas très grande. Une augmentation très importante du dommage élémentaire est observée (en particulier à basse température) dès que les interfaces sont considérées glissantes, ou décrites par une couche mince élastique ou viscoélastique.

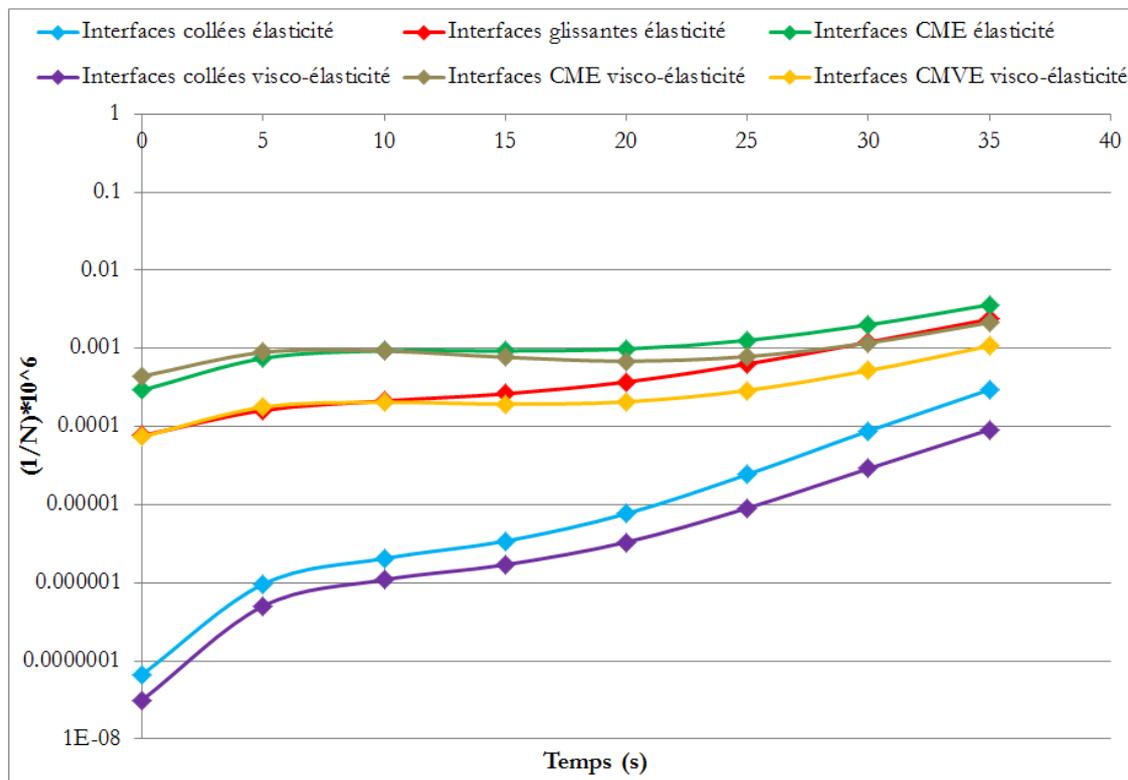


Figure 5.15. Evolution du dommage élémentaire à la base de la couche d'EME en fonction de la température pour les différents cas d'étude

Pour la couche de BBME, on constate que :

- Le dommage obtenu dans le calcul élastique avec interfaces collées est beaucoup plus petit qu'avec toutes les autres hypothèses. Ce calcul n'a été effectué qu'à partir à 20°C car la couche de BBME travaille en contraction dans les deux directions transversale et longitudinale en-dessous de 15°C pour le modèle élastique
- Pour une même température, les dommages obtenus dans les calculs élastiques (avec couche mince élastique ou interfaces glissantes) sont nettement plus importants que ceux obtenus avec les calculs viscoélastiques (avec interfaces élastiques ou visco-élastiques).
- Pour le modèle viscoélastique, lorsque les interfaces sont collées, la couche de BBME travaille en contraction dans les deux directions transversale et longitudinale pour toute la plage de température (de 0°C à 35°C), et l'endommagement est alors considéré nul.

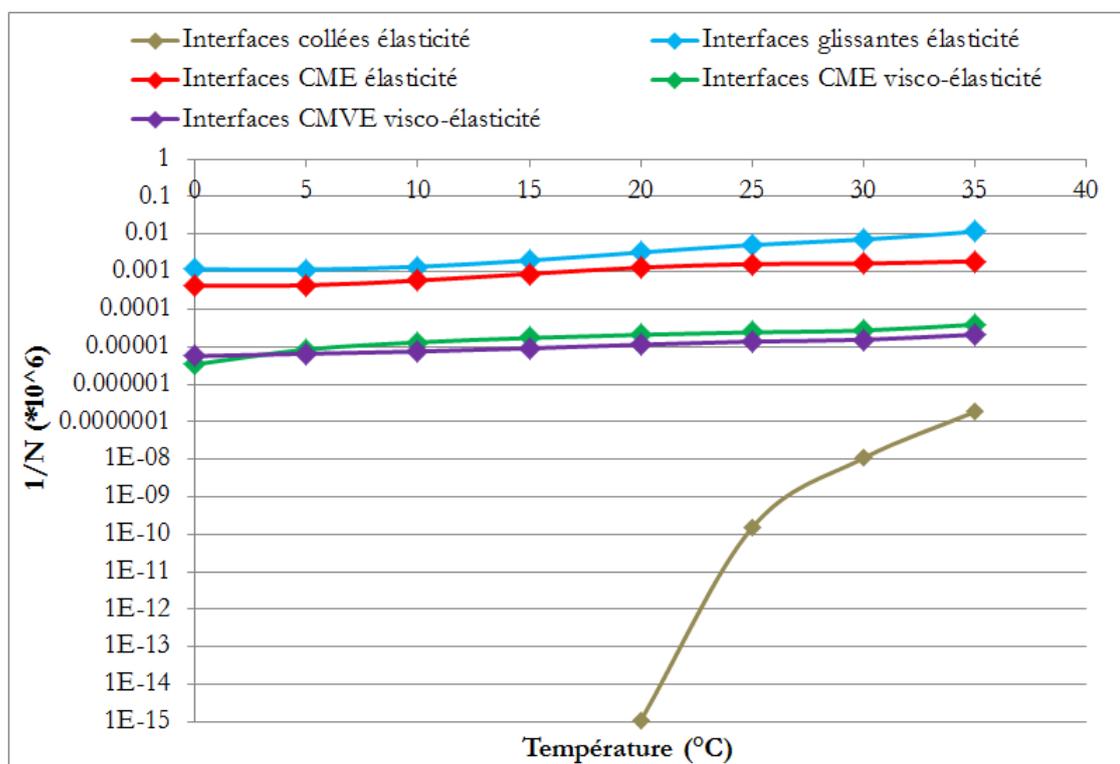


Figure 5.16. Evolution du dommage élémentaire à la base de la couche de BBME en fonction de la température pour les différents cas d'étude

Les résultats des calculs de dommages cumulés sont présentés ci-dessous. Les valeurs de dommage, calculées ici sur une période de 10 mois ont aussi été converties en durées de vie, en faisant l'hypothèse que la croissance du dommage sera linéaire avec le temps:

Endommagement de la couche d'EME :

Pour la couche d'EME, les calculs ALIZE conduisent aux résultats suivants :

- Calcul en élasticité, interfaces collées à T=15°C : D=0.000221 (durée de vie N = 3770 ans) – ce résultat constitue la référence, correspondant à l'application stricte de la méthode française de dimensionnement.

- Calcul en élasticité, interfaces collées, avec les températures réelles : $D= 0.00263$ (durée de vie $N = 317$ ans).
- Calcul en élasticité, interfaces glissantes : $D= 0.0395$ (durée de vie $N = 21$ ans)
- Calcul en élasticité, interfaces couches minces élastiques : $D= 0.0860$ (durée de vie $N = 9,7$ ans).

Tableau 5.4. Dommages cumulés à la base de la couche d'EME pour différents cas d'études avec le calcul en élasticité

Cas d'études	Dommages cumulés
Interfaces collées à $T=15^{\circ}\text{C}$	0.000221
Interfaces collées	0.00263
Interfaces glissantes	0.0395
Interfaces couches minces élastiques	0.0860

En ce qui concerne les calculs en élasticité linéaire, on peut donc conclure que :

- L'application de la méthode de dimensionnement française standard (avec interfaces collées, et température constante de 15°C) conduit, pour la couche d'EME, à un dommage calculé très faible, et correspond à une durée de vie « théorique » très grande, 3770 ans, sans doute surestimée (on parle ici de durée de vie « théorique », puisque c'est celle donnée par le dimensionnement, en considérant comme seul mode d'endommagement la fatigue due aux déformations de traction à la base des couches bitumineuses. Dans la réalité, d'autres modes de dégradation, non pris en compte dans le dimensionnement, peuvent apparaître.
- Lorsqu'on prend en compte les températures réelles (hypothèse 2), l'endommagement augmente, et la durée de vie passe à 317 ans (réduction d'un facteur 12 environ).
- L'ajout d'interfaces glissantes réduit encore de façon considérable la durée de vie, qui passe à environ 21 ans.
- Enfin, si on considère la modélisation des interfaces par une couche mince élastique, la durée de vie se réduit encore, et passe à environ 10 ans.

Ces résultats montrent l'influence considérable du comportement des interfaces sur la durée de vie de la chaussée, et donc l'importance de modéliser de façon réaliste ce comportement.

Les calculs avec Viscoroute conduisent aux résultats suivants :

- Calcul en visco-élasticité, interfaces collées : $D= 0.000866$ (durée de vie $N= 962$ ans).
- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces élastiques : $D= 0.0606$ (durée de vie $N= 13,8$ ans).

- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces visco-élastiques : $D= 0.0208$ (Durée de vie $N = 40$ ans).

Tableau 5.5. Dommages cumulés à la base de la couche d'EME pour différents cas d'études avec le calcul en visco-élasticité

Cas d'études	Dommages cumulés
Interfaces collées	0.000866
Interfaces couches minces élastiques	0.0606
Interfaces couches minces visco-élastiques	0.0208

Les calculs avec Viscoroute confirment l'influence considérable du comportement des interfaces sur la durée de vie de la couche d'EME. Pour une même condition d'interface, la viscoélasticité conduit à des durées de vie « théoriques » plus élevées que l'élasticité linéaire.

Enfin, l'hypothèse qui reproduit le mieux les déformations mesurées (couches de chaussées viscoélastiques, et interfaces viscoélastiques), conduit à une durée de vie de la couche d'EME d'environ 40 ans.

Endommagement de la couche de BBME

Pour la couche de BBME, les calculs conduisent aux résultats suivants :

- Calcul en élasticité, interfaces collées : $D= 0.00003$ (durée de vie $N = 27778$ ans !).
- Calcul en élasticité, interfaces glissantes : $D= 0.490$ (durée de vie $N = 1,7$ ans).
- Calcul en élasticité, interfaces couches minces élastiques : $D= 0,100$ (durée de vie $N = 8,3$ ans)
- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces élastiques : $D= 0.00207$ (durée de vie $N = 403$ ans).
- Calcul en visco-élasticité, interfaces couches minces visco-élastiques : $D= 0.00110$ (durée de vie $N = 758$ ans).

Tableau 5.6. Dommages cumulés à la base de la couche de BBME pour différents cas d'études avec le calcul en élasticité

Cas d'études	Dommages cumulés
Interfaces collées	0.00003
Interfaces glissantes	0.490
Interfaces couches minces élastiques	0.100

Tableau 5.7. Dommages cumulés à la base de la couche de BBME pour différents cas d'études avec le calcul en visco-élasticité

Cas d'études	Dommages cumulés
Interfaces couches minces élastiques	0.00207
Interfaces couches minces visco-élastiques	0.00110

Il est à noter que deux cas conduisent à des contraintes toujours en contraction pour la couche de BBME : le calcul élastique à 15°C, avec interfaces collées, et le calcul viscoélastique avec interfaces collées. Les calculs d'endommagement n'ont donc pas été faits pour ces deux cas.

Pour la couche de BBME, qui est la couche de surface, on constate que le rôle du collage des interfaces est encore plus important que pour la couche d'EME. En effet, avec les calculs ALIZE, l'hypothèse d'interfaces collées conduit à une durée de vie quasi-infinie. En revanche, dès que l'on suppose les interfaces décollées, la durée de vie devient très faible (1,7 ans). Elle est un peu plus grande lorsque l'interface est décrite par une couche mince élastique (8,3 ans).

Enfin, pour le BBME, la prise en compte de la viscoélasticité change largement les résultats : En effet, avec le modèle viscoélastique, les durées de vie sont grandes (plus de 400 ans), même dans le cas d'interfaces modélisées par une couche mince élastique ou viscoélastique.

En conclusion, il faut d'abord souligner que l'objectif principal de ces calculs n'est pas de déterminer une valeur de dommages réelle, mais surtout de comparer les résultats obtenus avec les différentes hypothèses, et de montrer l'incidence du comportement des interfaces sur la durée de vie de la chaussée. Il faut aussi préciser que le calcul n'a été fait que sur une période limitée, de 10 mois. La température moyenne à la base de l'EME sur les 10 mois de calcul est de 19.8°C.

Les principales conclusions que l'on peut retenir de ces calculs d'endommagement sont les suivants:

- Pour la structure de chaussée de l'autoroute Ax, le dommage le plus faible est obtenu pour le cas « élasticité, interface collée à 15°C ». Ces hypothèses, généralement utilisées pour le dimensionnement des chaussées, conduisent à une durée de vie très grande.

- Le monitoring de la chaussée a montré que son comportement réel est assez différent des hypothèses de la méthode de dimensionnement. Il a montré que l'endommagement de la chaussée dépend très fortement:
 - Des variations réelles de température dans la structure. On a vu que le calcul avec les vraies températures conduit à un dommage environ 12 fois plus élevé que l'approche de dimensionnement française classique.
 - Du comportement des interfaces. Le monitoring a montré que ces interfaces ne peuvent pas être considérées comme complètement collées, mais qu'elles présentent un certain degré de glissement, notamment à haute température. En modélisant ces interfaces par une couche mince, élastique ou viscoélastique on a montré que cela conduit à une réduction considérable de la durée de vie en fatigue, pour l'EME comme pour le BBME.

Ces résultats mettent en évidence certaines limites de la méthode française actuelle de dimensionnement des chaussées, pour l'évaluation de chaussées existantes, et suggèrent deux pistes d'amélioration:

- La prise en compte des variations climatiques (et en particulier des températures) réelles
- L'amélioration de la description du comportement des interfaces entre couches de chaussées.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a cherché à exploiter les résultats du monitoring de la section instrumentée de l'autoroute Ax (en particulier les mesures des jauges et des sondes de température) pour évaluer son endommagement sous l'effet du trafic. Pour cela, une démarche de calcul de l'endommagement, basée sur les principes de la méthode française de dimensionnement a été proposée. Plusieurs simplifications ont été faites dans l'application de cette démarche :

- En l'absence de mesure des charges, le trafic a été décrit par le nombre de poids lourds, et converti en nombre d'essieux équivalents en utilisant un coefficient d'agressivité moyen.
- Les calculs ont été réalisés en utilisant pour l'EME et le BBME des lois de fatigue « standard », proposées dans la méthode de dimensionnement pour chaque classe de matériaux bitumineux.

Les calculs d'endommagement ont été réalisés en prenant en compte les variations de température issues du monitoring de la chaussée, et les différentes hypothèses de comportement proposées dans le chapitre 4 (comportement élastique ou viscoélastique, différentes hypothèses pour les interfaces). Les endommagements obtenus avec ces différents modèles ont été comparés.

Les calculs de dommages ont montré que les hypothèses de température et de comportement des interfaces ont une très grande influence sur l'endommagement calculé de la chaussée. En particulier, en prenant en compte les résultats issus du monitoring, qui ont montré que les interfaces peuvent être décrites par des couches minces (élastiques ou viscoélastiques), dont le module est proche de celui d'un bitume, on a montré que cette hypothèse conduit à des durées de vie bien plus faibles que l'hypothèse d'interfaces collées.

Les résultats de ce chapitre soulignent donc l'intérêt d'un monitoring, tel que celui réalisé sur l'autoroute Ax, pour évaluer de façon plus précise l'endommagement d'une structure de chaussée. Ils suggèrent aussi que la méthode de dimensionnement pourrait être améliorée par une meilleure prise en compte des variations de température, et des conditions d'interfaces.

Chapitre 6 - Analyse des mesures de géophone

Sommaire

6	Chapitre 6 - Analyse des mesures de géophone.....	193
6.1	Introduction.....	194
6.2	Caractéristiques des géophones utilisés et essais en laboratoire.....	194
6.2.1	Caractéristiques intrinsèques des géophones.....	195
6.2.2	Essais en laboratoire.....	196
6.3	Exploitation des mesures des géophones.....	200
6.3.1	Exemple d'un signal de géophone.....	200
6.3.2	Etude de la valeur moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des géophones.....	201
6.3.3	Etude de la position latérale des géophones.....	202
6.3.4	Etude de la profondeur des géophones.....	203
6.3.5	Caractérisation des silhouettes des poids lourds.....	204
6.3.6	Détermination de la vitesse des poids lourds.....	208
6.4	Estimation de la déflexion.....	210
6.4.1	Méthode de correction des signaux des géophones.....	210
6.4.2	Validation de la méthode de correction des mesures des géophones à partir d'essais sur le manège de fatigue.....	217
6.4.3	Applications aux mesures sur l'Ax.....	233
6.5	Conclusion.....	236

6.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des mesures des géophones installés sur le site instrumenté de l'Ax.

Après un rappel de l'instrumentation réalisée, le chapitre présente d'abord les caractéristiques des géophones utilisés, ainsi qu'une étude réalisée en laboratoire, pour évaluer leurs performances, et en particulier leur réponse en fréquence. Ensuite, deux exploitations des mesures des géophones sont présentées:

- La première exploitation concerne l'identification des silhouettes des poids lourds passant sur la chaussée, et la détermination de leurs vitesses. Celle-ci repose sur une analyse directe des signaux de mesure enregistrés.
- La seconde exploitation concerne l'utilisation des mesures des géophones pour l'évaluation de la déflexion de la chaussée. Cette deuxième exploitation nécessite d'intégrer les mesures de vitesse de déplacement délivrées par les géophones, pour remonter aux valeurs de déplacement vertical. Pour cela, une procédure de traitement et d'intégration des mesures de géophones a été proposée. Cette procédure a ensuite été validée par comparaison avec des mesures réalisées sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR, sous des conditions de chargement contrôlées.

La dernière partie du chapitre présente des applications des mesures des géophones au suivi de l'évolution des déflexions sur la section expérimentale de l'Ax en fonction du temps, et des variations de température.

6.2 Caractéristiques des géophones utilisés et essais en laboratoire

Les géophones constituent, après les jauges, le second type de capteur principal utilisé sur le site instrumenté de l'Ax. Le type de géophones, et leur implantation, ont été choisis en fonction des résultats obtenus sur l'A10, où l'IFSTTAR a utilisé pour la première fois ce type d'instrumentation. Les résultats obtenus sur l'A10 (présentés dans le chapitre 3), ont montré que les géophones utilisés présentaient une résolution satisfaisante, pour suivre les signaux des poids lourds, et permettaient de bien distinguer les différentes silhouettes de poids lourds. La comparaison des signaux des 2 géophones installés a aussi montré la bonne répétabilité de leurs mesures.

Il a été décidé d'exploiter plus en détail les mesures des géophones sur l'Ax, et d'essayer de mettre au point une procédure permettant d'utiliser les géophones pour l'estimation des déflexions. Pour cela, afin de bien comprendre l'influence de la position des géophones sur leur réponse, 8 géophones ont été installés sur le site de l'Ax:

- 1 géophone (G7) à la base de la couche de GB.
- 4 géophones (G1, G2, G3, G4) à la base de la couche d'EME. Les géophones G1, G3 et G4 ont été placés dans le sens latéral (espacés d'environ 20 cm) afin d'étudier l'effet de balayage sur les mesures des capteurs. Deux géophones G1 et G2 ont été placés à 1 mètre de distance dans le sens longitudinal.
- 2 géophones (G5, G6) à la base de la couche de BBME (avec 1 mètre d'écart dans le sens longitudinal).

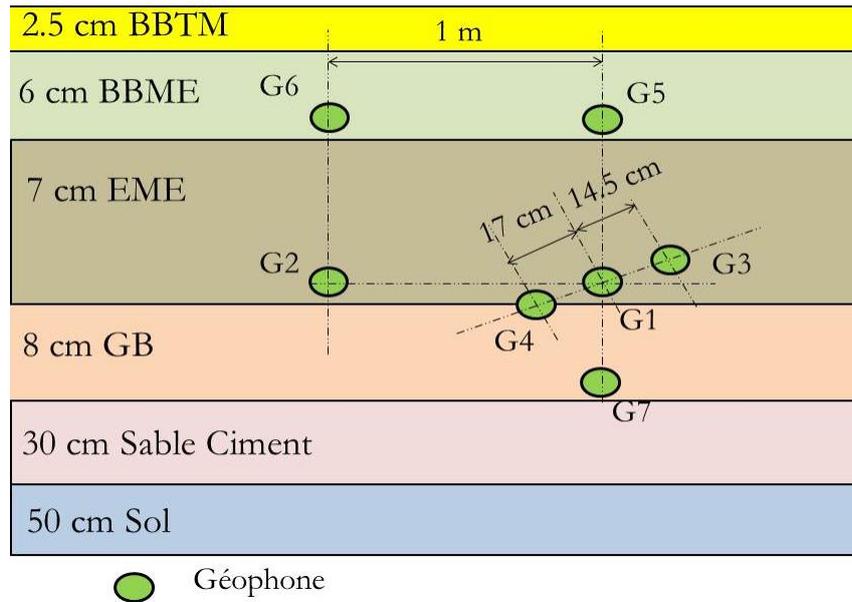


Figure 6.1. Plan d'instrumentation des géophones sur l'Ax

6.2.1 Caractéristiques intrinsèques des géophones

Parmi les différents types de géophones présentés dans le Tableau 1.2 du chapitre I, les géophones utilisés sur le site expérimental de l'Ax sont ceux de type GS11D. Les géophones utilisés sont de marque Geospace modèle GS-11D associés à une résistance de fermeture de $47 \text{ k}\Omega$, de sorte à ce que la fréquence propre soit calée sur une fréquence de 4.5 Hz , avec un amortissement relatif de « l'overshoot » (excédent de la réponse à la fréquence propre). Cela conduit au calcul d'un coefficient de sensibilité, à partir d'une analyse effectuée sur la plage $30\text{-}60 \text{ Hz}$, réalisée au sein du laboratoire SII-COSYS, égal à 89 V/ms^{-1} soit $0.011 \text{ ms}^{-1}/\text{V}$. Ce coefficient de sensibilité n'est pas très loin du coefficient donné par le fabricant (94.4 V/ms^{-1}). La courbe de réponse théorique du capteur, dans une telle configuration, donnée par le fabricant, est présentée sur la Figure 6.2:

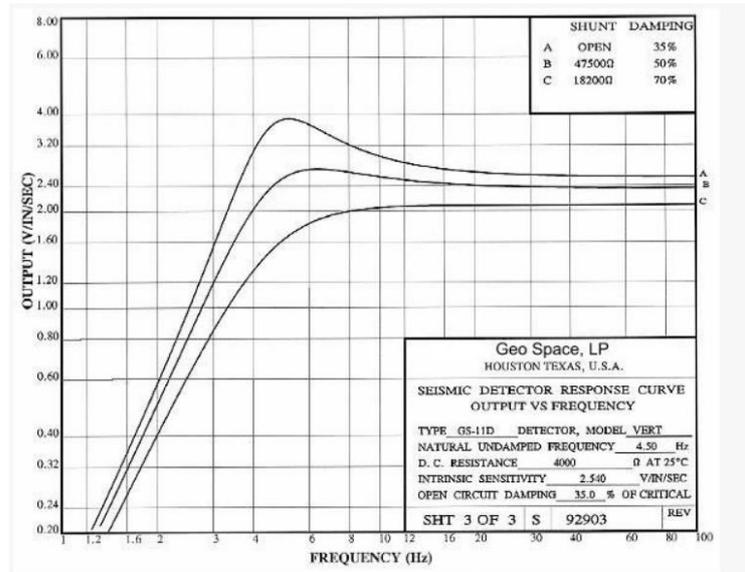


Figure 6.2. Réponse fréquentielle donnée par le fabricant (A, B, C désignent trois types de géophones du même fabricant Geo Space avec différentes valeurs de la résistance de fermeture et du pourcentage d'amortissement)

On note que cette réponse spectrale s'apparente à un filtre passe-haut du second ordre (40dB/décade) avec une fréquence de coupure $F_{\text{coupure}}=4.5$ Hz. Cela signifie donc que le géophone ne peut intrinsèquement pas restituer correctement les basses fréquences ($[0-4.5\text{Hz}]$) (le signal est atténué dans cette plage de fréquence). Outre ces propriétés techniques, ce modèle de géophone présente l'intérêt d'être peu onéreux et relativement robuste (d'où un potentiel d'utilisation intéressant pour notre cadre d'application).

6.2.2 Essais en laboratoire

6.2.2.1 Objectifs des essais

Avant l'installation des géophones dans la chaussée, il a été décidé d'évaluer leurs caractéristiques métrologiques en laboratoire, et notamment de préciser leur réponse pour les conditions de sollicitations (fréquence, amplitude), attendues dans la chaussée. Etudier le comportement d'un géophone, c'est avant tout caractériser sa réponse en fonction des fréquences d'excitation (étude fréquentielle) en régime dynamique. Pour ces essais effectués en régime dynamique, nous avons cherché à tester les capteurs dans la gamme de fréquences « utile » par rapport au cadre d'utilisation, c'est-à-dire pour les fréquences d'excitation correspondant aux passages des véhicules sur la chaussée.

6.2.2.2 Protocole expérimental

Les essais ont été réalisés sur une table vibrante du laboratoire SII de l'IFSTTAR. Ce dispositif permet de reproduire des déplacements verticaux correspondant à des signaux d'excitation préalablement définis au moyen d'un logiciel spécifique. Il fonctionne en circuit fermé: un signal de consigne électronique est converti puis transmis mécaniquement à l'actionneur du vérin de la table vibrante; le déplacement de cette dernière est alors enregistré par un capteur de contrôle (capteur de déplacement du vérin) qui renvoie l'information vers le système de commande. Grâce à ce système, il est possible de générer une grande variété de déplacements contrôlés, à condition que l'amplitude de ces derniers n'excède pas la course maximale du vérin (± 50 mm). Les essais ont été réalisés en plaçant sur la table vibrante le

géophone étudié. Ce géophone (identique à ceux mis en place in situ), est de type GS11D 4000, avec une résistance de fermeture de 47 k Ω . Un capteur de déplacement à laser Keyence a été utilisé comme capteur de référence, pour mesurer le déplacement vertical du banc de vibration, et évaluer la réponse du géophone. Le montage d'essai utilisé est représenté sur la Figure 6.3.

Laser de Keyence



Géophone

Table vibrante

Figure 6.3. Vue du montage utilisé pour les essais sur le banc de vibration

Pour l'évaluation de la fonction de transfert du géophone, la table vibrante a été soumise à des excitations sinusoïdales. Les essais ont été réalisés pour plusieurs niveaux de déplacement imposé (0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm). Pour chaque niveau, on a fait varier la fréquence d'excitation entre 1 Hz à 20 Hz, ce qui correspond à la gamme de fréquences « usuelle » des passages des véhicules sur la chaussée.

6.2.2.3 Exploitation des résultats

Les essais ont consisté à comparer, pour les différents niveaux de sollicitation, la réponse du géophone (intégrée pour obtenir un déplacement) avec la réponse du capteur laser, prise comme référence. Un exemple de résultats de mesure obtenus avec le géophone et le capteur laser Keyence, pour une sollicitation sinusoïdale de 0.5 mm d'amplitude et une fréquence de 3 Hz est présenté sur la Figure 6.4.

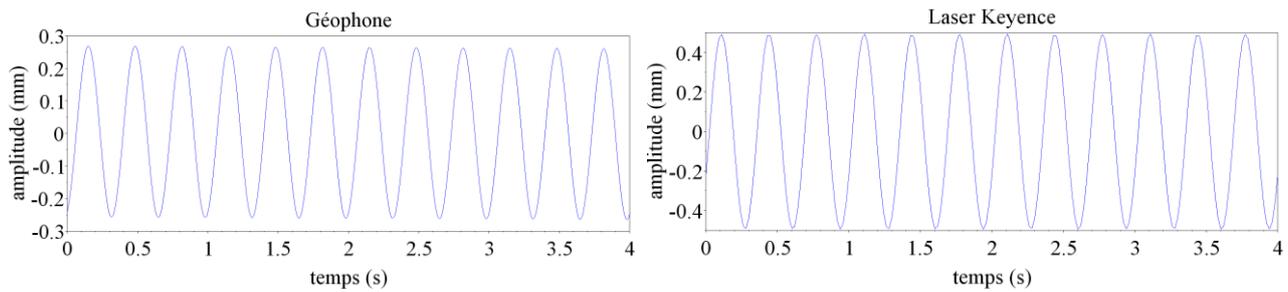


Figure 6.4. Comparaison du signal intégré du géophone et du signal du capteur laser Keyence sous une sollicitation sinusoïdale d'amplitude 0.5 mm à 3 Hz

On constate que la forme du signal du géophone est très proche de celle du capteur laser sous une excitation sinusoïdale. L'amplitude du signal du capteur laser Keyence est de 0.5 mm. L'amplitude du signal intégré du géophone est de 0.25 mm. Une perte d'amplitude de 0.25 mm est donc observée pour le signal du géophone à une fréquence de 3 Hz. La Figure 6.5 présente le rapport de l'amplitude des signaux du géophone et du capteur laser, pour une sollicitation sinusoïdale d'amplitude 0.5 mm et pour la plage de fréquences [1Hz-20Hz], représentative du trafic routier.

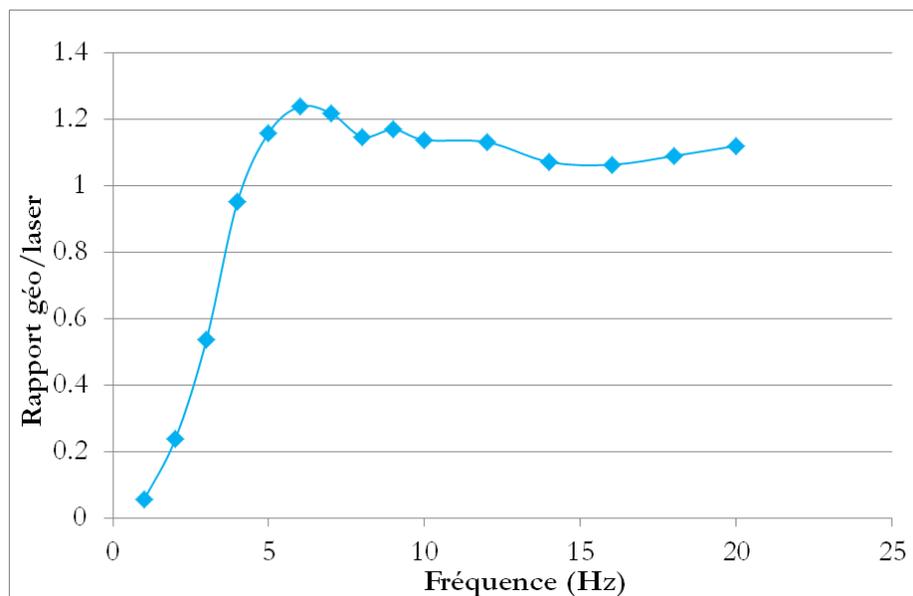


Figure 6.5. Rapport de l'amplitude des signaux du géophone et du capteur laser Keyence sous une sollicitation sinusoïdale (amplitude de 0.5 mm, plage de fréquences [1Hz 20 Hz])

On constate que cette courbe est fortement non linéaire à basses fréquences. L'amplitude de la réponse du géophone diminue fortement pour des fréquences comprises entre 1 Hz et 4.5 Hz environ. Cette perte est d'autant plus importante que la fréquence de sollicitation est faible. Autour de 4.5 Hz, le rapport entre l'amplitude des signaux du géophone et du capteur laser Keyence passe par une valeur maximale d'environ 1,2. Au-delà de 4,5 Hz, le rapport d'amplitude devient relativement constant, et vaut environ 1,1.

Les mêmes essais, à déplacement sinusoïdal imposé, ont été réalisés avec des amplitudes de sollicitation de 0.25 mm, 0.5 mm et 1 mm, et pour la même plage de fréquences [1Hz 20Hz]. Les rapports des amplitudes des signaux des capteurs pour les trois niveaux de sollicitation sont présentés sur la Figure 6.6.

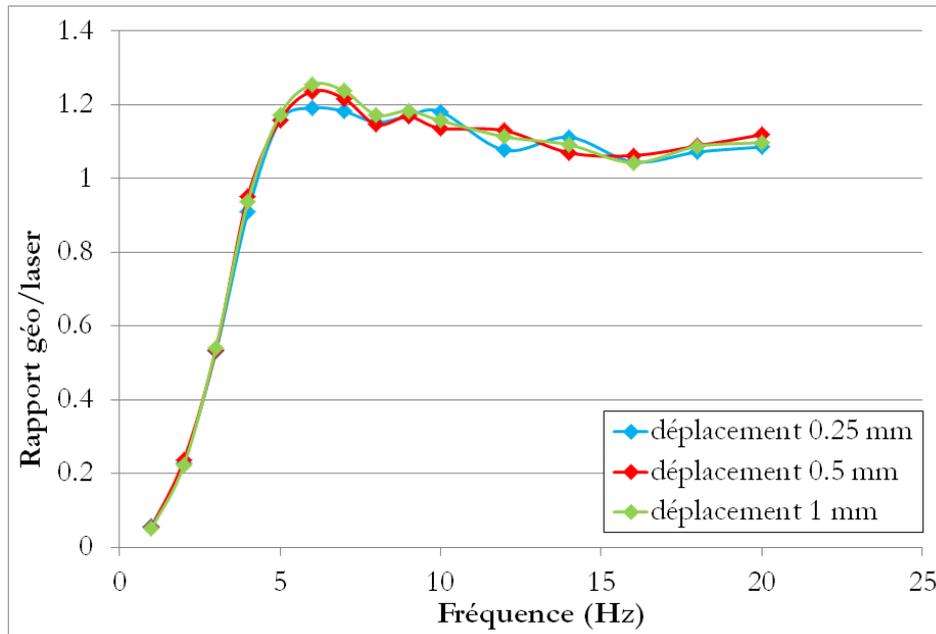


Figure 6.6. Rapports des amplitudes des signaux du géophone et du capteur laser Keyence sous trois niveaux de sollicitations sinusoïdales (amplitudes de 0.25 mm; 0.5 mm et 1 mm).

On observe que quelle que soit l'amplitude de déplacement appliquée (0.25 mm; 0.5 mm ou 1 mm), la réponse en fréquence du géophone est similaire. Une forte atténuation de l'amplitude du signal du géophone est obtenue pour les basses fréquences (de 1Hz à 4.5Hz environ). Au-delà de 4.5Hz, le rapport entre l'amplitude du signal du géophone, et l'amplitude de référence donnée par le capteur laser se stabilise, et tend vers une valeur de 1,1.

6.2.2.4 Conclusion

L'essai sur la table vibrante a permis d'évaluer les caractéristiques métrologiques des géophones, avant qu'ils ne soient intégrés dans leur environnement de travail. L'intérêt de cet essai en laboratoire consiste à pouvoir évaluer les caractéristiques métrologiques des capteurs de déplacement (géophone, accéléromètre) en laboratoire, sous des conditions contrôlées, et en particulier leurs réponses spectrales en régime dynamique. L'étude de la fonction de transfert du géophone a ainsi révélé que sa réponse dans la plage des fréquences utiles (de 1 Hz à 20 Hz) correspond aux caractéristiques fournies par le fabricant, avec un coefficient de sensibilité calculé (89 V/ms^{-1}) du même ordre de grandeur que le coefficient fourni par le fabricant (94.4 V/ms^{-1}). Cette fonction de transfert conduit toutefois à une forte atténuation de l'amplitude en-dessous de 4,5 Hz, qui nécessitera une correction, si l'on souhaite exploiter des mesures à basse fréquence. Cet essai permet donc de valider les caractéristiques intrinsèques des géophones utilisés pour l'instrumentation des chaussées A10 et Ax présentées dans ce rapport.

Dans cette étude en laboratoire, d'autres paramètres pouvant influencer la réponse des géophones n'ont pas pu être étudiés, comme par exemple l'effet de la température ambiante. La stabilité à long terme de la réponse des géophones, et leur durée de vie, qui sont importants pour le fonctionnement sur site, n'ont également pas été étudiés.

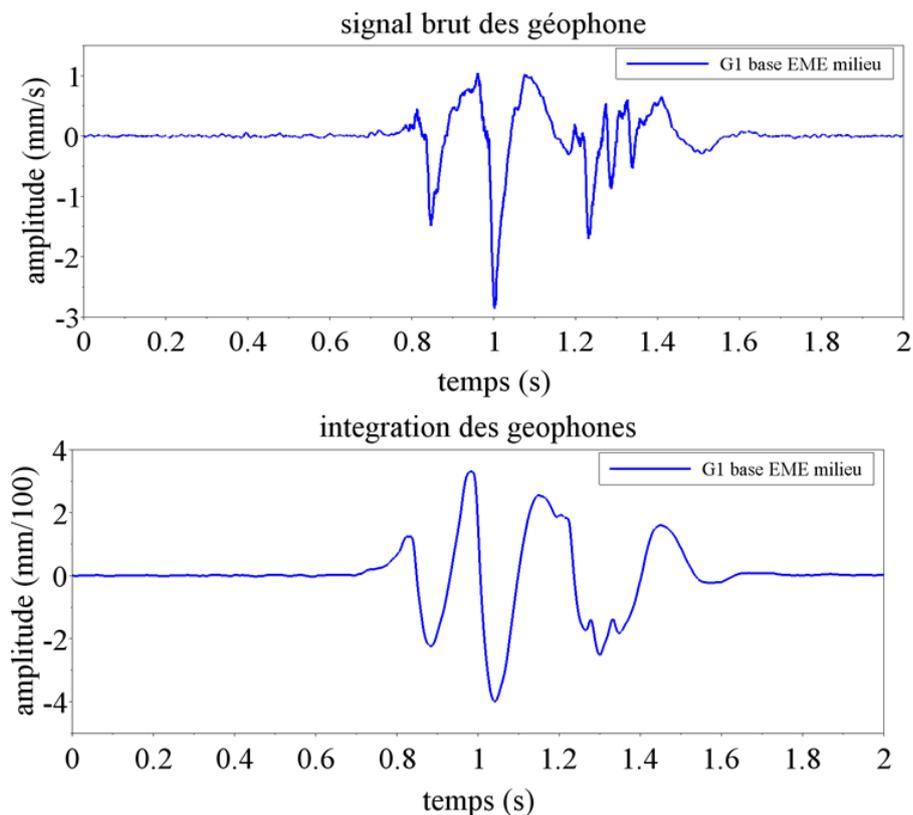
6.3 Exploitation des mesures des géophones

6.3.1 Exemple d'un signal de géophone

Comme sur l'A10, l'acquisition des mesures des géophones a été faite par un déclenchement sur seuil de façon à enregistrer environ une centaine de poids lourds par jour. Avec ce seuil, environ 100 à 150 fichiers ont été enregistrés chaque jour pour chaque géophone. L'intégration des signaux des géophones est obtenue par la méthode classique des rectangles (Paragraphe 3.5.2 – Chapitre 3).

La Figure 6.7 présente un exemple d'un signal brut et intégré du géophone G1 placé à la base de la couche d'EME. Ce signal a été enregistré le 01 novembre 2015 à 10h44min02s. On a constaté que :

- Après intégration, cinq pics de déplacement vers le bas ont été clairement observés. On peut en conclure que le signal correspond au passage d'un poids lourd à 5 essieux (semi-remorque de type T2S3 avec 3 essieux sur la remorque).
- L'amplitude maximale de déplacement vertical, crête-à-crête, est de 7.5 mm/100, et correspond au passage du deuxième essieu, qui est bien l'essieu le plus chargé sur un poids lourds T2S3 (essieu moteur).



A partir de ces résultats, il est possible de conclure que :

- La réponse des géophones est très sensible aux faibles déplacements produits par le passage des poids lourds (de l'ordre de 7.5 mm/100 à 15°C)
- Le signal intégré des géophones présente des oscillations vers le haut. Ces oscillations qui indiquent un soulèvement de la chaussée ne sont pas réalistes (le bassin de déflexion est toujours dirigé vers le bas et ne montre pas de soulèvement). Une méthode de correction des signaux des géophones sera présentée dans le paragraphe 6.4 de ce chapitre.

6.3.2 Etude de la valeur moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des géophones

Une première méthode d'exploitation possible des mesures des géophones consiste à étudier l'amplitude crête-à-crête des mesures intégrées, comme cela a déjà été fait pour le site de l'A10. Cette amplitude est définie par l'écart entre la valeur maximale et la valeur minimale des signaux intégrés des géophones. La Figure 6.8 présente la moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des différents géophones installés sur le site de l'Ax, pendant la période de monitoring. La position des géophones dans les couches de la chaussée a été présentée dans le paragraphe 2.3.3 du chapitre 2. Les mesures sont présentées à partir du mois de mars 2015 jusqu'au mois de mai 2016, la période où les géophones fonctionnent correctement. On constate ainsi que les mesures des signaux intégrés des géophones sont relativement stables pendant la première période de monitoring, avant l'interruption, qui va jusqu'en décembre 2015. Après l'interruption, les valeurs sont un peu plus élevées en avril-mai 2016. L'amplitude crête-à-crête des géophones varie entre 7 et 10 mm/100. L'écart-type des mesures est inférieur à 1 mm/100 et ne varie pas beaucoup d'un mois à l'autre. Par rapport aux mesures des jauges, les mesures des géophones sont donc moins sensibles aux variations de la température.

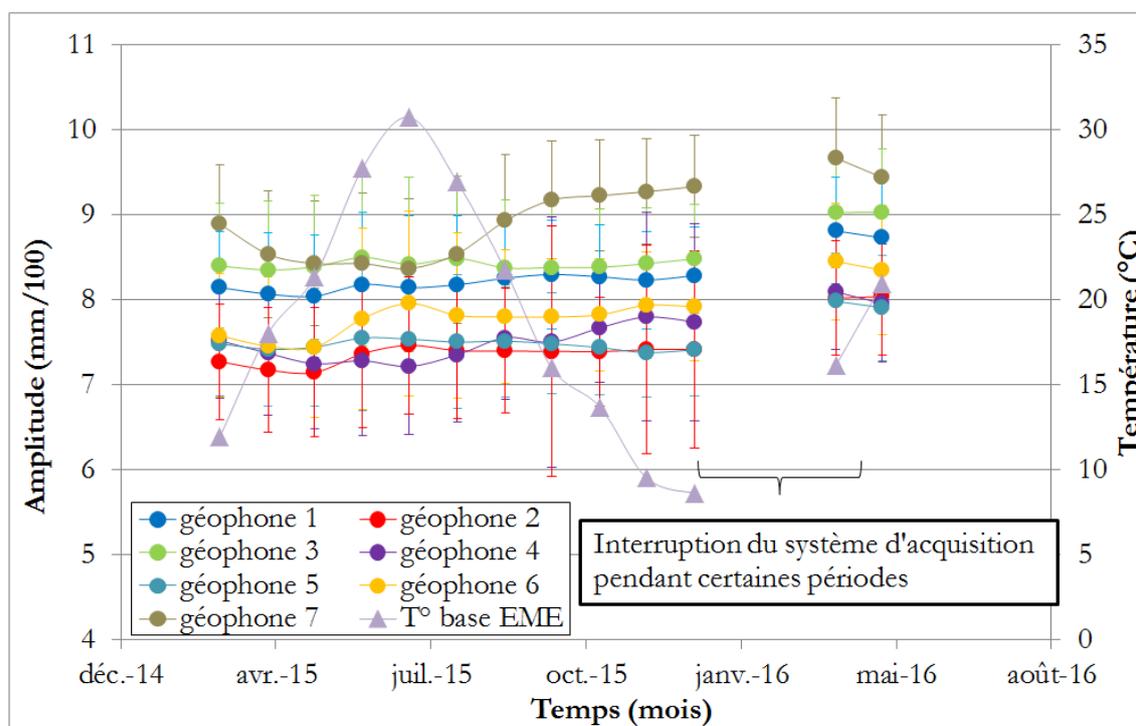


Figure 6.8. Amplitude crête-à-crête des signaux intégrés des géophones pendant la période de monitoring

6.3.3 Etude de la position latérale des géophones

Sur l'Ax, des géophones ont été placés dans le sens transversal de la bande de roulement, afin de pouvoir étudier le balayage des poids-lourds.

La Figure 6.10 présente la valeur moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones placés dans le sens latéral à la base de la couche d'EME. Les résultats montrent que l'ordre croissant des valeurs moyennes mensuelles des mesures des géophones est : mesure du géophone G4 < mesure du géophone G1 < mesure du géophone G3. Autrement dit, l'amplitude mesurée avec le géophone placé à droite (donc plus proche de la BAU) est la plus importante. Elle est assez proche de l'amplitude mesurée avec le géophone placé au milieu. L'amplitude mesurée avec le géophone placé à gauche est la plus faible. Ce qui signifie qu'en moyenne, les poids lourds roulent un peu plus vers la BAU, donc plus près de la ligne blanche. Ce schéma montre également que les géophones sont bien sensibles à la position latérale des poids lourds. La comparaison de la valeur maximale des mesures fournies par les trois géophones permet ainsi d'estimer la position latérale des roues du poids-lourd.

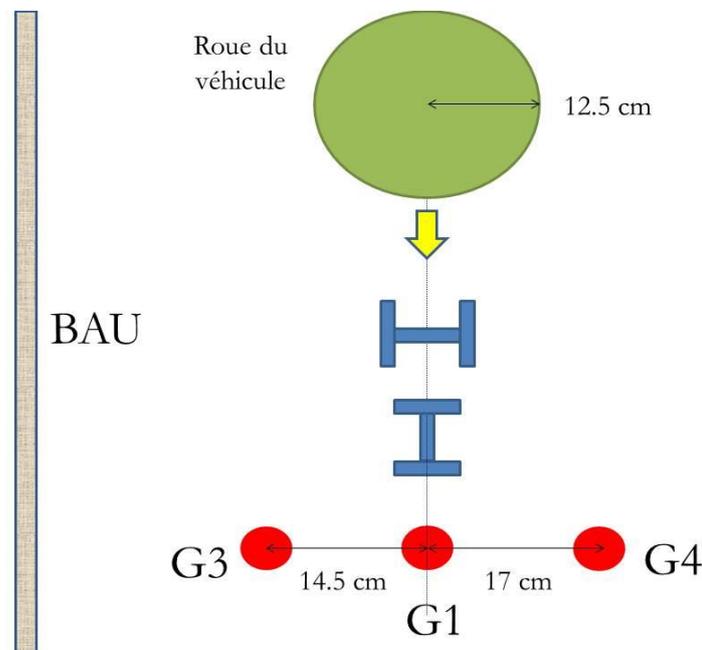


Figure 6.9. Position latérale des géophones G1, G3 et G4 à la base de la couche d'EME (Géophone G1 est aligné avec les jauges de déformation)

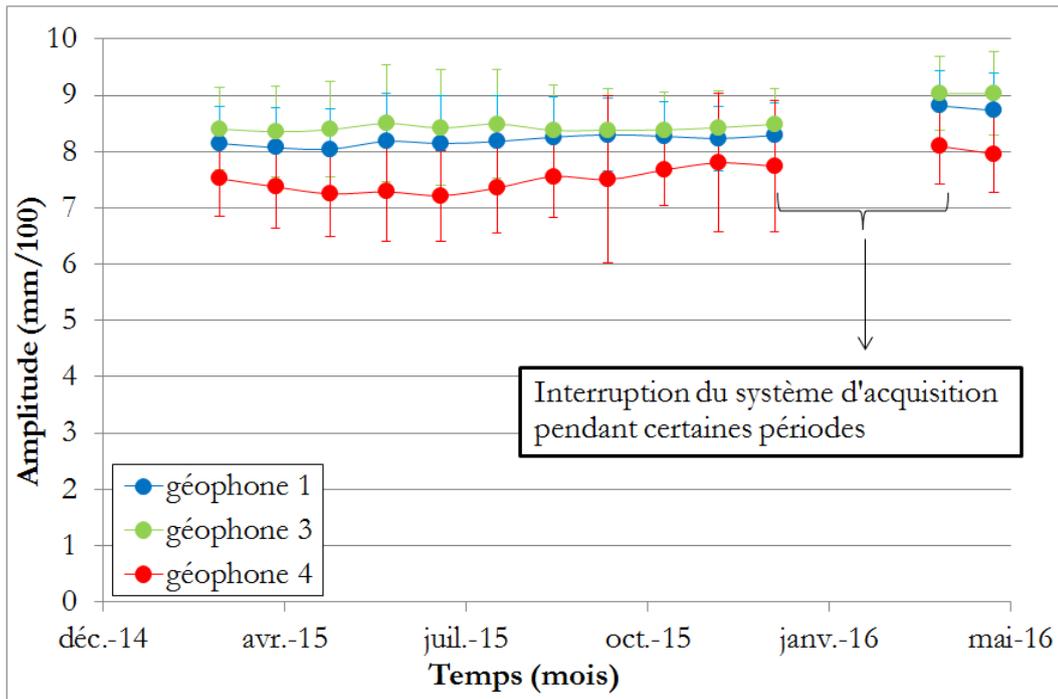


Figure 6.10. Comparaison des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones G1, G3 et G4 placés dans le sens latéral à la base de la couche d'EME

6.3.4 Etude de la profondeur des géophones

La Figure 6.12 présente la valeur moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones placés à différents niveaux de profondeur à la base des couches de BBME, d'EME et de GB. Pour les géophones placés à différents niveaux de profondeur de la chaussée, l'ordre croissant des valeurs moyennes mensuelles des mesures des géophones est : mesure du géophone G5 (base du BBME) < mesure du géophone G1 (base de l'EME) < mesure du géophone G7 (base du GB). On remarque donc que plus le géophone est placé bas dans la chaussée, plus l'amplitude du signal est importante.

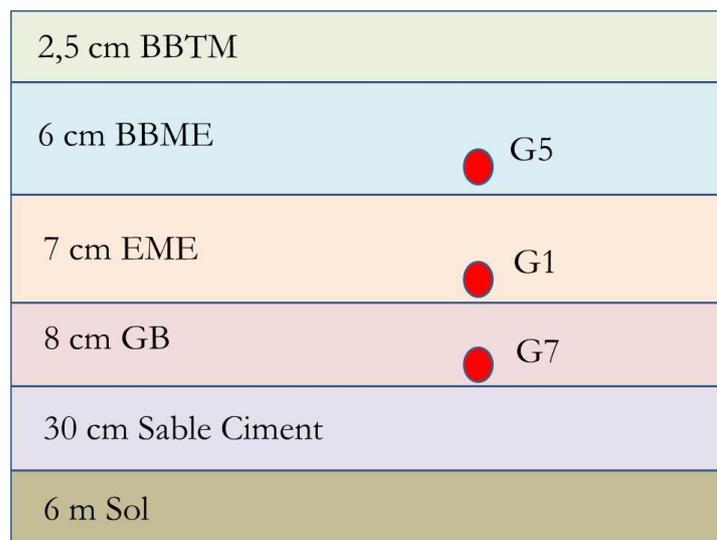


Figure 6.11. Position des géophones placés à différents niveaux de profondeur (G5 à la base du BBME, G1 à la base de l'EME, G7 à la base de la GB)

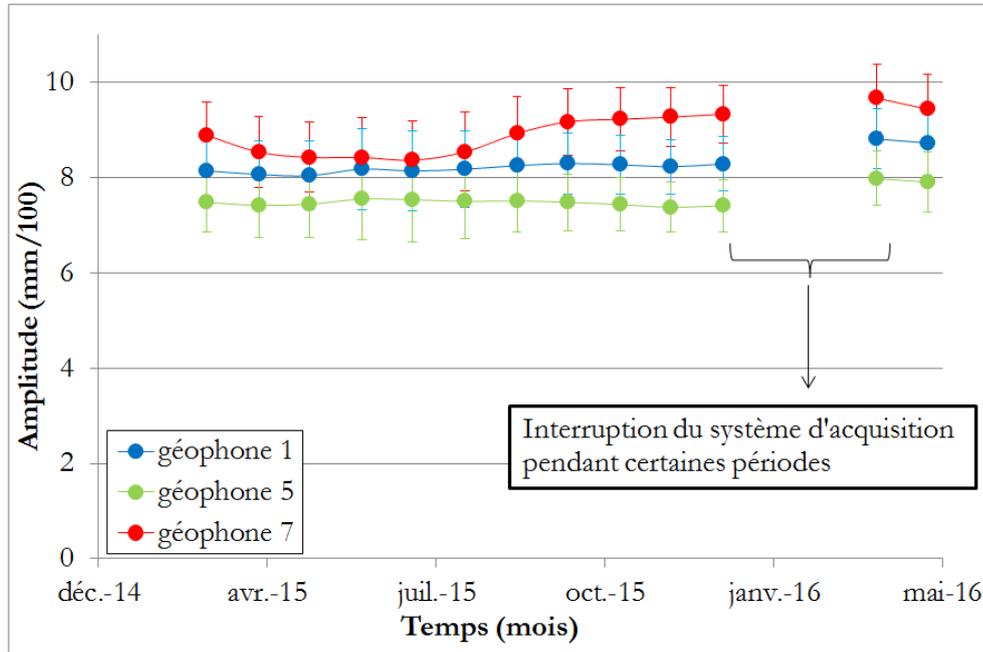


Figure 6.12. Comparaison des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones G1, G5 et G7 placés à différentes profondeurs de la chaussée (G1 à la base d'EME ; G5 à la base de BBME ; G7 à la base de GB)

6.3.5 Caractérisation des silhouettes des poids lourds.

L'exemple du signal des géophone présenté dans la Figure 6.7 du paragraphe 6.3.1 montre qu'il est possible d'identifier clairement les déplacements produits par les différents essieux du poids lourd, et donc d'identifier qualitativement les silhouettes des poids lourds. L'identification de ces dernières consiste à détecter les pics négatifs et positifs (nombre des pics, position des pics) des signaux intégrés des géophones.

Le signal utilisé afin d'identifier les silhouettes des poids lourds est le signal intégré du géophone G1 (base de l'EME et centre de la bande de roulement). Une « dérivée » du signal est calculée. Celle-ci change de signe avant et après un extrémum du signal, et c'est l'identification de ce changement de signe qui conduit à la détection d'un pic.

$$f'(A_1-A_{20}) = \frac{f(x_{20})-f(x_1)}{x_{20}-x_1} \quad (6.1)$$

Afin de ne pas confondre un pic dû au bruit de mesure et un pic dû à un passage d'essieu, un écart de 20 points est utilisé dans le calcul de la « dérivée ».

- La détection des pics est basée sur le fait que la dérivée des points d'un signal change le signe lorsqu'un pic est passé, et sur le signe positif ou négatif de la valeur au pic. Lorsque la dérivée change de signe de positif à négatif, et que la valeur de déplacement est positive, un pic dit positif est détecté (Figure 6.13)
- Lorsque la dérivée change de signe de négatif à positif, et que la valeur de déplacement est négative, un pic dit négatif est détecté (Figure 6.14)

Le principe d'identification des silhouettes des poids-lourds est présenté en détail dans l'annexe E.

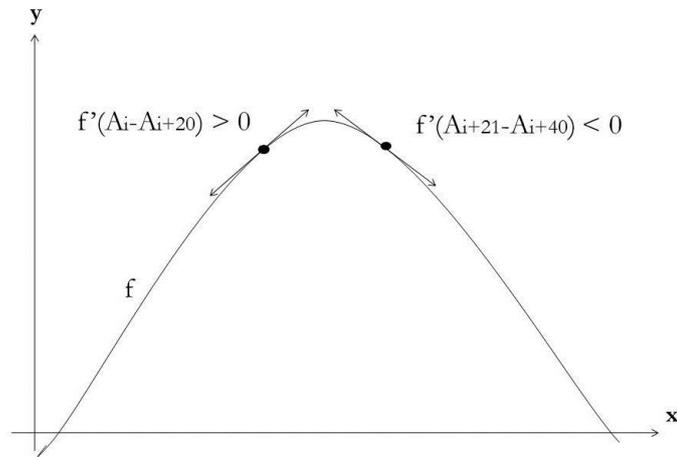


Figure 6.13. Principe de détection d'un pic positif d'un signal

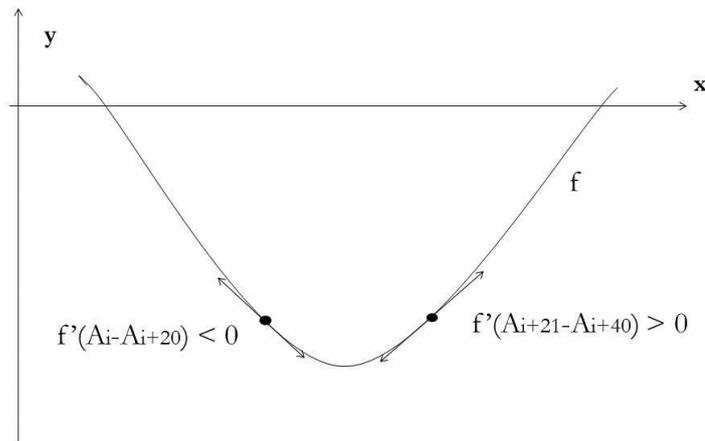


Figure 6.14. Principe de détection d'un pic négatif d'un signal

La Figure 6.15 présente des exemples de signaux de cinq types de poids lourds, identifiés automatiquement par le programme réalisé avec le logiciel Scilab: un poids lourd de 2 essieux, un poids lourd à 3 essieux, un poids lourd à 4 essieux, un poids lourd à 5 essieux et un poids lourd à 5 essieux de type T2S3. Le Tableau 6.1 présente différents types de poids lourds circulant sur l'Ax, et des exemples de signaux correspondants.

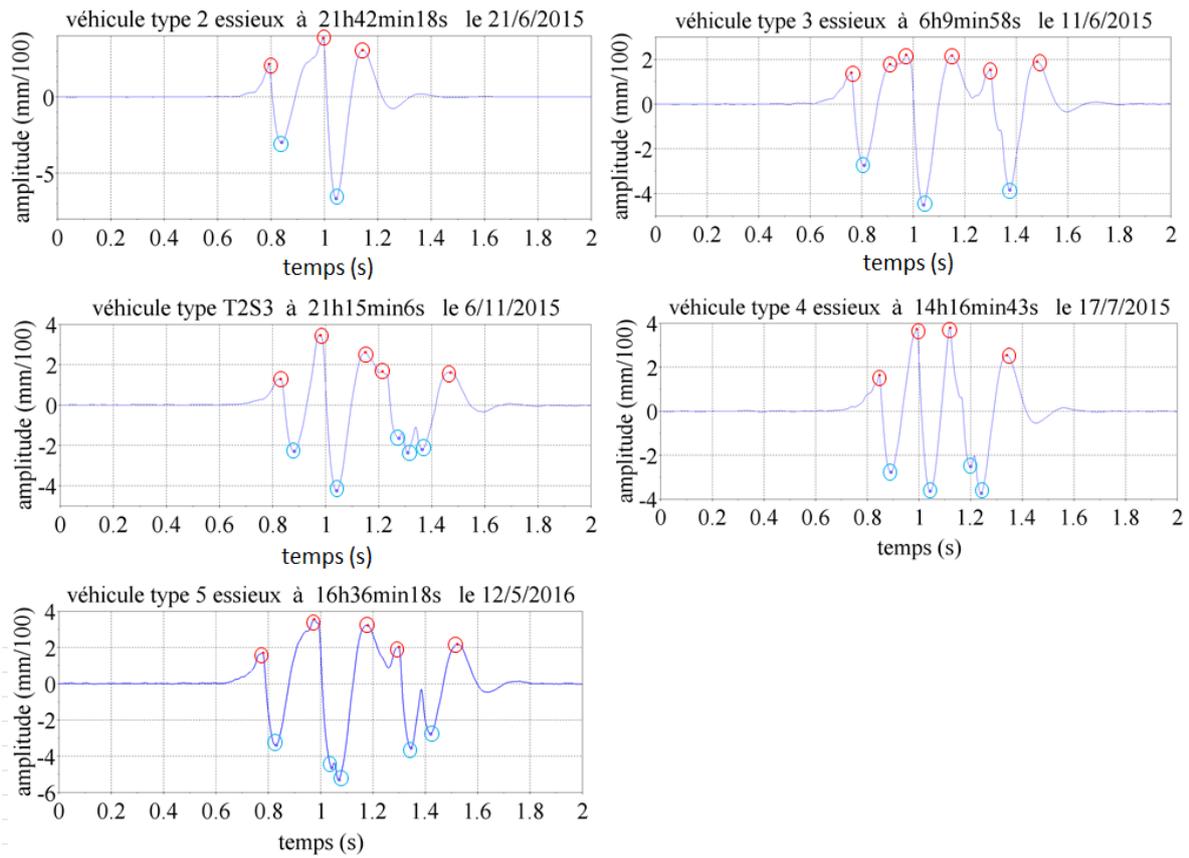
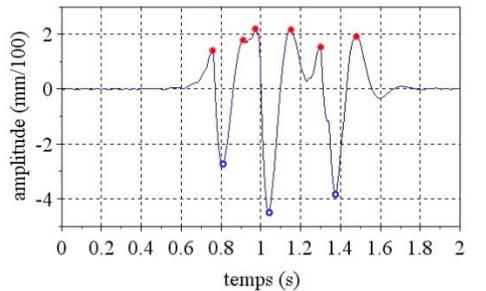
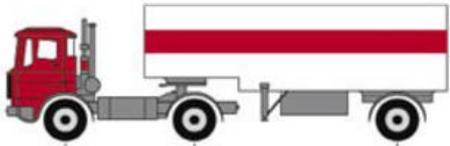
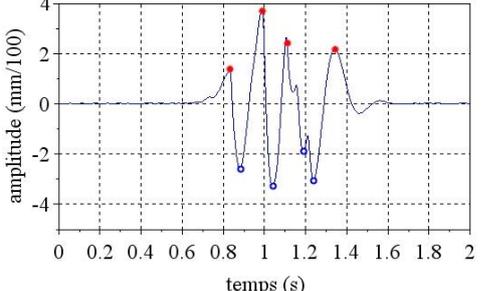
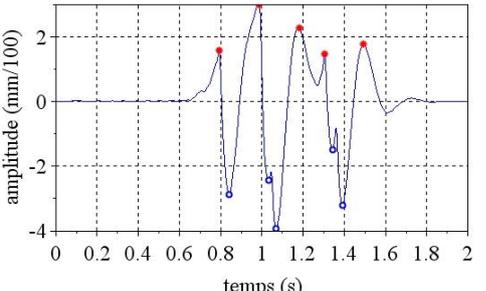
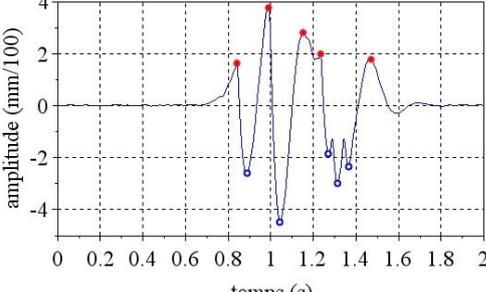


Figure 6.15. Exemples de signaux correspondant à différentes silhouettes de poids lourds

Tableau 6.1. Tableau des différents types de poids lourds qui circulent sur l’Ax

Type du poids lourd	Silhouette du poids lourd	Illustration
2 essieux	<p>véhicule type 2 essieux à 21h42min18s le 21/6/2015</p>	

3 essieux	<p>véhicule type 3 essieux à 6h9min58s le 11/6/2015</p> 	
4 essieux	<p>véhicule type 4 essieux à 6h17min9s le 6/7/2015</p> 	
5 essieux	<p>véhicule type 5 essieux à 22h0min52s le 3/6/2015</p> 	
5 essieux de type T2S3	<p>véhicule type T2S3 à 11h23min36s le 4/6/2015</p> 	

La procédure de comptage des différents types de poids lourds a été testée sur les données enregistrées par le système d'acquisition sur l'Ax. Les signaux qui ont été traités correspondent uniquement aux poids lourds enregistrés (c'est-à-dire ceux où le seuil de déclenchement de l'acquisition est dépassé).

Le nombre mensuel de chaque type de poids lourds ainsi obtenu est présenté sur la Figure 6.16. Comme déjà signalé, le système d'acquisition à distance n'a pas fonctionné continûment pendant la période de décembre 2015 à avril 2016, en raison de problèmes techniques. Les résultats

montrent que le nombre de poids lourds circulant sur la chaussée augmente pendant la période estivale. On constate aussi que la plupart des poids lourds circulant sur l'autoroute Ax (parmi ceux qui sont enregistrés) sont des poids lourds à 5 essieux (de type T2S3), qui sont les poids lourds de grande capacité, utilisés habituellement pour le transport longue distance. Le rapport entre le nombre de poids lourds de ce type et le nombre total des poids lourds enregistrés est quasiment constant pour tous les mois (80% environ).

Ici, en raison du seuil d'acquisition qui a été fixé, le comptage des poids lourds n'a été réalisé que sur une partie du trafic poids-lourds (représentant les poids lourds les plus chargés). Toutefois, en diminuant le seuil d'acquisition choisi, il serait possible d'utiliser la même procédure pour enregistrer et compter la totalité des poids lourds. C'est ce qui devrait être fait si la procédure devait être utilisée de manière opérationnelle, pour le comptage du trafic. Cependant, dans ce cas, il serait sans doute plus efficace d'effectuer le traitement en temps réel, au niveau du système d'acquisition, et non en post-traitement sur les signaux enregistrés, compte tenu du volume de trafic. (En effet, le post traitement nécessite de stocker l'ensemble des signaux des poids lourds, ce qui conduit à des volumes de données très importants).

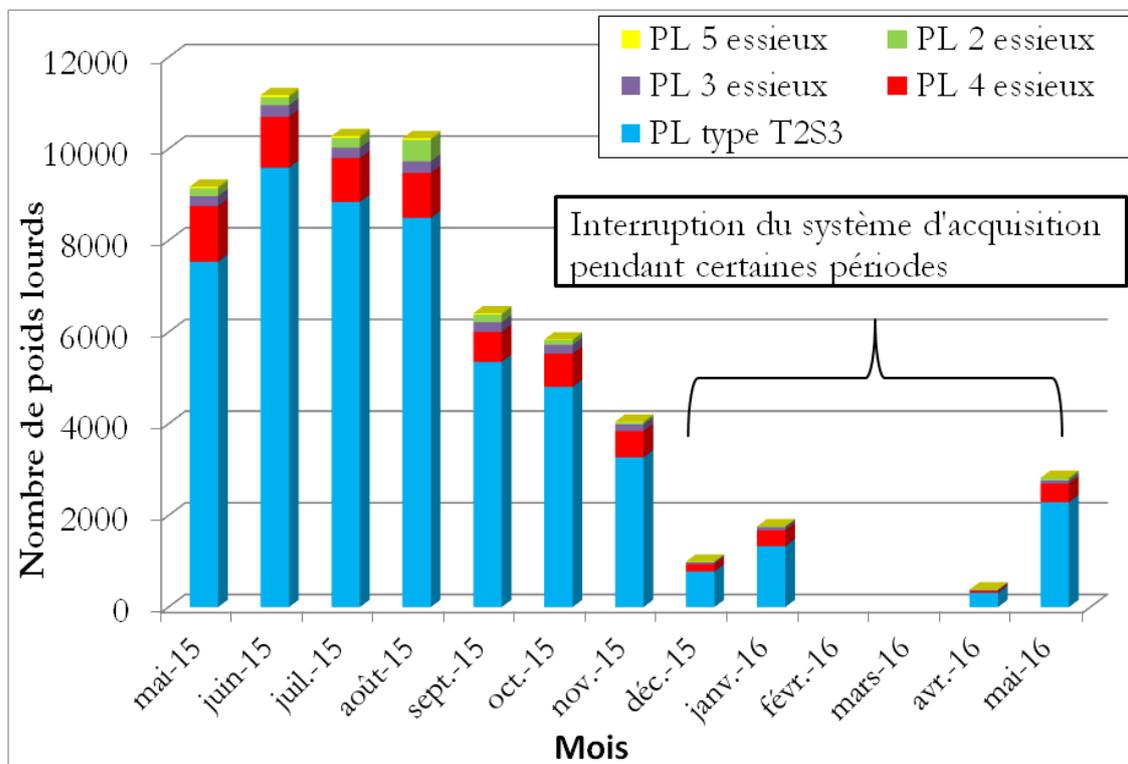


Figure 6.16. Nombre mensuel des différents types de poids lourds passant sur l'Ax (limité aux poids-lourds dont les signaux sont enregistrés)

6.3.6 Détermination de la vitesse des poids lourds

Les deux géophones G1 et G2 (renvoyer à la Figure 6.1) placés dans la couche d'EME, à un mètre d'intervalle dans le sens longitudinal, permettent de déterminer la vitesse des poids lourds qui passent sur la chaussée. Cette vitesse est calculée comme suit:

$$v = \frac{d}{t} \quad (6.2)$$

Avec :

- d Distance entre les deux géophones (1 m)
- t Intervalle de temps entre les réponses des deux signaux des géophones (en s)

L'intervalle t a été déterminé par l'écart entre les premiers pics de déplacement vers le bas des signaux intégrés des deux géophones, comme indiqué sur la Figure 6.17. On peut également noter la bonne répétabilité des signaux des deux géophones, qui correspondent ici à des poids lourds à 5 essieux.

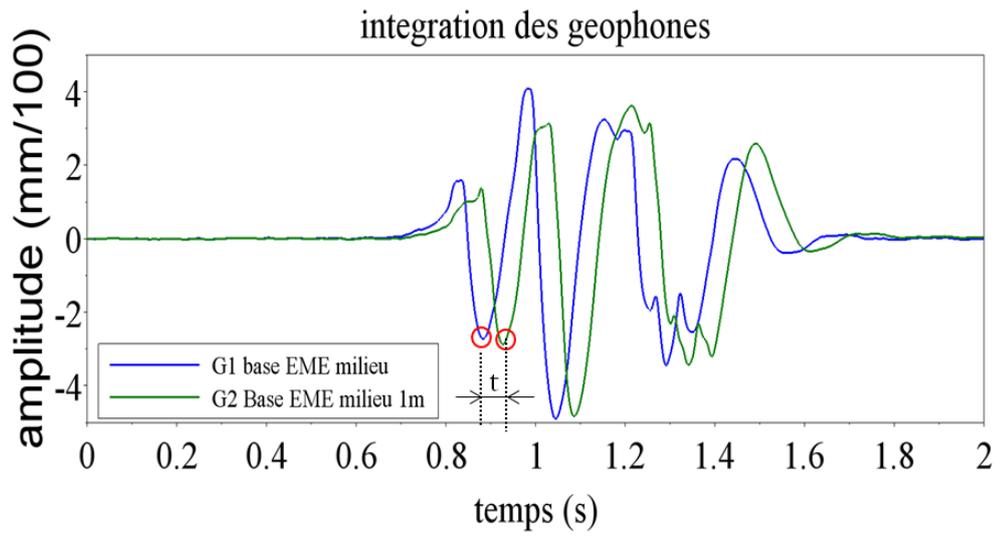


Figure 6.17. Ecart temporel entre les signaux intégrés des deux géophones G1 et G2 placés à la base de la couche d'EME

A partir de ces calculs, les valeurs moyennes mensuelles de la vitesse des poids lourds qui passent sur la chaussée de l'Ax ont été déterminées. Ces vitesses moyennes sont représentées sur la Figure 6.18. On constate que la vitesse moyenne des poids lourds ainsi que son écart-type ne varie pas beaucoup d'un mois à l'autre. La vitesse moyenne mensuelle des poids lourds varie entre 76 et 80 km/h environ. Cette valeur semble tout à fait correcte étant donné que la vitesse maximale autorisée pour les poids lourds sur autoroute est de 90 km/h.

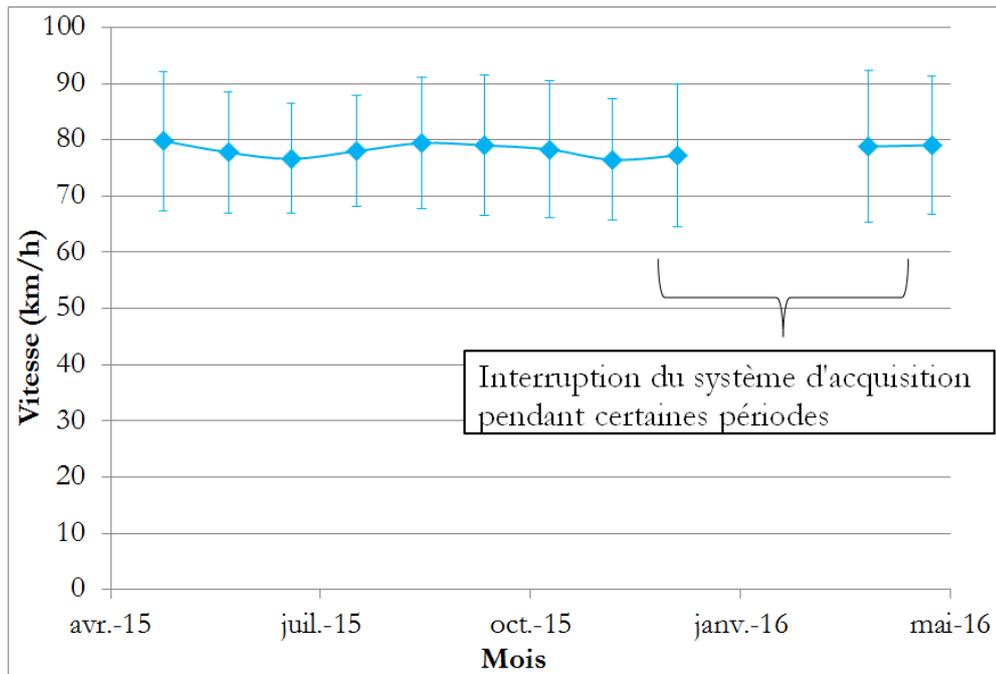


Figure 6.18. Vitesse moyenne mensuelle des poids lourds qui passent sur l'Ax, calculée à partir des signaux des géophones.

6.4 Estimation de la déflexion

6.4.1 Méthode de correction des signaux des géophones

Le géophone est un instrument qui retourne, en mesure directe, les valeurs de vitesse de son propre déplacement. Pour cela, le signal électrique délivré par le géophone à sa sortie doit être converti en valeurs physiques de vitesse (en m/s) par le biais du coefficient de sensibilité.

De manière théorique, le signal correspondant au déplacement vertical du géophone (selon l'axe Z) s'obtient en intégrant dans le temps le signal constitué des valeurs successives de vitesse de déplacement. Compte-tenu de la position des géophones dans les structures-tests sur l'Ax et l'A10, on devrait donc pouvoir déterminer la déflexion au niveau de l'assise de la chaussée.

Dans les faits, une opération d'intégration seule du signal « brut » délivré par le géophone ne suffit pas pour accéder à un signal de déflexion renvoyant à des propriétés physiques acceptables. Deux facteurs gênent le calcul du signal déflexion « réel » :

- Les capacités métrologiques intrinsèques du géophone face au type d'excitation de l'étude (solicitation s'inscrivant dans la plage spectrale où le capteur n'est pas le plus performant)
- Le fait que le signal à traiter soit à moyenne non-nulle (génération d'une composante continue du signal intégré, liée à la constante d'intégration)

6.4.1.1 Intégration du signal

L'intégration du signal brut fourni par le géophone peut se faire au moyen de méthodes numériques traditionnelles (méthode des rectangles, des trapèzes, etc.). Un rapide test montre que le choix de telle ou telle méthode n'a que très peu d'impact sur le résultat final. Par contre, on

rappelle que ces méthodes numériques ne fournissent qu'une estimation du résultat final. Par ailleurs, comme dit précédemment, nous avons affaire à des signaux à moyenne non-nulle; le processus d'intégration génère alors une composante continue qu'il faut supprimer (voir les fonctions de filtrage ou de « detrending » proposées par les logiciels de calcul numériques). La Figure 6.19 illustre l'effet de l'intégration numérique sur un signal de référence « demi-sinus ». On constate que ce signal et le signal reconstruit qui est issu de la dérivation puis de l'intégration du signal initial, ne sont pas identiques.



Figure 6.19. Illustration de l'effet de l'intégration numérique appliqué à des « demi-sinus » (le signal reconstruit est issu de la dérivation puis de l'intégration du signal initial)

6.4.1.2 Correction du signal intégré par transformée de Hilbert

Après avoir intégré le signal géophone, on remarque que le signal déflexion comporte des oscillations qui n'ont pas de sens physique puisque celles-ci tendraient à montrer que la structure se déplace tantôt vers le bas et tantôt vers le haut autour d'une position d'équilibre et à des amplitudes quasi-similaires (un peu de la même façon que sur la Figure 6.7). Or, une déflexion est une déformation de la structure qui ne peut, à priori, dépasser sa position initiale « par le haut ». L'origine de ces oscillations est donc vraisemblablement imputable au processus numérique d'intégration de la réponse spectrale du géophone.

Une solution proposée pour éviter ce phénomène est d'utiliser une transformée de Hilbert pour tenter de supprimer ces oscillations. Ce type de transformation est notamment utilisé dans les procédés de modulation des signaux pour distinguer l'enveloppe du signal de sa porteuse. Mathématiquement, la transformée de Hilbert est un « réarrangement » des parties réelle et imaginaire de la transformée de Fourier d'un signal donné, de sorte à déphaser les différentes composantes de 90 degrés (en fait de -90° pour les fréquences positives). Ainsi, à titre d'exemple, si le signal initial est un cosinus, alors le signal résultant de la Transformée de Hilbert (TH) sera un sinus.

Soit $X(f)$ la transformée de Fourier du signal $x(t)$ et $X_h(f)$ sa transformée de Hilbert associée, alors :

$$X_h(f) = -i * \text{signe}(f) * X(f) \quad (6.3)$$

Le signal temporel $xh(t) = TH[x(t)]$ issu de la transformée de Hilbert peut être obtenu par une transformée inverse.

Dans les faits, la transformée de Hilbert est souvent utilisée par le biais d'un signal $z(t)$ dit « analytique » défini par la relation suivante où le signal $x(t)$ correspond à $\text{Re}(z(t))$ et $xh(t)$ à $\text{Im}(z(t))$:

$$z(t) = x(t) + i * xh(t) \quad (6.4)$$

Dans le logiciel de calcul Matlab, ce signal $z(t)$ est directement obtenu par l'appel à la fonction $z = \text{Hilbert}(x)$. Si on revient dans un contexte de modulation de signaux et que l'on considère:

$$x(t) = e(t) * p(t) \quad (6.5)$$

Avec :

$e(t)$ Signal enveloppe

$p(t)$ La porteuse

Alors: $e(t) = \sqrt{x(t)^2 + xh(t)^2} = \text{abs}(z(t))$

La Figure 6.20 présente un exemple d'un signal « modulé » et sa transformée de Hilbert. Cette dernière est le module du signal analytique $z(t)$ défini dans la formule (1).

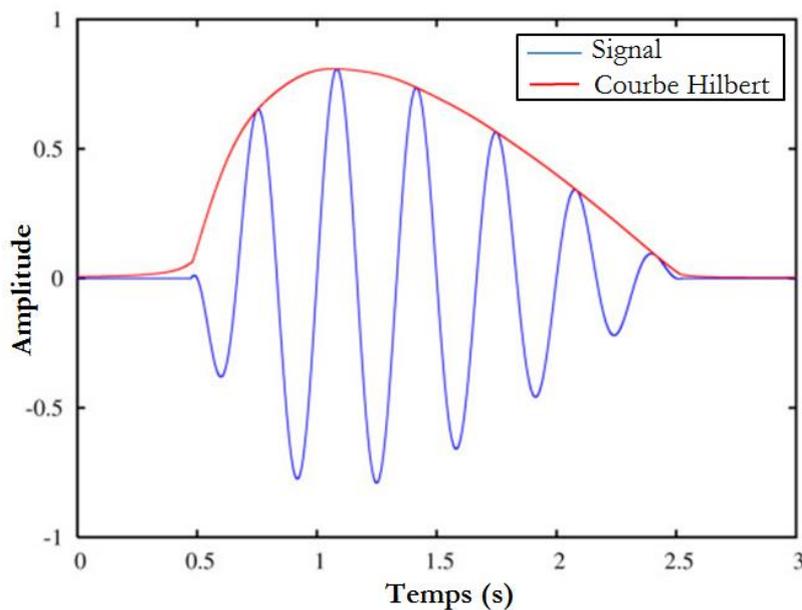


Figure 6.20. Illustration de la transformée de Hilbert d'un signal « modulé »

Ainsi, dans notre étude, on va également chercher à conserver la courbe qui enveloppe le signal intégré par ce même procédé et conserver également les pics des essieux. Un exemple de résultat est illustré sur la Figure 6.21. Le signal du géophone est enregistré sous le passage d'un poids lourd de type T2S3 chargé à 44 tonnes à 15h31min le 18 mars 2014. Le véhicule passe à l'aplomb du capteur.

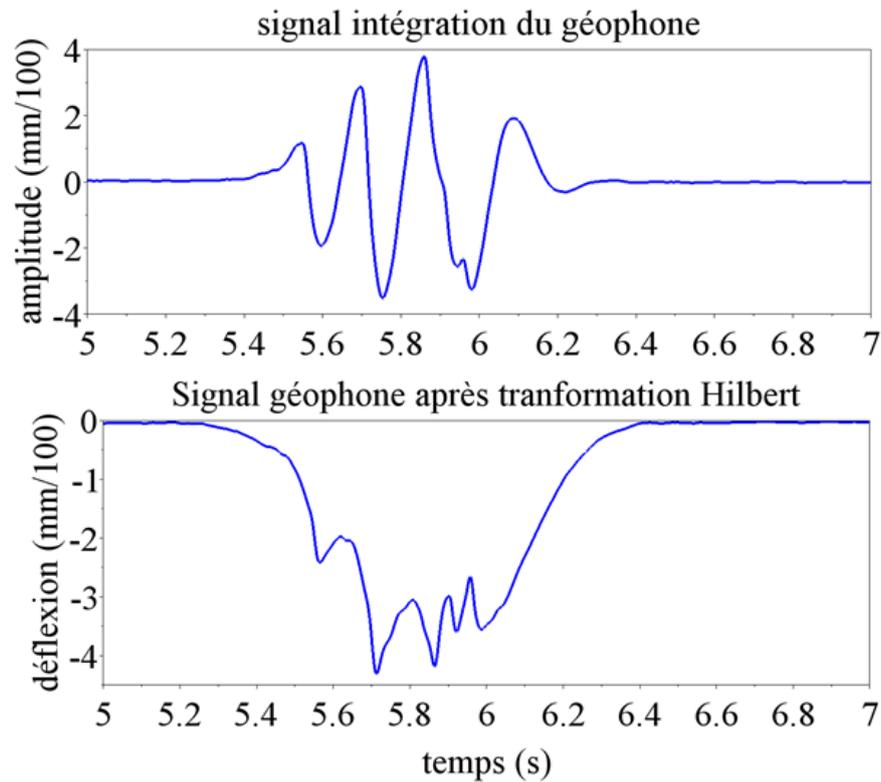


Figure 6.21. Exemple d'un signal intégré du géophone enregistré sous le passage d'un camion de type T2S3 chargé à 44 tonnes à 15h31min le 18 mars 2014 et sa transformation de Hilbert

Sur la Figure 6.21, on s'aperçoit que cette méthode de traitement semble assez efficace pour corriger la forme du signal produit à l'issue de l'étape d'intégration. On retrouve ainsi un signal expérimental plus proche d'un signal de déflexion théorique avec des variations correspondant au passage successif des différents essieux (ici un PL à 5 essieux de type T2S3), et sans déplacement vers le haut (peu réaliste).

6.4.1.3 Correction de la réponse en fréquence des géophones

La Transformée de Hilbert est un outil permettant de corriger la silhouette du signal expérimental pour le rendre plus conforme avec la « forme » d'un signal de déflexion au passage d'un PL. Cependant, par comparaison avec différents signaux issus de simulations numériques (avec le logiciel Alizé), on a constaté qu'après ces corrections, le signal expérimental sous-estime les valeurs théoriques de déflexion, notamment la partie du signal correspondant au passage du tridem du poids lourds T2S3 (Figure 6.22). Le calcul avec Alizé a été fait avec l'hypothèse d'interfaces collées. Les modules des couches correspondent aux valeurs issues du calage sur les mesures initiales avec l'ajustement en température.

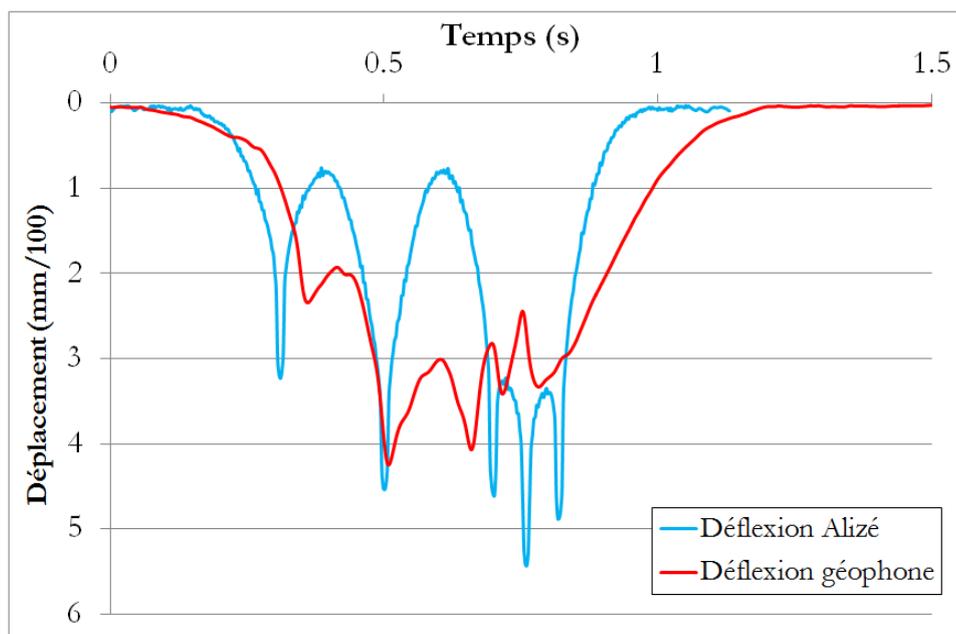


Figure 6.22. Comparaison de la déflexion calculée avec Alizé (15°C et 10Hz) et obtenue par la transformée de Hilbert du signal du géophone enregistré sous le passage d'un camion de type T2S3 chargé à 44 tonnes à 15h31min le 18 mars 2014.

Une des raisons pouvant expliquer cet écart (atténuation) est la faible capacité des géophones à restituer intrinsèquement des composantes vibratoires de basses fréquences (BF) alors que celles-ci sont susceptibles de contenir de fortes énergies. Ceci a été identifié par l'analyse de la fonction de transfert du géophone (Figure 6.6).

Pour tenter d'augmenter la valeur maximale de déflexion dans le signal expérimental, on va chercher à récupérer ces composantes BF, atténuées par le géophone, en les amplifiant a posteriori par des procédés numériques. Une première tentative consiste à suivre la stratégie suivante :

- Filtrage passe-haut du signal brut délivré par le géophone (filtrage Butterworth ordre 2 pour la fréquence de coupure F_c du géophone (4.5 Hz) et conversion en valeur physique du signal par le biais du coefficient de sensibilité (89.2 V/ms^{-1}). Cette opération permet d'extraire les composantes vibratoires que l'on va appeler hautes fréquences (HF) dans ce chapitre.
- Amplification des composantes BF du signal brut par la conception d'un filtre passe-bas modifié de sorte à ce que le gain soit nettement positif pour les fréquences comprises entre 0 et 4.5 Hz (utilisation d'un filtre passe-bas de Butterworth ordre 2 pour la fréquence de coupure F_c du géophone de 4.5 Hz). Dans l'exemple ci-dessous, on a ainsi simplement multiplié par 1.7 les coefficients du numérateur de la fonction polynôme correspondant au filtre numérique cité précédemment. Par cette opération, on « remonte » ainsi artificiellement la réponse originelle du géophone dans la plage de fréquences 0-4.5Hz. (cette correction nécessitera toutefois un calage, par rapport à des mesures de référence, pour fixer le coefficient d'amplification).

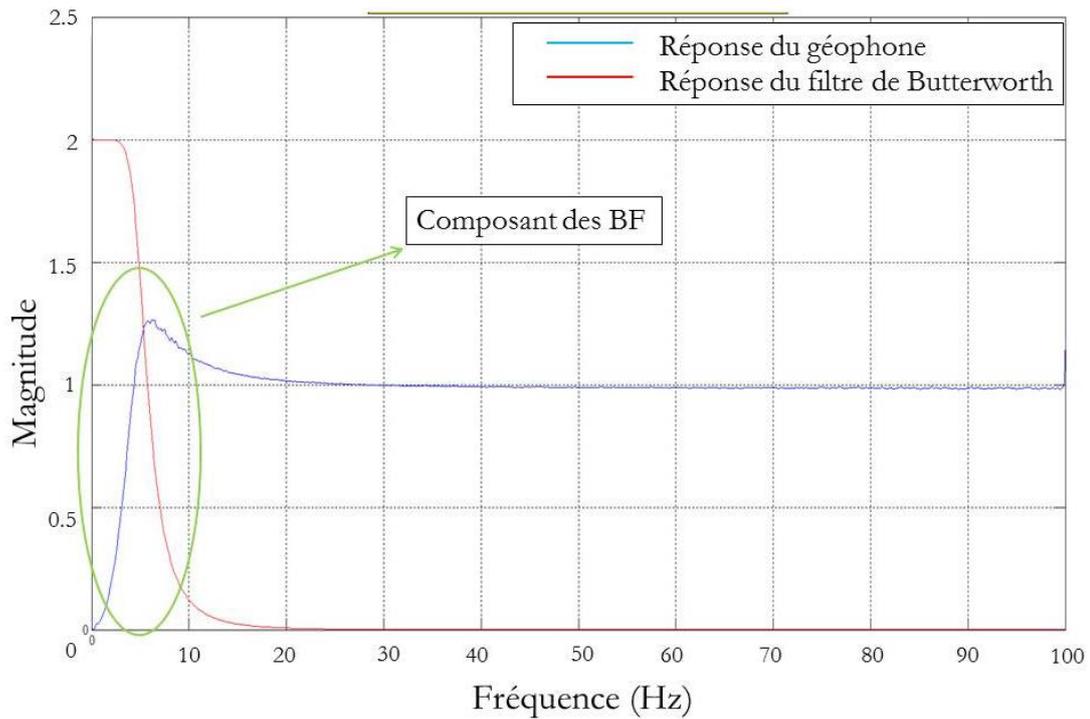


Figure 6.23. Réponses spectrales normalisées du géophone et du filtre passe-bas amplifié en BF

- Intégration numérique des composantes HF et BF + detrending (suppression des composantes continues).
- Transformée de Hilbert pour chacun des signaux intégrés.
- Reconstitution du signal final par la somme des composantes HF et BF après transformée de Hilbert.

Le résultat de ce procédé est illustré sur la Figure 6.24 ci-dessous. Le signal du géophone est enregistré sous le passage d'un camion de type T2S3 chargé à 44 tonnes à 15h31min le 18 mars 2014. On peut notamment observer que la valeur maximale de la déflexion a été augmentée, et que la forme du signal se rapproche plus d'un vrai signal de déflexion, sous passage d'un poids lourd.

On a comparé ce signal corrigé avec un calcul ALIZE, effectué avec le modèle de structure de chaussée calé au chapitre 4 (toutes les interfaces sont supposées collées). Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 6.25. On constate que les amplitudes des différents pics de déflexion sont du même ordre de grandeur que celles données par le calcul ALIZE. La forme du signal reste parfaite (les niveaux de déflexion entre les pics sont moins bien estimés...).

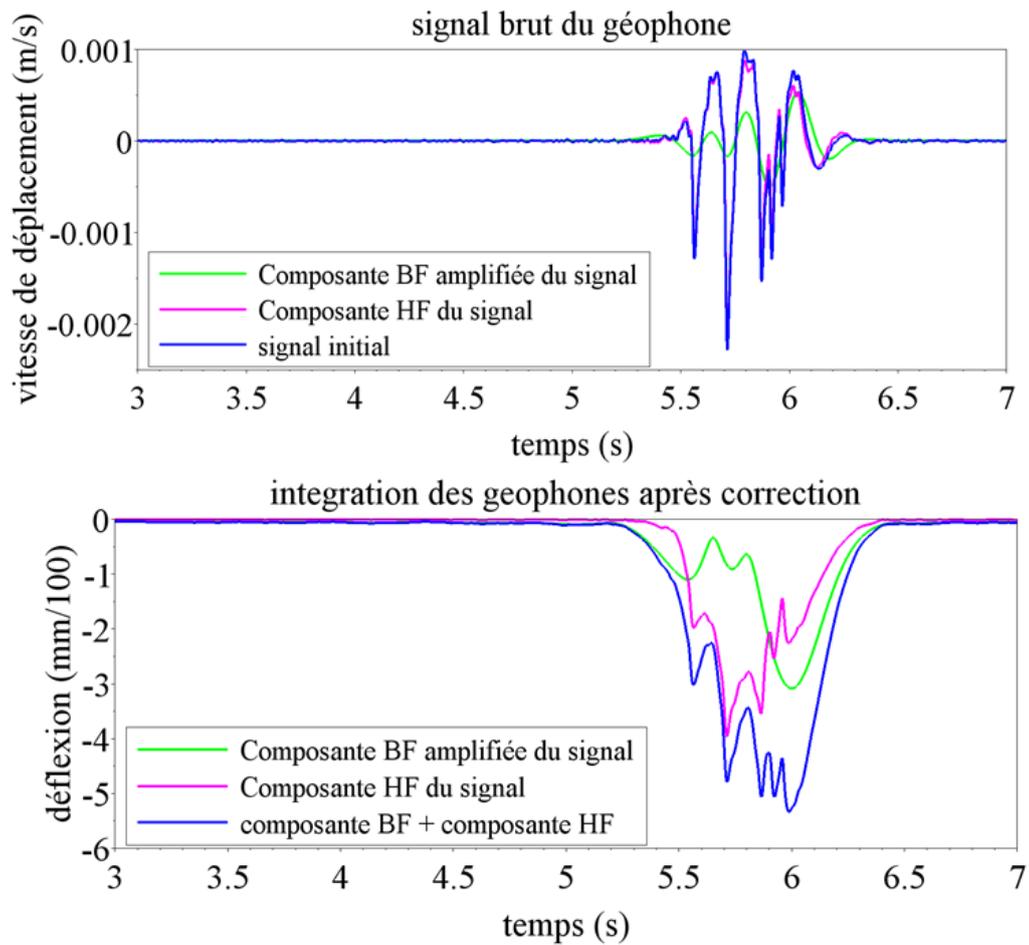


Figure 6.24. Déflexion obtenue après correction, avec amplification de la composante basse fréquence, pour le signal du géophone enregistré sous le passage d'un camion de type T2S3 chargé à 44 tonnes à 15h31min le 18 mars 2014

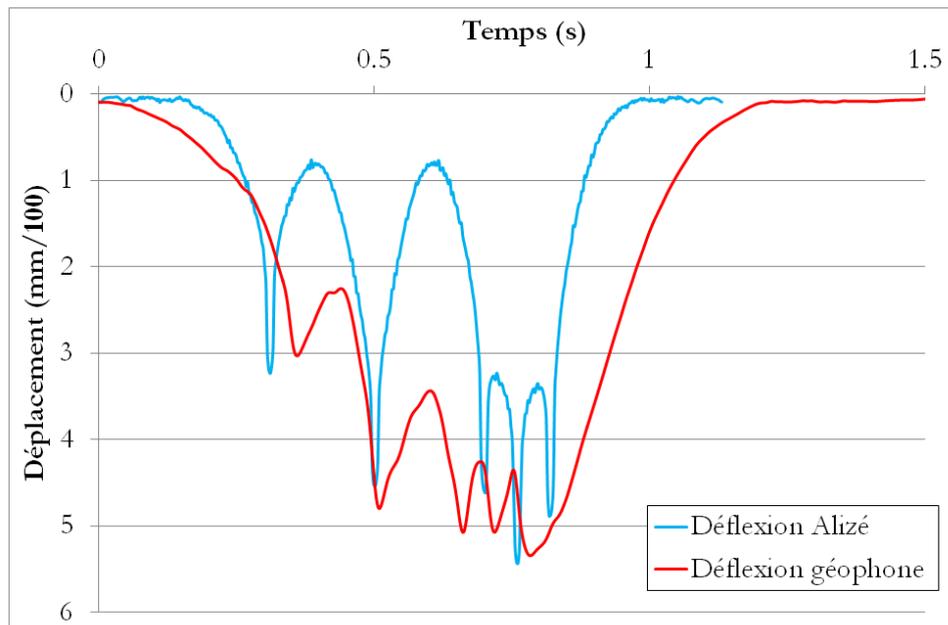


Figure 6.25. Comparaison de la déflexion calculée avec Alizé (15°C, 10Hz) et obtenue après correction du signal du géophone (avec amplification de la composante basse fréquence), sous le passage d'un camion de type T2S3 chargé à 44 tonnes à 15h31min le 18 mars 2014.

Dans cette partie, on a donc montré que l'exploitation des signaux issus des géophones intégrés dans la chaussée permet une identification de la classe du PL (du moins les classes les plus pertinentes) et permet également de remonter à une information de déflexion plus ou moins exacte. Cette dernière peut être obtenue au moyen du processus décrit dans ce paragraphe (décomposition en composantes basse et haute fréquence, intégration et transformation de Hilbert), sachant que celui-ci peut certainement encore être amélioré. Il reste cependant à mieux caler les différents paramètres de filtrage et de transformation, par comparaison avec des signaux de référence, mesurés sur une vraie structure de chaussée (tels que ceux d'un capteur de déplacement ancré, d'un FWD ou d'un curviamètre).

6.4.2 Validation de la méthode de correction des mesures des géophones à partir d'essais sur le manège de fatigue

Afin de caler les mesures des géophones sur des valeurs de référence, on a profité d'une expérimentation réalisée en 2016 sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR pour installer sur le manège deux géophones du type utilisé sur l'Ax (GS11D 4000), associés avec un capteur de déplacement ancré. Ce dernier est un capteur de type LVDT dont le principe consiste à réaliser un forage jusqu'à 6 m de profondeur ou jusqu'à un substratum rigide si celui-ci est plus proche de la surface et à ancrer une tige au fond de ce forage. Sur cette tige vient ensuite se positionner le corps du capteur de déplacement. La partie fixe du capteur de déflexion ancré est hachurée en noir sur le schéma de la Figure 6.26. Le déplacement total entre la surface de la structure et une référence fixe peut ainsi être mesuré.

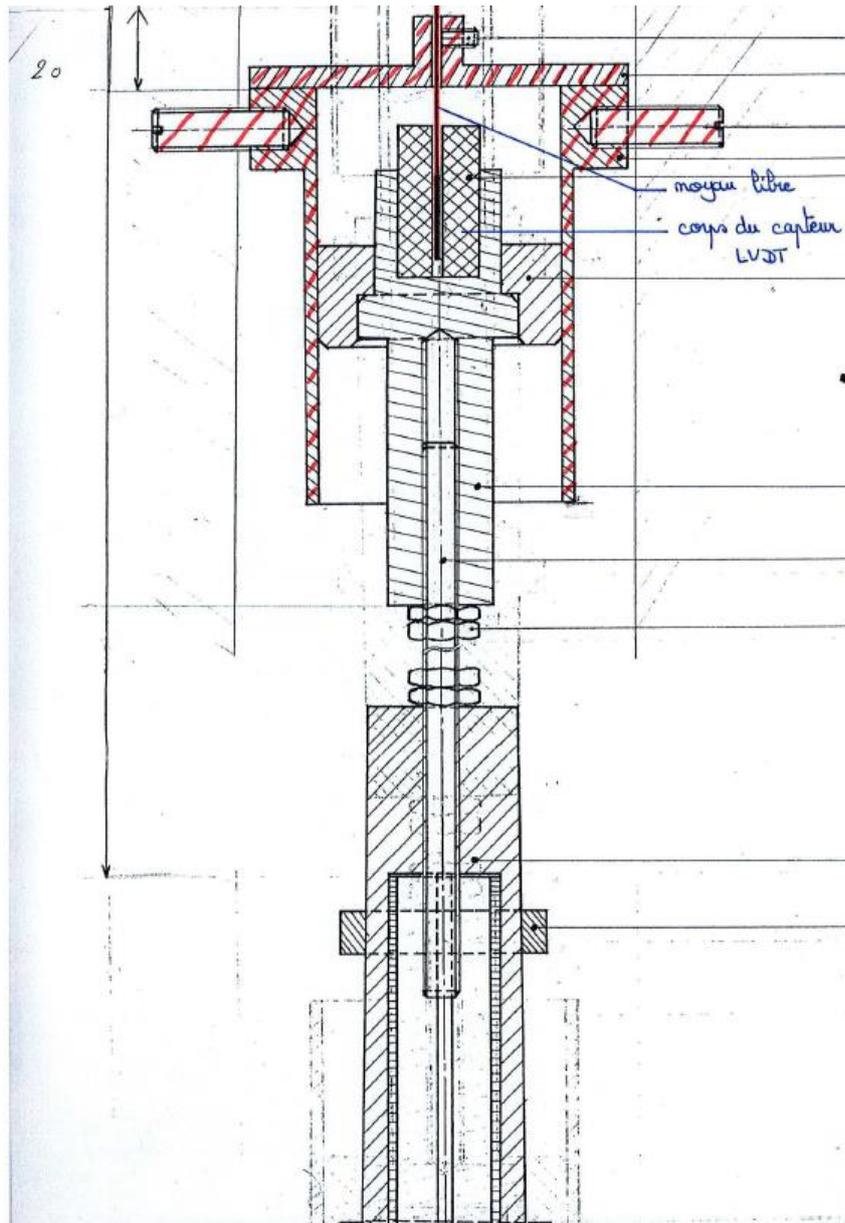


Figure 6.26. Schéma du capteur de déflexion ancré

6.4.2.1 Présentation du manège de fatigue

Le manège de fatigue des structures de chaussées a été construit sur le site de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) à Nantes, au début des années 1980. L'amélioration de la conception de ce dispositif en vue de répondre à différents enjeux a duré plusieurs années. Les caractéristiques principales du manège sont: (Hornych, et al., 2013)

- Une machine de 40 de diamètre pouvant se déplacer sur plusieurs sites.
- Les pistes expérimentales ont une largeur de 6 m, et une longueur totale de 120 m, au rayon moyen de 17.5 m.
- Le manège comporte 4 bras de chargement, qui permettent d'appliquer à la chaussée les charges des poids lourds. Les charges appliquées sur chaque bras sont comprises entre 65

kN et 130 kN, avec différentes types de configurations d'essieux possibles (roue simple, roues jumelées, tandem, tridem).

- La vitesse de rotation maximale est de 100 km/h pour 4 bras chargés à 65 kN et 50 km/h pour 4 bras chargés à 130 kN.



Figure 6.27. Manège de fatigue de l'IFSTAR Nantes.

La conception du manège s'est révélée très robuste. Cela est dû à sa motorisation électro-hydraulique, comportant 4 moteurs hydrauliques, qui assurent la rotation, alimentés par 2 systèmes identiques de pompes hydrauliques. Lorsqu'une pompe ne fonctionne plus, le système peut fonctionner avec l'autre pompe, avec une vitesse réduite qui peut atteindre 50 km/h en configuration jumelage standard. Le manège peut fonctionner 24 heures sur 24, ce qui permet d'appliquer entre 500000 et 1 million de chargements par mois, suivant la vitesse de rotation. De 1981 à 2013, le manège a effectué environ 14 millions de rotations (soit 56 millions de chargements), ce qui représente un kilométrage parcouru d'environ 1,6 millions de kilomètres, soit 40 fois le tour de la terre. Il était alors l'installation la plus performante de ce type au monde.

Avec la mise en service du manège, les premiers systèmes de mesure et de suivi des structures ont aussi été mis au point. Les capteurs utilisés sur le manège sont principalement :

- Des jauges qui permettent de mesurer les déformations longitudinales, transversales et verticales à différents niveaux dans la chaussée.
- Des capteurs de pression totale, permettant de mesurer les contraintes verticales dans le sol support.
- Des capteurs de déflexion dynamique (capteurs de déplacement vertical ancrés) qui permettent de mesurer la déflexion (déplacement vertical) de la chaussée.
- Des sondes de température (thermocouples ou sondes PT100) utilisées pour mesurer les températures à différents niveaux dans la chaussée.
- Des sondes de teneur en eau, permettant d'évaluer l'état hydrique dans les couches GNT et le sol support.

D'autres capteurs ont récemment été testés sur le manège: des accéléromètres et des géophones, permettant d'étudier les phénomènes de battement des chaussées en dalles béton au passage des charges; des capteurs à fibres optiques (capteurs à réseaux de Bragg, fibres optiques continues) permettant des mesures de déformations, et aussi de température.

Le système d'acquisition du manège, renouvelé dans la période 2008-2011, utilise 4 centrales d'acquisition HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) avec une capacité totale de 124 voies de mesure pour les capteurs à jauges ou LVDT (Linear Variable Differential Transformer), plus 76 voies de mesure pour les températures. Des méthodes d'acquisition des données à distance, sans fil ont également été testées sur le manège, avant leur utilisation sur site. (Sohm, et al., Mai 2012)

Le manège de fatigue permet de réaliser différents types d'expérimentations, répondant aux préoccupations de la profession routière (Hornych, et al., 2013) (Kerzrého, 2013) (Autret & Gramsammer, 1990) (SETRA, LCPC, 1994). Les thématiques de recherche concernent en particulier :

- L'évaluation des performances de nouveaux matériaux ou de nouvelles structures de chaussée.
- La validation des modèles de calcul de structures de chaussées et des méthodes de dimensionnement.
- L'évaluation de différents équipements destinés à être installés dans les chaussées ou sous les chaussées, tels que des tampons de canalisations, des caniveaux, etc...
- L'évaluation de méthodes d'auscultation et d'instrumentation des chaussées.

Au cours de leur durée de vie, les chaussées sont soumises à des sollicitations multiples et complexes. Leurs mécanismes de dégradations sont donc difficiles à prévoir et modéliser. Les essais en laboratoire, dans lesquels les conditions (chargement, température..) sont contrôlées, permettent de déterminer certaines propriétés mécaniques des matériaux. Cependant, ces résultats sont généralement insuffisants pour prédire le comportement en vraie grandeur des structures routières multicouches, qui sont soumises à des conditions de chargement et d'environnement complexes, et variables. Les chantiers expérimentaux, sur chaussées réelles, quant à eux, permettent de se placer dans des conditions réelles. Toutefois, les chaussées étant dimensionnées pour des durées longues (généralement 20 ans ou plus), un suivi sur de nombreuses années est nécessaire pour évaluer leur comportement sous trafic. Par conséquent, les essais accélérés en vraie grandeur, tels que ceux réalisés sur le manège, constituent un moyen privilégié pour évaluer, dans une durée limitée, (quelques mois), la tenue sous trafic des matériaux et structures, identifier leurs mécanismes de dégradation et valider leur dimensionnement. Ces essais ont toutefois aussi leurs limitations. Leur durée étant limitée à quelques mois, ils ne permettent pas de reproduire les cycles climatiques annuels, ni le vieillissement des matériaux. Par ailleurs, le système de chargement du manège ne permet pas d'appliquer d'efforts horizontaux à la chaussée (comme ceux causés par le freinage), alors que ces efforts peuvent jouer un rôle important dans l'usure des couches de surfaces. Compte tenu de ces limites, il est souvent nécessaire de compléter les essais accélérés par des retours d'expérience de chantiers réels. (Kerzrého, 2013)

6.4.2.2 Présentation de l'essai manège étudié

6.4.2.2.1 Structures de chaussées étudiées

L'essai manège utilisé pour l'évaluation des géophones est réalisé dans le cadre du projet ANR SolduGri (Solution Durable du renforcement des infrastructures par Grilles en fibre de

verre). Cet essai vise à tester des structures de chaussées renforcées par des grilles en fibre de verre, et à comparer leur comportement avec celui d'une structure de référence non renforcée. Cet essai est réalisé sur l'anneau C du manège de fatigue, qui dispose d'un cuvelage, et d'un système de pompes, permettant de modifier le niveau de la nappe hydraulique dans le sol support, et ainsi de modifier sa portance. Le sol support en place est un sable argileux de classe B2. En fonction de la hauteur de nappe, sa portance peut varier entre environ 80 MPa (nappe basse) et 50 MPa (nappe haute).

La structure étudiée est celle d'une chaussée à faible trafic, comportant des matériaux bitumineux d'une épaisseur de 10 cm, sur une assise en GNT (Figure 6.28). La grille de renforcement a été mise à l'interface entre deux couches d'enrobés bitumineux (à 6 cm sous la surface).

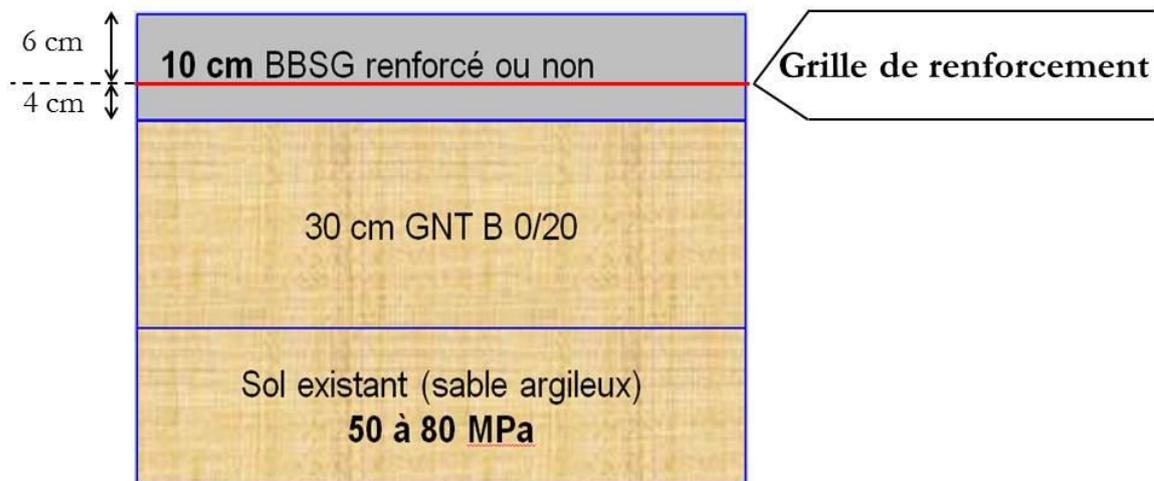


Figure 6.28. Structure de la chaussée de test au manège de fatigue

6.4.2.2.2 Positionnement des capteurs

Pour l'évaluation de la réponse des géophones, deux géophones de type GS11D ont été placés au sommet de la couche de surface de la chaussée. Un capteur de déplacement vertical ancré a également été installé sur cette section, à proximité des géophones. Ce capteur permet de mesurer avec précision la déflexion (déplacement vertical) de la chaussée au passage des charges, et a été utilisé comme référence pour évaluer et calibrer les mesures des géophones. Trois sondes de température de type PT100 ont été placées à trois niveaux différents de la chaussée (à la surface, à 5 cm en profondeur et à 9 cm en profondeur). La température calculée pour chaque campagne de mesure présentée dans la suite du rapport est la moyenne des mesures de ces trois sondes de températures.

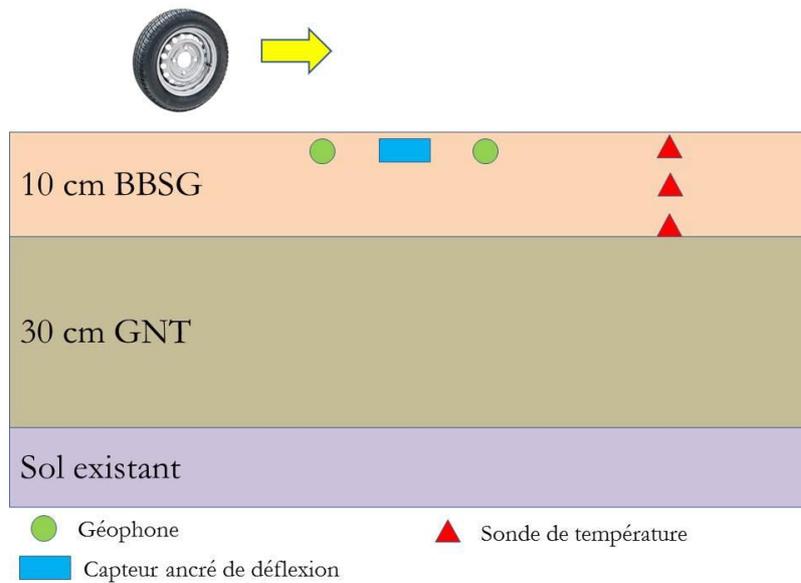


Figure 6.29. Plan d'instrumentation sur l'essai manège

6.4.2.2.3 Mesures réalisées

Les mesures des géophones et du capteur ancré ont été réalisées sous des chargements correspondant à un demi-essieu standard de référence chargé à 65 kN, avec l'axe du demi-essieu centré sur les capteurs (comme expliqué sur la Figure 6.30). Deux séries de mesures ont été sélectionnées pour l'évaluation des géophones :

- Une première série de mesures réalisée le 14 mars 2017 à 18h30, avec différentes vitesses du manège comprises entre 3 à 10 tours par minute, (soit 6 m/s à 20 m/s), et pour une température moyenne de la couche bitumineuse de 16.5°C .Cette série visait à étudier l'effet de la vitesse de chargement sur la réponse des géophones, à température constante.
- Une deuxième série de mesures réalisées le 15 mars 2017, à différents moments de la journée (à 9h42, 11h54, 15h36), correspondant à différentes températures (13°C, 14.5°C et 20 °C respectivement). Ces mesures ont été réalisées à une vitesse constante de 5 tours par minute, soit 10 m/s. Cette deuxième série de mesures avait pour objectif d'étudier l'effet de la température sur la réponse des capteurs, à vitesse constante. Toutefois, à la période où ces essais ont pu être réalisés (mars 2017), les amplitudes de variation journalière de la température restaient assez limitées. En période estivale et ensoleillée, on peut avoir des amplitudes supérieures (de l'ordre de 20 à 25 °C)

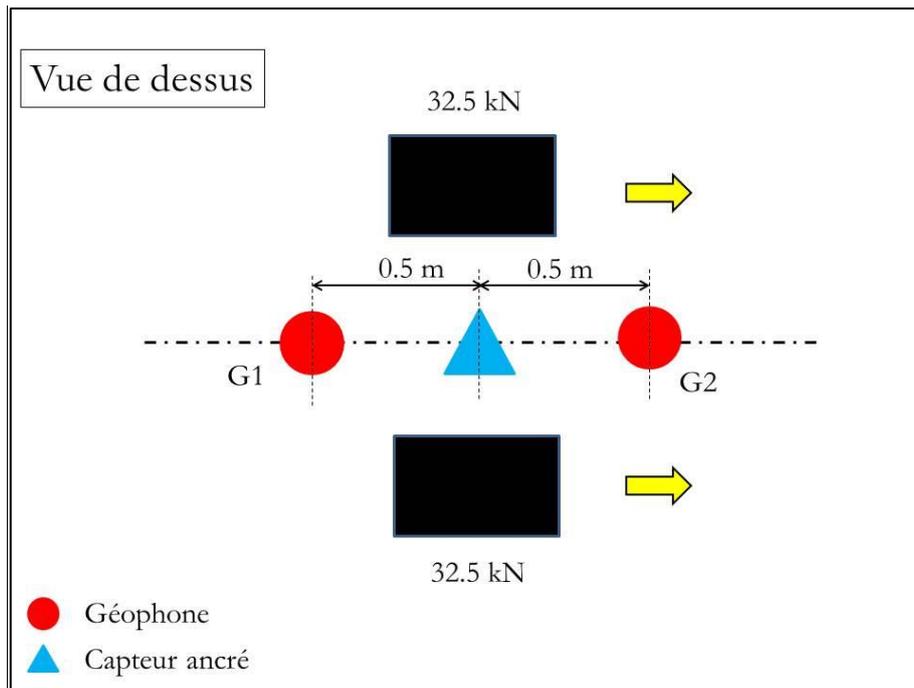


Figure 6.30. Vue de dessus de la position des géophones et des capteurs ancrés par rapport aux roues du manège, lors des tests des géophones (chargement par un demi-essieu standard de référence)

6.4.2.3 Exploitation des mesures et validation de la méthode de correction des signaux des géophones

6.4.2.3.1 Exemple de mesures

Les Figure 6.31 et Figure 6.32 présentent des signaux du capteur ancré et du géophone G2 enregistrés au passage des demi-essieux du manège. L'enregistrement a été réalisé le 15 mars 2017 à 9h42. La durée des signaux est d'environ 23 secondes (2 tours complets du manège). Chaque pic observé sur le signal correspond au passage d'un essieu du manège. On a donc, au total, 8 pics par séquence de mesure.

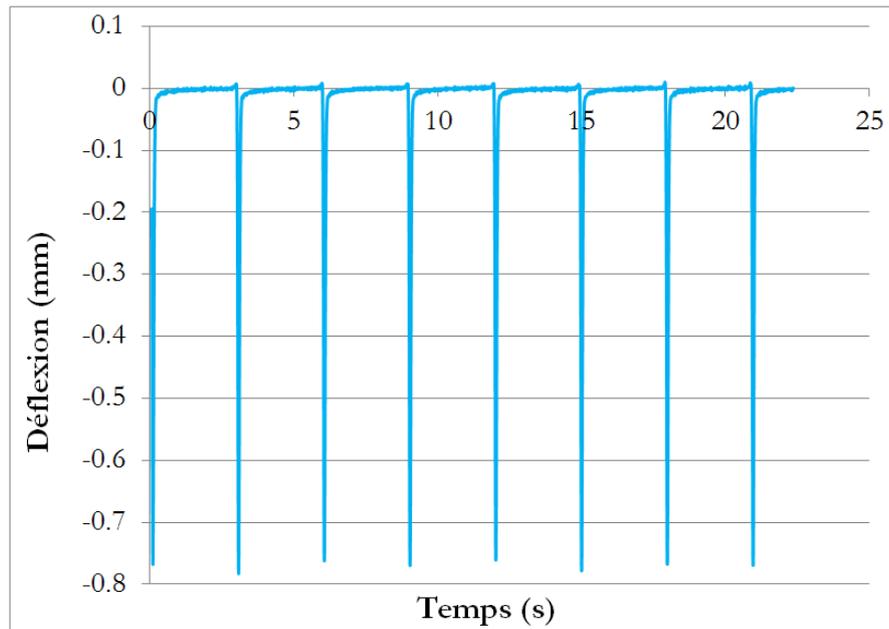


Figure 6.31. Signal du capteur ancré au passage des essieux du manège (l'enregistrement à 9h42 le 15 mars 2017, $T=13^{\circ}\text{C}$, $v=10\text{ m/s}$)

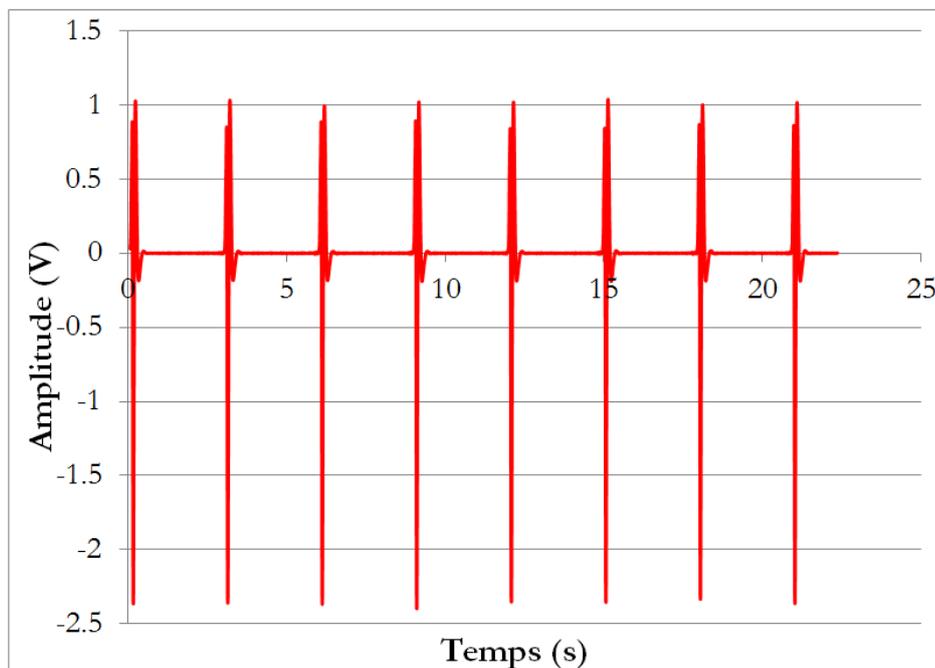
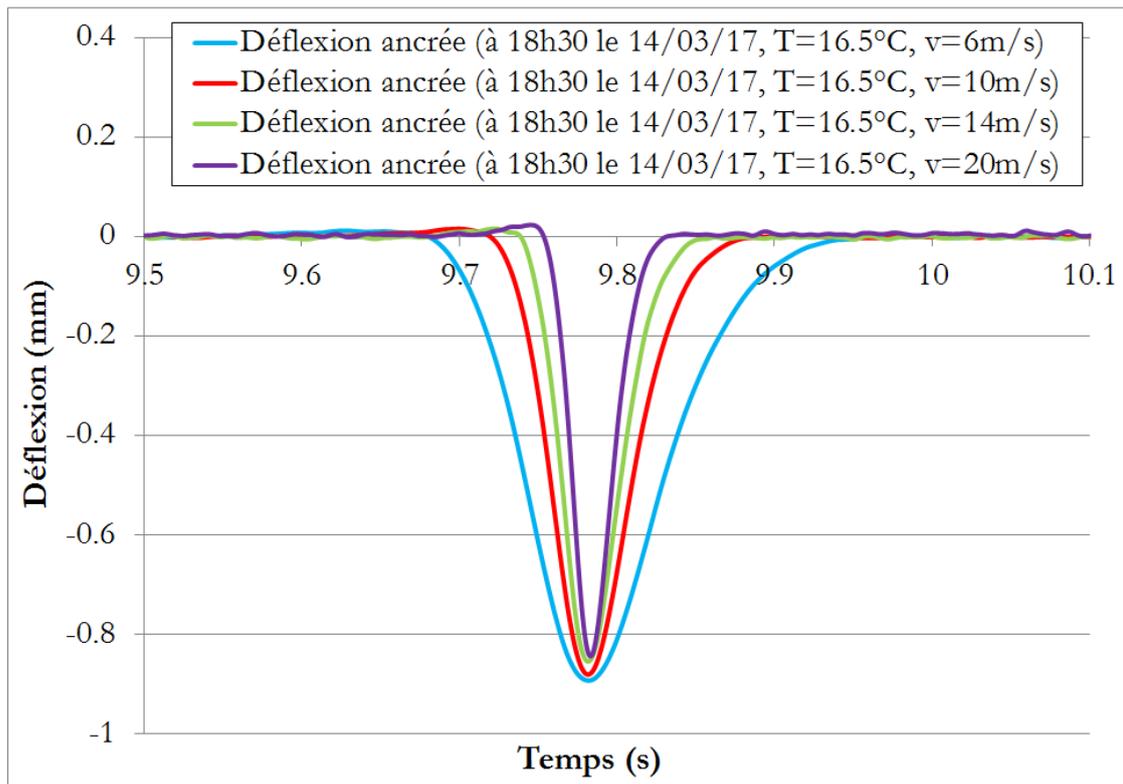


Figure 6.32. Signal brut du géophone G2 (l'enregistrement à 9h42 le 15 mars 2017, $T=13^{\circ}\text{C}$, $v=10\text{ m/s}$)

6.4.2.3.1.1 Evolution en fonction de la vitesse du chargement

La première série de mesures effectuées à 18h30 le 14 mars 2017 ($T=16.5^{\circ}\text{C}$) permet d'étudier l'influence de la vitesse de passage du chargement sur les mesures des capteurs. Les Figure 6.33 à Figure 6.35 présentent la déflexion mesurée par le capteur ancré et la valeur brute des géophones G1 et G2 à différentes vitesses, qui varient de 6 m/s à 20 m/s. On constate ainsi que:

- Les signaux du capteur ancré sont similaires. Le signal est plus élargi lorsque la vitesse diminue. La valeur de déflexion est comprise entre 0.8 mm et 0.9 mm. La déflexion mesurée augmente lorsque la vitesse du chargement diminue.
- Les signaux des géophones sont similaires avec un pic vers le bas correspondant au passage du chargement sur le capteur. L'amplitude des géophones augmente fortement avec la vitesse, ce qui confirme la sensibilité à la fréquence de la réponse du géophone, dans la plage considérée (atténuation du signal à basse fréquence).



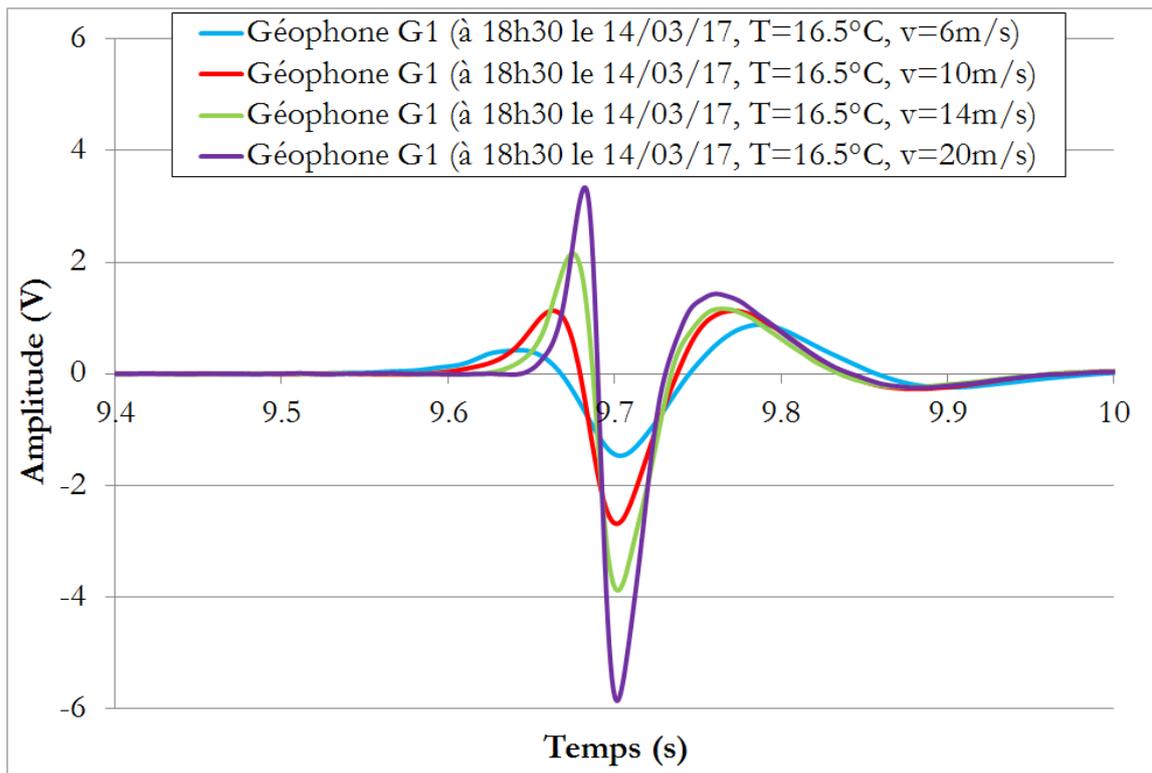


Figure 6.34. Evolution des signaux bruts du géophone G1 en fonction de la vitesse du chargement (les mesures ont été effectuées à 16.5°C à 18h30 le 14 mars 2017)

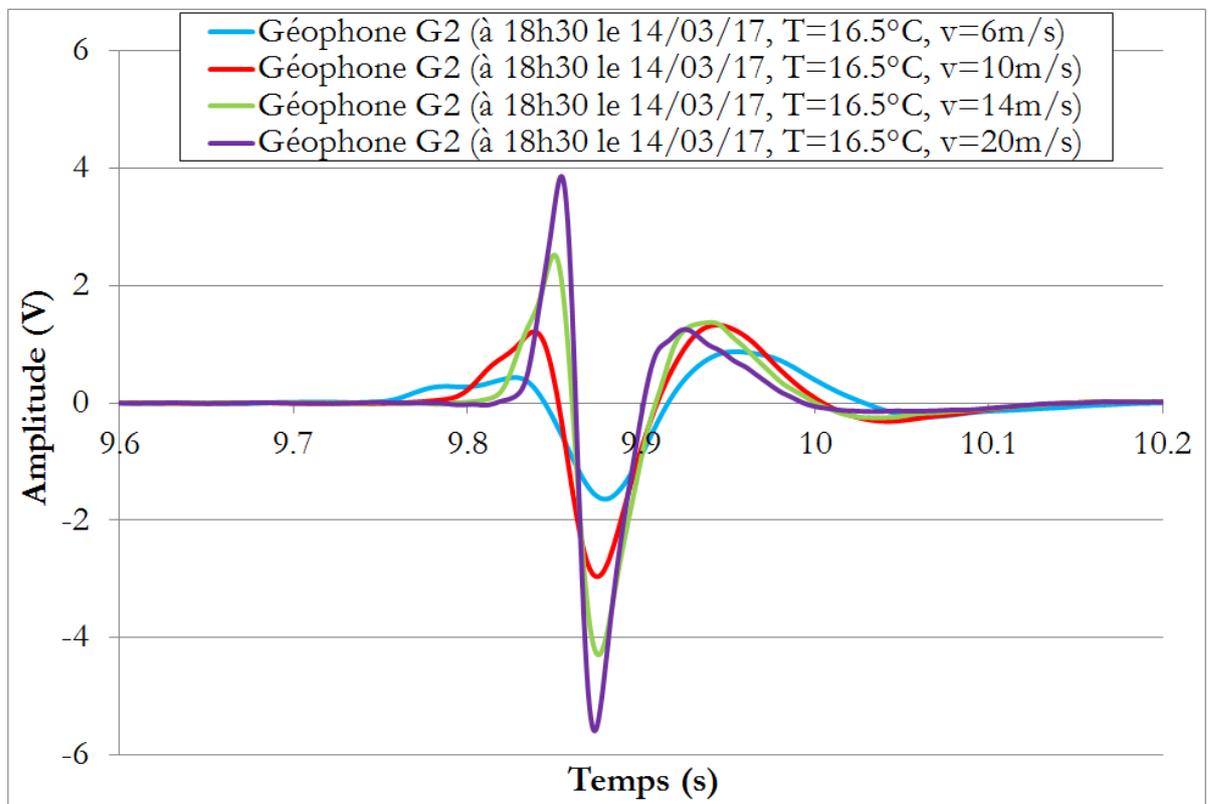


Figure 6.35. Evolution des signaux bruts du géophone G2 en fonction de la vitesse du chargement (les mesures ont été effectuées à 16.5°C à 18h30 le 14 mars 2017)

6.4.2.3.1.2 Evolution en fonction de la T°

La deuxième série de mesures effectuées à différents moments le 14 mars 2017 à vitesse constante (10 m/s) permet d'étudier l'influence de la température sur les mesures des capteurs. Les Figure 6.36 à Figure 6.38 présentent la déflexion mesurée par le capteur ancré et la valeur brute des géophones G1 et G2 à différentes température. On constate ainsi que:

- Les signaux du capteur ancré sont très proches. La valeur de déflexion est comprise entre 0.78 mm et 0.82 mm. La déflexion mesurée augmente légèrement avec la température.
- Les signaux des géophones sont similaires avec un pic vers le bas correspondant au passage du chargement sur le capteur. Comme les mesures de déflexion, l'amplitude des géophones augmente faiblement avec la température.

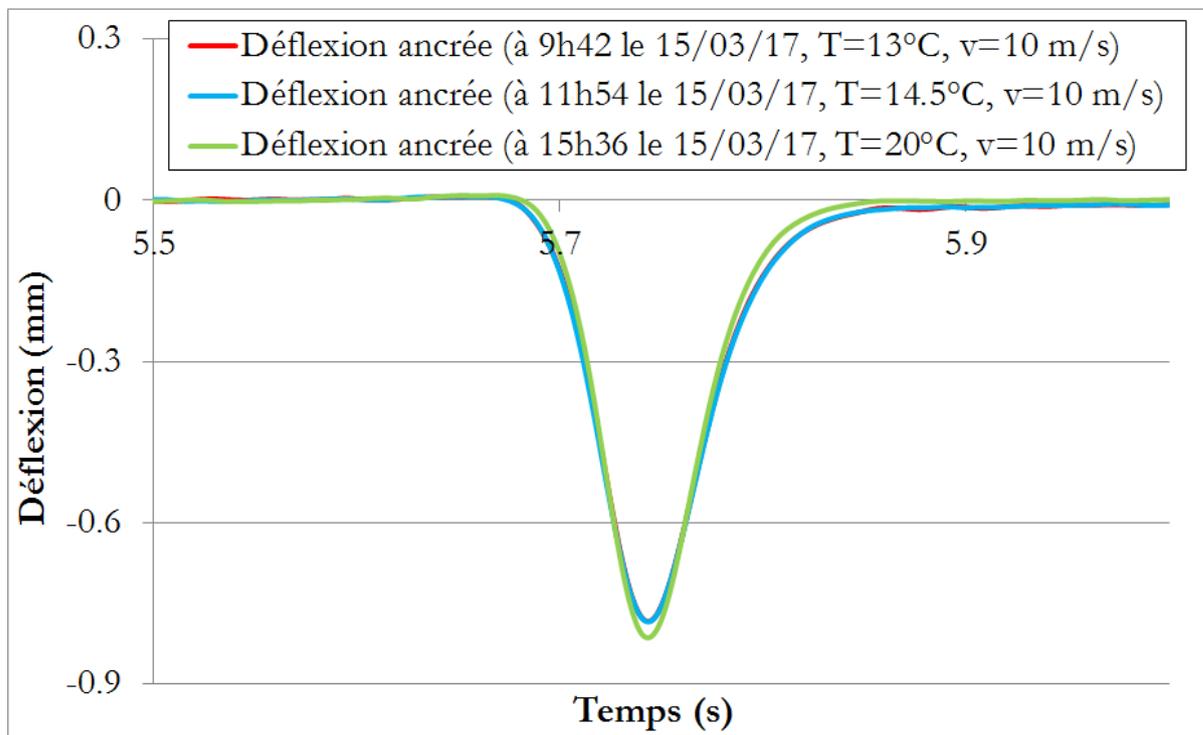


Figure 6.36. Evolution de la déflexion mesurée par le capteur ancré en fonction de la température (les mesures ont été effectuées à 13°C , 14.5°C et 20°C le 15 mars 2017)

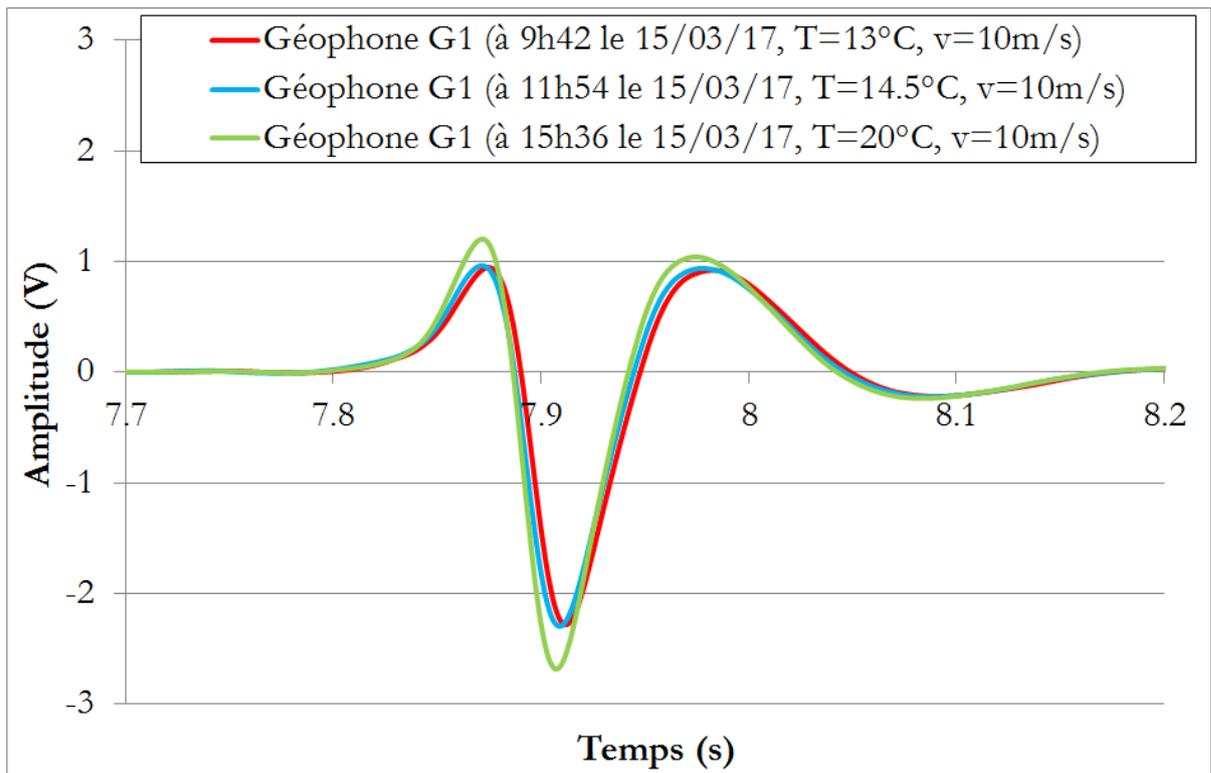


Figure 6.37. Evolution des signaux bruts du géophone G1 en fonction de la température (les mesures ont été effectuées à 13°C, 14.5°C et 20°C le 15 mars 2017)

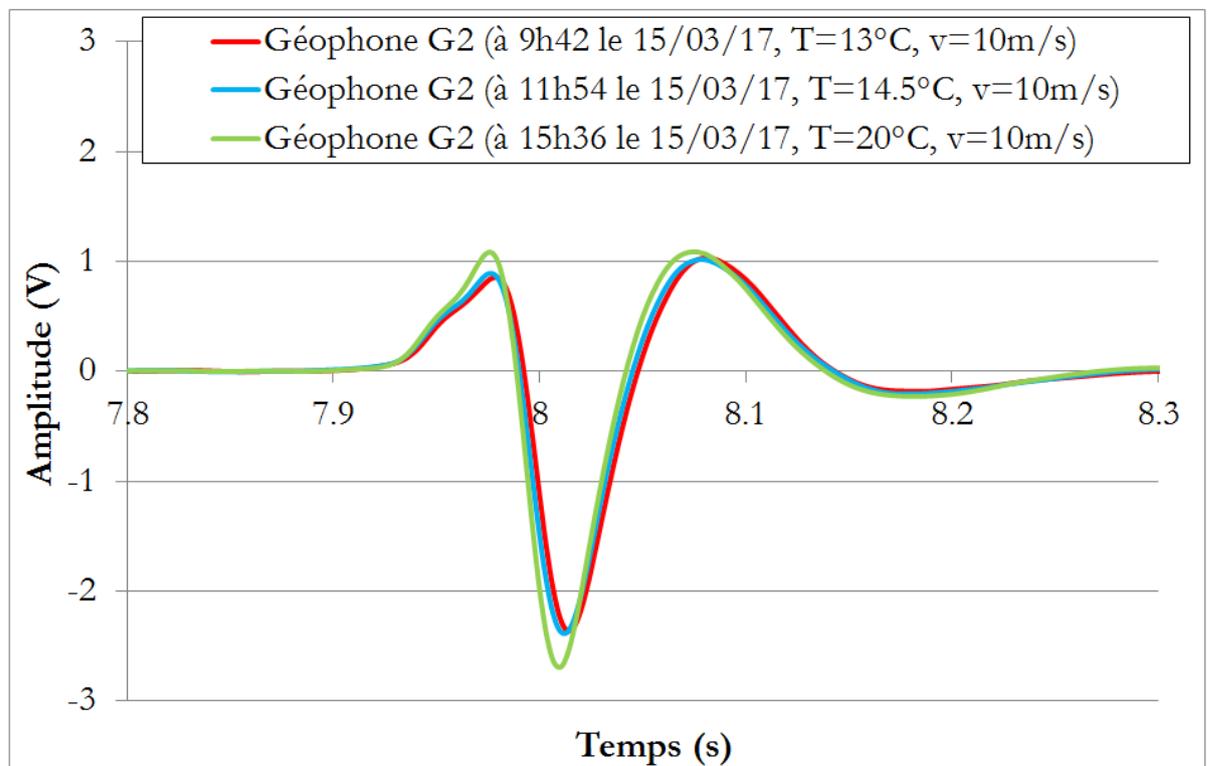


Figure 6.38. Evolution des signaux bruts du géophone G2 en fonction de la température (les mesures ont été effectuées à 13°C, 14.5°C et 20°C le 15 mars 2017)

6.4.2.3.2 Validation de la méthode de correction des signaux des géophones

Les mesures sélectionnées sur le manège ont été utilisées pour valider la méthode de correction des signaux des géophones présentée dans le paragraphe 6.4.1. Pour cela, on a appliqué la procédure de correction, et on a ajusté les paramètres suivants, de façon à caler au mieux les signaux des géophones sur la référence, constituée par les mesures du capteur ancré :

- La fréquence de coupure du géophone
- Le coefficient d'amplification de la partie basse fréquence du signal du géophone

En ce qui concerne la fréquence de coupure du géophone, qui se situe autour de 4.5 Hz, on a décidé de tester cinq valeurs différentes de cette fréquence: 3 Hz, 3.5 Hz, 4 Hz, 4.5 Hz et 5 Hz. Pour chaque fréquence, la méthode de correction a été appliquée en faisant varier le coefficient d'amplification de la composante basse fréquence du signal, afin de reproduire au mieux la forme et l'amplitude de la déflexion mesurée par les capteurs ancrés.

La Figure 6.39 présente un exemple qui illustre le calage des signaux des géophones G1 et G2 pour un passage du demi-essieu standard de référence enregistré le 15 mars 2017 à 9h42. La fréquence de coupure choisie ici est de 4.5 Hz. Pour cette fréquence, le coefficient d'amplification de la composante basse fréquence du signal a été fixé à 1.4. On constate que pour cette valeur du coefficient d'amplification, les valeurs maximales de déflexion calculées à partir des mesures des géophone sont très proches de la mesure du capteur ancré (environ 0,8 mm). Par contre, la forme du signal du capteur ancré n'est pas complètement bien reproduite (les géophones conduisent à un signal plus large que le signal de référence)

La même méthode de calage des signaux des géophones, consistant à fixer la fréquence de coupure, puis à ajuster le coefficient d'amplification des basses fréquences, de façon à caler les mesures du capteur ancré, a été appliquée pour l'ensemble des signaux enregistrés au cours des 2 séries de mesures (à vitesse variable, et à température variable) réalisées sur le manège de fatigue.

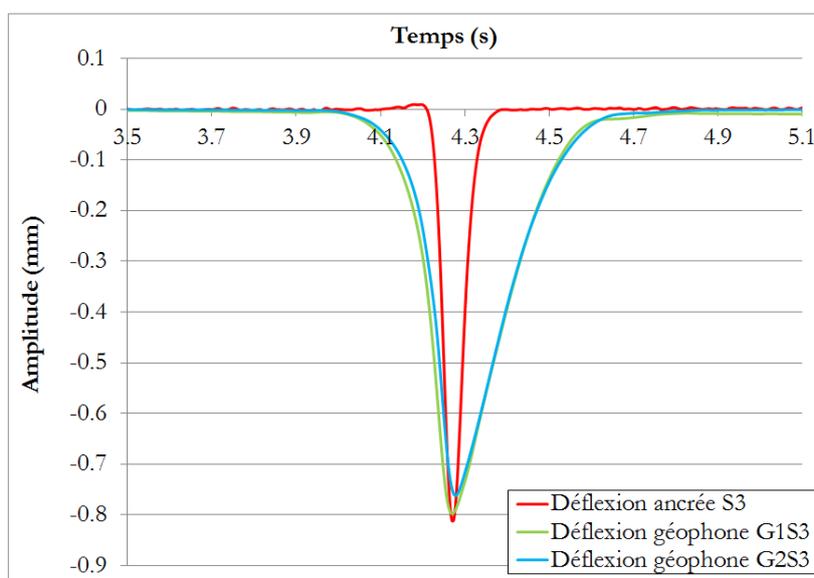


Figure 6.39. Calage des signaux des géophones sur la déflexion mesurée par le capteur ancré. Mesure sous passage du demi-essieu standard de référence à 10 m/s le 15 mars 2017 à 9h42, T=13°C (paramètres de calage: $F_c=4.5$ Hz, coefficient d'amplification BF = 1.4) Deuxième série de mesures

Afin d'étudier l'effet de vitesse de chargement sur les mesures des géophones, une série de mesures a été effectuée à température constante (16.5°C) à 18h30 le 14 mars 2017. Différentes vitesses du manège, variant de 3 à 10 tours par minute, soit de 6 m/s à 20 m/s ont été appliquées. Pour chaque vitesse, la méthode de correction de déflexion a été appliquée aux signaux des géophones, en faisant varier le coefficient d'amplification de la composante basse fréquence (BF) pour chaque fréquence de coupure choisie, de manière à caler la déflexion sur les mesures in situ. La Figure 6.40 présente les valeurs du coefficient d'amplification BF des signaux des géophones à différentes vitesse de chargement (6 m/s; 10 m/s; 14 m/s; 20 m/s) et pour différentes fréquences de coupures ([3Hz – 5Hz]). Ces valeurs correspondent à la moyenne des deux valeurs calées pour les deux géophones et ne varient pas beaucoup de l'un à l'autre. On constate que le coefficient d'amplification obtenu diminue lorsque la fréquence de coupure augmente. Pour une fréquence de coupure donnée, ce coefficient diminue fortement lorsque la vitesse de chargement augmente.

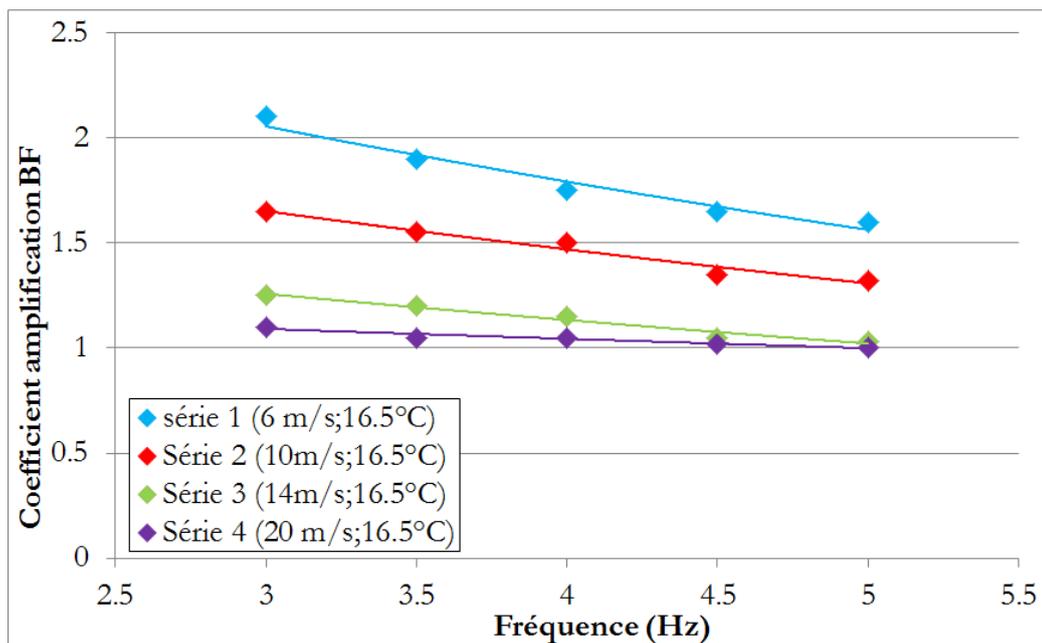


Figure 6.40. Application de la méthode de correction pour les différents cas de fréquence de coupure des géophones (de 3 Hz à 5 Hz) sous le passage du demi-essieu standard de référence à différentes vitesses (18h30 le 14 mars 2017, T=16.5°C)

Ces premiers résultats, qui ont montré que le coefficient d'amplification à appliquer dépend plus de la vitesse de passage des charges que de la fréquence de coupure choisie. Figure 6.41 et le Tableau 6.2 donnent les valeurs du coefficient d'amplification BF ainsi obtenues. On voit que ce coefficient diminue lorsque la vitesse augmente, ce qui est logique puisque la partie basse fréquence est d'autant plus importante que la vitesse de passage est faible. On constate aussi que pour une vitesse de 20 m/s (vitesse maxi applicable dans cet essai sur le manège), le coefficient d'amplification tend vers 1, c'est-à-dire qu'à partir de cette vitesse, une amplification de la composante basse fréquence n'est plus nécessaire.

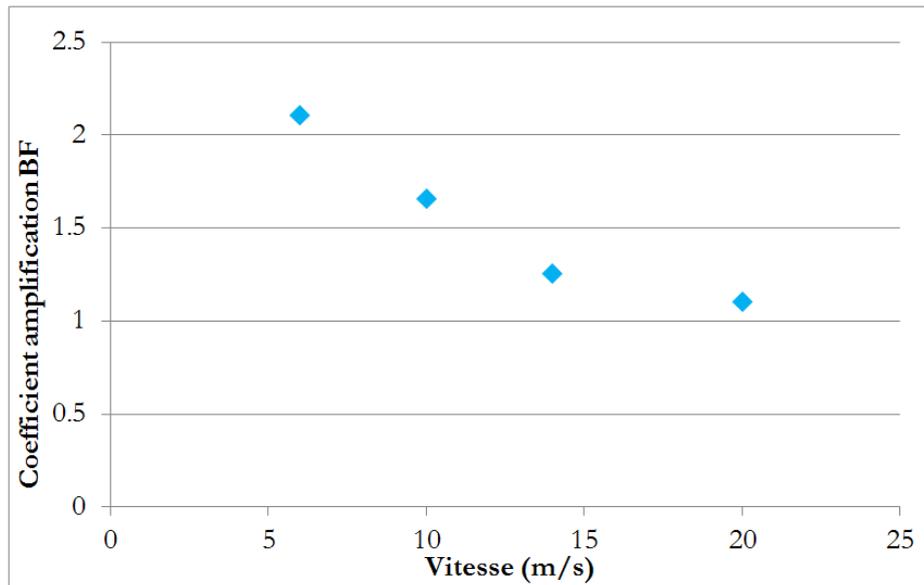


Figure 6.41. Variation du coefficient d'amplification BF déterminé pour les géophones en fonction de la vitesse de chargement, pour une fréquence de coupure de 3Hz

Tableau 6.2. Valeurs du coefficient d'amplification BF des signaux des géophones obtenues pour différentes vitesses de chargement (fréquence de coupure de 3Hz).

Fréquence de coupure = 3 Hz, T=16.5°C	
Coefficient d'amplification BF	Vitesse de chargement (m/s)
2.1	6
1.65	10
1.25	14
1.1	20

Afin d'étudier l'effet de la température sur les mesures des géophones, une deuxième série de mesures a été réalisée le 15 mars 2017. Ces mesures ont été réalisées à différentes heures de la journée (9h42, 11h54, 15h36), permettant d'avoir des températures différentes (13 °C, 14.5 °C et 20°C respectivement). Les mesures ont été réalisées avec le demi-essieu standard de référence, à une vitesse constante de 10 m/s. Pour chaque température, la procédure de calcul de la déflexion a été appliquée aux signaux des géophones, pour plusieurs fréquences de coupure des géophones (3Hz à 5Hz). Comme précédemment, pour chaque fréquence, le coefficient d'amplification de la composante basse fréquence du signal a été ajusté, de manière à caler la déflexion mesurée. Les valeurs du coefficient d'amplification ainsi obtenues pour chaque fréquence de coupure sont présentées sur la Figure 6.42 et dans le Tableau 6.3. Pour les trois températures, on constate que la valeur du coefficient d'amplification des BF diminue lorsque la fréquence de coupure augmente. On observe aussi que pour une fréquence de coupure de 3 Hz, le coefficient d'amplification ne varie quasiment pas avec la température. L'influence de la température est plus marquée lorsque la fréquence de coupure est plus élevée. Ces mesures montrent donc qu'en

fixant la fréquence de coupure à 3Hz, on peut considérer que la température a peu d'influence sur les mesures, et prendre un coefficient d'amplification constant. Ce résultat n'a toutefois été obtenu que sur une plage de température limitée (entre 13 et 20°C, qui résulte de la date à laquelle ont été faites les mesures, en mars 2017).

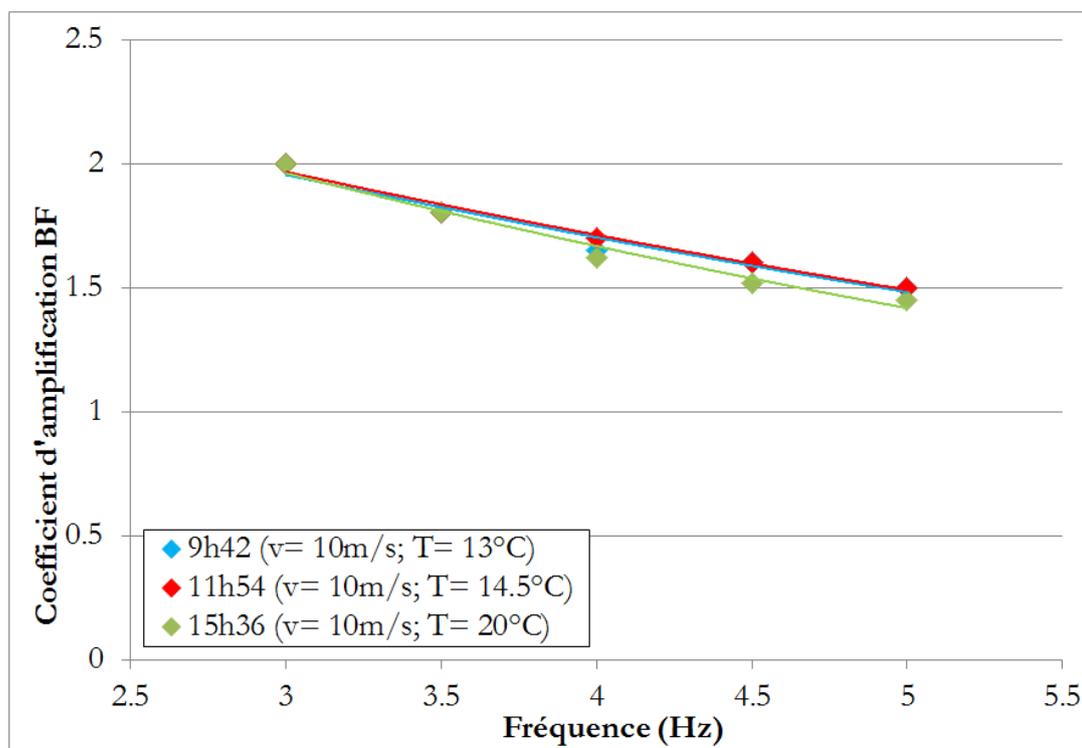


Figure 6.42. Application de la méthode de correction pour les différents cas de fréquence de coupure des géophones (de 3 Hz à 5 Hz) sous le passage du demi-essieu standard de référence à 10 m/s à différentes périodes de mesures le 15 mars 2017 (9h42 avec T=13°C, 11h54 avec T=14.5°C, 15h36 avec T=20°C)

Tableau 6.3. Valeurs du coefficient d'amplification BF des signaux des géophones obtenues pour 3 températures différentes (mesures le 15 mars 2017)

	9h42 (13°C, 10m/s)	11h54 (14.5°C, 10m/s)	15h36 (20°C, 10m/s)
Fréquence (Hz)	Coefficient d'amplification BF	Coefficient d'amplification BF	Coefficient d'amplification BF
3	2	2	2
3.5	1.8	1.8	1.8
4	1.65	1.7	1.62
4.5	1.6	1.6	1.52
5	1.5	1.5	1.45

6.4.2.3.3 Conclusions sur la méthode de correction des mesures des géophones

La méthode de correction des signaux des géophones a été appliquée à deux séries de mesures réalisées sur le manège de fatigue, et les valeurs de déflexion obtenues ont été comparées avec les mesures de référence obtenues avec les capteurs de déplacement ancrés. En appliquant cette méthode, et en calant la fréquence de coupure et les coefficients d'amplification, on a montré que les signaux sont largement améliorés :

- La procédure de correction supprime les oscillations « vers le haut » des signaux des géophones qui n'ont pas de sens physique et permet d'obtenir une forme de signaux raisonnable (même si la largeur du signal réel n'est pas complètement bien restituée).
- Le calage des paramètres permet d'obtenir des amplitudes de déflexion en bon accord avec les mesures de référence.

Les deux séries de mesures ont également permis de déterminer les valeurs de paramètres de correction en fonction de la température et de la vitesse de chargement. La série de mesures à différentes températures, à vitesse constante (10 m/s) a montré que pour une fréquence de coupure de 3 Hz, le coefficient d'amplification BF ne varie quasiment pas avec la température, dans la plage étudiée (entre 13 et 20°C). Pour cette fréquence de coupure, l'effet de la température peut donc être négligé. La série de mesures à différentes vitesses, à température constante a montré que le coefficient d'amplification à appliquer diminue lorsque la fréquence de coupure choisie augmente. On a alors choisi de fixer la fréquence de coupure à 3 Hz. Pour cette valeur, on a montré que le coefficient d'amplification diminue lorsque la vitesse du chargement augmente (dans la plage 6 m/s à 20 m/s).

Pour le traitement des mesures sur site, on a vu dans ce chapitre que la vitesse moyenne des poids lourds sur la section instrumentée est d'environ 76 à 80 km/h (soit entre 21 m/s et 22 m/s), avec une faible dispersion. Par conséquent, pour la correction des mesures des géophones sur site, on a donc choisi de retenir comme paramètres de correction une fréquence de coupure de 3 Hz et une valeur du coefficient d'amplification BF de 1.1, qui correspond à la valeur obtenue sur le manège de fatigue pour 20 m/s, quelle que soit la température des couches de chaussée. Ces paramètres ont donc été appliqués au traitement des mesures des géophones sur site, en vue de suivre l'évolution de la déflexion de la chaussée.

6.4.3 Applications aux mesures sur l'Ax

Les mesures des géophones ont été enregistrées en continu sous trafic réel de mai 2015 à mai 2016.

6.4.3.1 Comparaison des mesures des géophones avec la modélisation

Cette partie consiste, dans un premier temps, de comparer les signaux mesurés des géophones avec les différentes hypothèses de calcul avec le logiciel ALIZE. Ce sont les mêmes hypothèses utilisées pour la modélisation de la chaussée présentée dans le chapitre 4 pour les mesures des jauges. Les hypothèses concernant sont les suivants :

- Tout d'abord des interfaces BBME / EME et EME / GB sont collées.
- Des interfaces BBME / EME et EME / GB sont totalement décollées
- Des interfaces BBME / EME et EME / GB sont décrites par des couches minces élastiques (2 mm d'épaisseur) avec un module d'élasticité relativement faible, simulant les

propriétés de la couche d'émulsion située à l'interface des couches bitumineuses (d'après les calages réalisés dans le chapitre 4).

La structure utilisée pour la modélisation est la structure définie à partir des mesures initiales sur site (cf Tableau 5.3). Les modules des couches sont ajustés en fonction de la température, et correspondant à une fréquence de 10 Hz. Les calculs ont été effectués pour un poids-lourd de 5 essieux de type T2S3 chargé à 44 tonnes, avec les charges des essieux correspondant à celles du poids-lourd utilisé pour la campagne expérimentale des mesures sur site (cf Figure 2.16). Pour les mesures, les charges des poids lourds T2S3 ne sont pas connues. La vitesse des véhicules est cependant autour de 80 km/h.

Vu que les mesures du géophone G1 sont relativement stables pendant toute la période de monitoring, on a décidé d'appliquer la méthode de correction pour ce géophone placé à la base de la couche d'EME et sur la bande de roulement. Ce géophone est en plus aligné avec les jauges de déformations et le déclenchement sur seuil a été fait sur celui-ci.

La Figure 6.43 présente des comparaisons entre les signaux corrigés du géophone G1 et les différents modèles de calcul avec Alizé à basse température (15°C). Le signal a été enregistré à 8h00min le 21 novembre 2015. La charge du véhicule n'est pas connue.

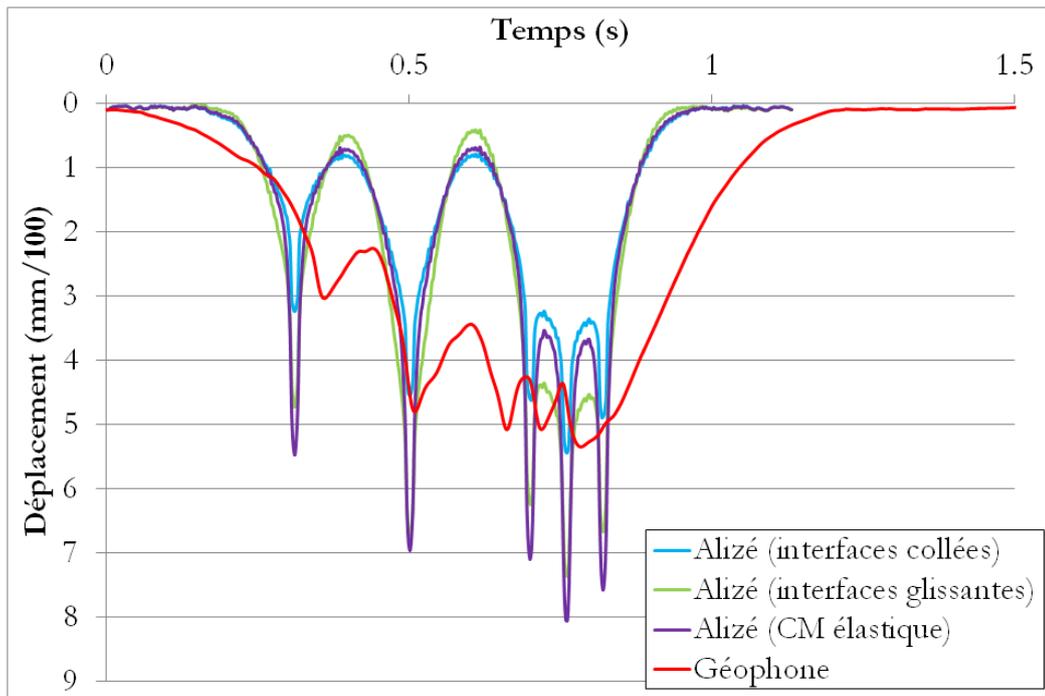


Figure 6.43. Comparaison entre le signal corrigé du géophone enregistré à 8h00min le 21 novembre 2015 et les différents modèles de calcul avec Alizé (15°C, 10 Hz)

On constate que :

- Pour la modélisation, la déflexion maximale de la chaussée avec l'hypothèse des interfaces collées est de l'ordre de 5.5 mm/100. La déflexion avec les autres hypothèses (interfaces glissantes, couches minces élastiques) est plus élevée (8 mm/100 environ).
- Le signal corrigé du géophone présente 5 pics qui correspondent au passage des essieux du poids lourd T2S3 sur la chaussée. La déflexion du signal est de 5.5 mm/100 environ, ce qui est du même ordre de grandeur que la déflexion calculée avec l'hypothèse des

interfaces collées. La forme du signal n'est cependant pas parfaitement bien restituée. Afin de pouvoir étudier l'évolution de la déflexion de la chaussée Ax, il est décidé, comme pour l'étude des mesures des jauges, de ne considérer que la déflexion sous le passage du premier essieu des poids lourds de type T2S3 qui a une charge constante (environ 65 kN) (Schmidt, et al., 2016).

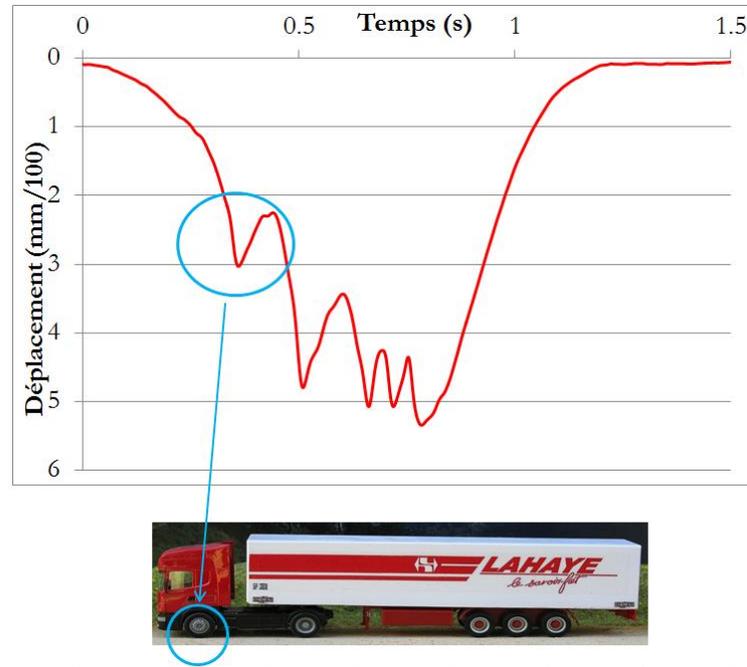


Figure 6.44. Déflexion mesurée sous le passage du premier essieu du poids lourd T2S3

6.4.3.2 Evolution de la déflexion moyenne

Une méthode simplifiée pour suivre l'évolution de la rigidité de la chaussée consiste à suivre l'évolution de la valeur moyenne mensuelle de la déflexion issue des signaux corrigés des géophones. La démarche de cette méthode est la suivante:

- Pour chaque signal de géophone correspondant au passage du poids lourd T2S3, on applique la méthode de correction
- On calcule ensuite la déflexion sous le passage du premier essieu de chaque poids lourd
- On calcule la moyenne des valeurs de déflexion de tous les signaux des poids lourds T2S3 enregistrés durant un mois

La Figure 6.45 présente la valeur moyenne mensuelle de la déflexion mesurée sous le passage du premier essieu des poids lourds T2S3 sur l'Ax de mai 2015 à mai 2016. On constate que l'évolution de la déflexion du premier essieu est cohérente avec l'évolution de la température à la base de la couche d'EME. Les pics de la courbe de déflexion ont été observés dans la période estivale où la température est plus élevée. On constate cependant que la variation de la déflexion avec la température est faible, par rapport à ce que donnent les calculs avec ALIZE. Cette variation n'est pas satisfaisante. Ces résultats peuvent être expliqués par deux raisons:

- La structure utilisée sur le manège pour valider la méthode de correction des mesures des géophones n'est pas la même que la structure de chaussée de l'autoroute Ax (elle est beaucoup plus souple).

- Les essais sur le manège n'ont pu être effectués qu'à trois températures différentes. Cette plage de température est de plus assez limitée (de 14°C à 20°C environ). Ces essais manège n'ont pu être poursuivis pour d'autres conditions, en raison de la dégradation rapide de la chaussée du manège, qui a conduit à l'arrêt de l'essai.

Des essais complémentaires, pour une gamme plus large de températures, seraient nécessaires pour proposer une correction plus précise en température. Cette correction risque également de dépendre de l'épaisseur des couches bitumineuses (plus ces couches sont épaisses, plus la sensibilité à la température sera grande).

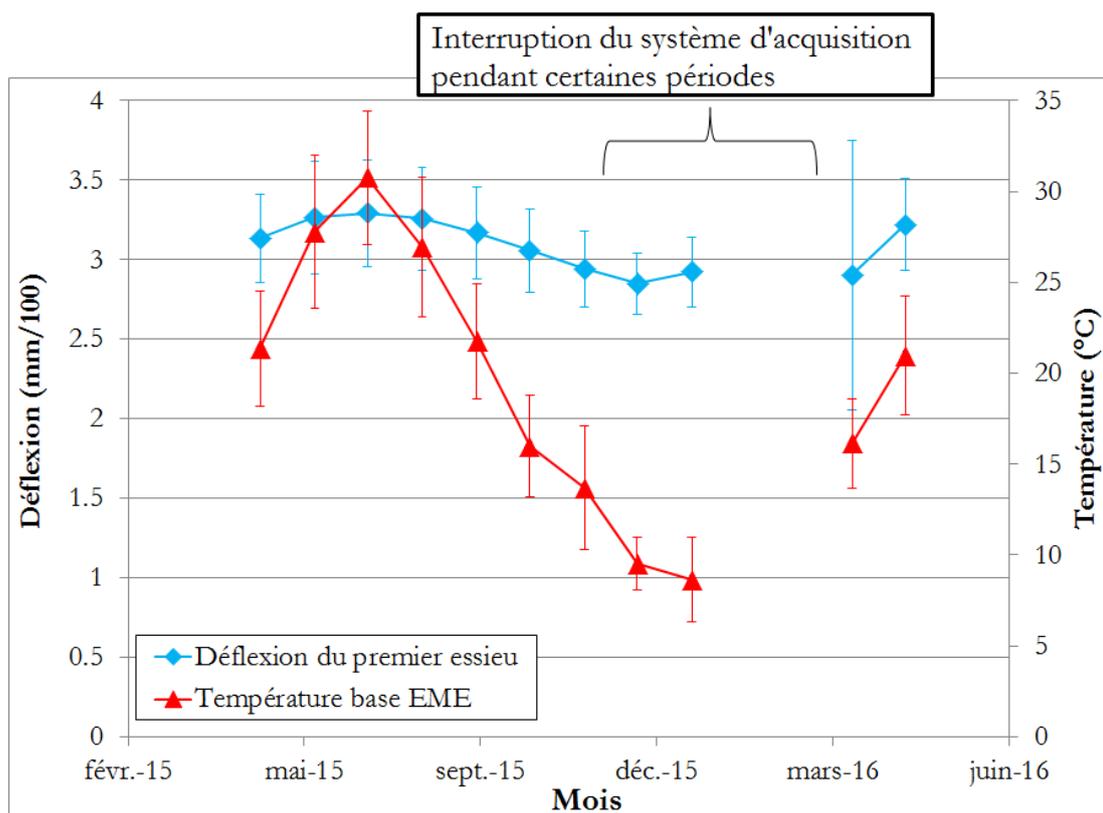


Figure 6.45. Evolution des valeurs moyennes mensuelles de déflexion sous le passage du premier essieu des poids lourds T2S3 sur l'Ax de mai 2015 à mai 2016

6.5 Conclusion

Ce chapitre présente les analyses des mesures des géophones placés sur le site Ax. L'acquisition et le transfert sans-fil des mesures sont réalisés par le système PEGASE développé à l'IFSTTAR. Avant de pouvoir effectuer le traitement des données, des essais en laboratoire (essais sur la table de vibration) ont été réalisés au sein du laboratoire SII de l'IFSTTAR. Ces essais consistent à étudier la réponse de ce type de géophone sur une plage de fréquence « utile » en régime dynamique, ce qui correspond aux sollicitations habituelles générées par les poids lourds sur la chaussée. Ils ont permis de préciser les caractéristiques métrologiques fournies par le fabricant avant que les géophones ne soient intégrés dans leur environnement de travail.

Le traitement des mesures a montré la bonne répétabilité et la bonne sensibilité des mesures des géophones aux déplacements produits par le passage des poids-lourds, et la possibilité d'identifier

les silhouettes des poids lourds à partir des signaux intégrés des géophones. Pour cela, une procédure de traitement a été développée, qui permet de détecter le nombre et la position des pics des signaux des poids lourds passant sur la chaussée. On a constaté que la plupart des poids lourds passant sur l'autoroute Ax est de type T2S3 (2 essieux sur le tracteur et 3 essieux sur la remorque) avec un pourcentage de 80 % (parmi les poids lourds dépassant le seuil d'acquisition). Il est également à noter qu'avec le seuil fixé, le comptage des poids lourds n'a été réalisé que sur une partie du trafic poids-lourds (représentant les poids lourds le plus chargés). Il serait possible d'utiliser la même procédure pour enregistrer et compter la totalité des poids lourds en diminuant le seuil d'acquisition choisi. A partir des mesures, on peut déduire également la vitesse de passage des poids lourds sur la chaussée à l'aide de plusieurs géophones placés dans le sens de circulation (sens longitudinal). Sur la section de l'Ax, la vitesse des poids lourds est généralement autour de 80 km/h.

Le traitement des mesures des géophones vise également à pouvoir remonter à la déflexion. Cependant, les signaux de ceux-ci présentent des oscillations vers le haut, qui indiquent un soulèvement de la chaussée et ne sont pas réalistes (le bassin de déflexion de la chaussée est toujours vers le bas). Cette imperfection est probablement due au processus d'intégration (apparition d'une constante d'intégration) et notamment à la faible capacité des géophones à restituer intrinsèquement des composantes vibratoires de basses fréquences (BF) alors que celles-ci sont susceptibles de contenir de fortes énergies (réponse non linéaire à basses fréquences). Une première tentative de correction a été donc proposée dans ce chapitre. Cette tentative constitue des étapes principales suivantes:

- Extraire les composants des hautes fréquences (HF) et les composants des basses fréquences (BF). On amplifie ensuite des composants BF par multiplier simplement un coefficient amplificateur.
- Intégrer numériquement chacun des composants. On applique ensuite la transformation mathématique de Hilbert permettant d'« envelopper » les signaux intégrés pour « supprimer » les oscillations vers le haut qui n'ont pas de sens physique.
- Reconstituer le signal final par la somme des composantes HF et BF.

Afin de pouvoir valider cette méthode de correction, deux séries de mesures ont été réalisées sur le manège sous charges contrôlées à différentes vitesses de passage et à différentes températures. Ces essais permettent de corriger les paramètres de correction (fréquence de coupure et coefficient amplificateur des composants BF) en fonction de vitesse de passage et de la température avant de pouvoir appliquer sur l'Ax.

Sur le manège de fatigue, un bon calage des mesures des géophones sur les amplitudes de déplacements mesurées par le capteur ancré a pu être obtenu. Ce résultat est encourageant, et montre qu'une exploitation appropriée des mesures permet une estimation réaliste de la déflexion. D'autres études sur le manège mériteraient cependant d'être réalisées pour mieux valider l'approche de correction proposée, qui n'a pu être appliquée que sur un nombre de mesures réduit. Notamment, des tests sur une plus grande plage de températures seraient nécessaires, afin de mieux comprendre l'influence de la température de la chaussée sur les mesures fournies par les géophones.

Au vu des résultats obtenus sur le manège, on a donc choisi de retenir comme paramètres de correction pour le site de l'Ax une fréquence de coupure de 3 Hz et une valeur du coefficient d'amplification BF de 1.1, qui correspond à la valeur obtenue sur le manège de fatigue pour 20

m/s, quelle que soit la température des couches de chaussée (en s'appuyant toutefois sur des tests sur une plage de température limitée).

Pour le site de l'Ax, la correction de déflexion a été appliquée pour les signaux des poids lourds de type T2S3, et pour leur premier essieu, dont la charge est relativement stable (environ 65 kN) d'après (Schmidt, et al., 2016). Les résultats obtenus pour ce niveau de charge à peu près constant montrent une évolution cohérente de la déflexion moyenne mensuelle avec la température. Cependant, cette variation avec la température est plus faible, en comparaison avec les résultats d'ALIZE, avec différentes hypothèses de comportement des interfaces. Le calage des mesures des géophones devra donc encore être amélioré, en réalisant des tests sur une plus grande plage de température, et également avec au moins deux structures de chaussées, d'épaisseur différente, afin de se rapprocher davantage des conditions d'un site autoroutier tel que celui de l'Ax.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans une démarche générale de développement des moyens d'auscultation et d'instrumentation permettant de suivre, de manière plus précise et plus fine dans le temps, les performances mécaniques et l'état structurel d'une chaussée. Cette thèse présente les études réalisées sur deux sites autoroutiers instrumentés sur l'A10 et l'Ax en partenariat avec les gestionnaires routiers Cofiroute et Colas. L'objectif était d'évaluer l'état structurel des chaussées en utilisant des capteurs spécifiques mis en place dans la chaussée (jauges de déformation, sondes de température et géophones), qui constituent un moyen de mesure complémentaire vis-à-vis des dispositifs d'auscultation classique qui sont peu souvent précis pour les structures épaisses et peu déformables.

De l'étude bibliographie effectuée, il ressort que l'instrumentation des chaussées est utilisée depuis pas mal d'années pour suivre le comportement des structures de chaussées, et l'évolution de ce comportement sous l'effet des conditions environnementales (températures, variations de teneur en eau des matériaux non liés, etc). Cependant, dans ces études, les mesures sont généralement effectuées de manière ponctuelle, sous le passage d'un véhicule de référence (mesures espacées de quelques semaines à quelques mois...). A côté des mesures ponctuelles, la réalisation de mesures en continu, sous trafic réel, présentée dans ce rapport de thèse, apparaît donc comme une approche originale qui permet de suivre de manière beaucoup plus fine l'état structurel des chaussées, en prenant en compte l'effet des variations journalières et saisonnières de température, et des différents types de poids lourds. La contrepartie est que ce type de suivi génère de grandes quantités de données de mesure, qui doivent être traitées de manière automatique, afin d'en tirer les informations pertinentes. Les travaux menés dans cette thèse visaient donc à tester différentes approches de traitement de ces mesures, permettant de caractériser l'évolution des déformations, des déflexions, des modules des matériaux.

La première étude sur site réel instrumenté a été réalisée sur le site de l'A10. Les mesures sur ce site ont été réalisées de manière ponctuelle au moyen d'un véhicule spécifique (déflectographe 02 dont l'essieu arrière est un essieu de jumelage de référence chargé de 130 kN) et continue sous trafic réel. Les mesures sur site des jauges de déformation ont permis de déterminer les modules du matériau innovant Recycvia mis en place (provenant du retraitement de l'ancienne chaussée) et leur évolution dans le temps, et ainsi de rassurer le maître d'ouvrage sur son choix de réhabilitation. Les mesures sous trafic réel ont été réalisées avec les géophones. Par intégration des mesures des géophones, des valeurs moyennes de déplacement vertical de la chaussée au passage des charges des poids lourds ont été estimées. On a constaté que l'évolution de ces mesures était cohérente avec l'évolution des mesures des jauges de déformation et avec les variations saisonnières de la température. Ces déplacements mesurés par les géophones peuvent être utilisés comme indicateur de la rigidité globale de la chaussée, et de son évolution au cours du temps. Finalement, cette étude sur l'A10 a montré l'intérêt et les possibilités d'utilisation d'un système d'acquisition en continu, avec transmission des données à distance, pour le suivi du comportement de la chaussée sous trafic réel.

Suite aux résultats obtenus sur le site de l'A10, une seconde étude a été réalisée sur un autre site autoroutier de l'Ax, avec une instrumentation plus complète. Cette fois-ci, les mesures de tous les capteurs (jauges, géophones et sondes de température) ont été réalisées en continu sous trafic réel avec acquisition et transmission des données à distance au moyen du système d'acquisition PEGASE développé à l'IFSTTAR. Une grande quantité de données a été enregistrée, durant une période de 24 mois. Cette importante quantité de données et la variabilité des mesures due aux

variations du trafic (type de véhicules, charges des essieux, positions latérales sur la chaussée) a nécessité la mise au point d'un processus original de tri des signaux permettant de faciliter l'analyse de la réponse de la chaussée. Ce processus est constitué des étapes suivantes:

- La première étape consiste à sélectionner uniquement les signaux correspondant aux poids lourds à 5 essieux de type T2S3, dont les roues sont centrées sur les jauges. Une évaluation de la qualité des signaux, basée sur le rapport signal / bruit est également réalisée afin d'éliminer les signaux dont le pic produit par le passage du passage du 1er essieu a une amplitude trop faible.
- La deuxième étape est le traitement du signal de déformation mesuré sous le premier essieu des poids-lourds dont la charge est toujours similaire, et proche de 65 kN en moyenne, quelle que soit la variation des charges sur les essieux de la remorque des poids lourds de type T2S3.

Ce processus de tri permet de limiter la variabilité des mesures du trafic et d'étudier les variations des mesures de déformations en prenant en compte les variations saisonnières de température. Le traitement des données a également mis en évidence les grandes déformations à la base des couches bitumineuses (EME et BBME) à haute température. Le comportement viscoélastique des matériaux bitumineux a aussi été clairement mis en évidence avec les signaux des jauges transversales.

Afin de mieux appréhender le comportement mécanique de la chaussée, des modélisations ont été effectuées. Des comparaisons des déformations mesurées et calculées avec deux modèles : élastique linéaire (ALIZE) et viscoélastique (Viscoroute) ont été effectuées. Pour chaque modèle, différentes conditions d'interface ont été considérées: collée, totalement décollée, interface décrite par une couche mince (d'épaisseur 2 mm) élastique et/ou viscoélastique. Les résultats de modélisation ont montré que :

- Dans le cas des interfaces collées, les mesures de déformation sont largement sous-estimées, notamment à hautes températures.
- Le modèle viscoélastique décrit mieux la forme des signaux de déformation dans les couches bitumineuses. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des interfaces décrites par une couche mince élastique, avec un faible module qui varie avec la température (pour le modèle élastique) et par une couche mince viscoélastique (pour le modèle viscoélastique), qui restitue encore mieux la forme des signaux, notamment pour les déformations transversales.

Les résultats des modélisations et ses mesures montrent l'apparition d'un glissement à l'interface des couches bitumineuses et la diminution du degré de collage des interfaces avec la température. Ce phénomène, qui n'est pas pris en compte dans la méthode de dimensionnement des chaussées, peut conduire à une augmentation des déformations en extension à la base des couches bitumineuses et peut donc réduire la durée de vie en fatigue de la chaussée.

L'une des finalités du monitoring d'une chaussée (à condition de disposer de l'ensemble des informations nécessaires), est de pouvoir suivre non seulement l'évolution dans le temps des performances des matériaux, mais également l'évolution de l'endommagement de la chaussée. Ce dernier permet d'évaluer la durée de vie résiduelle de la chaussée. Une procédure de calcul d'endommagement en fatigue, basée sur la méthode française de dimensionnement des chaussées a été proposée, et un calcul d'endommagement été effectué sur l'Ax sur une durée de 10 mois où les données ont été enregistrées sans interruption. Les différentes hypothèses de modélisation

présentée ci-dessus ont été prises en compte dans ces calculs. Les calculs ont montré que le dommage élémentaire augmente avec la température pour toutes les hypothèses. L'hypothèse de couches minces viscoélastiques (hypothèse la plus réaliste pour la modélisation du comportement de la chaussée) conduit pour cette chaussée à un dommage environ 100 fois plus important qu'en utilisant l'hypothèse de dimensionnement utilisée en France (élasticité, température de 15°C, interfaces collées).

Ces résultats suggèrent des pistes d'amélioration de la méthode française de dimensionnement des chaussées, concernant la prise en compte du comportement viscoélastique des matériaux, la prise en compte effective des variations de température, et l'amélioration de la caractérisation des interfaces entre couches de chaussée. Toutefois, la prise en compte de nouvelles hypothèses nécessiterait aussi un recalage de la méthode, dont les coefficients de calage actuels sont basés sur les hypothèses de modélisation actuelles (élasticité linéaire, température constante, interfaces collées).

L'acquisition à distance a également été réalisée pour les mesures des géophones. Le traitement des mesures a montré la possibilité d'identifier les silhouettes des poids lourds passant sur la chaussée. Ce processus d'identification est basé sur la détection des pics positifs et négatifs (nombre des pics, position des pics) des signaux des géophones après intégration. Les résultats ont montré que la plupart des poids lourds qui circulent sur la chaussée sont de type T2S3 (5 essieux): environ 80% pour chaque mois. A partir de ces mesures, la vitesse de passage des poids lourds sur la chaussée peut également être calculée à l'aide de deux géophones placés dans le sens de circulation (sens longitudinal) et écartés d'un mètre. La vitesse moyenne des poids lourds est généralement autour de 80 km/h. L'intérêt de telles mesures est que les géophones sont des capteurs robustes et relativement peu coûteux (environ 100 € pour les géophones utilisées). Les données récoltées permettent donc une évaluation de la composition et de l'agressivité du trafic, pour un coût faible.

L'intérêt des géophones est non seulement de permettre l'identification des silhouettes des poids-lourds et le calcul de la vitesse mais également, de pouvoir remonter à la déflexion de la chaussée. Dans les faits, une opération d'intégration seule du signal « brut » délivré par le géophone ne suffit pas pour obtenir une valeur de déflexion réaliste, représentative des performances mécaniques des couches de chaussée. En effet, les signaux intégrés des géophones présentent des oscillations vers le haut qui traduiraient un soulèvement de la chaussée. Ce phénomène n'est pas réaliste car le bassin de déflexion est toujours orienté vers le bas. Deux facteurs gênent le calcul du signal de déflexion « réel »:

- Les capacités métrologiques intrinsèques du géophone face au type d'excitation de l'étude (solicitation s'inscrivant dans la plage spectrale où le capteur n'est pas le plus performant).
- Le fait que le signal à traiter soit à moyenne non-nulle (génération d'une composante continue du signal intégré, liée à la constante d'intégration).

Afin d'améliorer l'estimation de la déflexion, une méthode de correction a été proposée. Cette méthode consiste dans un premier temps, à amplifier les composantes de basse fréquence du signal, qui peuvent contenir de fortes énergies, et qui sont atténuées par la fonction de transfert du géophone et dans un deuxième temps, d'améliorer les imperfections générées par le processus numérique d'intégration. Cette méthode de correction a ensuite été validée par comparaison avec des tests sur le manège de fatigue sous chargement contrôlé, avec différentes conditions de vitesse et de température. Les mesures des géophones ont été donc comparées avec les mesures des capteurs de déflexion ancrée qui ont servi de mesures de « référence ».

L'application aux mesures de l'Ax montre une évolution régulière de la déflexion moyenne mensuelle sous le passage du premier essieu (charge constante quel que soit la variation des charges des essieux en remorque des poids lourds de type T2S3) avec la température. Une augmentation de la déflexion a été observée à haute température et une diminution a été observée à basse température. Malgré ces résultats, la valeur de la déflexion est encore faible en comparaison avec les déflexions calculées avec différentes hypothèses avec ALIZE. Ce résultat peut être dû au fait que la structure utilisée sur le manège pour valider la méthode de correction des signaux des géophones n'est pas la même que la structure de chaussée sur l'autoroute Ax. Les mesures sur le manège n'ont été réalisées qu'à seulement trois températures différentes (variant de 13°C à 20°C environ). Cette méthode est une première tentative visant à remonter à la déflexion de la chaussée à partir des mesures des géophones. Certains aspects peuvent certainement être encore améliorés comme la détermination des paramètres d'amplification des composants des basses fréquences. De plus, la méthode nécessiterait d'être validée pour différents types de structures et pour une plage plus grande de températures.

Perspectives

Ce travail est le premier à l'IFSTTAR qui a porté sur le développement de méthodes de traitement de mesures en continu, sous trafic réel, sur chaussées instrumentées. Il a permis de proposer différentes pistes d'interprétation de ces mesures, et ouvre plusieurs perspectives pour la poursuite de ces recherches:

Tout d'abord, les expérimentations ont montré le bon fonctionnement des systèmes d'acquisition à distance, qui ont permis de recueillir de grandes quantités de données sur le comportement mécanique des structures étudiées, permettant d'étudier finement les variations du comportement des chaussées (jusqu'à l'échelle journalière). Elles ont également montré le potentiel des géophones, capteurs peu coûteux, et très sensibles aux déplacements faibles enregistrés sur des chaussées autoroutières de forte épaisseur, pour l'évaluation de la composition du trafic, et l'estimation des déflexions. Dans ce travail, tous les traitements des mesures enregistrées ont été réalisés à posteriori, avec des procédures Scilab. Une évolution intéressante pourrait être l'implantation de certaines procédures de traitement (identification et comptage des silhouettes, détermination des vitesses, tri des signaux suivant certains critères) directement sur les cartes d'acquisition Pégase, conçues pour ce type d'applications. Cela permettrait un traitement en temps réel, évitant de stocker l'ensemble des signaux d'acquisition complets. Cela permettrait probablement de traiter les signaux de la totalité des poids lourds, alors qu'avec la procédure de traitement à posteriori, cela n'a pas été possible, et nous avons dû travailler avec un seuil de déclenchement de l'acquisition, réduisant le nombre de signaux enregistrés par jour, afin de réduire la quantité de données stockées et transmises.

Malgré des résultats intéressants, le déploiement d'une instrumentation à plus grande échelle sur les chaussées se heurte également à des problèmes de coût des capteurs (aujourd'hui de l'ordre de 100 € pour les géophones, à 400 € environ pour les jauges) et de difficulté de mise en œuvre, car les capteurs utilisés sont actuellement des capteurs filaires, qui nécessitent la réalisation de saignées et le passage de fils entre le capteur et le système d'acquisition). Des recherches sur la mise au point de capteurs sans fil, et à coût plus réduit, permettraient de faciliter le développement de telles applications.

Concernant les mesures des températures, également relativement peu coûteuses, nous avons montré qu'elles permettaient d'obtenir un historique fin des variations de température dans les couches de chaussées, qui peut permettre ensuite de réaliser des calculs d'endommagement de la chaussée prenant en compte les variations réelles de température, ce qui conduit à une estimation

de l'endommagement plus réaliste qu'une méthode de calcul avec une température constante. La réalisation et l'analyse de ce type de mesures sur un plus grand nombre de sections de chaussées permettrait de définir une approche réaliste pour la prise en compte des variations de température dans la méthode de dimensionnement des chaussées; des comparaisons de ces mesures avec des modèles thermiques, permettant d'estimer les températures internes dans les chaussées à partir des données météo seraient également intéressantes.

Concernant les mesures des jauges de déformation sous trafic réel, on a montré qu'une bonne exploitation de ces mesures nécessite de disposer d'informations sur les charges et sur les positions latérales des poids lourds (en plus également, de la mesure des températures). Des solutions ont été proposées pour obtenir ces informations, en exploitant les mesures des géophones (pour la position latérale), et les caractéristiques propres aux poids lourds semi-remorques à 5 essieux. Avec ces informations, il est possible de remonter, à partir des mesures, aux modules des couches, et également aux caractéristiques des interfaces. Ces résultats peuvent également être pris en compte dans les calculs d'endommagement.

Un des résultats marquants qui a été mis en évidence concerne les caractéristiques des interfaces, dont le comportement semble proche de celui d'une couche mince, élastique ou viscoélastique, sensible à la température. Ces résultats mériteraient d'être poursuivis par des études en laboratoire, sur le comportement des interfaces, à différentes températures (et avec différentes natures de couche d'accrochage), afin de confirmer les comportements observés. Ces résultats posent également la question de l'amélioration de la formulation des couches d'accrochage, afin d'optimiser le collage des couches. Tout cela pourrait déboucher sur de nouvelles recommandations concernant la prise en compte des interfaces dans les calculs de dimensionnement, ou également de renforcement des chaussées. Ces résultats sur le comportement des interfaces mettent également en avant le besoin de développer un essai *in situ*, pour l'évaluation des performances des interfaces de couches de chaussées ; quelques travaux sont en cours sur ce sujet, mais il n'existe pas aujourd'hui d'essai de référence, standardisé ou normalisé.

Enfin, les dernières perspectives concernent l'exploitation des mesures des géophones; une première méthode de correction des mesures des géophones, pour l'estimation des déflexions, a été proposée, mais celle-ci n'est pas encore complètement satisfaisante. Le travail sur ce sujet mériterait d'être poursuivi, en évaluant plusieurs types de géophones, d'abord en laboratoire, puis au moyen d'expérimentations sous conditions de chargements contrôlées, telles que celles réalisées sur le manège de fatigue, afin de choisir le géophone le plus adapté, et également améliorer et valider la procédure de traitement des mesures.

Bibliographie

AASHTO (1986), 1986. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C: s.n.

AFNOR, 2011. Norme NF P 98-086: Dimensionnement structurel des chaussées routières: Application aux chaussées neuves. Dans: s.l.:s.n.

Ai, C. et al., 2016. Analysis of Measured Strain Response of Asphalt Pavements and Relevant Prediction Models. *International Journal of Pavement Engineering*.

Allian Tech, 2010. *Généralités sur les accéléromètres*. s.l.:Spécialiste de la mesure dynamique.

Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., Elseifi, M. & Lahouar, S., 2004. *The Virginia Smart Road: The Impact of Pavement Instrumentation on Understanding Pavement Performance*, Washington DC: Transportation Research Board.

Athar Saeed & Jim Hall, W., 2003. *Accelerated pavement Testing: Data Guidelines*, USA: NCHRP Report 512, Transportation Research Board.

Autret, P. & Gramsammer, J.-C., 1990. Le manège de fatigue du LCPC et l'innovation. *Revue générale des routes et des aéroports (RGRA)*, Issue 680.

Bae, A. et al., 2010. Effects of Temperature on Interface Shear Strength of Emulsified Tack Coats and Its Relationship to Rheological Properties. *Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2180, pp. 93-101.

Berthier, J., 2013. De l'Essai AASHO au Manège de Fatigue. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, Issue 914, pp. 22-27.

Blanc, J. et al., 2015. Instrumentation de l'A10: Bilan après deux ans et demi de suivi. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, Issue 924, pp. 64-68.

Blanc, J. et al., 2016. Instrumentation de chaussées: Les jauges de déformations horizontales. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA)*, p. N° 940.

Boussinesq, J., 1885. *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des corps élastiques*. Paris: Gauthier Villars.

Burmister, D., 1943. The theory of stress and displacements in layered systems and applications of the design of airport runways. *Proceedings of the Highway Research Board*, Volume 23.

Chabot, A., Chupin, O., Deloffre, L. & Duhamel, D., 2010. Viscoroute 2.0: a tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement. *International Journal Road Materials and Pavement Design*, Volume 11 (2), pp. 227-250.

Chabot, A., Duhamel, D., Tamagny, P. & Poché, D., 2006. Visco-elastic modelling for asphalt pavements – Software ViscoRoute. *10th International Conference on Asphalt Pavements, Quebec, Canada*, Volume 2, pp. 5-14.

Chang, T.-Y. & Cui, H.-L., 2013. Determination of direction of arrival of seismic wave by a single tri-axial fiber optic geophone. *Defence Technology* 9, pp. 1-9.

Colette, C., 2011. *Review of sensors for low frequency seismic vibration measurement*, s.l.: CERN: ATS/Note/2011/001 (TECH).

- Collette, C. et al., 2012. Comparaison of new absolute displacement sensors. *Dynamic Testing: Methods and Instrumentation*.
- COST_333 (1999), 1999. *Final Report of Cost Action 333: Development of New Bituminous Pavement Design Method*, Luxembourg: European Commission.
- CTLGroup, s.d. *Asphalt Strain Gages*. s.l.:Source <http://www.ctlgroup.com> .
- David, H., Priest, L. & McEwen, T. V., 2004. *Design and Instrumentation of the structural pavement experiment at the NCAT Test Track*, s.l.: NCAT Report 04-01.
- Donnat, J., 1965. Capteurs et mesures de déplacement. *Bulletin de Liaison du Laboratoire Pont et Chaussées*, Issue 15.
- Duong, N. S., Blanc, J. & Hornych, P., 2016. instrumentation of an innovative pavement section on motorway A10. *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing (APT)*.
- Duong, N. S., Blanc, J. & Hornych, P., 2017. Analysis of the behavior of pavement layer interfaces from in-situ measurements. *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfield*.
- Gaborit, P., 2015. *Comportement thermo-mécanique de structures de chaussées bitumineux*. s.l.:Thèse à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Gaborit, P. et al., 2013. Analyse de la durée de vie résiduelle des chaussées autoroutières. *RGRA*, Issue 917-918.
- Goacolou, H. et al., 2003. La méthode française de dimensionnement. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, Issue 823.
- Grellet, D., Doré, G., Chupin, O. & Piau, J.-M., 2016. Experimental Evidence of the Viscoelastic Behavior of Interfaces in Bituminous Pavements - An Explanation to Top-Down Cracking?. *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements*, pp. 575-580.
- Guide CEREMA-IDRRIM, 2016. Diagnostic et conception des renforcements de chaussées. Dans: s.l.:s.n.
- Hogg, A., 1944. Equilibrium of a Thin Slab on an Elastic Foundation of Finite Depth. *Phil. Mag*, 35(243), pp. 265-276.
- Hornych, P., Piau, J.-M. & Kerzrého, J.-P., 2013. Bilan de l'utilisation du manège et perspectives. *RGRA*, Issue 914, pp. 90-96.
- Hossain, M. et al., 2012. Fourteen years of accelerated pavement testing at Kansas State University. *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing*.
- Huang, Y., 1993. *Pavement Analysis and Design*. Engenwoodcliffs: Prentice Hall.
- Huet, C., 1965. *Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastiques des matériaux hydrocarbonnés*. s.l.:Thèse à l'Université de Paris.
- Hug, C. et al., 2015. La Route de 5e Génération: Le Tronc Commun A10/A11. *Routes-Roads*, Issue 336.
- Kerzrého, J.-P., 2013. Implantation et résumé de l'utilisation du manège. *RGRA*, Issue 914, pp. 28-33.

- Khoury, I., Sargand, S., Al-Rawashdeh, A. & Edwards, W., 2012. Assessment of Response and Performance of Perpetual Pavements with Warm Mix Asphalt Surfaces at the Ohio Accelerated Pavement Load Facility. *Advances in Pavement Design through Full-Scale Accelerated Pavement Testing*, pp. 175-185.
- LCPC-SETRA, 1994. *Conception de dimensionnement des structures de chaussées: Guide technique national*. s.l.:s.n.
- Le Cam, V., 2011. Utilisation de la carte d'instrumentation PEGASE d'IFSTTAR dans plusieurs applications. Dans: http://www.ifsttar.fr/fileadmin/uploads/recherches/seminaires/JOA2011/J2-15_OP2-2_V-LeCam_DeclinaisonPEGASE.pdf. Marseille: Journées techniques Ouvrage d'Art.
- Le Cam, V., Cottineau, L.-M., Lemarchand, L. & Bourquin, F., 2008. Design of a generic smart and wireless sensors network – Benefits of emerging technologies. *Structural Health Monitoring*.
- Le Cam, V., Lemarchand, L., Martin, W. & Bonnet, N., 2010. Improving wireless sensor behavior by means of generic strategies. *Structure Health Monitoring*.
- Le Cam, V. & Martin, W., s.d. Guide de mise en oeuvre de PEGASE - Plateforme Experte Générique pour Applications Sans-fil Embarquées. Dans: http://www.a3ip.com/telechargements/Guide_de_mise_en_oeuvre_de_PEGASE_V1.E.pdf. s.l.:s.n.
- Leiva-Villacorta, F. & Timm, D., 2012. Simulating the effects of instrumentation on measured pavement response. *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing*.
- Liddle, W., 1962. Application des résultats de l'essai AASHO au calcul des chaussées souples. *International Conference of Asphalt Pavement*.
- Ling, F., Wang, W. & Mao, R., 1990. Dynamic stability analysis of the geophone spurious frequency phenomenon. *Journal of Sound and Vibration*, Issue 131(1), pp. 21-30.
- Lukanen, E. O., Novembre 2005. *Load testing of instrumented pavement sections*, s.l.: Final Report N°2005-47.
- Maadani, O., Abd El Halim, A. & Mostafa, N., 2015. Instrumentation for Monitoring Pavement Performance in Cold Regions. *Journal of Cold Regions Engineering*.
- Mauduit, C. et al., 2010. Evaluation of the concept of equivalent temperature for pavement design. *ISAP*.
- Mauduit, C. et al., 2013. Site instrumenté sur l'autoroute A75: impact des conditions climatiques sur les infrastructures routières. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA)*, Issue 907-908, p. 80.
- Miner, M., 1945. Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of applied mechanics*, Volume 12, pp. A159-A164.
- Mostafa Elseifi, A., 2009. *Analysis of Seasonal Strain Measurements in Asphalt Materials under Accelerated Pavement Testing and Comparing Field Performance and Laboratory Measured Binder Tension Properties*, L.A, USA: Report, FHWA/LA.09/444 Louisiana Transportation Research Center.
- Mostafa Elseifi, A., Louay Mohammad, N., Bill King, W. & Zhang, Z., 2012. Assessment stress and strain instrumentation in Accelerated pavement testing. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(2).

- National Instruments, s.d. *Capteurs utilisées pour la mesure des signaux dynamiques*. s.l.:source <http://ftp.ni.com>.
- Norme NF P 98-086, 2011. Dimensionnement structurel des chaussées routières: Application aux chaussées neuves. Dans: s.l.:s.n.
- Oome, A. et al., 2009. Modeling of an electromagnetic geophone with passive magnetic spring. *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 142-154.
- Perret, J., 2003. *Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic*. s.l.:Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Pouteau, B. & Mazé, M., Mai 2012. SMARTVIA: la route intelligente.... RGRA, Issue 901.
- Saint-Laurent, D., 2008. *Synthèse des outils de modélisation de chaussées actuellement disponibles au LCPC*, s.l.: Division Structures et Matériaux pour les Infrastructures de Transport (SMIT), LCPC.
- Sayegh, G., 1966. *Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux*. s.l.:Thèse à l'Université de Paris.
- Schmidt, F., Jacob, B. & Domprobst, F., 2016. Investigation of truck weights and dimensions using WIM data. *Proceedings of 6th Transport Research Arena, Poland*.
- SETRA, LCPC, 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées*. s.l.:Guide Technique.
- Sohm, J. et al., 2012. Remote monitoring of an experimental motorway section - An enabling technology of the 5th generation road. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(5).
- Sohm, J. et al., Mai 2012. Acquisition des données à distance pour évaluer l'état d'une structure de chaussée: la route intelligente?. *Revue Générale des Routes et Aérodrômes*, Issue 901.
- Swett, L., Mallick, R. & Humphrey, D., Octobre 2008. A study of temperature and traffic load related response in different layers in an instrumented flexible pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(5), pp. 303-316.
- 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*. s.l.:s.n.
- Westergaard, H., 1943. Stress Concentrations in Plates Loaded Over Small Areas. *Transactions ASCE*, Volume 108, pp. 831-856.
- Willis, J. R. & Timm, D. H., Octobre 2009. *Repeatability of asphalt strain gauges*, s.l.: NCAT Report 09-07.
- Worel, B. & Clyne, T., 2012. History of construction contracting methods used at MnROAD. *Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing*.
- Xue, W., Wang, L., Wang, D. & Druta, C., 2013. Pavement Health Monitoring System Based on an Embedded Sensing Network. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

Annexes

Annexe A : Schéma de l'instrumentation mise en place sur les différentes sections instrumentées de l'A10

PK 15+700 – A10

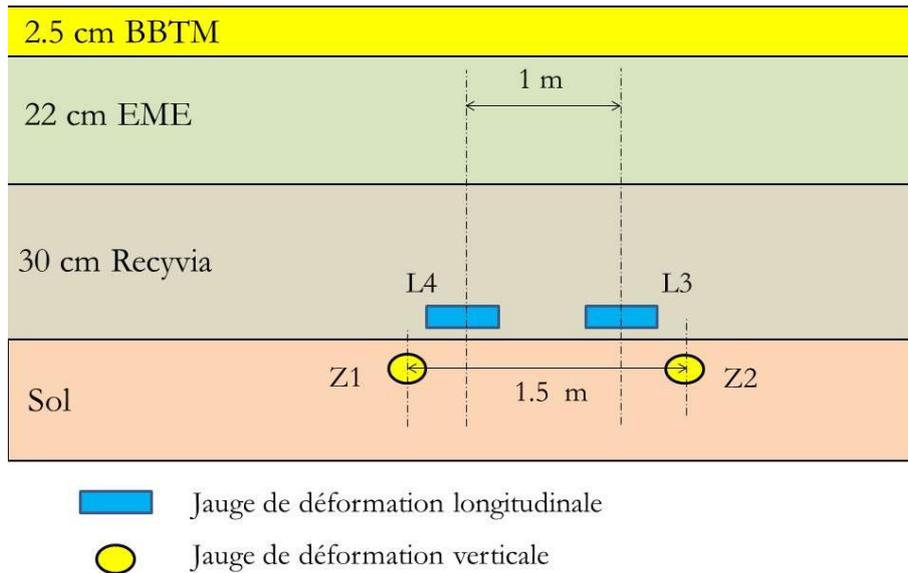


Figure A 1. Le plan d'instrumentation des capteurs sur la section PK 15+700 de l'A10

PK 15+900 – A10

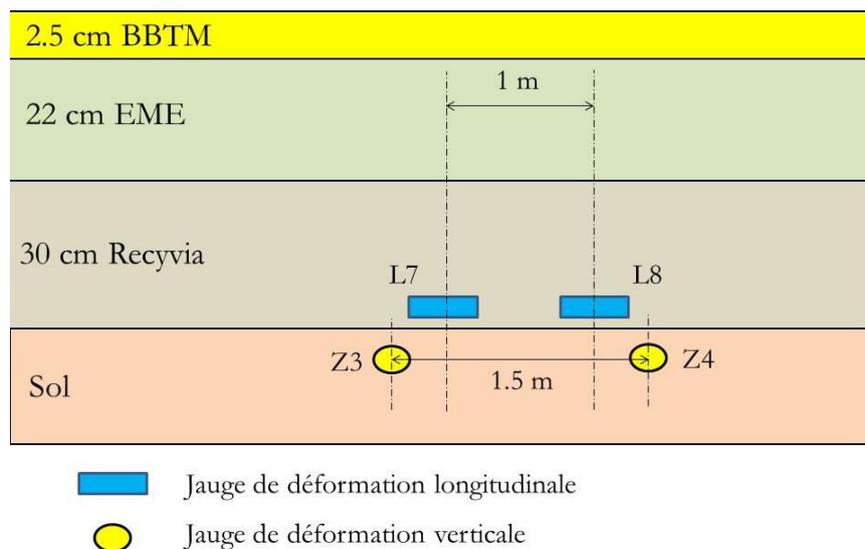
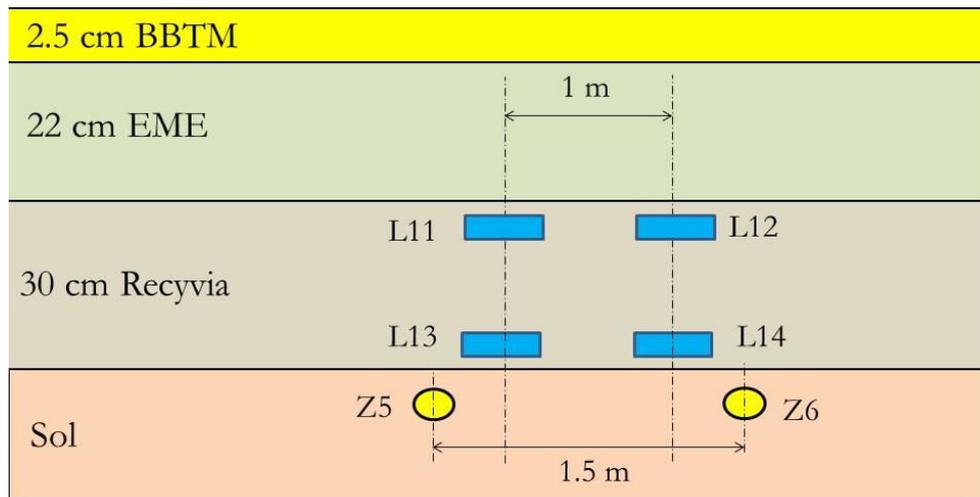


Figure A 2. Le plan d'instrumentation des capteurs sur la section PK 15+900 de l'A10

PK 16+850 – A10

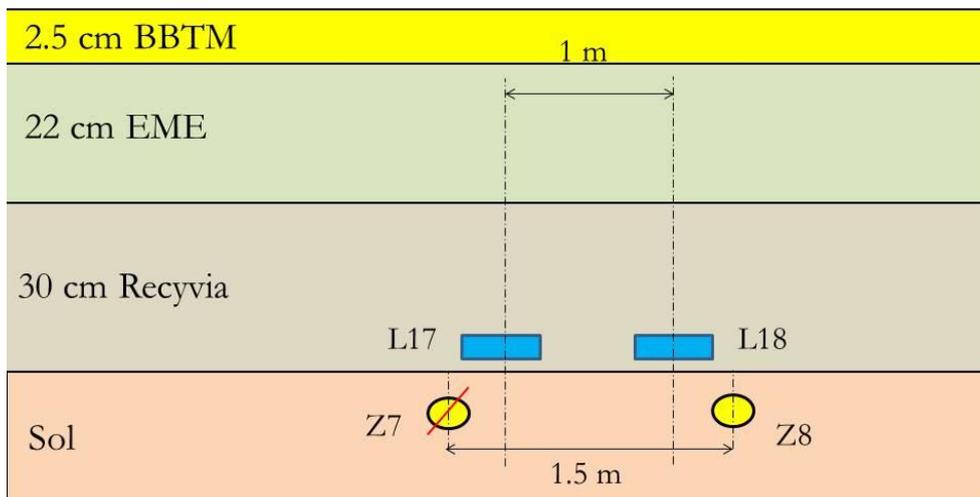


 Jauge de déformation longitudinale

 Jauge de déformation verticale

Figure A 3. Le plan d'instrumentation des capteurs sur la section PK 16+850 de l'A10

PK 17+100 – A10



 Jauge de déformation longitudinale

 Jauge de déformation verticale

Figure A 4. Le plan d'instrumentation des capteurs sur la section PK 17+100 de l'A10

PK 17+250 – A10

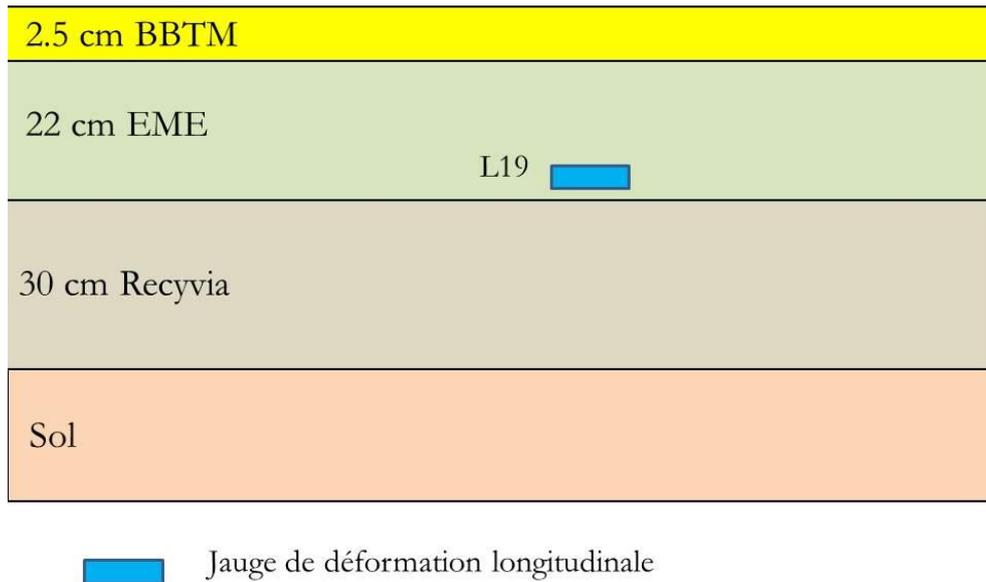


Figure A 5. Le plan d'instrumentation des capteurs sur la section PK 17+250 de l'A10

PK 16+016 – A10

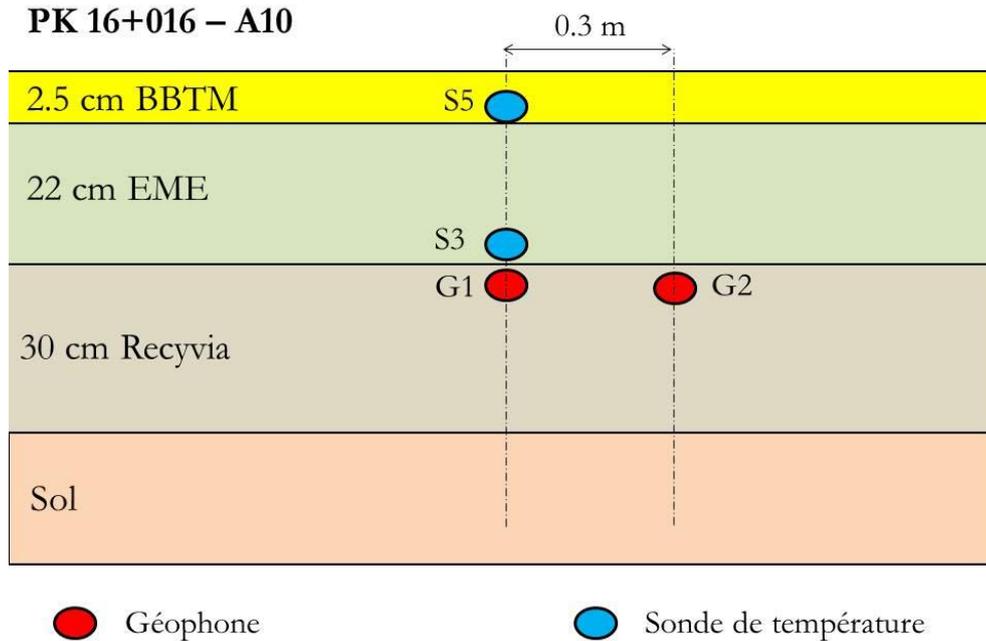


Figure A 6. Le plan d'instrumentation des capteurs sur la section PK 16+016 de l'A10

Annexes B : Schéma de l'instrumentation mise en place sur l'Ax

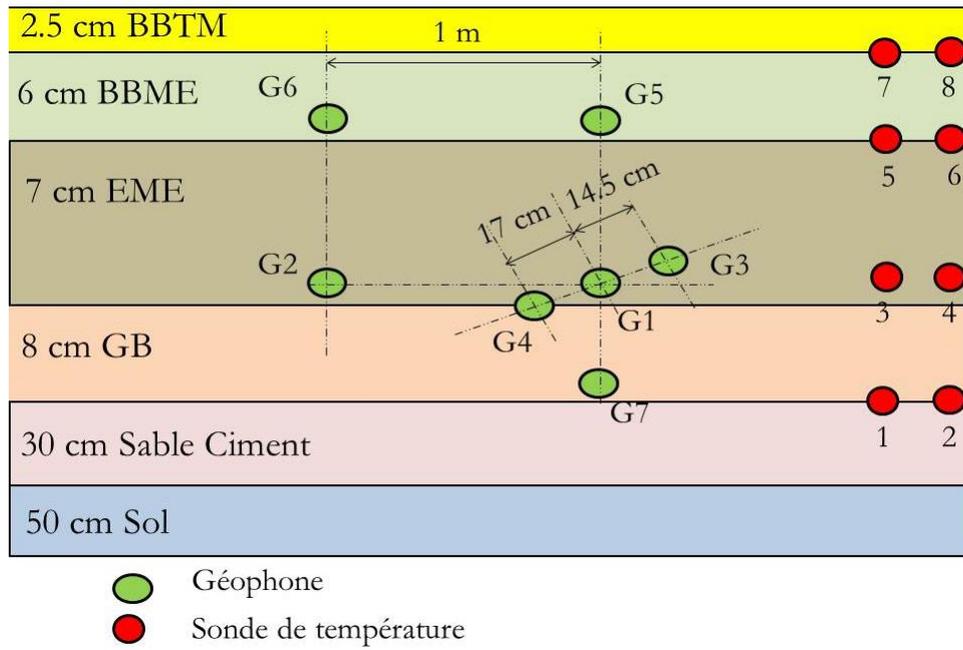


Figure B 1. Plan d'instrumentation des géophones et des sondes de température sur l'Ax

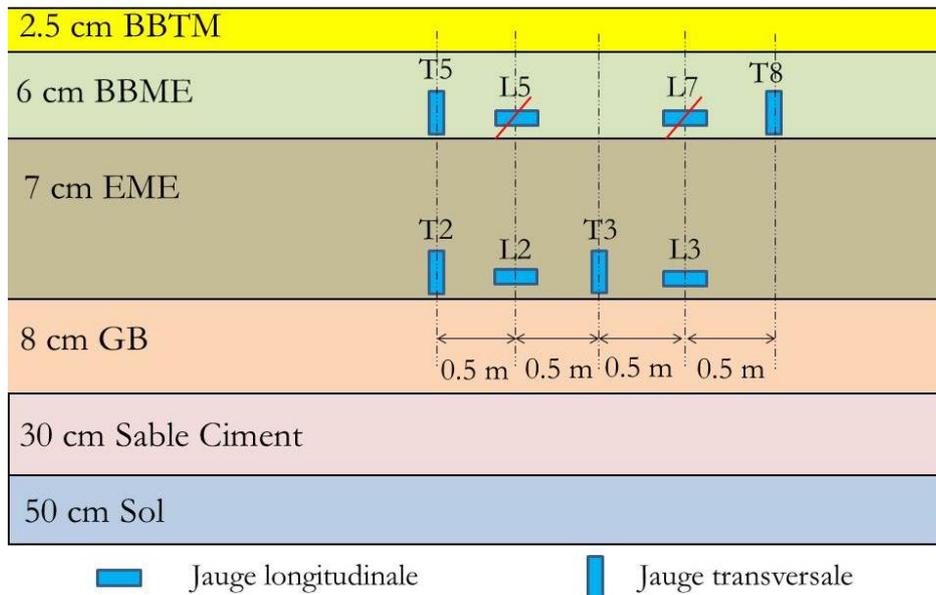


Figure B 2. Plan d'instrumentation des jauges de déformation sur l'Ax

Annexe C : Exemples des mesures des jauges enregistrées sous les passages du camion de référence sur l'Ax

Les mesures des jauges présentées ci-dessous ont été enregistrées sous le passage d'un camion T2S3 chargé à 44 tonnes sur l'Ax le 18 mars 2014.

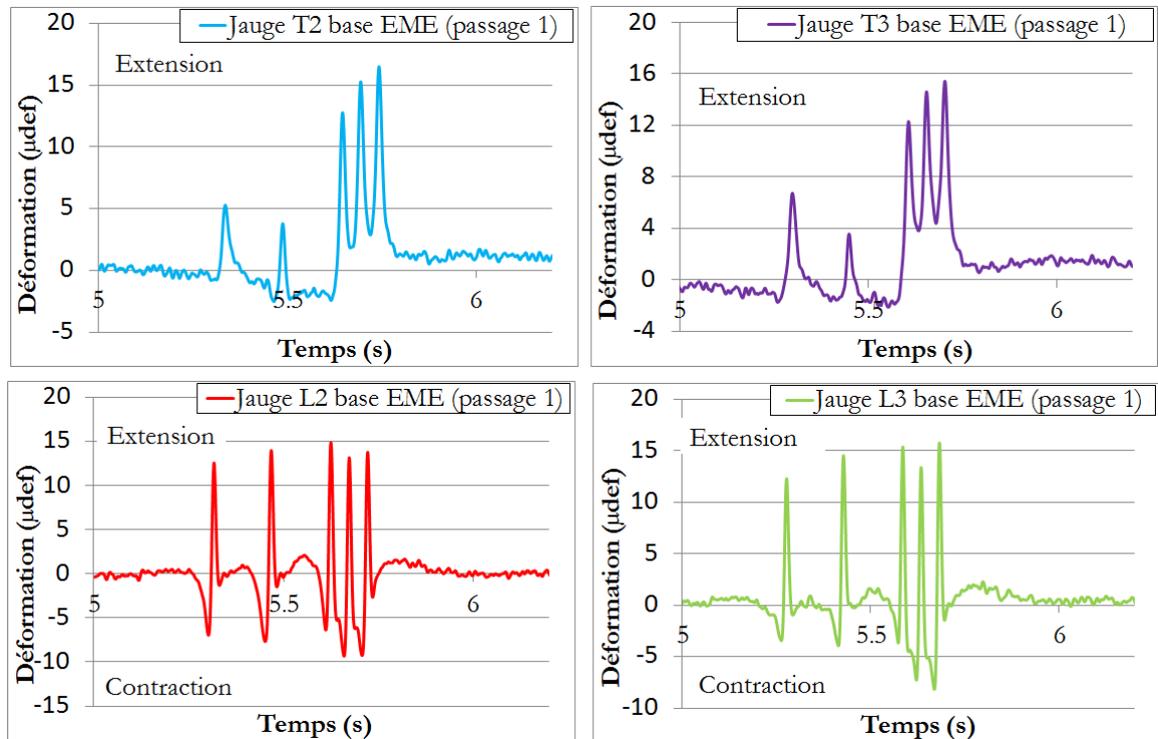


Figure C 1. Mesures des jauges de déformations longitudinales (L2, L3) et transversales (T2, T3) à la base de la couche d'EME lors du premier passage

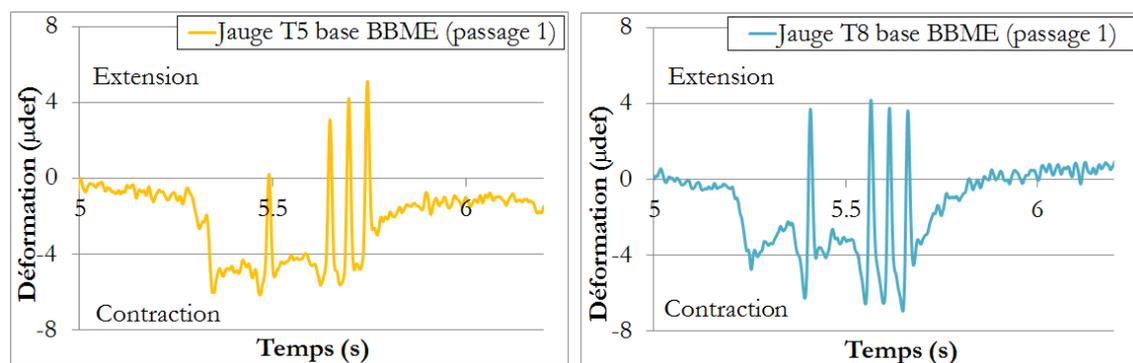


Figure C 2. Mesures des jauges de déformations transversales (T5, T8) à la base de la couche de BBME lors du premier passage

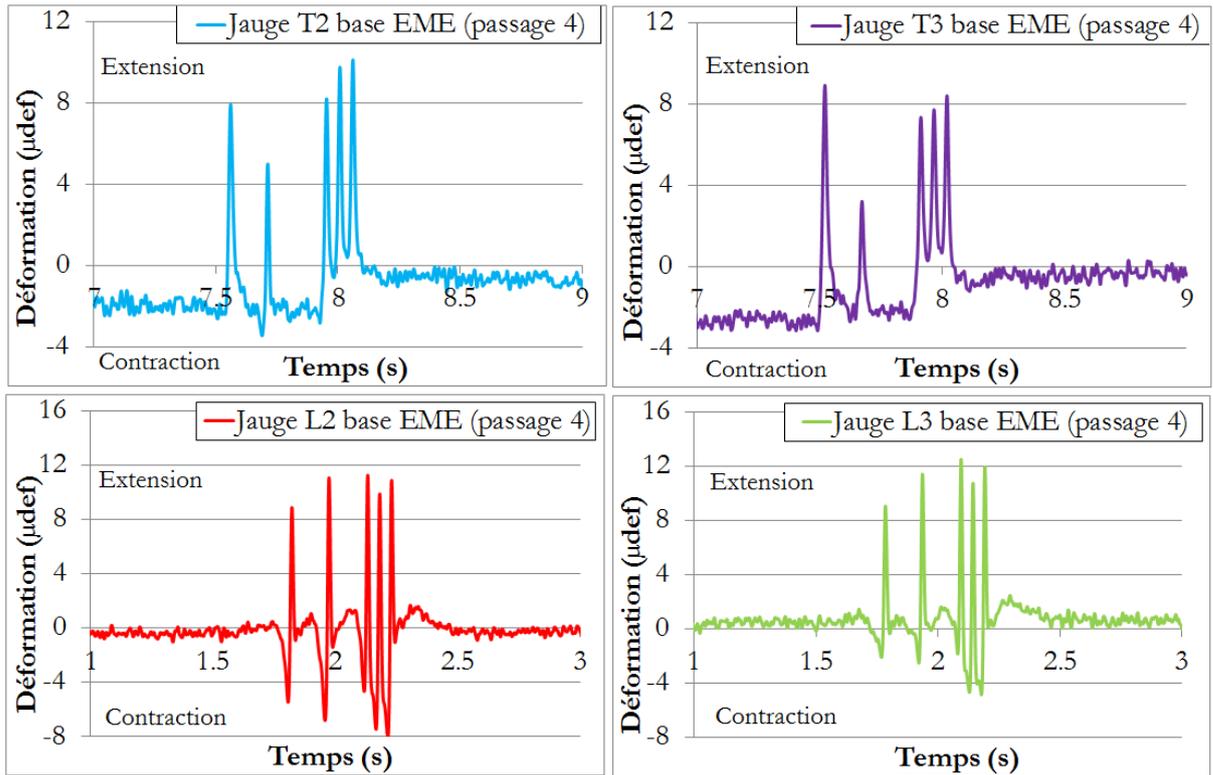


Figure C 3. Mesures des jauges de déformations longitudinales (L2, L3) et transversales (T2, T3) à la base de la couche d'EME lors du quatrième passage

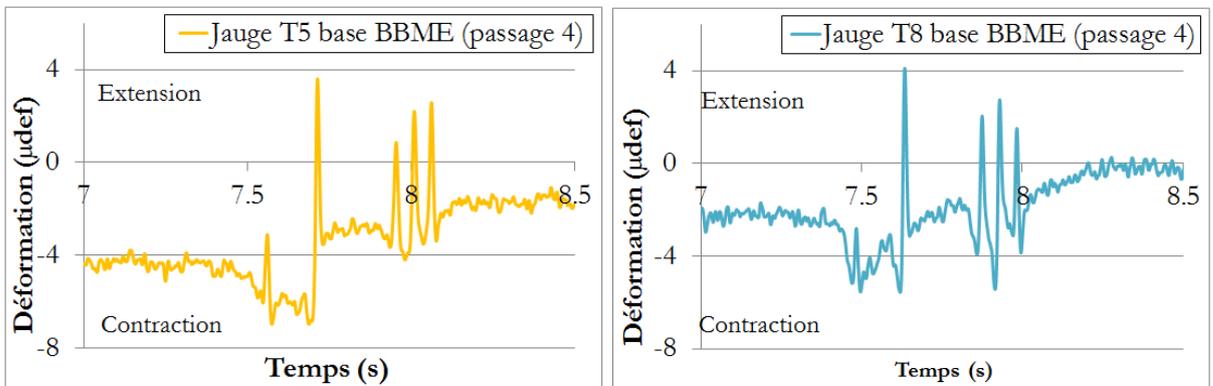


Figure C 4. Mesures des jauges de déformations transversales (T5, T8) à la base de la couche de BBME lors du quatrième passage

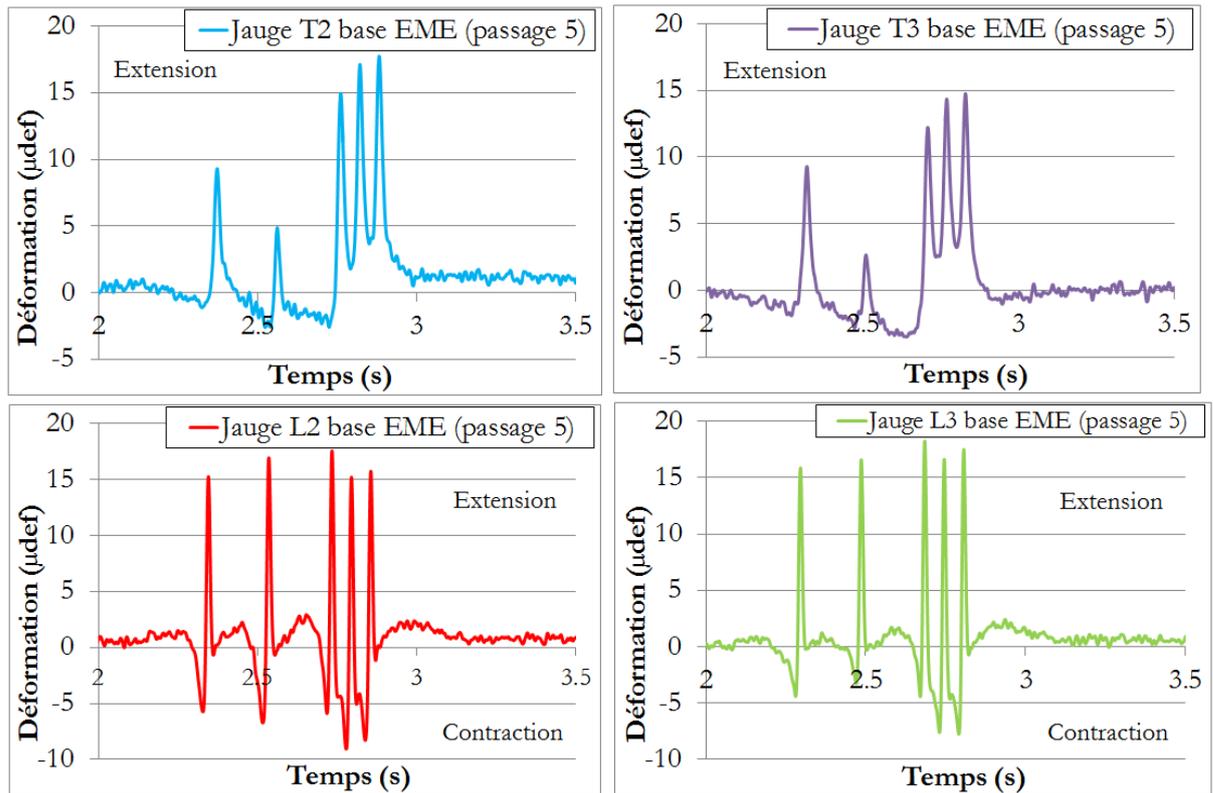


Figure C 5. Mesures des jauges de déformations longitudinales (L2, L3) et transversales (T2, T3) à la base de la couche d'EME lors du cinquième passage

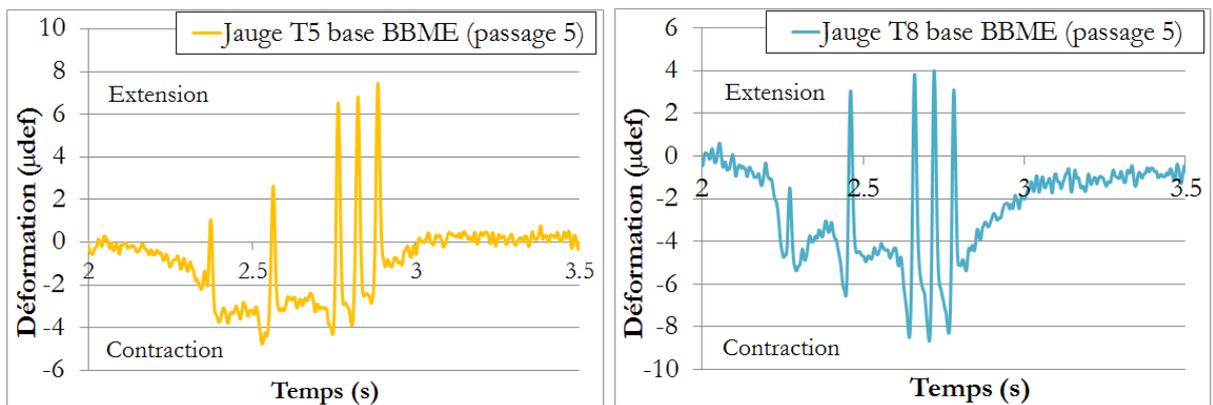


Figure C 6. Mesures des jauges de déformations transversales (T5, T8) à la base de la couche de BBME lors du cinquième passage

Annexe D : Exemple des mesures des jauges à distance

Les exemples ci-dessous illustrent l'évolution des mesures de la jauge transversale T8 à la base de la couche de BBME. Cette jauge ne fonctionne plus à partir d'avril 2016.

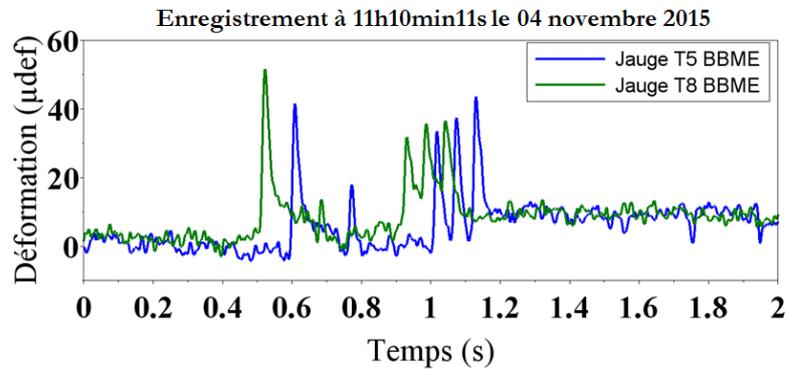


Figure D 1. Signal des jauges de déformations transversales à la base de la couche de BBME (enregistrement à 11h10min11s le 04 novembre 2015)

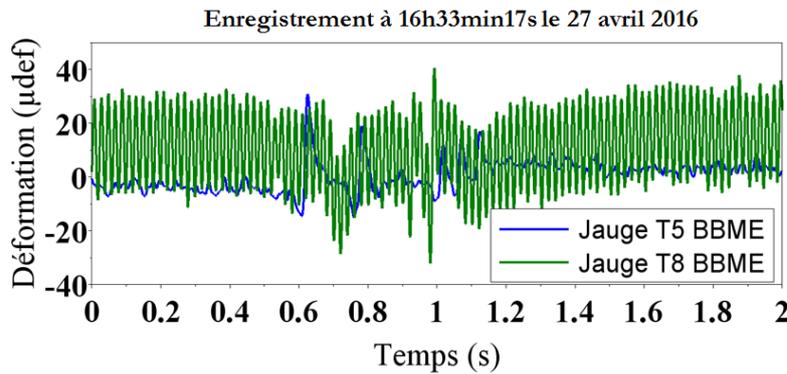


Figure D 2. Signal des jauges de déformations transversales à la base de la couche de BBME (enregistrement à 16h33min17s le 27 avril 2016)

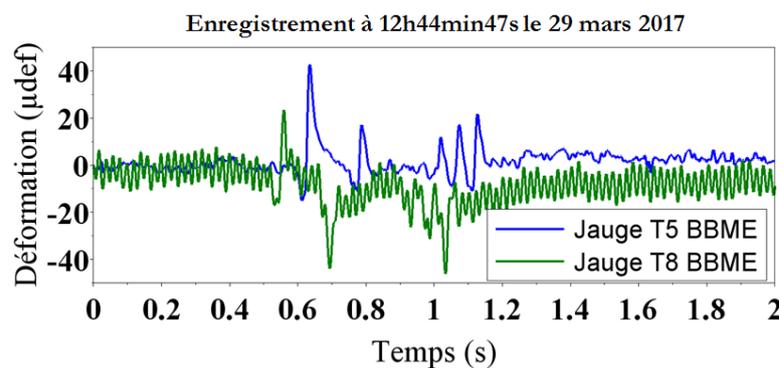


Figure D 3. Signal des jauges de déformations transversales à la base de la couche de BBME (enregistrement à 12h44min47s le 29 mars 2017)

Les exemples ci-dessous illustrent l'évolution des mesures de la jauge transversale T3 à la base de la couche d'EME. L'écart entre les mesures des jauges T2 et T3 s'accroît au cours du temps.

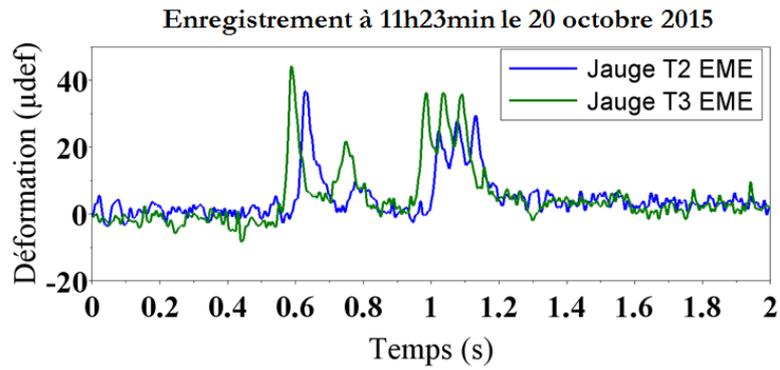


Figure D 4. Signal des jauges de déformations transversales à la base de la couche d'EME (enregistrement à 11h23min le 20 octobre 2015)

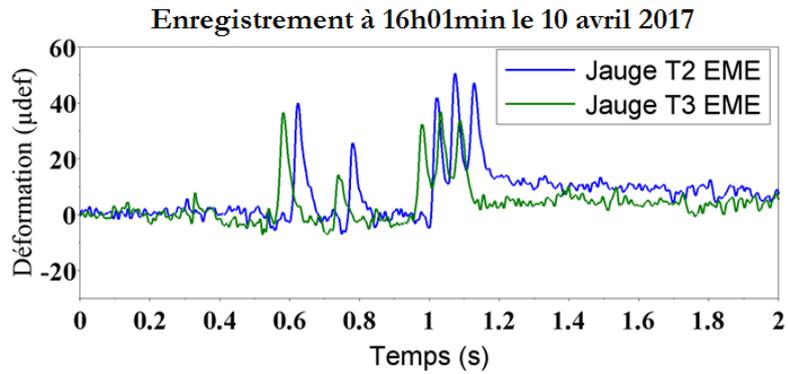


Figure D 5. Signal des jauges de déformations transversales à la base de la couche d'EME (enregistrement à 16h01min le 10 avril 2017)

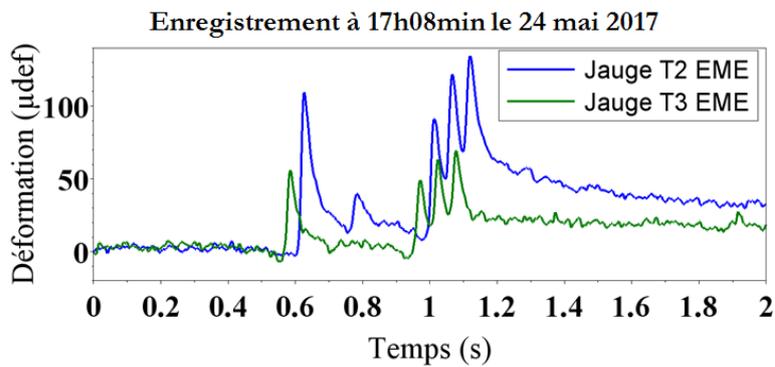


Figure D 6. Signal des jauges de déformations transversales à la base de la couche d'EME (enregistrement à 17h08min le 24 mai 2017)

Annexe E : Principe et script des programmes de SCILAB utilisés pour traiter des données à distance

Cette annexe présente les travaux qui ont été faits avec le logiciel gratuit SCILAB pour le traitement des données des capteurs. Elle est constituée de trois parties :

- Le traitement des données des sondes de température
- Le traitement des données des géophones
- Le traitement des données des jauges de déformation

Chaque partie décrit les différents programmes utilisés, ainsi que le principe du traitement. Ces différents programmes permettent de traiter les données et ainsi de tracer les figures concernant les mesures des capteurs (jauge de déformation, sondes de température, géophones) présentées dans ce rapport de thèse. Au total, 14 programmes ont été développés avec le logiciel Scilab.

Le traitement des données des sondes de température

Les sondes de températures ont été placées à la base des couches de chaussées. Pour rappel, l'acquisition des données de température est faite toutes les 5 minutes sur l'autoroute A10 et 15 minutes sur l'autoroute Ax. Les procédures principales de traitement des données avec Scilab sont les suivantes :

1. Tracer l'évolution de la température pendant une journée
2. Calculer la moyenne journalière des mesures de température à la base des couches bitumineuses durant un mois
3. Calculer le gradient de température maximal journalier dans la chaussée pour tous les jours du suivi
4. Calculer la moyenne mensuelle des mesures de température à la base des couches bitumineuses durant toute la période du monitoring

Tracer l'évolution de température pendant une journée

Les différentes étapes de cette procédure sont les suivantes :

1. Ouvrir tous les fichiers de température enregistrés pendant une journée
2. Pour chaque couche, on calcule la valeur moyenne des deux mesures des sondes placées à la base de cette couche
3. Tracer l'évolution de température pendant une journée

Calculer la moyenne journalière des mesures de température à la base des couches bitumineuses durant un mois

Les différentes étapes de cette procédure sont les suivantes :

1. Ouvrir tous les fichiers de température enregistrés chaque jour

2. Calculer en suite la moyenne journalière des températures à la base des couches bitumineuses de chaussée pendant un mois

Calculer le gradient de température maximal journalier dans la chaussée pour tous les jours du suivi

Les différentes étapes de cette procédure sont les suivantes :

1. Ouvrir tous les fichiers de température enregistrés chaque jour
2. Le calcul du gradient de température maximal journalier dans la chaussée est fait de la façon suivante:
 - Pour chaque moment de la journée, on calcule l'écart de température entre la couche la plus proche de la surface et la couche la plus profonde
 - On calcule ensuite les valeurs maximale et minimale de l'ensemble de ces écarts de température pendant une journée
 - On compare l'écart maximal et la valeur absolue de l'écart minimal et on prend la valeur la plus grande entre ces deux valeurs
 - Le gradient de température maximal journalier est défini par la division de cette valeur par la différence de hauteur entre les deux couches de la chaussée considérées (unité : °C/cm)

Moyenne mensuelle des mesures de température à la base des couches bitumineuses

Les différentes étapes de cette procédure sont les suivantes :

1. Ouvrir tous les fichiers de température enregistrés pendant un mois
2. Pour chaque mois, on calcule la moyenne mensuelle des températures à la base de chaque couche

Le traitement des données des géophones

Pour rappel, 2 géophones ont été mis en place au sommet de la couche d'EME dans le sens longitudinal sur l'autoroute A10. 8 géophones ont été mis en place à la base des couches bitumineuses non seulement dans le sens longitudinal mais également dans le sens latéral sur l'Ax. Les plans détaillés de l'instrumentation sont présentés dans l'annexe A et l'annexe B.

Dans cette annexe, on ne présente que les procédures de traitement des données des géophones sur le site Ax où l'instrumentation des géophones est plus élaborée. Les procédures pour le site A10 sont quasiment similaires.

Les procédures principales de traitement des données avec Scilab sont les suivantes :

1. Tracer les signaux bruts et intégrés des géophones

2. Tracer les signaux des géophones après avoir appliqué la méthode de correction décrite dans le chapitre 6.
3. Sélectionner les fichiers des géophones et des jauges de déformation où les poids lourds passent à l'aplomb des capteurs
4. Identifier les silhouettes des poids lourds et calculer la vitesse des poids lourds
5. Calculer la moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones
6. Calculer la moyenne mensuelle des valeurs de déflexion sous le passage du premier essieu des poids lourds de type T2S3 après avoir appliqué la méthode de correction

Tracer les signaux bruts et intégrés des géophones

Ce programme est constitué de trois étapes :

1. Ouvrir le fichier d'acquisition des mesures des géophones et convertir les valeurs en m/s
2. Intégrer le signal brut des géophones. Le processus d'intégration est basé sur la méthode classique d'intégration dite méthode des rectangles : l'intégration d'une fonction dans un intervalle donné est la somme des aires des rectangles des sous intervalles après la subdivision. Cette méthode a été décrite dans le paragraphe 3.5.2 du chapitre 3.
3. Tracer les signaux bruts et intégrés des géophones

Tracer les signaux des géophones après avoir appliqué la méthode de correction décrite dans le chapitre 6

Le principe de la méthode de correction des signaux des géophones a été présenté dans le chapitre 6. La procédure de traitement avec Scilab est constituée de 7 étapes :

- Ouvrir le fichier de mesure du signal d'un géophone
- Extraire les composantes des hautes fréquences du signal du géophone par filtrage Passe-haut
- Supprimer les constantes d'intégration et appliquer la transformation de Hilbert pour ces composantes
- Extraire les composantes des basses fréquences du signal du géophone par filtrage Passe-bas
- Amplifier ces composantes par un coefficient amplificateur
- Supprimer les constantes d'intégration et appliquer la transformation de Hilbert pour ces composantes
- Constituer le signal final par la somme des composantes des hautes fréquences et des composantes des basses fréquences amplifiées

- Tracer les signaux corrigés

Sélectionner les fichiers des géophones et des jauges de déformation où les poids lourds passent à l’aplomb des capteurs

Cette procédure permet de sélectionner uniquement les fichiers où les poids lourds passent à une position latérale constante avec leurs roues centrées sur les capteurs de déformations. Pour cela, on vise à sélectionner les fichiers des géophones dont l’amplitude du géophone G1 est maximale (le géophone G1 est aligné avec les jauges de déformations). Cette procédure permet également de récupérer les fichiers des jauges correspondant à l’acquisition sur seuil des géophones. Les étapes de la procédure sont les suivantes:

1. Ouvrir les fichiers de mesures des géophones
2. Calculer l’amplitude crête-à-crête des signaux intégrés des géophones G1, G3, G4 placés dans le sens latéral sur la chaussée
3. Sélectionner uniquement les fichiers des géophones dont l’amplitude crête-à-crête du géophone G1 est maximale
4. Pour chaque fichier des géophones dont l’amplitude crête-à-crête du géophone G1 est maximale, trouver le fichier jauge correspondant à l’enregistrement sur seuil du signal des géophones

Identifier les silhouettes des poids lourds et calculer la vitesse du passage des poids lourds

Cette procédure permet d’identifier les silhouettes des poids lourds qui passent sur la chaussée. Pour cela, un programme permettant de détecter les pics positifs et négatifs des signaux des géophones a été réalisé.

Cette procédure permet également de calculer la vitesse des poids lourds. En effet, connaissant l’écart entre les géophones (1 mètre) et l’écart temporel entre les signaux, la vitesse peut donc être déduite simplement.

Principe de la procédure d’identification des silhouettes des poids lourds

Pour identifier les différents types des poids lourds, on cherche à déterminer les pics (positifs et négatifs) des signaux intégrés des géophones. Pour cela, on fait appel à la notion mathématique de la « dérivée ».

On divise les points qui forment le signal du géophone en des groupes de 20 points successifs. Ensuite, on calcule la dérivée des 20-points (A_i, \dots, A_{i+20}):

$$f'_{(A_1-A_{20})} = \frac{f(x_{20}) - f(x_1)}{x_{20} - x_1}$$

Lorsque la dérivée change de signe de « positif » à « négatif », un pic dit positif est déterminé.

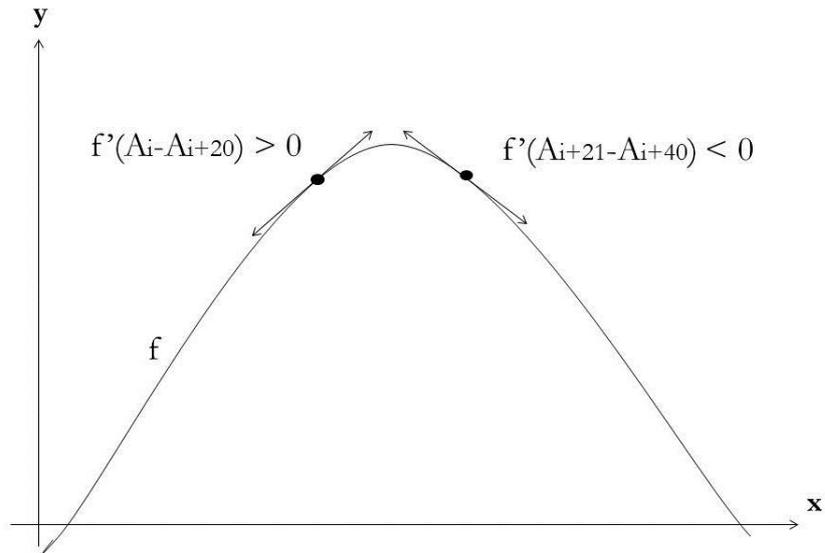


Figure E 1. Détermination un pic positif du signal par changement de signe de positif à négatif de la dérivée des 20-points

Lorsque la dérivée change de signe de « négatif » à « positif », un pic dit négatif est déterminé.

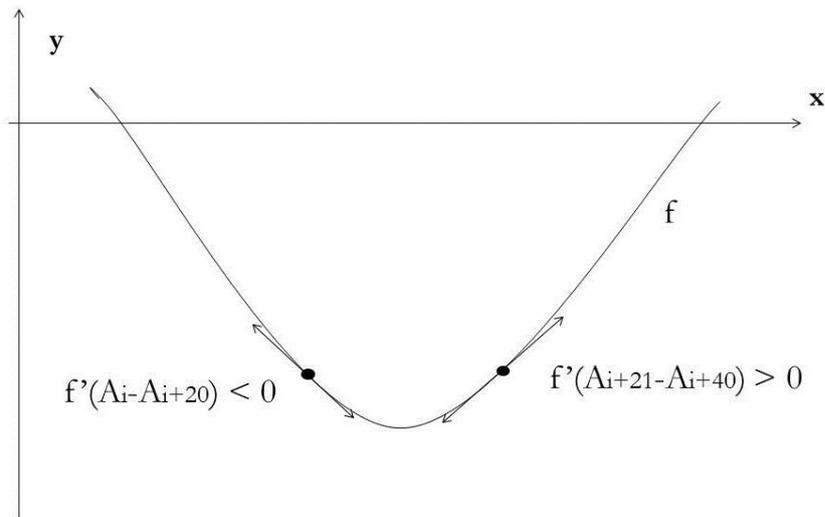


Figure E 2. Détermination un pic positif du signal par changement de signe de négatif à positif de la dérivée des 20-points

Un exemple d'un signal de géophone avec la détermination des pics positifs et négatifs est présenté dans la Figure E 3.

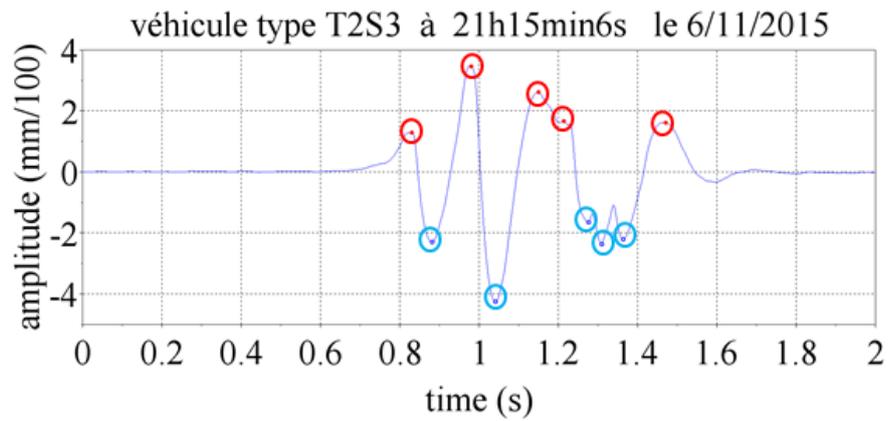


Figure E 3. Détermination des pics positifs et négatifs d'un poids lourd de type T2S3 (enregistrement du signal à 21h15min6s le 06 novembre 2015)

Une fois que les pics positifs et négatifs sont détectés, les silhouettes des poids lourds sont identifiées de façon suivante:

Tableau E 1. Identification des types des poids lourds

Nombre des pics positifs	Nombre des pics négatifs	Type du poids lourds
3	2	2 essieux
4	2	2 essieux
3	3	3 essieux
4	3	3 essieux
5	3	3 essieux
6	3	3 essieux
4	4	4 essieux
5	4	T2S3 (si le temps du 4 ^{ème} pic positif < le temps du 3 ^{ème} et 4 ^{ème} pic négatif < le temps du 5 ^{ème} pic positif)
5	4	4 essieux
6	4	4 essieux
3	5	T2S3
4	5	T2S3
5	5	T2S3 (si le temps du 3 ^{ème} pic négatif = le temps du 4 ^{ème} pic négatif)

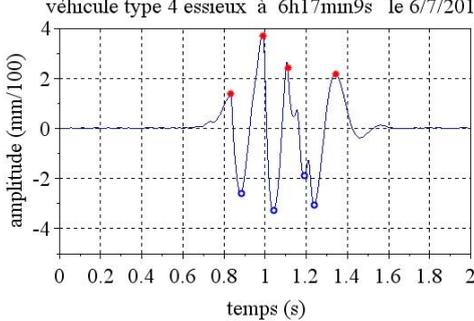
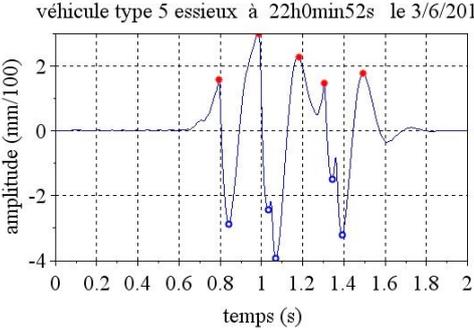
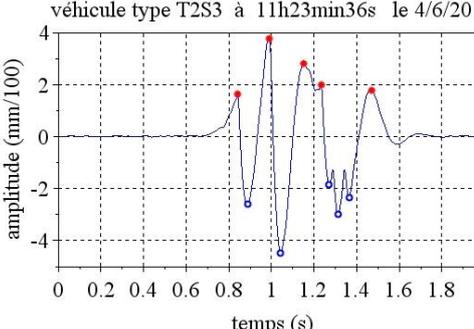
5	5	5 essieux (si le temps du 2 ^{ème} pic positif < le temps du 2 ^{ème} pic négatif ; le temps du 3 ^{ème} pic négatif < le temps du 3 ^{ème} pic positif)
5	5	T2S3
6	5	T2S3
7	5	T2S3

Pour tester la fiabilité du programme, on a décidé de mettre en œuvre ce programme pour 100 signaux aléatoires choisis dans l'ensemble des fichiers enregistrés où les véhicules passent à l'aplomb des capteurs pendant la période de monitoring. Parmi les 100 fichiers, le programme a permis de détecter correctement 97 poids lourds (soit 97%). Trois poids lourds (en rouge) n'ont pas pu être identifiés par le programme. Ce pourcentage (97%) montre la fiabilité du programme pour l'identification des types de poids lourds qui passent sur la chaussée.

Les différentes silhouettes identifiées par la procédure de traitement des signaux sur 100 fichiers sont les suivantes:

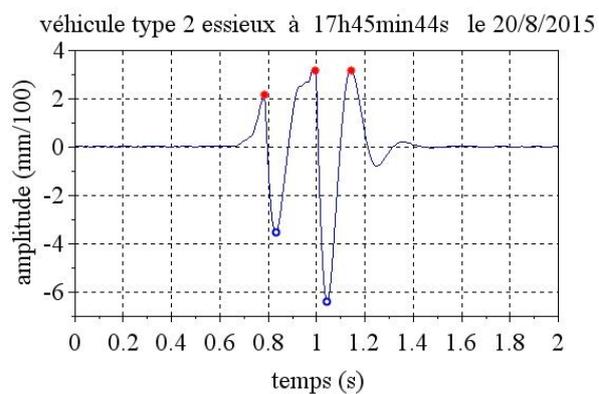
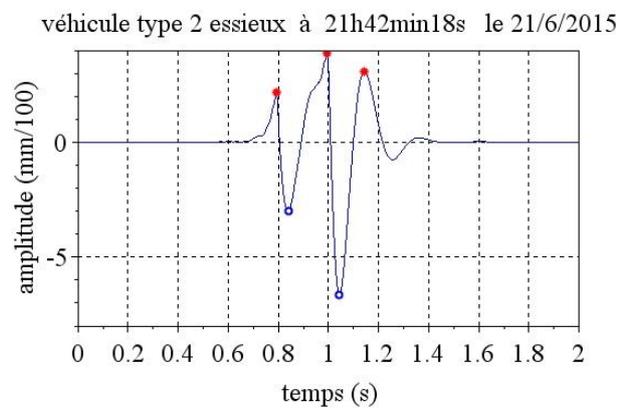
Tableau E 2. Différentes silhouettes des poids lourds identifiées par Scilab

Type du poids lourd	Silhouette du poids lourd
2 essieux	<p>véhicule type 2 essieux à 21h42min18s le 21/6/2015</p> <p>amplitude (mm/100)</p> <p>temps (s)</p>
3 essieux	<p>véhicule type 3 essieux à 6h9min58s le 11/6/2015</p> <p>amplitude (mm/100)</p> <p>temps (s)</p>

4 essieux	<p>véhicule type 4 essieux à 6h17min9s le 6/7/2015</p> 
5 essieux	<p>véhicule type 5 essieux à 22h0min52s le 3/6/2015</p> 
5 essieux de type T2S3	<p>véhicule type T2S3 à 11h23min36s le 4/6/2015</p> 

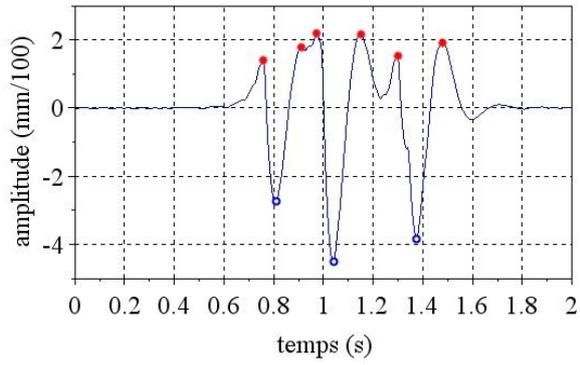
Les signaux des 100 fichiers sont les suivants :

Poids lourds de 2 essieux

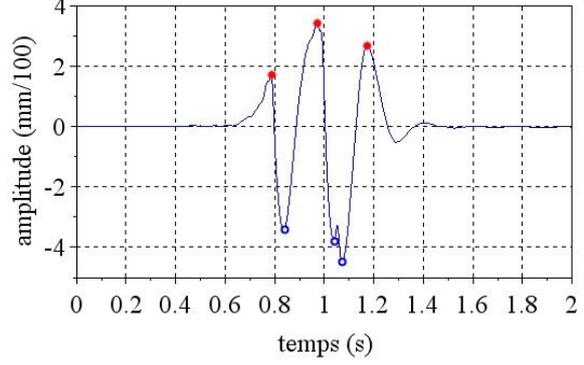


Poids lourds de 3 essieux

véhicule type 3 essieux à 6h9min58s le 11/6/2015

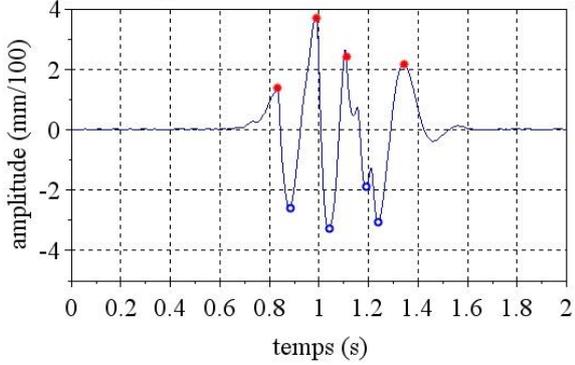


véhicule type 3 essieux à 17h4min36s le 19/8/2015

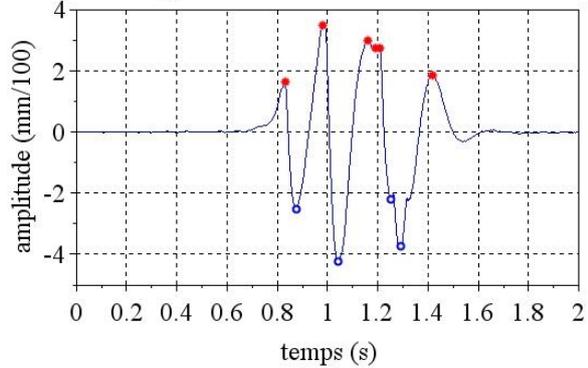


Poids lourds de 4 essieux

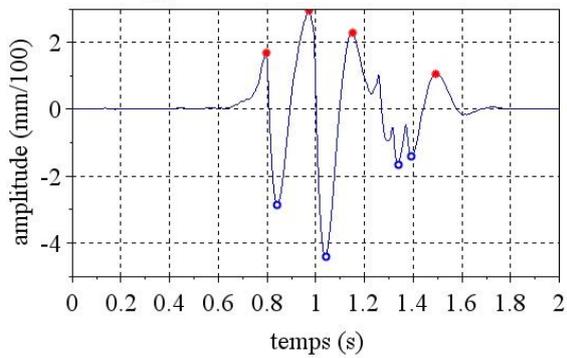
véhicule type 4 essieux à 6h17min9s le 6/7/2015



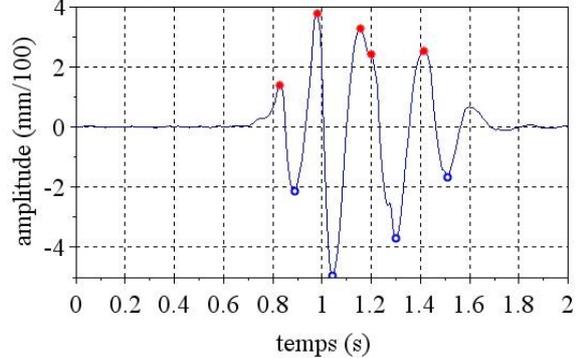
véhicule type 4 essieux à 4h13min15s le 1/8/2015



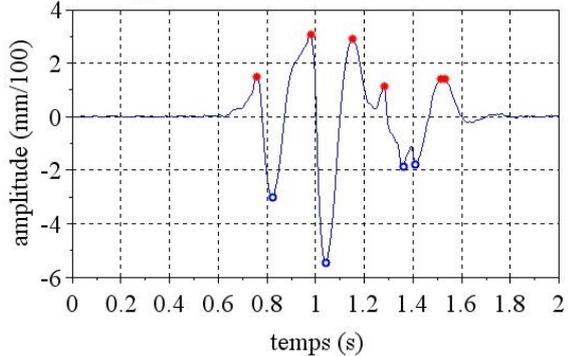
véhicule type 4 essieux à 1h14min45s le 1/9/2015



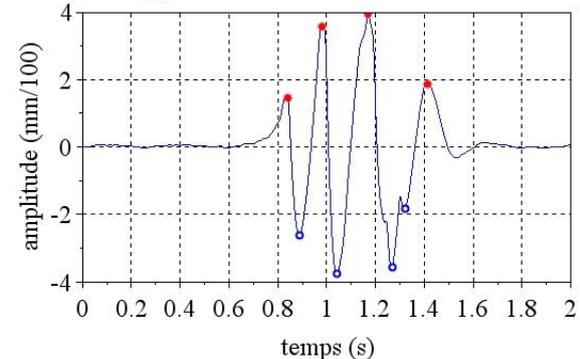
véhicule type 4 essieux à 14h13min5s le 9/12/2015

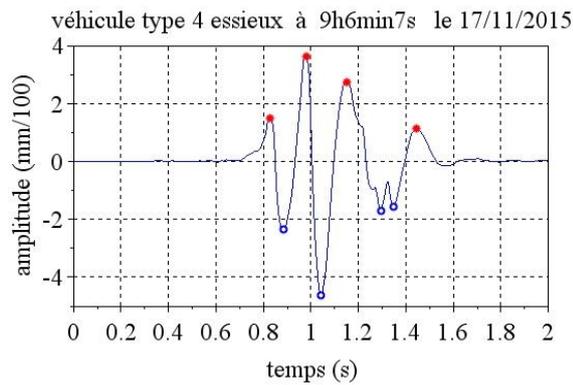


véhicule type 4 essieux à 12h16min12s le 6/11/2015

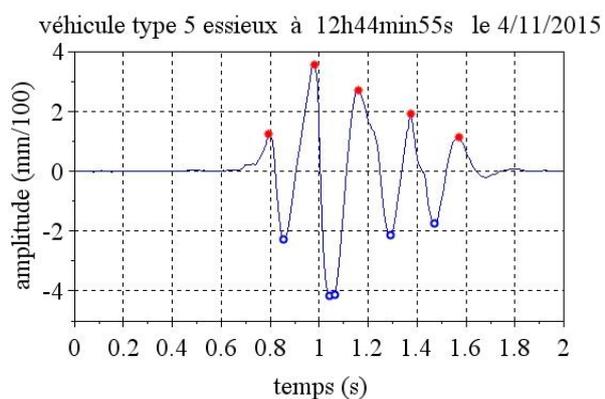
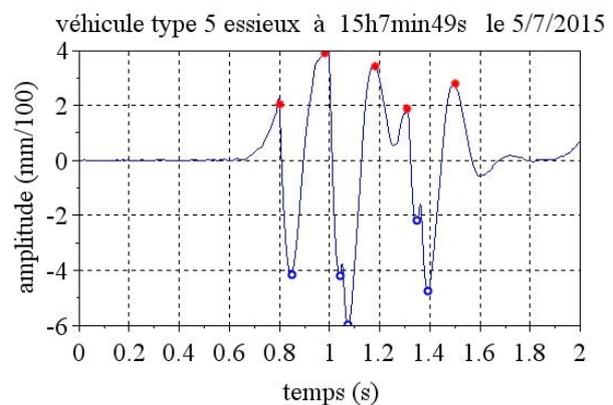
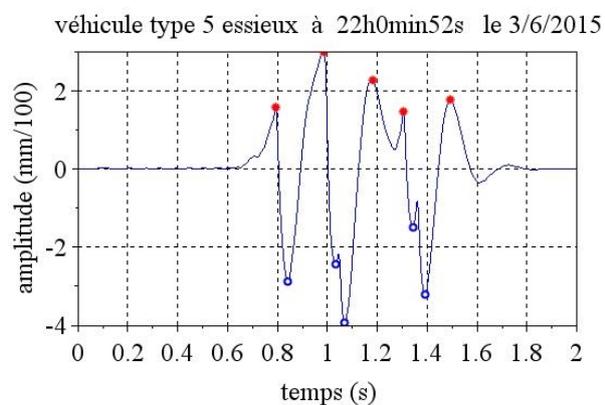


véhicule type 4 essieux à 17h38min59s le 9/10/2015



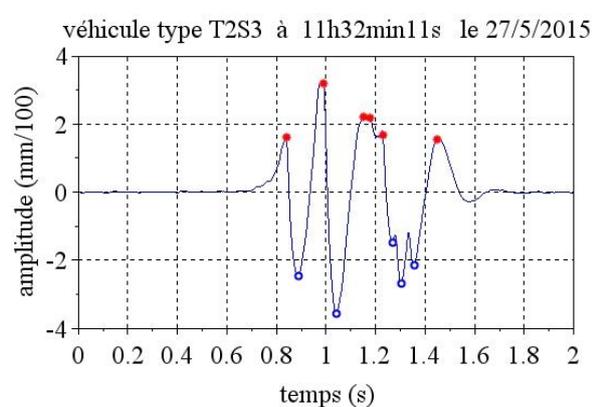
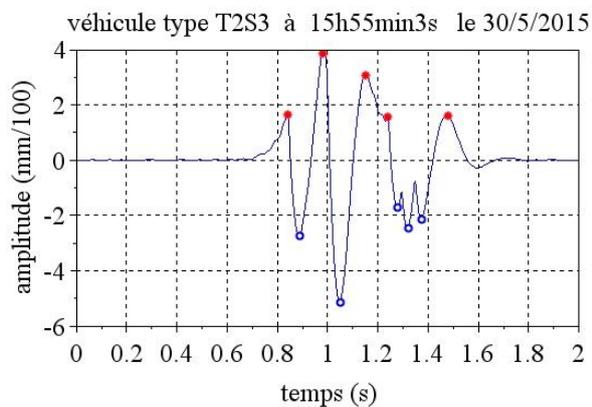
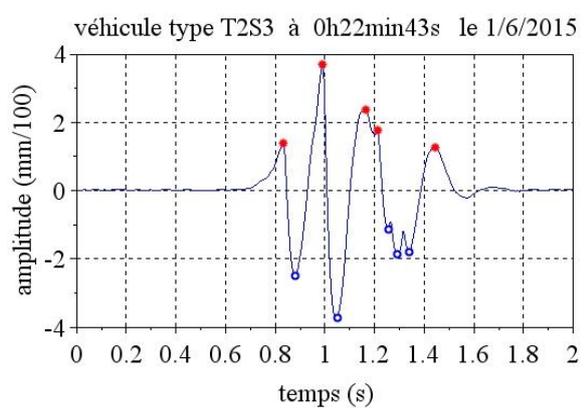
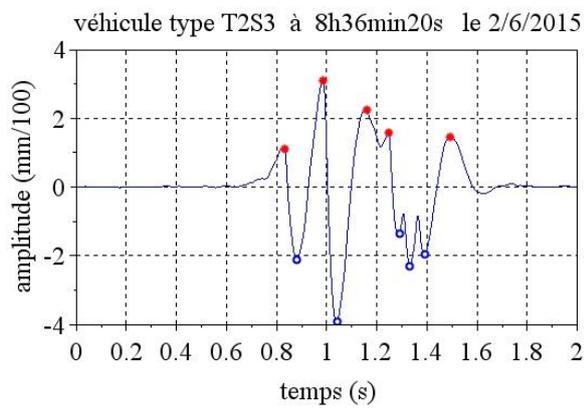
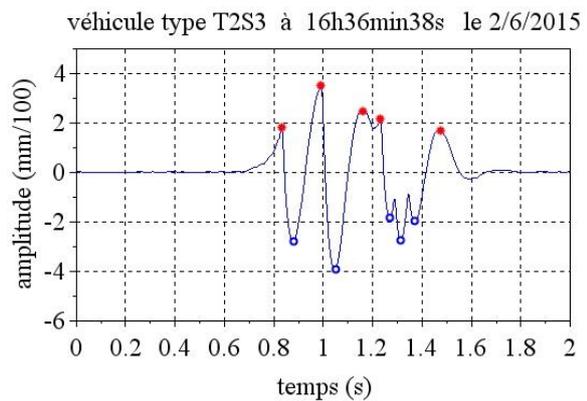
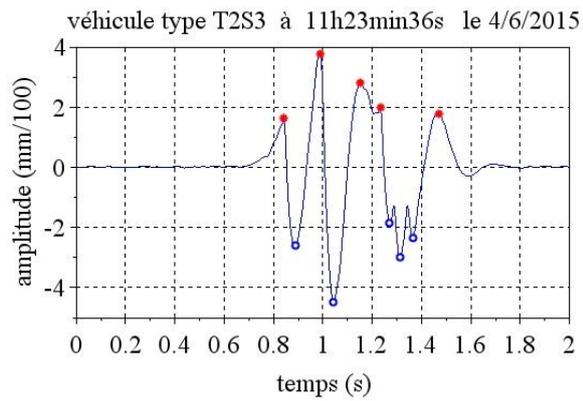
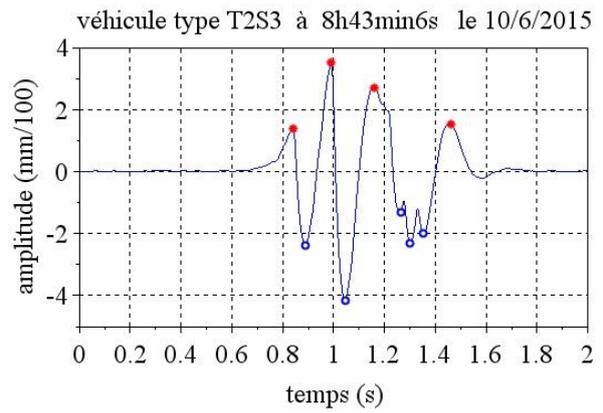
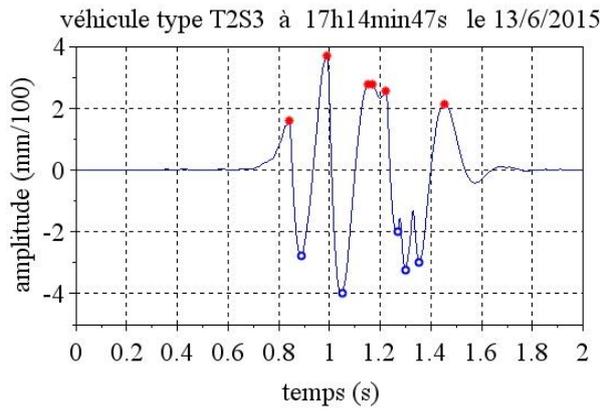


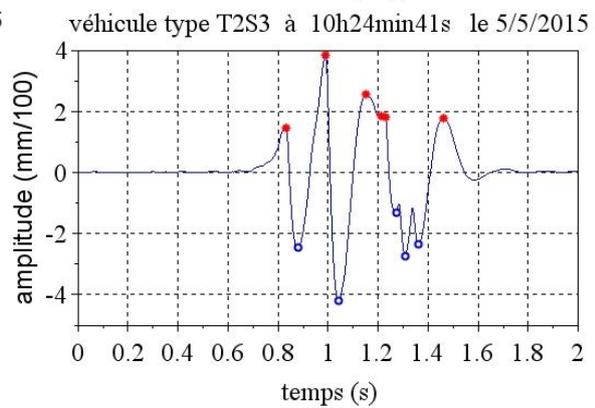
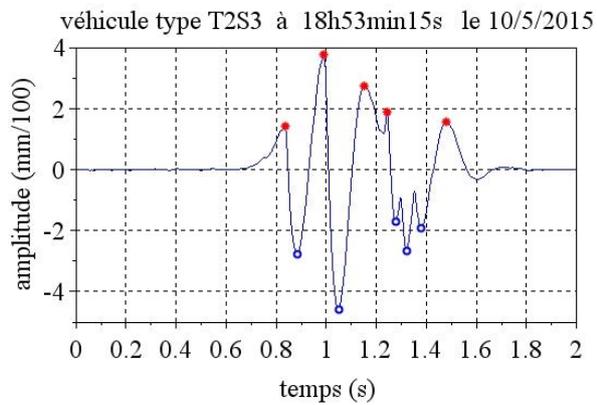
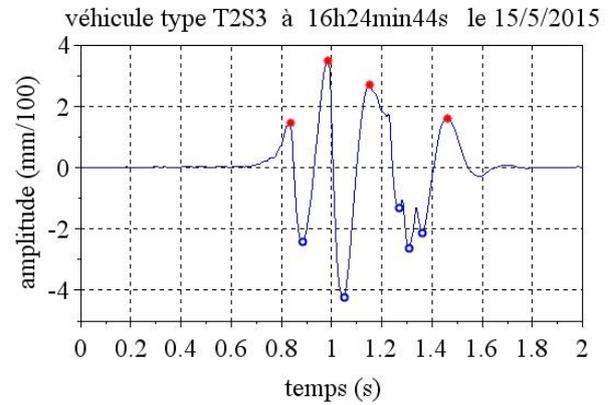
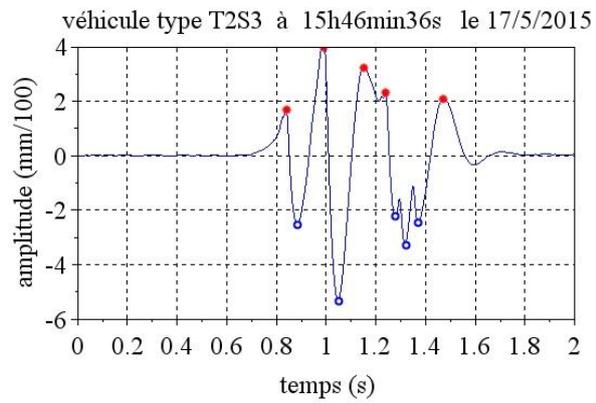
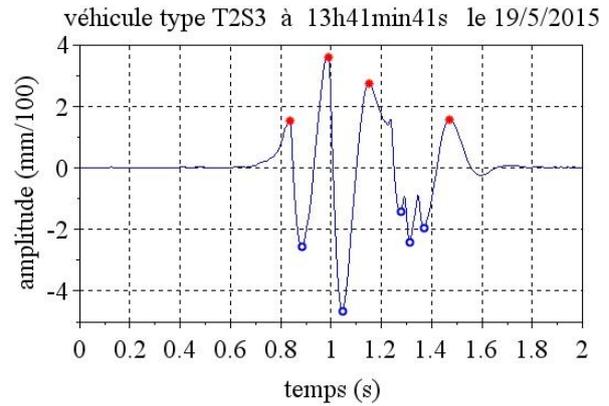
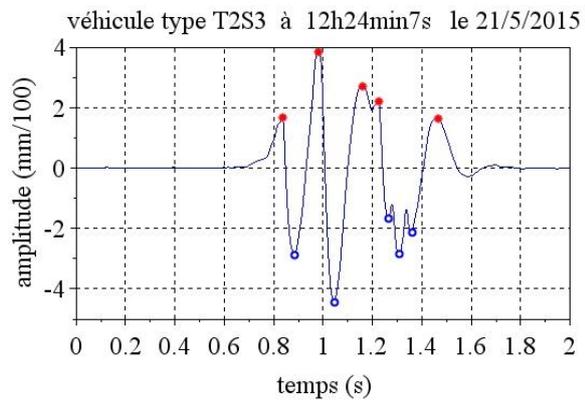
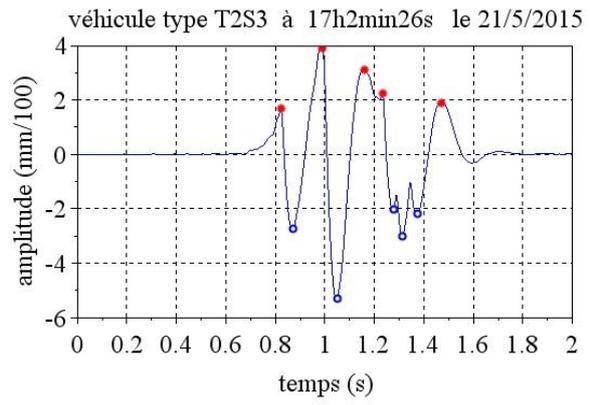
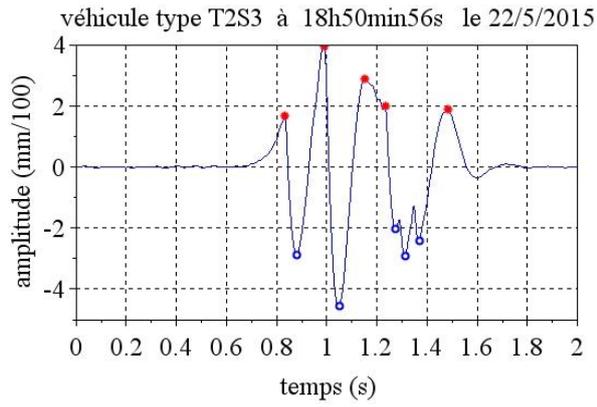
Poids lourds de 5 essieux

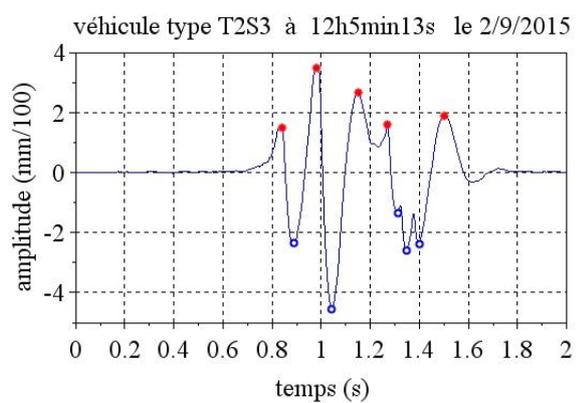
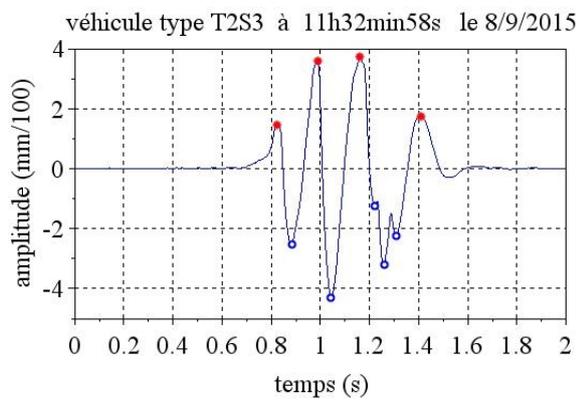
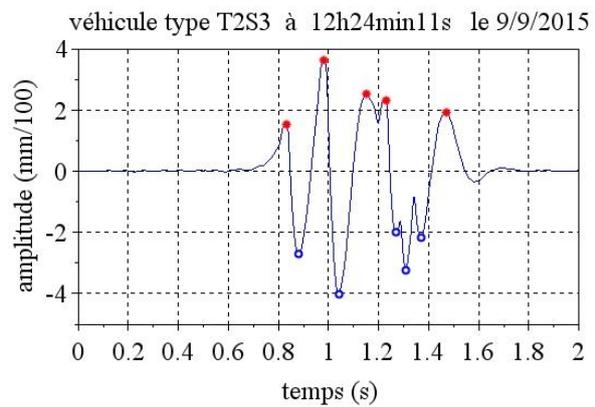
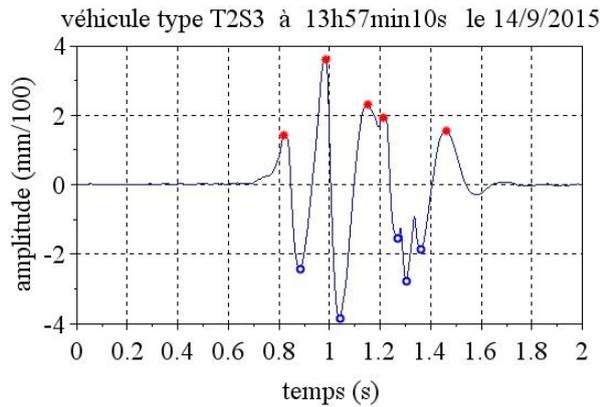
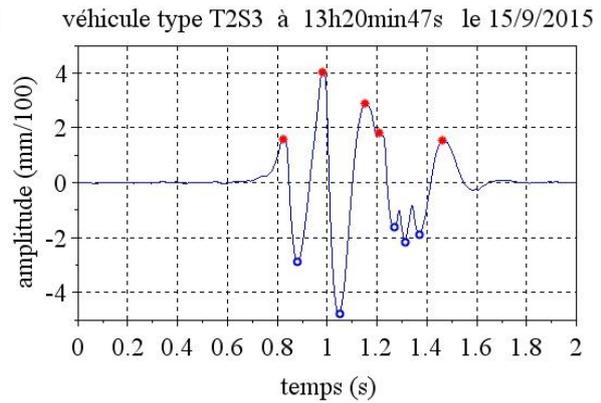
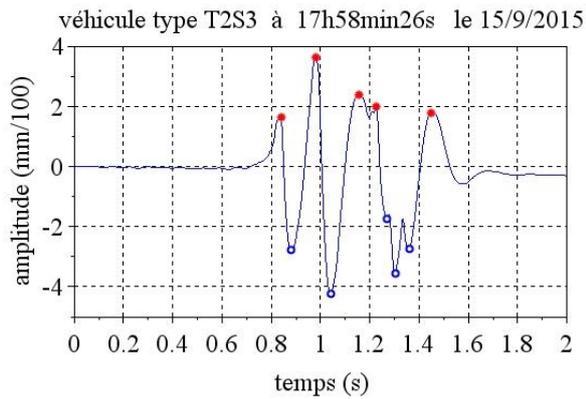
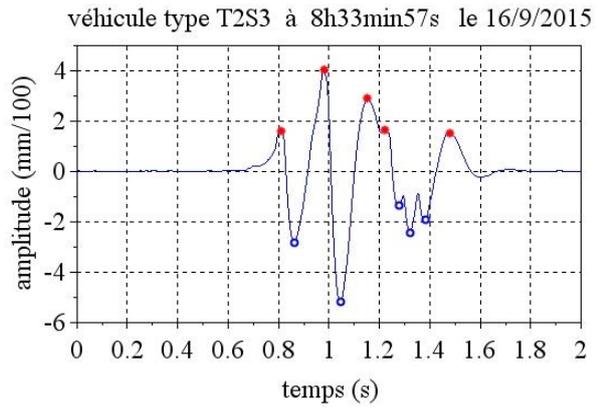
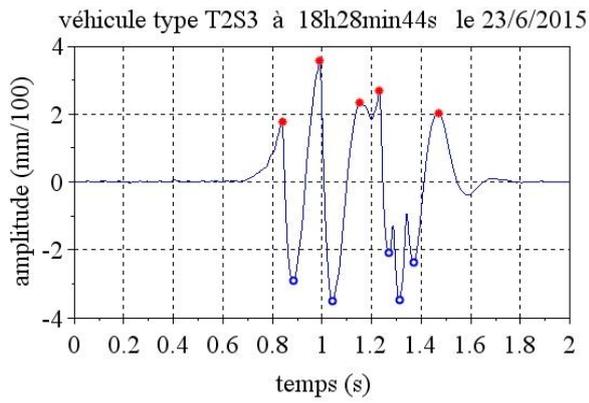


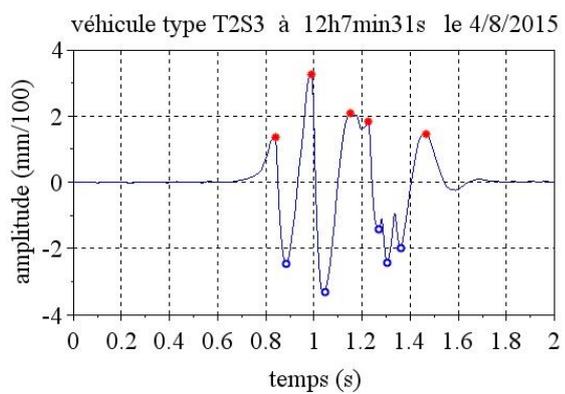
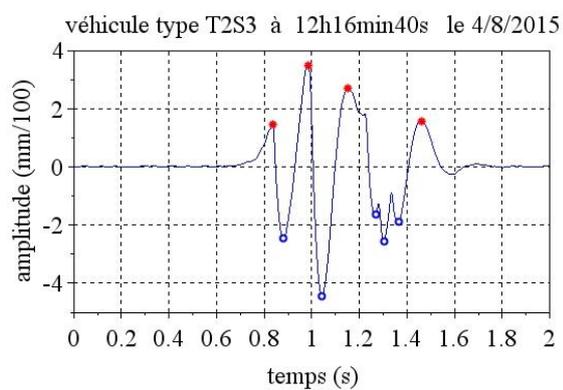
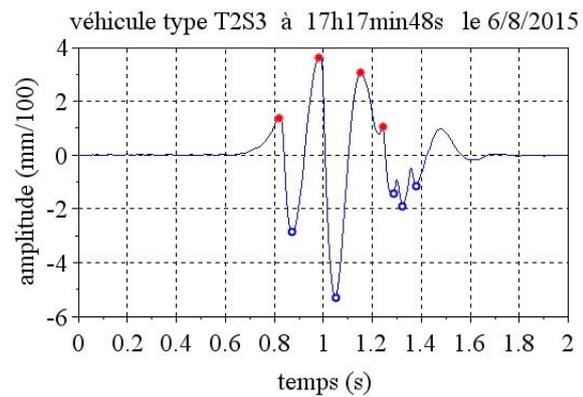
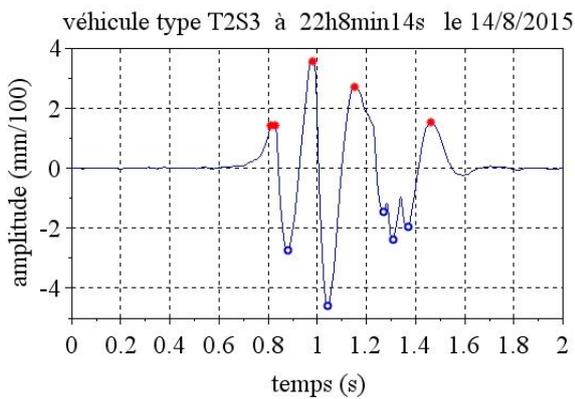
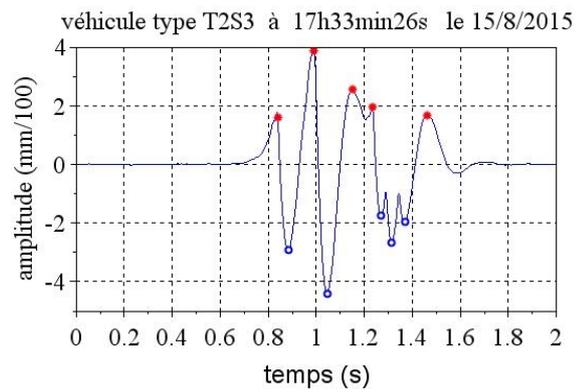
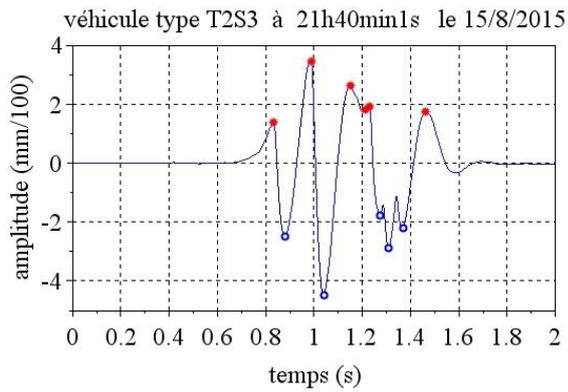
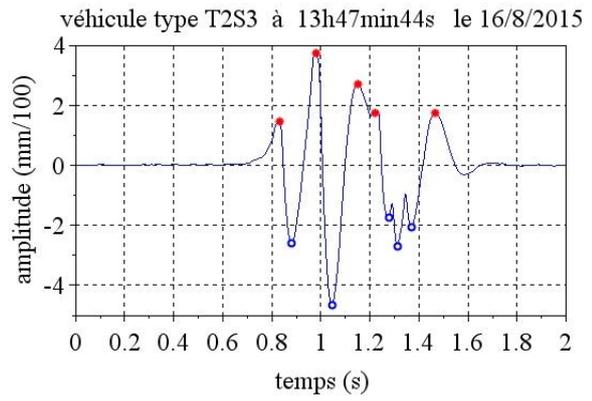
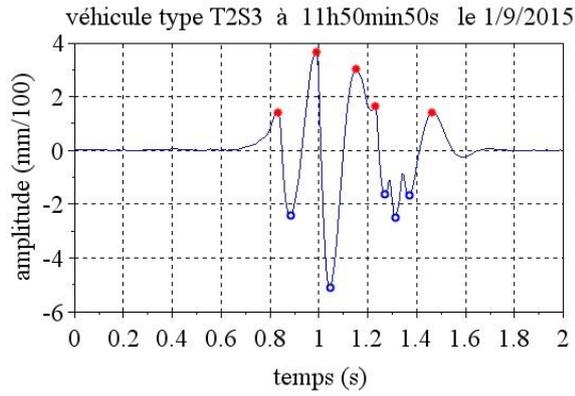
Poids lourds de 5 essieux de type T2S3

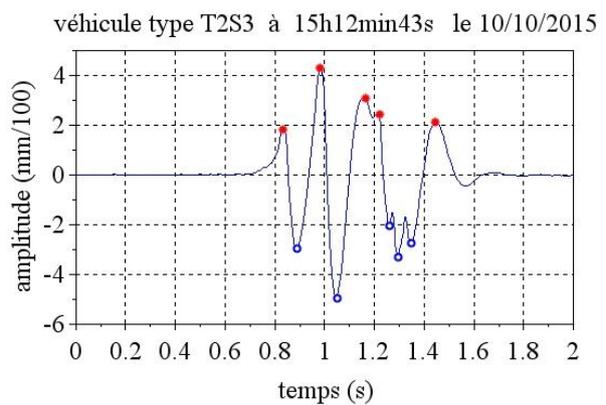
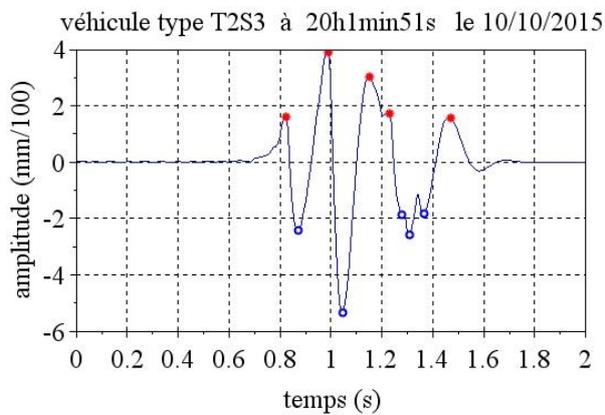
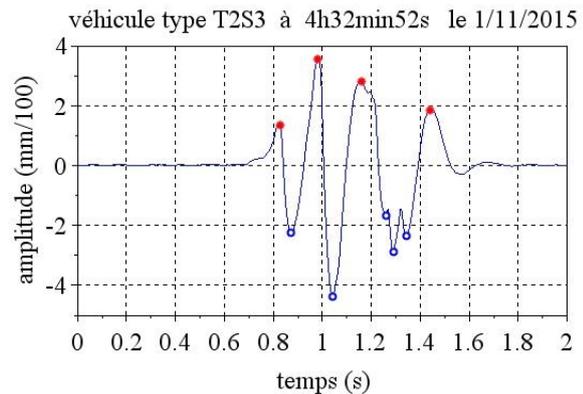
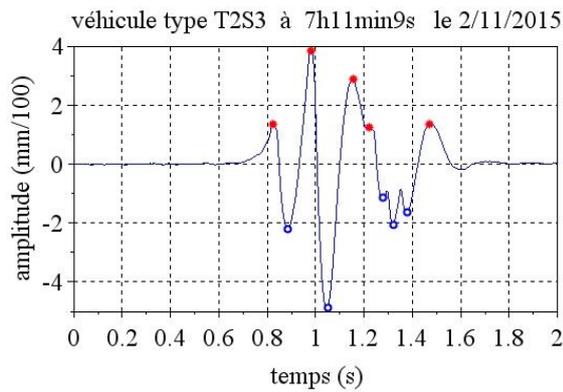
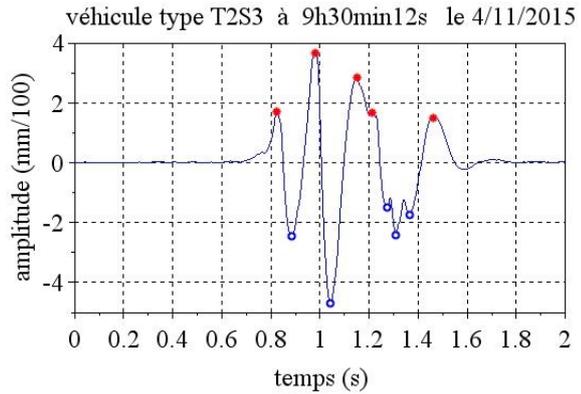
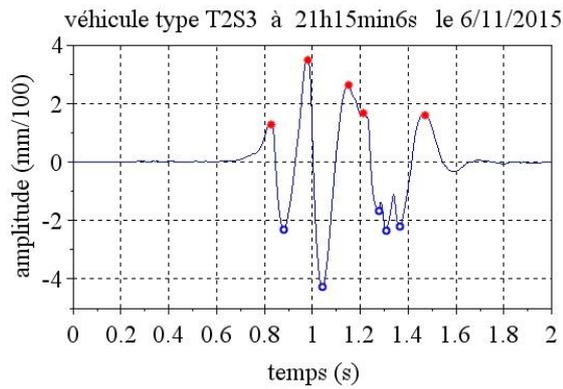
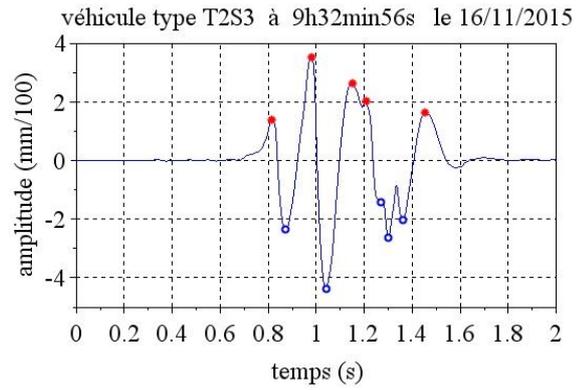
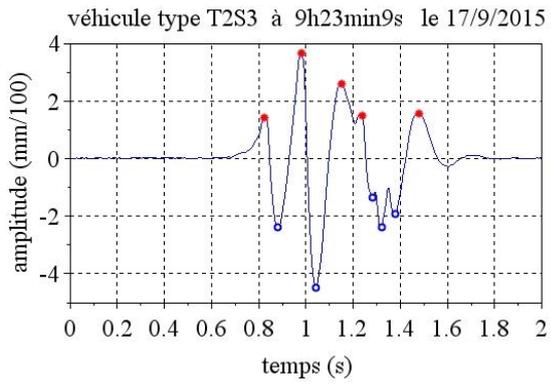
Pour certains fichiers où 5 pics positifs et 4 pics négatifs sont détectés, on les considère comme les poids lourds 5 essieux de type T2S3 car il est probable qu'un pic négatif ne soit pas détecté pas le programme Scilab. En plus, leurs signaux sont relativement proches des signaux des poids lourds de type T2S3 dont la plupart des cas présente 5 pics positifs et 5 pics négatifs.

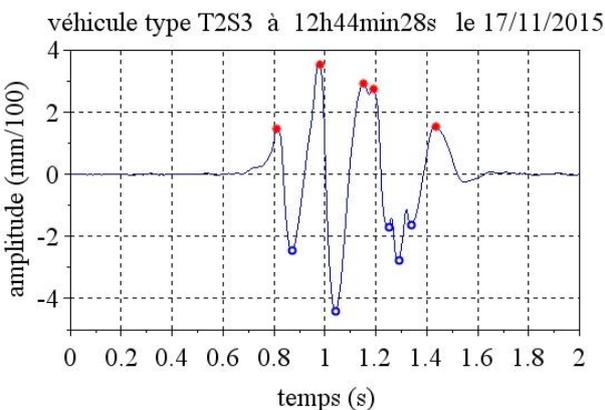
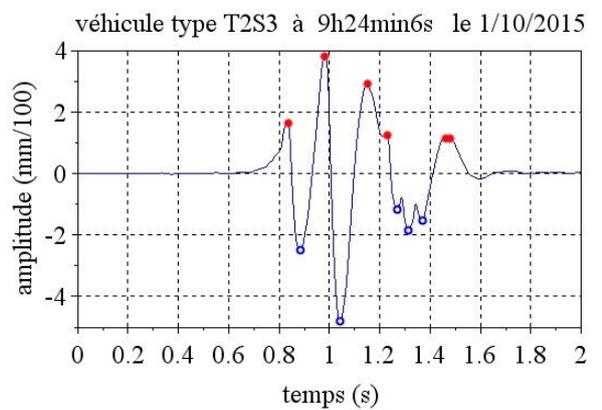
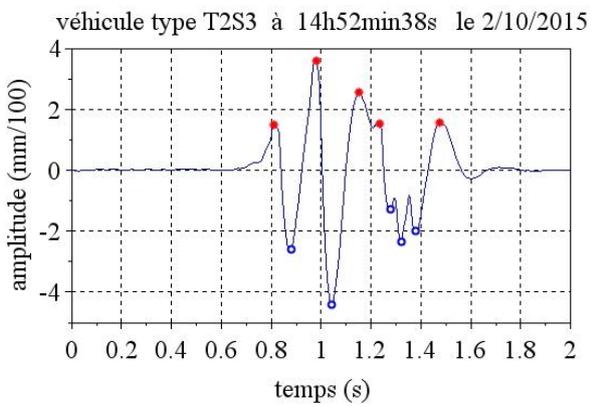
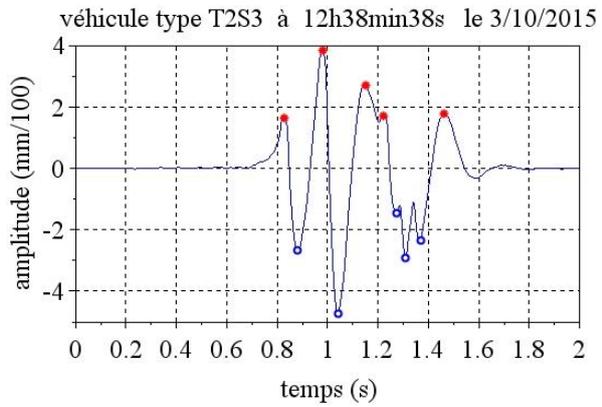
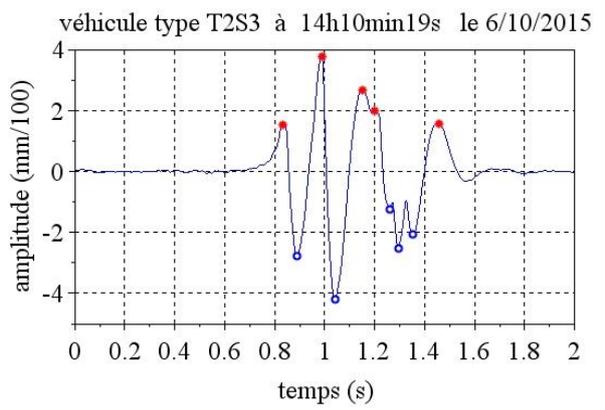
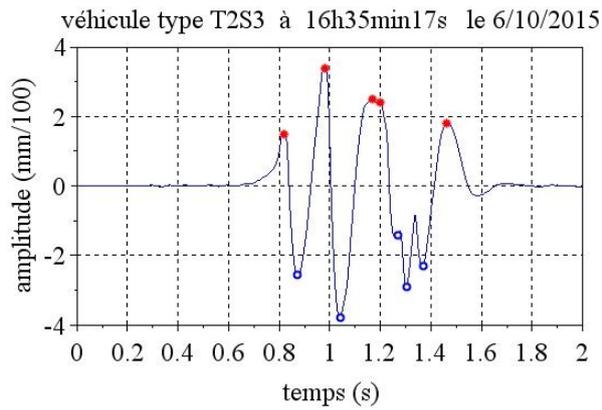
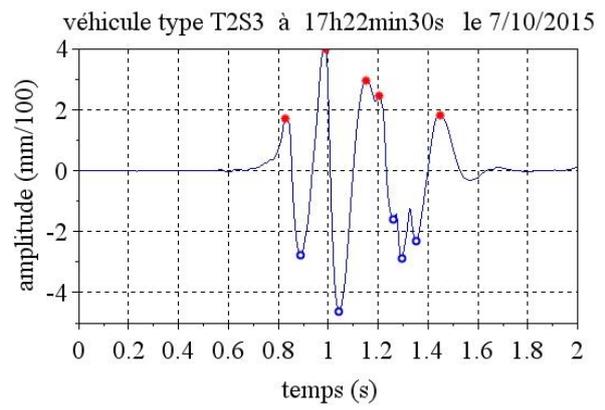
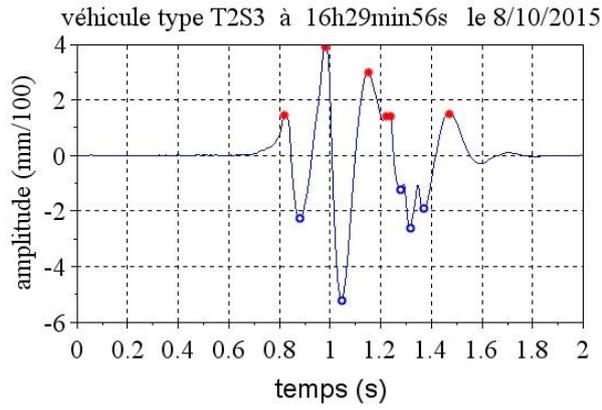


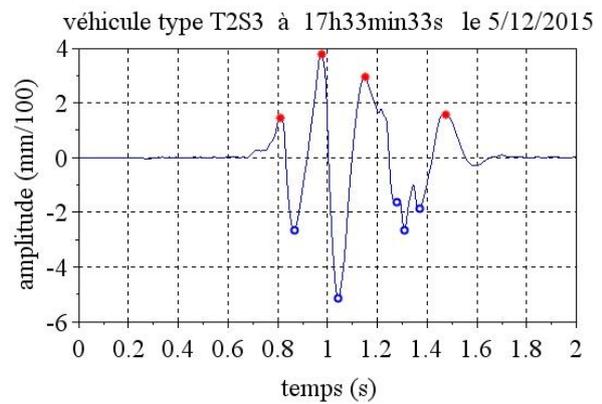
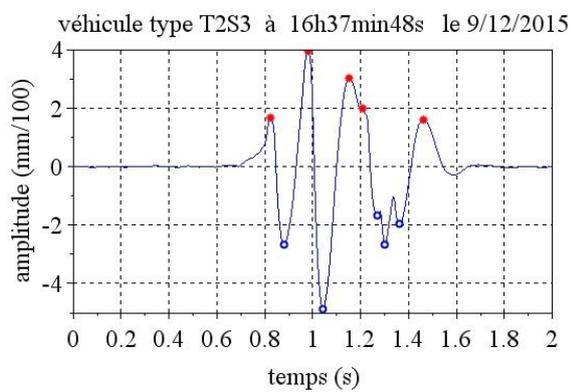
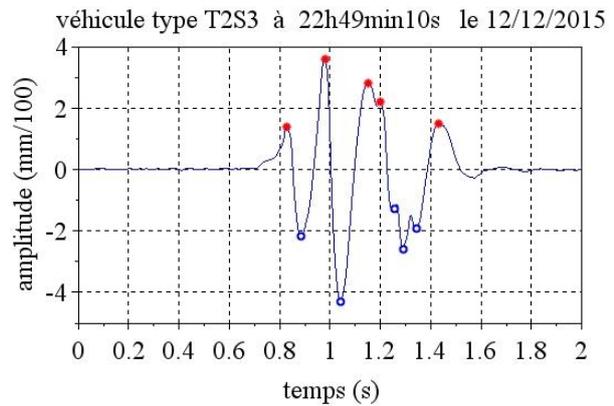
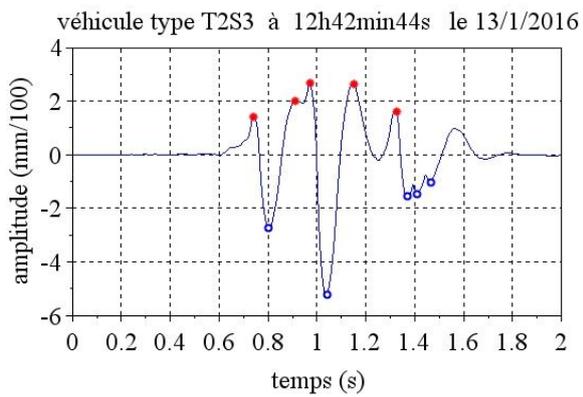
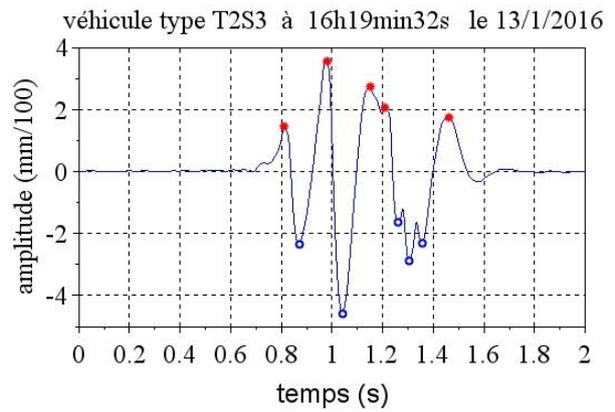
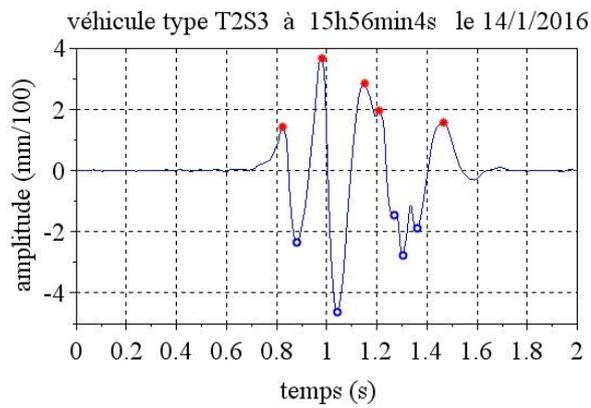
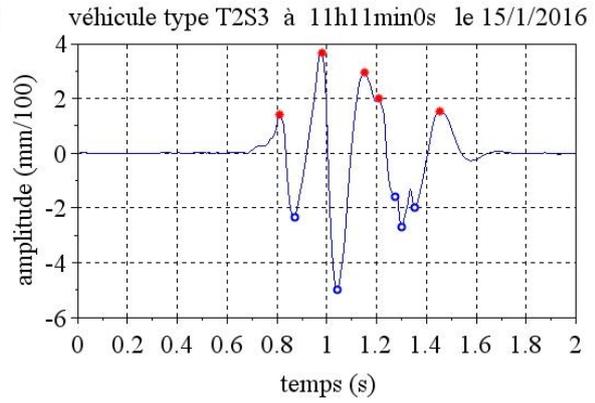
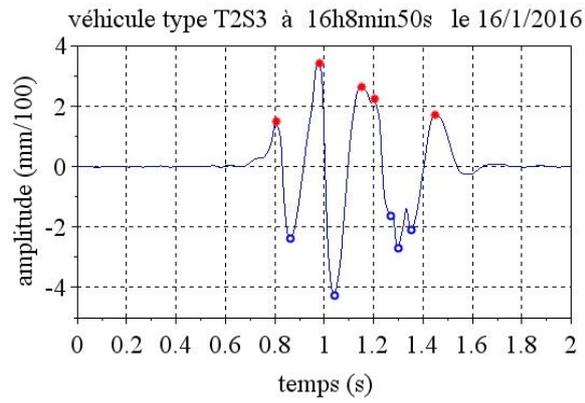


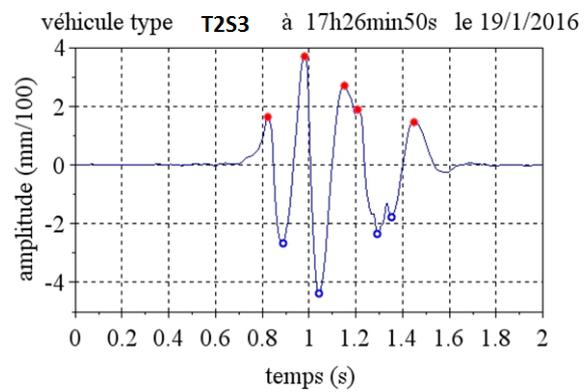
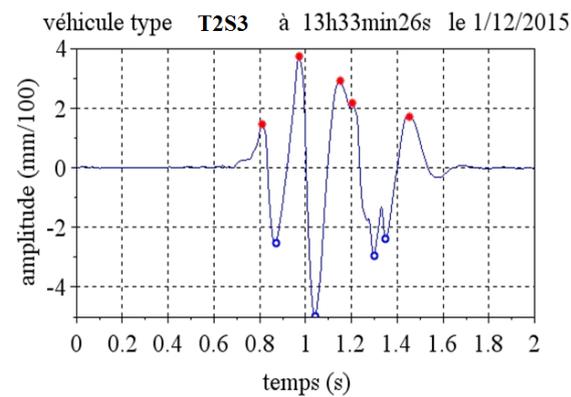
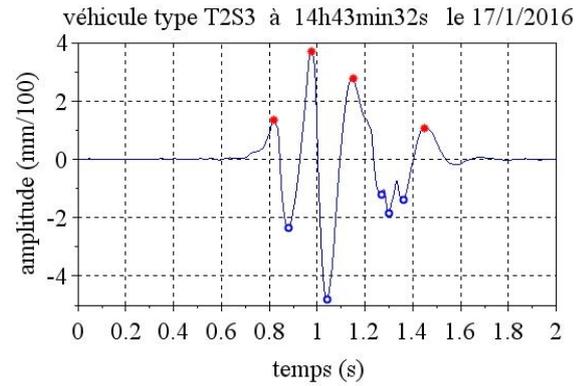
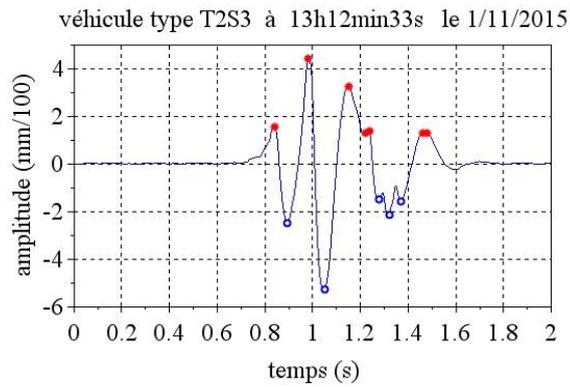
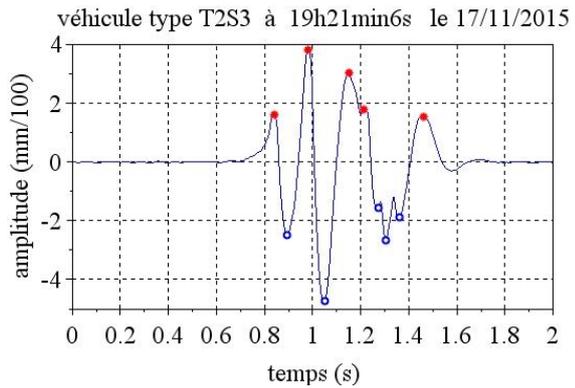
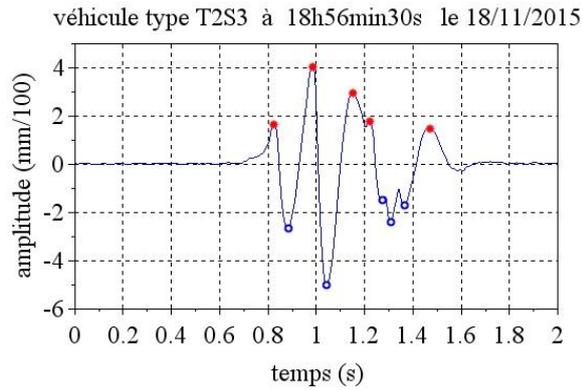
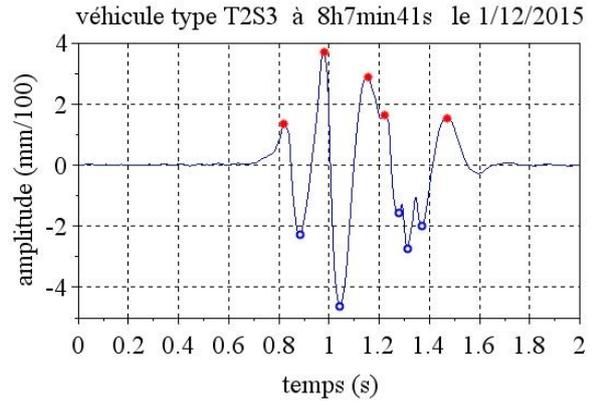
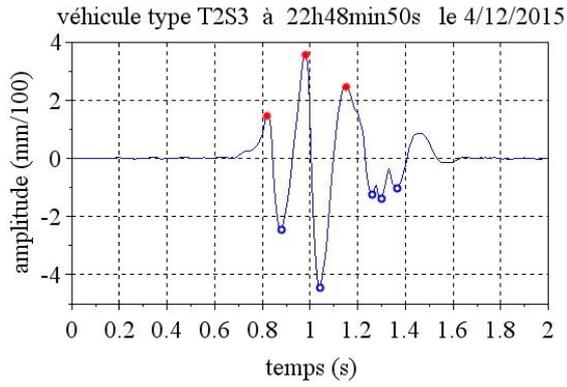


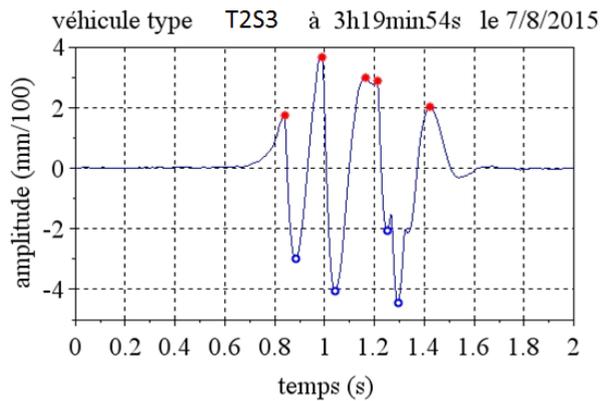
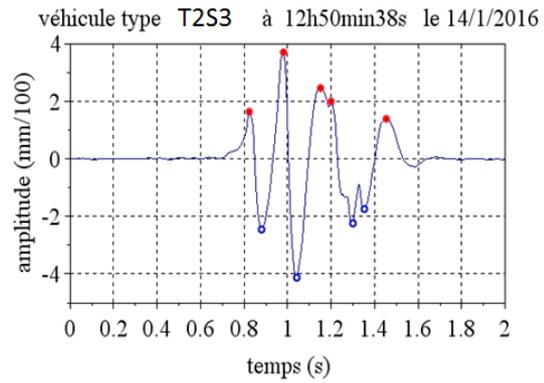
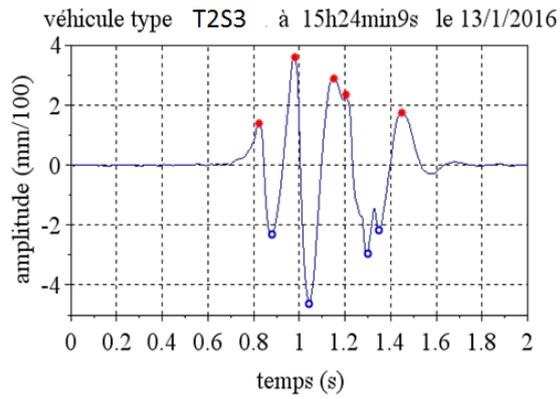






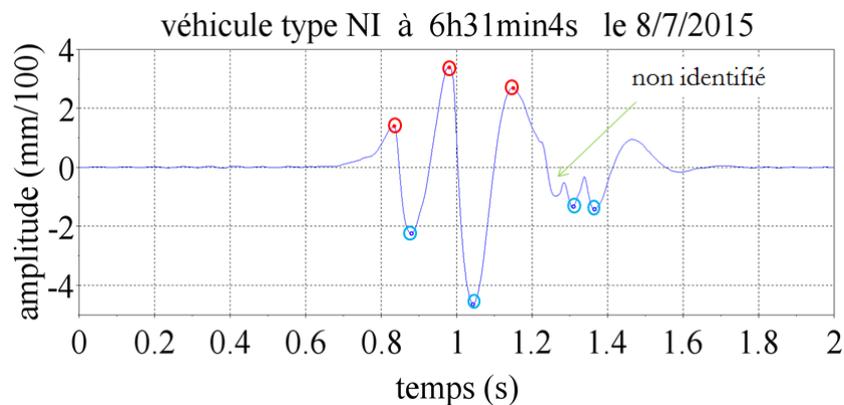






Les poids lourds non identifiés sont présentés ci-dessous. Les différentes raisons ont été remarquées :

- Un des pics du signal n'est pas détecté car son niveau est inférieur au celui de bruit imposé. On ne peut donc pas conclure si c'est bien un pic correspondant au passage d'un essieu du poids lourd.
- Plusieurs pics sont détectés sur le signal alors que leurs niveaux sont légèrement supérieurs au niveau de bruit imposé. Cela est donc difficile à identifier le passage des essieux du poids lourd sur la chaussée.



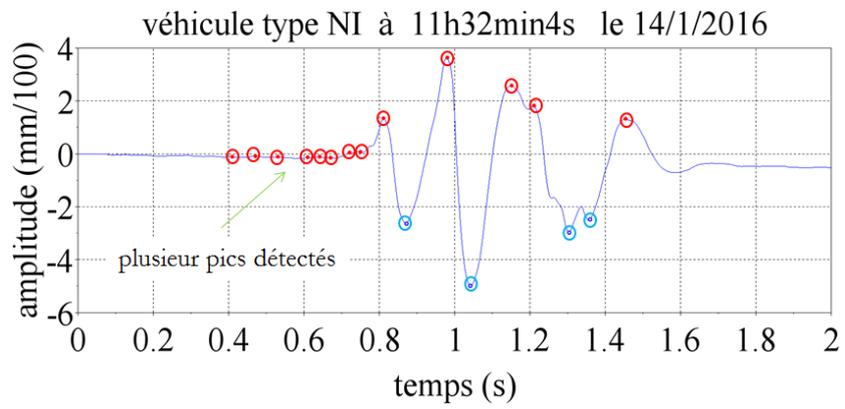
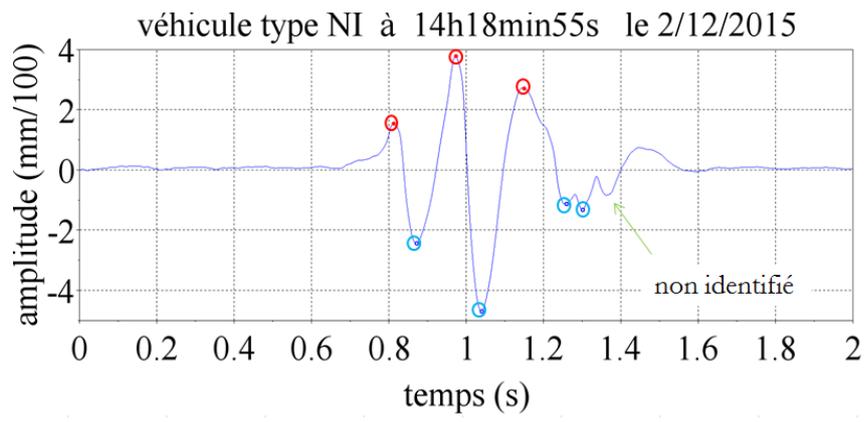


Tableau E 3. Test de fiabilité de la procédure d'identification des silhouettes des poids lourds

Année	Mois	Jour	Heure	Minute	Seconde	Nb essieux	Pic 1	Pic 2	Pic 3	Pic 4	Pic 5
2015	5	5	10	24	41	5	-2.46	-4.20	-1.33	-2.74	-2.37
2015	5	10	18	53	15	5	-2.79	-4.60	-1.69	-2.68	-1.93
2015	5	15	16	24	44	5	-2.43	-4.23	-1.33	-2.64	-2.13
2015	5	17	15	46	36	5	-2.54	-5.33	-2.21	-3.28	-2.45
2015	5	19	13	41	41	5	-2.56	-4.65	-1.41	-2.44	-1.97
2015	5	21	12	24	7	5	-2.87	-4.43	-1.66	-2.84	-2.12
2015	5	21	17	2	26	5	-2.73	-5.31	-2.04	-3.03	-2.18
2015	5	22	18	50	56	5	-2.88	-4.55	-2.04	-2.92	-2.42
2015	5	27	11	32	11	5	-2.47	-3.57	-1.48	-2.70	-2.13
2015	5	30	15	55	3	5	-2.73	-5.15	-1.73	-2.48	-2.13
2015	6	1	0	22	43	5	-2.49	-3.72	-1.15	-1.87	-1.80
2015	6	2	8	36	20	5	-2.12	-3.91	-1.37	-2.30	-1.96
2015	6	2	16	36	38	5	-2.82	-3.95	-1.83	-2.75	-2.00
2015	6	3	22	0	52	5	-2.89	-2.44	-3.92	-1.50	-3.21
2015	6	4	11	23	36	5	-2.59	-4.49	-1.87	-3.00	-2.35
2015	6	10	8	43	6	5	-2.38	-4.15	-1.33	-2.31	-1.99
2015	6	11	6	9	58	3	-2.75	-4.51	-3.84	0.00	0.00
2015	6	13	17	14	47	5	-2.77	-4.00	-1.98	-3.25	-3.00
2015	6	21	21	42	18	2	-2.98	-6.67	0.00	0.00	0.00
2015	6	23	18	28	44	5	-2.91	-3.51	-2.10	-3.48	-2.36
2015	7	1	0	5	39	5	-2.96	-4.96	-1.90	-3.39	-2.68
2015	7	1	20	28	41	5	-2.83	-5.89	-2.29	-3.40	-2.80
2015	7	4	7	55	59	5	-2.40	-4.48	-1.55	-2.61	-2.20
2015	7	4	9	18	5	5	-2.62	-4.30	-1.48	-3.06	-2.13
2015	7	4	16	37	7	5	-3.16	-3.88	-2.34	-4.17	-3.13
2015	7	4	23	12	45	5	-2.77	-5.13	-1.82	-3.19	-2.66
2015	7	5	10	25	4	5	-2.96	-4.09	-1.83	-3.02	-2.13
2015	7	5	15	7	49	5	-4.15	-4.22	-5.99	-2.20	-4.76
2015	7	6	6	17	9	4	-2.61	-3.29	-1.90	-3.06	0.00
2015	7	8	6	31	4	NI	-	-	-	-	-
2015	7	11	17	8	55	5	-3.02	-4.64	-2.48	-3.84	-2.92
2015	7	11	18	18	0	5	-2.84	-5.72	-2.12	-3.45	-2.21
2015	7	20	21	59	48	5	-2.89	-4.18	-1.68	-3.54	-3.02
2015	7	22	20	30	53	5	-2.94	-4.61	-1.66	-2.77	-2.55
2015	7	23	1	45	6	5	-2.50	-4.45	-1.54	-3.05	-2.69
2015	8	1	4	13	15	4	-2.53	-4.24	-2.22	-3.75	0.00
2015	8	1	21	2	6	5	-2.52	-4.06	-1.97	-3.09	-2.30
2015	8	2	9	21	12	5	-2.37	-4.16	-1.22	-2.12	-1.62
2015	8	3	3	53	39	5	-2.44	-4.68	-1.72	-2.68	-2.15
2015	8	4	5	58	30	5	-2.62	-3.25	-1.91	-3.04	-2.10
2015	8	4	12	7	31	5	-2.48	-3.31	-1.43	-2.43	-1.99
2015	8	4	12	16	40	5	-2.45	-4.44	-1.65	-2.58	-1.89
2015	8	6	17	17	48	5	-2.84	-5.30	-1.43	-1.90	-1.16

2015	8	7	3	19	54	5	-2.99	-4.06	-2.06	-4.46	0.00
2015	8	14	22	8	14	5	-2.76	-4.59	-1.47	-2.38	-1.96
2015	8	15	17	33	26	5	-2.92	-4.40	-1.74	-2.68	-1.95
2015	8	15	21	40	1	5	-2.48	-4.49	-1.78	-2.90	-2.20
2015	8	16	13	47	44	5	-2.60	-4.67	-1.75	-2.70	-2.06
2015	8	19	17	4	36	3	-3.41	-3.82	-4.47	0.00	0.00
2015	8	20	17	45	44	2	-3.53	-6.41	0.00	0.00	0.00
2015	9	1	1	14	45	4	-2.86	-4.42	-1.67	-1.40	0.00
2015	9	1	11	50	50	5	-2.44	-5.13	-1.63	-2.49	-1.66
2015	9	2	12	5	13	5	-2.34	-4.57	-1.36	-2.61	-2.37
2015	9	8	11	32	58	5	-2.54	-4.30	-1.25	-3.22	-2.23
2015	9	9	12	24	11	5	-2.69	-4.02	-2.00	-3.25	-2.18
2015	9	14	13	57	10	5	-2.43	-3.87	-1.56	-2.79	-1.87
2015	9	15	13	20	47	5	-2.88	-4.79	-1.61	-2.18	-1.91
2015	9	15	17	58	26	5	-2.78	-4.23	-1.74	-3.54	-2.75
2015	9	16	8	33	57	5	-2.83	-5.19	-1.35	-2.46	-1.92
2015	9	17	9	23	9	5	-2.39	-4.48	-1.35	-2.40	-1.92
2015	10	1	9	24	6	5	-2.48	-4.82	-1.16	-1.85	-1.54
2015	10	2	14	52	38	5	-2.60	-4.40	-1.27	-2.34	-2.01
2015	10	3	12	38	38	5	-2.66	-4.73	-1.46	-2.94	-2.33
2015	10	6	14	10	19	5	-2.76	-4.19	-1.26	-2.51	-2.05
2015	10	6	16	35	17	5	-2.56	-3.80	-1.42	-2.89	-2.30
2015	10	7	17	22	30	5	-2.77	-4.63	-1.61	-2.90	-2.30
2015	10	8	16	29	56	5	-2.28	-5.21	-1.23	-2.64	-1.92
2015	10	9	17	38	59	4	-2.63	-3.76	-3.59	-1.85	0.00
2015	10	10	15	12	43	5	-2.98	-4.96	-2.08	-3.34	-2.74
2015	10	10	20	1	51	5	-2.43	-5.37	-1.88	-2.58	-1.81
2015	11	1	4	32	52	5	-2.23	-4.38	-1.66	-2.89	-2.36
2015	11	1	13	12	33	5	-2.50	-5.30	-1.52	-2.16	-1.60
2015	11	2	7	11	9	5	-2.21	-4.89	-1.15	-2.08	-1.62
2015	11	4	9	30	12	5	-2.45	-4.69	-1.49	-2.40	-1.74
2015	11	4	12	44	55	5	-2.29	-4.17	-4.15	-2.15	-1.75
2015	11	6	12	16	12	4	-3.03	-5.48	-1.85	-1.81	0.00
2015	11	6	21	15	6	5	-2.30	-4.26	-1.66	-2.36	-2.20
2015	11	16	9	32	56	5	-2.35	-4.37	-1.43	-2.64	-2.04
2015	11	17	9	6	7	4	-2.36	-4.62	-1.70	-1.58	0.00
2015	11	17	12	44	28	5	-2.45	-4.43	-1.70	-2.77	-1.64
2015	11	17	19	21	6	5	-2.50	-4.75	-1.58	-2.67	-1.90
2015	11	18	18	56	30	5	-2.67	-5.01	-1.50	-2.43	-1.71
2015	12	1	8	7	41	5	-2.28	-4.62	-1.57	-2.73	-2.01
2015	12	1	13	33	26	5	-2.52	-4.99	-2.95	-2.37	0.00
2015	12	2	14	18	55	NI	-	-	-	-	-
2015	12	4	22	48	50	5	-2.44	-4.44	-1.23	-1.37	-1.04
2015	12	5	17	33	33	5	-2.65	-5.15	-1.63	-2.65	-1.86
2015	12	9	14	13	5	4	-2.13	-4.96	-3.70	-1.68	0.00
2015	12	9	16	37	48	5	-2.67	-4.86	-1.69	-2.66	-1.96

2015	12	12	22	49	10	5	-2.17	-4.32	-1.28	-2.61	-1.94
2016	1	13	12	42	44	5	-2.74	-5.22	-1.56	-1.48	-1.05
2016	1	13	15	24	9	5	-2.33	-4.61	-2.96	-2.18	0.00
2016	1	13	16	19	32	5	-2.34	-4.58	-1.65	-2.90	-2.32
2016	1	14	11	32	4	NI	-	-	-	-	-
2016	1	14	12	50	38	5	-2.44	-4.12	-2.24	-1.73	0.00
2016	1	14	15	56	4	5	-2.35	-4.63	-1.47	-2.78	-1.87
2016	1	15	11	11	0	5	-2.36	-5.01	-1.60	-2.70	-1.97
2016	1	16	16	8	50	5	-2.39	-4.26	-1.65	-2.69	-2.09
2016	1	17	14	43	32	5	-2.36	-4.79	-1.23	-1.84	-1.40
2016	1	19	17	26	50	5	-2.67	-4.38	-2.33	-1.79	0.00

Principe de la procédure de calcul de vitesse des poids lourds

Le calcul des vitesses des poids lourds peut être fait en utilisant les mesures des signaux des géophones placés dans le sens de circulation (sens longitudinal). Connaissant l'écart entre les géophones G1 et G2 (1 mètre) et l'écart temporel des signaux, la vitesse du poids lourd passant sur la chaussée peut être déterminée de cette façon :

$$v = \frac{d}{t}$$

Avec :

- d Distance entre deux géophones (1 mètre)
- t Durée entre les réponses des deux signaux des géophones (en s)

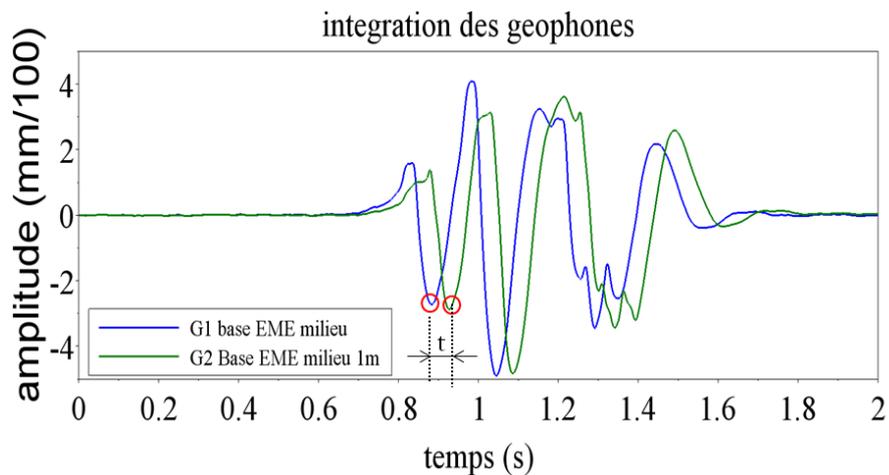


Figure E 4. L'écart temporel entre les réponses des deux géophones G1 et G2 placés à la base de la couche d'EME

Les différentes étapes de la procédure d'identification des silhouettes des poids lourds et de calcul des vitesses des poids lourds passant sur la chaussée sont les suivantes :

- Sélectionner uniquement les fichiers où les poids lourds passent à une position avec les roues centrées sur les jauges de déformations
- Identifier les pics positifs et négatifs des fichiers des géophones
- Caractériser les silhouettes des poids lourds et calculer les vitesses des poids lourds

Calculer la moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones

Les étapes de la procédure de calcul de la moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête des signaux intégrés des géophones sont les suivantes

- Ouvrir tous les fichiers de mesure des géophones enregistrés pendant un mois
- Intégrer chaque signal des géophones par la méthode des rectangles
- Calculer l'amplitude crête-à-crête de chaque signal intégré des géophones
- Calculer la moyenne mensuelle des amplitudes crête-à-crête de tous les signaux intégrés des géophones durant un mois

Calculer la moyenne mensuelle des valeurs de déflexion sous le passage du premier essieu des poids lourds de type T2S3 après avoir appliqué la méthode de correction

Cette procédure consiste à calculer la moyenne de toutes les valeurs de déflexion sous le passage du premier essieu des poids lourds de type T2S3 après avoir appliqué la méthode de correction pour tous les signaux enregistrés durant un mois. Les températures des couches de la chaussée au moment du passage des poids lourds sont également déterminées. Cette procédure regroupe plusieurs procédures citées précédemment dans la partie de traitement des données des géophones.

Les sous-procédures utilisées sont :

1. Procédure permettant de sélectionner les fichiers où les poids lourds passent à une position constante avec leurs roues centrées sur les jauges de déformations
2. Procédure permettant d'identifier les silhouettes des poids lourds
3. Procédure permettant de corriger les signaux des géophones

Les étapes de cette procédure sont les suivantes :

- Sélectionner uniquement les fichiers où les poids lourds passent à l'aplomb des capteurs
- Identifier les silhouettes des poids lourds passant sur la chaussée, sélectionner uniquement les poids lourds de type T2S3
- Appliquer la méthode de correction pour chaque signal de géophone

- Pour chaque signal de géophone, identifier le 1^{er} pic du signal et calculer la valeur de la déflexion sous le passage du premier essieu du poids lourd T2S3
- Afficher les températures des couches de la chaussée enregistrées au même moment du passage du poids lourd T2S3 enregistré
- Calculer la moyenne mensuelle des valeurs de déflexion sous le passage du premier essieu des poids lourds T2S3 durant un mois

Le traitement des données des jauges de déformation

Les jauges de déformations concernées sont les suivantes:

- Deux jauges de déformations transversales (T2 et T3) à la base de la couche d'EME
- Deux jauges de déformations longitudinales (L2 et L3) à la base de la couche d'EME
- Deux jauges de déformations transversales (T5 et T8) à la base de la couche de BBME

Pour le traitement des mesures des jauges, quatre procédures principales programmées avec Scilab ont été mises en place :

1. Tracer les signaux de déformations enregistrés sous chaque passage des poids lourds
2. Calculer la moyenne mensuelle des valeurs maximales de déformation des signaux des jauges sans processus de tri
3. Calculer la moyenne mensuelle des valeurs maximales de déformation des signaux des jauges avec le tri de la position latérale des chargements
4. Calculer la moyenne mensuelle des valeurs de déformation obtenues sous le passage du premier essieu des poids lourds de 5 essieux de type T2S3 avec processus de tri des signaux

Tracer les signaux de déformations enregistrés sous chaque passage des poids lourds

Cette procédure permet de tracer les signaux de déformations à la base des couches d'EME et de BBME. Les températures à la base de ces couches enregistrées au moment du passage du poids lourd peuvent être également affichées sur le graphique.

Les étapes de cette procédure sont les suivantes:

- Ouvrir le fichier des mesures des jauges de déformations
- Retrouver les températures à la base des couches bitumineuses au moment du passage du poids lourd
- Tracer les signaux de déformations, ainsi que la valeur de la température

Calculer la moyenne mensuelle des valeurs maximales de déformation des signaux des jauges sans processus de tri

Les étapes de cette procédure sont présentées ci-dessous :

- Ouvrir les fichiers des mesures de déformations
- Pour chaque fichier, calculer la valeur maximale des mesures de déformations à la base des couches de la chaussée
- Calculer la moyenne des valeurs maximales de déformations de tous les fichiers enregistrés dans un mois

Calculer la moyenne mensuelle des valeurs maximales de déformation des signaux des jauges avec le tri de la position latérale du chargement

Les étapes de cette procédure sont les suivantes :

- Sélectionner uniquement les fichiers où les poids lourds passent avec leurs roues centrées sur les capteurs de déformations
- Pour chaque fichier, calculer la valeur maximale des mesures de déformations à la base des couches de la chaussée
- Calculer la moyenne des valeurs maximales de déformations de tous les fichiers enregistrés dans un mois

Calculer la moyenne mensuelle des valeurs de déformation sous le passage du premier essieu des poids lourds de 5 essieux de type T2S3 avec processus de tri des signaux

Cette procédure regroupe plusieurs sous-procédures citées précédemment.

Les sous-procédures utilisées sont :

1. Procédure permettant de sélectionner les fichiers où les poids lourds avec leurs roues centrées sur les jauges de déformations
2. Procédure permettant d'identifier les silhouettes des poids lourds

Les étapes de cette procédure sont les suivantes :

- Sélectionner uniquement les fichiers où les poids lourds passent à l'aplomb des capteurs
- Identifier les silhouettes des poids lourds passant sur la chaussée puis sélectionner uniquement les poids lourds de type T2S3
- Sélectionner les signaux des jauges de déformations par une étude sur la qualité des signaux basée sur le rapport signal/bruit
- Déterminer les températures des couches de la chaussée enregistrées au moment du passage de chaque poids lourd T2S3

- Calculer la moyenne mensuelle des valeurs de déformation sous le passage du premier essieu des poids lourds T2S3 durant un mois

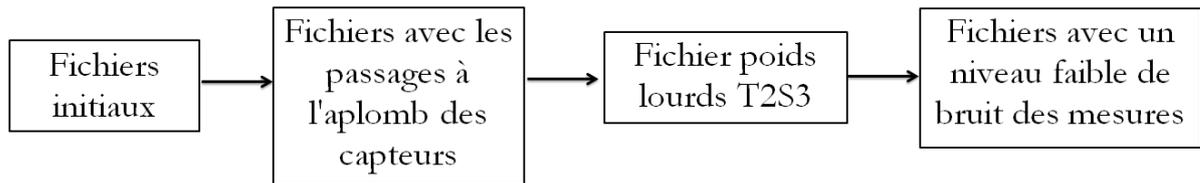


Figure E 5. Processus de tri des signaux des jauges

Thèse de Doctorat

Ngoc Son DUONG

Instrumentation de chaussées: la route intelligente qui s'auto-détecte?

Instrumentation of pavements: the smart road which self-detects?

Résumé

Les itinéraires routiers supportant un nombre élevé de véhicules lourds ont habituellement des structures de chaussées épaisses et peu déformables. A ce jour, l'évaluation de l'état structurel réalisée au moyen d'appareils de mesure de déflexion (déflectographe ou curviamètre) et les relevés de dégradation sont souvent insuffisants pour détecter le début d'endommagement des structures épaisses.

Afin de mesurer de façon plus précise et en continue, la réponse mécanique de la chaussée, des sections autoroutières ont été instrumentées au moyen de capteurs spécifiques (jauges, sondes de température et géophones) qui constituent un moyen d'auscultation complémentaire. L'exploitation des mesures sous trafic réel génère cependant une grande quantité des données et une variabilité des mesures qui conduisent à proposer une procédure originale de tri des signaux.

Le traitement des mesures des jauges permet d'analyser les variations réelles des déformations en prenant en compte les variations journalières et saisonnières des paramètres environnementaux. Une modélisation avec différentes hypothèses de comportement aux interfaces des différentes couches de la chaussée est ensuite proposée, ce qui permet d'améliorer la compréhension du comportement mécanique de la chaussée sous trafic réel. Le traitement des mesures des géophones permet de remonter à la mesure de la déflexion qui représente la capacité portante de la chaussée. L'utilisation des différents géophones permet également d'identifier les silhouettes des poids-lourds et d'estimer leur vitesse ainsi que leur position latérale. Ces travaux répondent à une demande très actuelle des gestionnaires d'ouvrages, qui souhaitent disposer d'outils pour le monitoring dans le temps de leurs infrastructures.

Mots clés

Chaussées, Instrumentation, Modélisation, Géophone, Jauge, Traitement de données, Acquisition à distance

Abstract

Recently, the roads supporting a great number of heavy vehicles usually have a thick and little deformable structure. To evaluate the pavement performances, deflection measurement devices have been used. However, these measurements are not accurate and the degradation detection is not enough to detect the start of pavement damage.

In order to obtain more accurate and continuous mechanical pavement measurements, highway sections were instrumented with specific sensors (temperature probes, strain gages, geophones). However, the measurements analysis under real traffic generates a great number of data and a variability of measurements. Therefore, this problem requires an original signal sorting process.

The study of strain measurements allows analyzing real strain variations which take in account the daily and seasonal variations of environment parameters. Modelling calculations with different assumptions were carried out afterward in order to obtain the best prediction for the mechanical pavement behavior.

The study of geophone measurements allows measuring pavement deflections which represent pavement bearing capacity. In addition, different geophones were used to characterize heavy vehicle silhouettes, vehicle speeds and their lateral positions. The thesis work meets the expected requirement of construction managers to monitor continuously their infrastructures under real traffic.

Key Words

Pavements, Instrumentation, Modelling, Geophone, Strain Gage, Data Analysis, Remote Acquisition