

Année 2017

N° d'ordre :

Université Lille1 Sciences et Technologies
Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement
Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de L'Université des Sciences et Technologies de Lille
Discipline : Génie Civil

Sous le titre de :

**Influence de la tranchée sur les chaussées en milieu urbain :
Analyse des données d'une expérimentation à grande échelle**

Soutenue par :

Hasan ALJR

Le 20/12/2017

Jury

DJELAL-DANTEC CHAFIKA	PROFESSEUR, UNIVERSITE D'ARTOIS	PRESIDENT
ARAB AHMAD	PROFESSEUR, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF	RAPPORTEUR
BURLON SEBASTIEN	INGENIEUR DE RECHERCHE, IFSTTAR	RAPPORTEUR
SHAHROUR ISAM	PROFESSEUR, UNIVERSITE DE LILLE 1	EXAMINATEUR
BIAN HANBING	MCF, UNIVERSITE PAUL VERLAINE METZ	EXAMINATEUR
SADEK MARWAN	HDR, UNIVERSITE DE LILLE1	DIRECTEUR

Remerciements

Au terme de ce travail de recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude et mes très vifs remerciements à l'ensemble des personnes ayant collaboré de près ou de loin aux différents travaux réalisés durant cette Thèse et sans lesquelles je n'aurais pu honorer mes engagements.

En premier lieu, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements au directeur du laboratoire LGCgE, Monsieur Isam Shahrour, pour son aide très précieuse, ses conseils scientifiques indispensables, sa qualité humaine, sa disponibilité malgré ses nombreuses charges, et sa sympathie.

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de Thèse Monsieur Marwan SADEK. Je le remercie pour sa confiance, les discussions riches, ses encouragements, et ces précieux conseils tout au long de ce travail doctoral.

Je tiens à remercier très vivement et respectueusement Madame DJELAL-DANTEC Chafika qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse. Messieurs, ARAB Ahmad et BURLON Sébastien qui ont accepté de rapporter ce travail et de me faire profiter de leur expérience. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements et de ma gratitude. Monsieur BIAN Hanbing qui a bien voulu examiner ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'équipe de la MEL, en particulier à Monsieur Julien HENIQUE, pour la collaboration et les échanges riches et constructifs à travers les différentes réunions qu'on a eues tout au long de ce travail de recherche.

Mes plus profonds s'adressent vont à mes parents pour leur soutien et encouragement sans relâche. Malgré l'éloignement depuis de nombreuses années, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portent et me guident tous les jours.

Enfin merci à mon frère Ammar pour ses encouragements et sa présence au fil de ces longues années.

A ma chère épouse Osaymah et à ma fille Alya, vous êtes pour moi une source permanente de motivation et de succès.

Résumé

La tranchée constitue une cause majeure de dégradation des voiries urbaines. Elle influence considérablement la durée de service de ces voiries. Le présent travail vise à étudier à travers une expérimentation à grande échelle l'influence de la tranchée sur la chaussée. Il a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre la Métropole Européenne de Lille, le Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement et Eurovia. Il comporte quatre parties.

La première comporte une synthèse bibliographique sur l'influence de la tranchée sur la structure de la chaussée et sa durée de service ainsi que sur son impact économique. La seconde partie concerne l'analyse du fonctionnement du système d'instrumentation qui a été utilisée pour le suivi du comportement de la chaussée et de la tranchée construites à l'entrée du campus de Lille1. La troisième partie consiste dans l'évaluation de l'état structurel de la chaussée et de la tranchée à l'aide des essais de déflexion. La dernière présente une analyse des réponses de la chaussée et de la tranchée sous l'effet du trafic et l'influence de la température sur ces réponses.

Mots-clés : tranchée, chaussée, durée de service, capteur, déformation, température, déflexion.

Abstract

The trench is a major cause of deterioration of urban pavements. It considerably reduces the service life of these pavements. The present work aims to study through a large-scale experimentation the influence of the trench on urban pavements. It has been conducted within a collaboration between Lille Metropolis, Civil and geo-Environmental Engineering laboratory and Eurovia. It includes 4 parts.

The first part contains a literature review concerning the influence of the trench on urban pavements as well as its economic impact. The second part concerns the analysis of the performances of the instrumentation system used to monitor the behavior of the pavement and the trench built at the entrance of Lille1 campus. The third part consists in the analysis of structural behavior of the pavement and the trench using deflection tests. The last presents an analysis of the responses of the pavement and the trench under traffic and the influence of the temperature on these responses.

Keywords: utility cut, pavement, service life, sensor, strain, temperature, deflection.

Table des figures

Figure	Titre	Page
1.1	Les différentes couches de la chaussée (SETRA 1994).....	5
1.2	Déformations longitudinales des couches bitumineuses sous une charge roulante (Perret 2003).....	8
1.3	Signal type des déformations longitudinales au bas de la couche de base (Perret 2003).....	9
1.4	Déformations transversales des couches bitumineuses sous une charge roulante (Perret 2003).....	9
1.5	Signal type des déformations transversales au bas de la couche de base (Perret 2003).....	10
1.6	La durée de vie et la durée de dimensionnement d'une chaussée.....	11
1.7	Evolution du niveau de service d'une chaussée (SETRA 1996).....	12
1.8	Les indicateurs et les dégradations de la chaussée (STBA 1988).....	13
1.9	Indice d'état de chaussée IEC (PCI) (CAQ, 2014).....	14
1.10	Comportements différentiels entre la zone de tranchée et les zones adjacentes (Ainley Group 2000).....	17
1.11	Impact du nombre de tranchées sur la durée de service d'une chaussée (Department of Public Works 1998).....	18
1.12	Infiltration d'eau dans la chaussée à travers les joints de la tranchée.....	19
1.13	Absence de colmatage des joints de tranchée (Nichols Consulting Engineers 2007).....	20
1.14	Présence des fissures sur la chaussée dans la zone adjacente à la tranchée (Nichols Consulting Engineers 2007).....	20
1.15	Formation de la zone d'influence d'une tranchée (Department of Public Works 1998 ; SUDAS 2016).....	21
1.16	Répartition des points de mesure des déflexions, ville de Seattle (Yapp M. et al 2001).....	22

1.17	Courbe typique des valeurs moyennes des déflexions maximales (Yapp M. et al, 2001).....	23
1.18	Répartition des points de mesure de déflexion, ville de Cincinnati (Bodocsi et al, 1995).....	24
1.19	Courbe de déflexion maximale mesurée sur un site type, ville de Cincinnati (Bodocsi et al 1995).....	24
1.20	Largeur moyenne de la zone d'influence d'une tranchée, ville de Cincinnati (Bodocsi et al 1995).....	25
1.21	Réalisation d'une tranchée sous forme de « T » (Schaefer et al 2005).....	26
1.22	Cas type : tranchée sous chaussée (SETRA 1994).....	28
1.23	La densité relative et le compactage d'AASHTOO T99 pour un matériau granulaire (Spangler et Handy 1982).....	29
1.24	Figure 1.24 : Impact de la tranchée sur l'indice d'état de la chaussée PCI (Yapp M. et al 2001).....	30
1.25	Impact du nombre de tranchées sur l'état de la chaussée (Department of Public Works 1998).....	31
1.26	Perte de la durée de service de la chaussée due à la présence d'une tranchée.....	31
1.27	Zones de calcul du PCI de la section étudiée (Shahin et Crovetti 2002).....	32
1.28	Perte en coût de construction de la chaussée due à la présence des tranchées (Arudi 2000).....	35
2.1	Localisation de l'expérimentation ; Avenue Henri Poincaré, Villeneuve d'Ascq, près de la Cité Scientifique.....	38
2.2	Etat de la chaussée avant l'expérimentation.....	39
2.3	Reconstruction de la Chaussée (photo EUROVIA).....	40
2.4	Coupe transversale de la chaussée.....	40
2.5	Construction de la tranchée (photo EUROVIA).....	41
2.6	Coupe transversale dans la tranchée.....	41
2.7	Plan d'implantation des nœuds des capteurs.....	42

2.8	Fonctionnement des capteurs du nœud P0 (D1, D2 et D4).....	47
2.9	Fonctionnement des capteurs du nœud P1 (D5, D6, D7 et D8).....	47
2.10	Fonctionnement des capteurs du nœud P5 (D29, D30 et D31).....	48
2.11	Fonctionnement des capteurs de température au nœud P0.....	49
2.12	Fonctionnement des capteurs de température au nœud P1.....	50
2.13	Fonctionnement des capteurs de température au nœud P5.....	50
2.14	Fonctionnement des capteurs d'humidité au nœud P0.....	51
2.15	Fonctionnement des capteurs d'humidité au nœud P1.....	52
2.16	Fonctionnement des capteurs d'humidité au nœud P5.....	52
3.1	Déflexion maximale sous une charge roulante règlementaire.....	55
3.2	Mesure de déflexion à la poutre Benkelman.....	56
3.3	Mesure de déflexion au Déflectographe FLASH.....	56
3.4	Répartition des points de mesure de déflexion.....	58
3.5	Mesures de déflexion à la poutre Benkelman-bande de roulement droite.....	59
3.6	Mesures de déflexion au déflectographe FLASH-bande de roulement droite.....	60
3.7	Mesures de déflexion à la poutre Benkelman-bande de roulement gauche.....	60
3.8	Mesures de déflexion au déflectographe FLASH -bande de roulement gauche...	61
3.9	Déflexions corrigées (poutre Benkelman)-bande de roulement droite.....	62
3.10	Déflexions corrigées (déflectographe FLASH)-bande de roulement droite.....	62
3.11	Déflexions corrigées (poutre Benkelman)-bande de roulement gauche.....	63
3.12	Déflexions corrigées (Déflectographe FLASH)-bande de roulement gauche.....	63
3.13	Déflexion caractéristique sur et hors tranchée.....	65
3.14	Déflexion caractéristique sur, hors et au voisinage de la tranchée.....	66
3.15	Déflexion caractéristique sur, hors et au voisinage de la tranchée.....	67
4.1	Exemple type des mesures brutes de déformation longitudinale.....	70

4.2	Exemple de signaux de déformations longitudinales corrigés.....	70
4.3	Signaux de déformation longitudinale dus au passage d'un poids lourd.....	71
4.4	Signaux dus au passage d'une charge roulante sur des capteurs de déformation successifs.....	72
4.5	Jeu de points représentant des signaux de déformation.....	72
4.6	Variation de la température dans la chaussée.....	73
4.7	Variation de l'humidité dans la chaussée.....	74
4.8	Distribution des déformations maximales mesurées par la jauge de déformation D2 (point de référence de la chaussée).....	75
4.9	Distribution des déformations maximales mesurées par la jauge de déformation D29 (point de référence dans la tranchée).....	75
4.10	Comparaison des distributions des déformations mesurées par les jauges D2 et D29 (supérieures à 40 μ def).....	76
4.11	Localisation des périodes correspondantes aux catégories de température.....	78
4.12	Déformations longitudinales des 3 capteurs aux faibles températures (Cat1, 1- 7°).....	78
4.13	Distribution des déformations longitudinales des 3 capteurs aux faibles températures ($1^{\circ} < T \leq 7^{\circ}$).....	79
4.14	Déformations longitudinales aux températures élevées (Cat 5, $22^{\circ} < T \leq 28^{\circ}$).....	79
4.15	Distribution des déformations longitudinales aux températures élevées (Cat 5, $22^{\circ} < T \leq 28^{\circ}$).....	80
4.16	Déformations longitudinales enregistrées pour les températures de la catégorie 2 ($7 < T \leq 12^{\circ}$).....	80
4.17	Déformations longitudinales enregistrées pour les températures de la catégorie 3 ($12 < T \leq 17^{\circ}$).....	81
4.18	Déformations longitudinales enregistrées pour les températures de la catégorie 4 ($17 < T \leq 22^{\circ}$).....	81
4.19	Influence de la température sur les déformations longitudinales dans la chaussée (D2 et D10) et la tranchée (D29).....	82
4.20	Corrélation entre les déformations dans la chaussée (D2 au point P0) et celles dans la tranchée (D29 au point P5).....	83

4.21	Corrélation entre les déformations dans la chaussée entre (D2 au point P0) et (D10 au point P2).....	84
4.22	Corrélation entre les déformations dans la chaussée entre (D2 au point P0) et (D5 au point P1).....	85

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
1.1	Les valeurs de l'indice d'état de chaussée et leurs photos associées (Ville de Honolulu 2012).....	16
1.2	Nombre annuel de tranchées réalisées dans des villes américaines (SUDAS2005 ; ICPI 2013).....	25
1.3	Largeur de la zone d'influence d'une tranchée.....	26
1.4	Largeur d'épaulement recommandée par certains états ou villes américaines (Peters 2002 ; Schaefer et al 2005).....	26
1.5	Impact de la tranchée sur la durée de service des chaussées.....	32
1.6	L'épaisseur moyenne d'asphalte pour compenser la perte de portance due à la présence d'une tranchée.....	34
1.7	Coût de réhabilitation de la zone de tranchée en \$ (Lee et Lauter 1999).	34
2.1	Capteurs utilisés.....	42
2.2	Implantation des capteurs.....	43
3.1	Campagnes de mesure de déflexion.....	56
3.2	Le nombre de points de chaque famille pour chaque campagne de mesure.....	59
3.3	Facteur de correction de température.....	61
3.4	Classes de la déflexion caractéristique (Cerema et IDRRIM 2016).....	64
3.5	Déflexions caractéristiques.....	64

3.6	Classes de la déflexion caractéristique-chaussée bitumineuse épaisse (Cerema et IDRRIM 2016).....	66
4.1	Les classes de température.....	77
4.2	Nombre d'événements enregistrés par capteur en fonction des classes de température.....	77
4.3	Données de l'analyse locale.....	82

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : BIBLIOGRAPHIE	4
1.1. Introduction	4
1.2. Classements des chaussées.....	4
Cat1 : Chaussées souples (flexibles)	5
Cat2 : Chaussées semi-rigides	5
Cat3 : Chaussées rigides	6
1.3. Dimensionnement des chaussées	6
1.4. Déformations des chaussées.....	7
1.4.1. Les déformations sous une charge roulante	8
1.5. Durée de vie, durée de service et niveau de service.....	10
1.5.1. Evaluation du niveau de service	12
1.6. Les tranchées	15
1.6.1. Problématique de la tranchée	17
1.6.2. Effets des tranchées sur la structure de la chaussée	18
1.6.2.1. Infiltration des eaux	19
1.6.2.2. Effets de bords (zone d'influence d'une tranchée)	20
1.6.2.3. Qualité de matériaux et techniques de construction	27
1.6.3. Impact des tranchées sur la durée de service des chaussées	30
1.6.4. Impact économique des tranchées	33
1.7. Conclusions	36
CHAPITRE 2 : EXPERIMENTATION A GRANDE ECHELLE DE LA TRANCHEE : DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU SYSTEME D'INSTRUMENTATION	37
2.1. Introduction	37
2.2. Description de l'expérimentation.....	38
2.2.1. Choix du site expérimental	38
2.2.2. Travaux de construction.....	39

2.3. Instrumentation	41
2.3.1. Les capteurs	41
2.3.2. Système d'acquisition	45
2.4. Fonctionnement des capteurs	45
2.4.1. Méthodologie	45
2.4.2. Capteurs des déformations	46
2.4.3. Fonctionnement des capteurs de température	48
2.4.4. Fonctionnement des capteurs d'humidité	51
2.5. Conclusions	53
CHAPITRE 3 : ESSAIS DE DEFLEXION	55
3.1. Introduction	55
3.2. Les campagnes de mesure de déflexion	56
3.3. Les points de mesure de déflexion	57
3.4. Les mesures de déflexion	59
3.5. La déflexion caractéristique	64
3.5.1. Etat structural de la chaussée	65
3.5.2. Zone d'influence de la tranchée	66
3.5.3. Impact de la température.....	67
3.6. Conclusions	68
CHAPITRE 4 : TRAITEMENT ET ANALYSE DES MESURES	69
4.1. Introduction	69
4.2. Méthodologie	69
Phase 1 : Création de la base de données initiale	69
Phase 2 : Mettre les données dans des références liées aux évènements	70
Phase 3 : Enregistrement des pics des signaux.....	72
4.3. Analyse globale des données	73
4.3.1 Analyse de la température	73
4.3.2 Analyse d'humidité.....	74

4.3.3 Analyse des déformations.....	74
4.4. Impact de la température	76
4.4.1. Analyse globale.....	76
4.5. Analyse de corrélations – Influence de la tranchée sur la réponse de la chaussée	82
4.6. Conclusions	86
CONCLUSION GENERALE	87
RÉFÉRENCES.....	90
ANNEXE A1 : FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS DE DEFORMATION.....	100
ANNEXE A2 : FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS DE TEMPERATURE.....	103
ANNEXE A3 : FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS D’HUMIDITE	106
ANNEXE A4 : MESURES DE DEFLEXION	108

Introduction générale

Un nombre important de tranchées est creusé quotidiennement en milieu urbain dans le monde, soit pour des aménagements neufs, soit dans le cadre de la rénovation d'équipements existants tels que les réseaux d'assainissement, de drainage, d'électricité, de gaz et de télécommunications. Un rapport publié par le New York City Transportation Commissioner indique que chaque année plus de **250 000** tranchées sont réalisées à New York, avec une augmentation annuelle de 8% (*Khogali and Mohamed 1999*).

Malgré leur importance pour les services urbains, les tranchées constituent une des principales sources des dégradations des chaussées. Elles influencent considérablement la structure, la durée de vie, le coût d'entretien et de réhabilitation et l'esthétique des chaussées et la sécurité des usagers. Ces dégradations ne se limitent pas à la zone de la tranchée mais elles se propagent sur la zone voisine de la chaussée.

De nombreux guides techniques et normes ont été développés pour veiller à la bonne réalisation des tranchées. Mais il s'avère que la performance des chaussées reste insatisfaisante (*Emery and Johnston 1986 ; Khogali and Mohamed 1999 ; Lee and Lauter 2000 ; Tighe et al 2002*). Les défauts de réalisation des tranchées conduisent à une réhabilitation précoce avec des coûts supplémentaires très élevés. La tranchée en milieu urbain constitue l'un des problèmes majeurs auxquels les gestionnaires des voiries sont confrontés.

Des nouvelles technologies sans tranchées (fonçage, forage,...) ont été développées comme alternatives à la tranchée. Elles offrent des avantages évidents en matière de coûts associés aux dérangements du sol et à son rétablissement, le temps de construction et les coûts associés à la perturbation de la circulation routière occasionnée par les travaux (*Iseley et Tanwani 1990 ; Tighe et al 1999*). En dépit de ces avantages, il n'en reste pas moins que chaque année, des centaines de kilomètres de tranchées et plusieurs dizaines de milliers d'excavations sont réalisés en France.

L'impact des tranchées sur la performance des voiries a fait ces dernières décennies l'objet de nombreuses études, notamment en Amérique du Nord. Ces études montrent que les tranchées réduisent considérablement la capacité portante des chaussées. Elles réduisent également leur durée de service de 17 à 50%.

La Métropole Européenne de Lille (MEL) possède un patrimoine de voiries de plus de 2 700 km. Ces voiries accueillent une grande diversité de réseaux urbains : gaz, électricité, eau, assainissement, etc. Des interventions sur ces réseaux sont régulièrement menées pour les réparer, moderniser et étendre. Ce qui implique la réalisation de 12 000 à 15 000 tranchées par an, qui fragilisent la voirie et réduisent sa durée de service. Ceci représente des coûts annuels de dizaine de millions d'euros de perte de patrimoine.

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche, coordonné et financé par la MEL, qui s'inscrit dans le cadre des efforts déployés par la MEL pour préserver et développer son patrimoine en bénéficiant des innovations technologiques. Il a été mené en partenariat avec EUROVIA et Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE). Le projet a pour objectif de réaliser une expérimentation à grande échelle avec la réalisation d'une chaussée et d'une tranchée. Ces dernières sont instrumentées afin de comparer leurs réponses à des sollicitations réelles avec suivi des conditions thermiques et d'explorer ainsi l'influence de la tranchée sur le comportement de la chaussée.

Le travail de la thèse est présenté en quatre chapitres :

Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur l'impact de la tranchée sur les chaussées. Après une brève introduction sur les classements des chaussées et leurs méthodes de dimensionnement, il présente une description des signaux issus des jauges de déformation lors du passage d'une charge routière sur une chaussée bitumineuse. Le chapitre présente également l'évaluation de l'état des chaussées et leur durée service. Ensuite, l'accent est mis sur les effets potentiels des tranchées sur la structure de la chaussée. L'étude bibliographique s'intéresse, enfin, aux impacts des tranchées sur l'économie et la durée de service des chaussées.

Le second chapitre présente l'expérimentation à grande échelle qui a été réalisée. Il explique le choix du site, les travaux de reconstruction de la chaussée et de la tranchée et le système d'instrumentation. Il présente aussi le bilan de fonctionnement du système d'instrumentation.

Le troisième chapitre présente les résultats d'essais de déflexion qui ont été réalisés en utilisant la poutre Benkelman et le Défectographe FLASH. Le chapitre présente aussi une évaluation de l'état structural de la chaussée et de la tranchée ainsi que l'influence de cette dernière sur son voisinage.

Le dernier chapitre présente une analyse des mesures réalisées avec les capteurs de déformation, de température et d'humidité. Il décrit la méthodologie développée pour l'exploitation des mesures. Ensuite, il fournit une analyse globale des déformations basée sur une comparaison des déformations enregistrées dans la chaussée et dans la tranchée. Enfin, l'accent est mis sur l'influence de la température sur l'effet de la tranchée sur le comportement de la chaussée.

Chapitre 1

Bibliographie

1.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur l'impact de la tranchée sur les chaussées. Dans un premier temps, les classements des chaussées et leurs méthodes de dimensionnement sont exposés. Ensuite, une description des déformations des chaussées induites lors du passage d'une charge routière est présentée. On s'intéresse également à l'évaluation de l'état des chaussées et leur durée service. Un bilan des connaissances sur les effets de la tranchée sur les chaussées et son impact sur l'économie et la durée de service des chaussées clôture ce chapitre.

1.2. Classements des chaussées

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée constituée du sol terrassé (dit sol support) surmonté généralement d'une couche de forme. La figure 1.1 représente les différentes couches composant la chaussée (*SETRA 1994*).

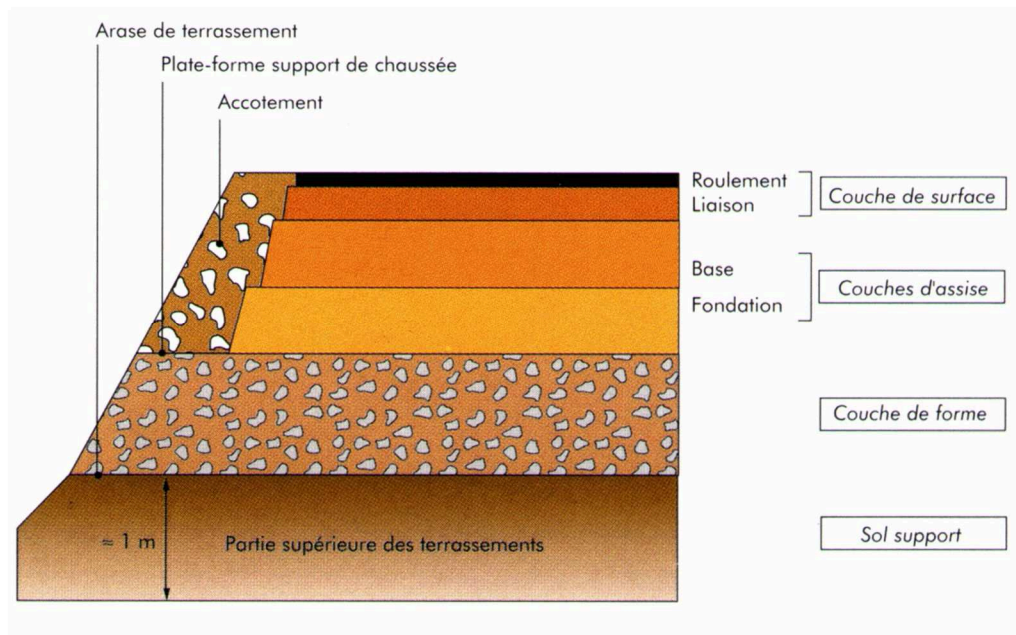


Figure 1.1 : Les différentes couches de la chaussée (SETRA 1994)

Selon le type des matériaux de construction utilisés dans le revêtement, les chaussées peuvent être classées en trois familles principales (BAAJ 2012) :

Cat1 : Chaussées souples (flexibles)

Cette catégorie est la plus courante en France et dans le monde. Dans cette catégorie, des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés sont utilisés pour la construction des couches supérieures liées. Les couches sous-jacentes (couches d'assise et couche de forme) peuvent être constituées de matériaux granulaires traités ou non.

Cat2 : Chaussées semi-rigides

La structure hybride de cette catégorie est constituée de matériaux liés avec des liants hydrocarbonés dans certaines couches et de matériaux liés avec des liants hydrauliques dans d'autres. En France, la structure type est généralement composée de couches de surface en enrobé bitumineux et de couche de base et/ou de fondation en graves-ciment. Ce type de structure est appelé « chaussée à structure mixte » et le ratio de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de l'ordre de $\frac{1}{2}$ (SETRA 1994).

Un autre type de chaussée que l'on classe dans cette catégorie est celui des « chaussées à structure inverse » où la couche de surface bitumineuse, d'une quinzaine de centimètres, est suivie par une couche de grave non traitée (d'environ 12 cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (*SETRA 1994*).

Cat3 : Chaussées rigides

Dans cette catégorie, la chaussée est composée d'une couche de fondation granulaire reposant sur la couche de forme et couverte par une dalle de béton de ciment. Une couche de roulement très mince en enrobé bitumineux peut être déployée pour réduire le bruit et améliorer l'adhérence. La couche de roulement n'a pas de rôle structural. Ce type de chaussées est peu utilisé en France ; il est largement utilisé en Allemagne, au Canada et dans certains états américains. La route en béton est adaptée aux revêtements fortement sollicités comme les autoroutes urbaines où le trafic peut être à la fois lent, lourd et dense.

1.3. Dimensionnement des chaussées

Le dimensionnement d'une chaussée routière consiste à déterminer les épaisseurs de ses différentes couches de façon à ce qu'elle puisse répondre aux sollicitations imposées pendant une période définie, appelée durée de vie ou durée de dimensionnement (*Perret 2003 ; Berthier 2009*). Les méthodes de dimensionnement peuvent être classées en deux catégories. :

Méthode empirique : comme la méthode d'AASHTO. Dans cette méthode, les relations entre les paramètres de conception (charges, propriétés des matériaux, configurations des couches, environnement...) et les dégradations de la chaussée (l'orniérage, fatigue ...) sont déterminées par des équations empiriques, qui donnent le nombre de cycles de charge jusqu'à la dégradation totale.

Méthode mécanique-empirique (rationnelle) : Dans cette méthode, la relation entre les paramètres physiques (contraintes, déformations...) et la dégradation est décrite en utilisant des modèles mathématiques. Les paramètres sont déterminés par des essais. La méthode mécanique-empirique prend en compte les changements directs et des effets environnementaux. Pour étudier la sollicitation de la chaussée générée par le trafic, plusieurs méthodes ont été

développées à partir des modèles de Boussinesq (1885) et de Burmister (1943, 1945). Elles utilisent un système d'une couche ou plusieurs couches élastiques linéaires et homogènes. La méthode de dimensionnement des chaussées utilisée en France est basée sur le modèle multicouche élastique linéaire de Burmister (*Duhamel al. 2003*). Ce modèle est introduit dans de nombreux codes tels que ALIZE, qui a été développé par le (LCPC-SETRA).

Dans toutes les méthodes de dimensionnement, les caractéristiques du trafic à considérer doivent préalablement être définies. Le seul trafic qui intervient dans la détérioration des structures de chaussées étant celui des poids lourds. Ce trafic qui doit être caractérisé par le nombre de passages des poids lourds pendant sa « durée de dimensionnement » et leur agressivité.

1.4. Déformations des chaussées

Les déformations induites par les charges du trafic et de l'environnement sont à l'origine des dégradations de la chaussée (Orniéage, fissurations,...). Leur détermination est un élément fondamental dans l'évaluation de l'état structural et la durée de vie résiduelle des chaussées.

Les jauges de déformation sont utilisées pour mesurer les déformations des chaussées. Des campagnes de mesures sont régulièrement effectuées (*Diffiné 2012*). On peut citer les travaux réalisés à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) à Lyon (*El Abd 2006*), à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (*Perret 2003*), au National Center for Asphalt Technology (NCAT) à Auburn University (*Timm et Priest 2004*) et au site expérimental routier de l'université de Laval (SERUL) (*Wurckler 2010*). Des camions dont le poids par essieu est connu font des passages sur les sections instrumentées et les réponses des jauges sont enregistrées pour des analyses ultérieures. Trois types de déformations peuvent être rencontrés :

- Longitudinales : dans le sens de la circulation du trafic.
- Transversales : perpendiculaires au sens de circulation
- Verticales : perpendiculaires à la surface de la chaussée

Les déformations peuvent être en extension ou en contraction.

1.4.1. Les déformations sous une charge roulante

Sous une charge roulante, le comportement en plan (longitudinal ou transversal) des couches bitumineuses peut être assimilé à celui d'une poutre encadrée soumise à une charge ponctuelle. La fibre inférieure est tendue au droit de la charge, alors que la fibre supérieure est comprimée et cette situation s'inverse au-delà des points d'inflexion situés de part et d'autre de la charge (Perret 2003 ; Di Benedetto et Corté 2004 ; Nguyen 2009). Si les couches bitumineuses sont collées, l'état de contrainte horizontale dépendra de la position de l'axe neutre (Perret 2003 ; Diffiné 2012).

Lors du passage d'une charge routière, les matériaux bitumineux subissent des déformations longitudinales alternant entre contraction et extension, tout dépend de la profondeur de la couche et de la position de la charge. Par exemple, au bas de la couche de roulement, les déformations longitudinales s'alternent entre extension/contraction/extension. Tandis qu'au bas de la couche de base, elles s'alternent entre contraction /extension /contraction (Figure 1.2).

Les déformations longitudinales au bas de la couche de base sont représentées dans la figure 1.3. On note que le pic de contraction précédant le pic d'extension est plus élevé que celui qui le suit. Cette dissymétrie est due au caractère viscoélastique des matériaux bitumineux (Bodin 2002 ; Diffiné 2012). L'écart devient plus important quand la température augmente (Soltani, 1998).

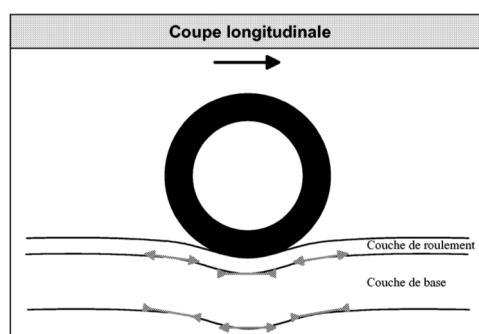


Figure 1.2 : Déformations longitudinales des couches bitumineuses sous une charge roulante
(Perret 2003)

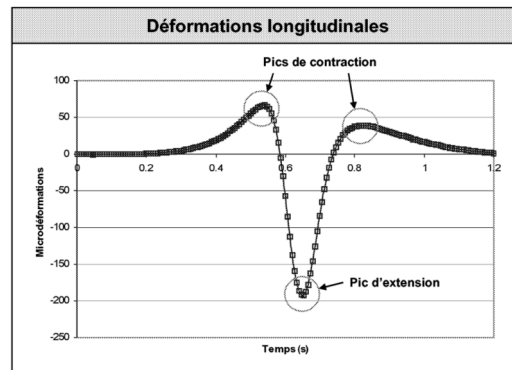


Figure 1.3 : Signal type des déformations longitudinales au bas de la couche de base (Perret 2003)

Dans le sens transversal, la charge routière n'induit pas d'alternance des déformations. Selon la position de la charge par rapport au point de mesure et la profondeur de celui-ci, les matériaux bitumineux subissent des déformations de compression ou en extension. Par exemple, au bas de la couche de roulement, les déformations transversales dans la zone située sous la charge sont en compression et en extension dans les zones adjacentes. Par contre, au bas de la couche de base, on retrouve des déformations d'extension dans la zone sous la charge et de contraction en dehors de cette zone (Figure 1.4).

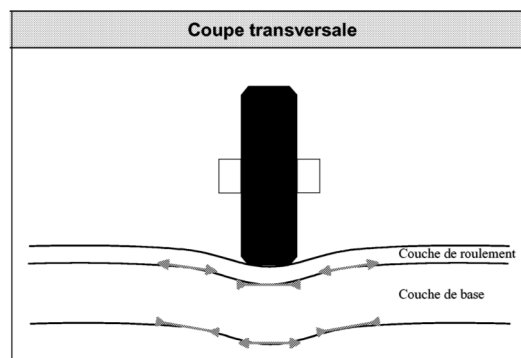


Figure 1.4 : Déformations transversales des couches bitumineuses sous une charge roulante (Perret 2003)

Les déformations transversales au bas de la couche de base sont représentées sur la figure 1.5. On note que les pics d'extension des déformations se produisent lorsque la charge s'applique verticalement sur le dispositif de mesure et ils sont égaux dans les sens longitudinal et transversal, (Perret 2003).

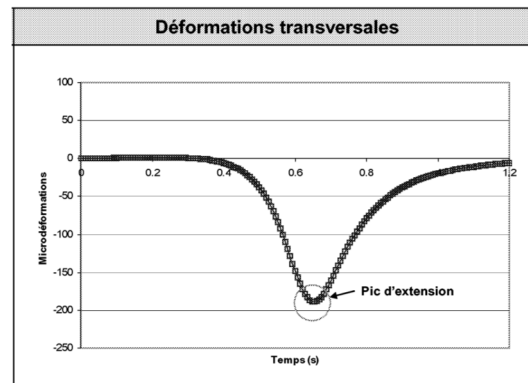


Figure 1.5 : Signal type des déformations transversales au bas de la couche de base (Perret 2003)

1.5. Durée de vie, durée de service et niveau de service

Dans la littérature les termes « durée de vie » et « durée de service » sont fréquemment confondus. La « durée de vie » d'une chaussée est une notion conditionnant son dimensionnement. Elle peut être employée pour désigner la durée de dimensionnement de celle-ci. En France, le « Catalogue des types de routes en milieu interurbain » de 1991 propose deux valeurs pour la durée de dimensionnement initiale :

- 30 ans pour les voies du réseau structurant (VRS) : autoroutes et routes express à une chaussée.
- 20 ans pour les voies de réseaux non structurant (VRNS) : les autres voies.

Au sens du guide pratique d'utilisation de la méthode ACN-PCN, la durée de vie est définie comme la période à la fin de laquelle la portance de la chaussée devient insuffisante pour supporter sans risque le trafic (STBA 1988).

Par contre, la durée de service est le temps pendant lequel on n'a pas à effectuer d'entretien sur la structure de la chaussée (SETRA 1990). Pour les zones urbaines, soumises à des travaux souvent fréquents, dus notamment aux interventions sous chaussées, la durée de service peut être plus courte qu'en rase campagne. Il appartient au concepteur de choisir la durée de service qui lui paraît la plus réaliste (SETRA 1990). La durée de service de la chaussée peut être classée

en courte (5 à 6 ans), moyenne (10 à 12 ans) et longue (plus de 15 ans) (SETRA 1990). La figure 1.6 montre le rapport entre la durée de vie et la durée de service.

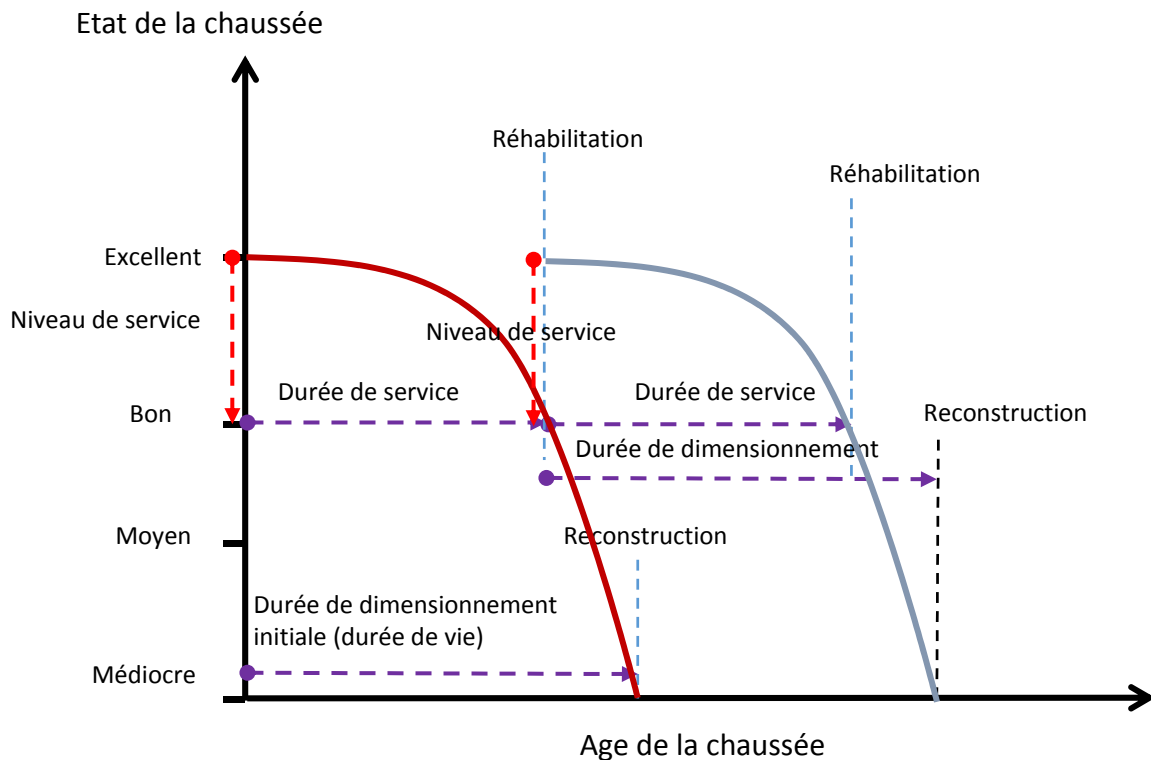
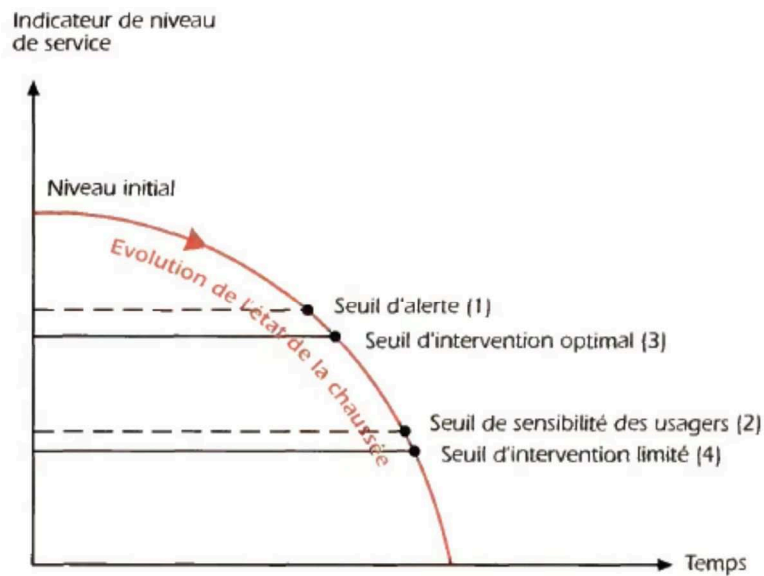


Figure 1.6 : La durée de vie et la durée de dimensionnement d'une chaussée

Il est à noter que la durée de service d'une route varie en fonction du niveau de service offert aux usages, qui représente l'aptitude de cette dernière à satisfaire les besoins exprimés ou implicites de l'utilisateur. Il dépend donc de la qualité des éléments qui composent la route, notamment la chaussée, les équipements, la signalisation et les dépendances (SETRA 1996).

Le maître d'ouvrage choisit généralement le niveau de service d'une route en fonction de l'intérêt socio-économique de celle-ci et des budgets disponibles pour le maintenir. Si aucun entretien n'est réalisé, le niveau de service se dégrade avec le temps (voir figure 1.7). Les interventions d'entretien et de maintenance des différents composants de la route permettent le maintien du niveau de service fixé par le maître d'ouvrage.



- (1) Dégradations perçues par le technicien et non par l'utilisateur (fissures, faïençage, ...).
- (2) Dégradations perçues par l'utilisateur (nids de poule, déformations profondes, ...).
- (3) Interventions du type entretien préventif, sur tout ou partie de la chaussée.
- (4) Interventions du type entretien curatif sur la dégradation.

Figure 1.7 : Evolution du niveau de service d'une chaussée (SETRA 1996).

1.5.1. Evaluation du niveau de service

Les objectifs de l'analyse du service de la route sont la sécurité, le temps et le coût du parcours, la régularité du service, le confort de conduite et l'agrément du parcours. (SETRA 1994). Les quatre premiers dépendent de la nature et de l'état de la chaussée, à travers ses caractéristiques de surface et structurales.

Le niveau de service peut être traduit en indicateurs d'état relatifs aux objectifs indiqués ci-dessus afin de définir des seuils pour le déclenchement des opérations d'entretien. Certains pays, comme les Etats-Unis, ont opté pour des méthodes basées sur les concepts d'index global de niveau de service des chaussées. Le niveau de service est exprimé alors en une seule valeur numérique. Cette dernière pourra être déterminée par l'intermédiaire d'une corrélation entre la perception des usagers et des paramètres physiques tels que la portance, l'étanchéité, l'adhérence, l'uni, la glissance, ... (Figure 1.8).

Ce système n'a pas été retenu en France. L'évaluation de l'état d'une route en France est liée à l'analyse des besoins d'entretien.



Figure 1.8 : Les indicateurs et les dégradations de la chaussée (STBA 1988)

1.5.1.1. Evaluation de l'état de la chaussée à partir des indices numériques

L'état de la chaussée est une expression générale qui décrit sa capacité d'assurer un certain niveau de service pour un trafic donné (Yu 2005). Les méthodes employées pour évaluer l'état des routes sont regroupées en deux catégories (Yu 2005) :

- 1- Méthodes basées sur les indices de rugosité de la chaussée tels que l'International Roughness Index (IRI), le Ride Number (RN)...etc
- 2- Méthodes basées sur les indices des dégradations de la chaussée tels que le Pavement Condition Index (PCI), le Pavement Condition Rating (PCR)...etc.

L'évaluation des chaussées par la méthode d'indice d'état de chaussée (PCI) a été développée par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine en 1976 (Shahin et Darter 1976) et adoptée plus tard par le DOD (Department of Defense aux États-Unis) et le APWA (American Public Works Association) (ASTM D 6433 – 07 2009). Le principe de cette méthode porte sur la réalisation d'un relevé visuel des dégradations de la surface de la chaussée. Ces dégradations sont évaluées numériquement à partir d'un catalogue codifié en fonction de leur type, quantité et sévérité. La valeur numérique de l'indice d'état de la chaussée peut être obtenue finalement par la soustraction de la somme des points attribués aux dégradations relevées de 100 (Shahin 1994). La valeur de l'indice est comprise entre 0 et 100 caractérisant l'état d'une chaussée à un instant donné. La valeur 100 correspond à une chaussée en parfait état et la valeur 0 correspond à une chaussée hors service. Les relevés réguliers permettent au gestionnaire de suivre l'évolution de l'état de son patrimoine et de programmer des éventuels travaux d'entretien ou de rénovation.

La figure 1.9 représente le principe de calcul de l'indice d'état de la chaussée IEC (le PCI en anglais).

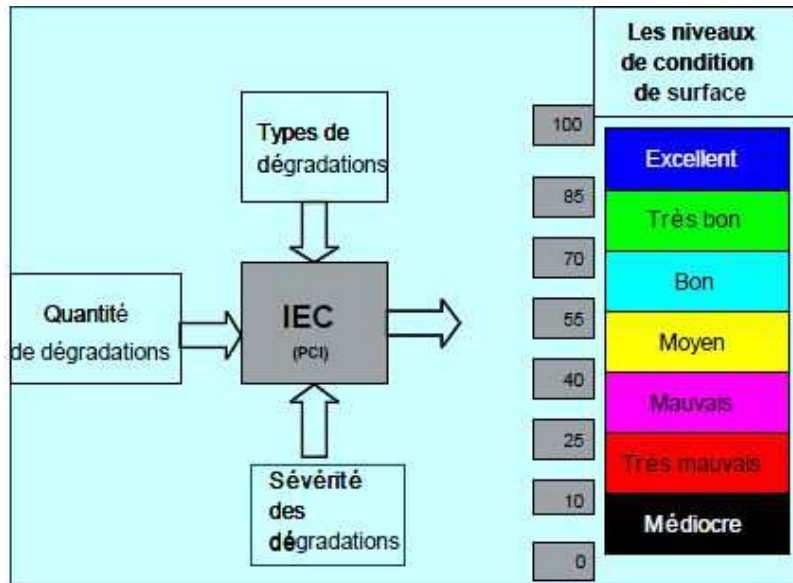




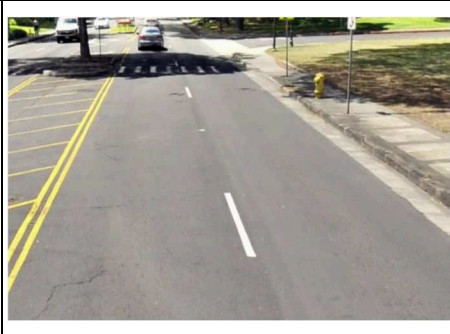




Figure 1.9 : Indice d'état de chaussée IEC (PCI) (CAQ, 2014)

Le tableau 1.1 donne des exemples des différentes classes de l'indice de l'état de la chaussée et les photos associées.

Tableau 1.1 : Les valeurs de l'indice d'état de chaussée et leurs photos associées (Ville de Honolulu 2012)

VALEUR DU CEC (PCI)	PHOTO ASSOCIEE	VALEUR DU CEC (PCI)	PHOTO ASSOCIEE
86-100		26-40	

71-85		11-25	
56-70		0-10	
41-55			

1.6. Les tranchées

Ces dernières trois décennies, l'impact des tranchées sur la performance des routes a préoccupé les autorités routières. Il a fait l'objet de nombreuses études, notamment en Amérique du Nord. Certaines ont été financées par des agences publiques, et d'autres par des compagnies privées de services publics. La plupart de celles menées par les agences publiques portent sur l'impact financier des tranchées. Elles considèrent que les travaux de réhabilitation doivent remettre la chaussée dans son état initial avant travaux, en termes de durée de vie. Les services publics estiment que le problème est lié aux concepts de dimensionnement initial de la route et demandent des spécifications techniques concernant le remblai de réfection des tranchées.

La réalisation et la réfection des tranchées restent une source de conflit entre les municipalités et les prestataires des services publics (*Schaefer et al, 2005*).

Des nouvelles technologies sans tranchées (fonçage, forage,...) sont de plus en plus employées pour la pose, la réhabilitation, l'auscultation, la réparation, l'inspection, le remplacement et le diagnostic des réseaux enterrés. Elles sont devenues rapidement une alternative à l'excavation en tranchée. Elles permettent de réduire les coûts associés aux dérangements du sol et à son rétablissement, le temps de construction et les coûts associés à la perturbation de la circulation routière occasionnée par les travaux (Iseley et Tanwani 1990 ; Tighe et al 2002). Malgré les avantages de ces techniques, il n'en reste pas moins que chaque année, des centaines de kilomètres de tranchées et plusieurs dizaines de milliers d'excavations sont réalisés en France, soit pour des aménagements neufs, soit dans le cadre de rénovation d'équipements existants, soit pour des interventions d'urgence (SETRA, 2001). Nous donnons ci-dessous quelques chiffres illustrant l'ampleur du problème des tranchées.

Le nombre de tranchées réalisées sur les chaussées de l'arrondissement de Camden, qui est un des districts de Grand Londres au Royaume-Uni, dépasse les **100 000** par an (Jones 1999). Un rapport publié par le New York City Transportation Commissioner indique que chaque année plus de **250 000** tranchées sont réalisées sur les routes de la ville de New York, avec une augmentation annuelle de 8% (Khogali and Mohamed 1999). A Lille, en France, entre **12 000 et 15 000** ouvertures sont réalisées en moyenne par an (Henique et al 2015). Le tableau 1.2 donne le nombre annuel de tranchées creusées dans certaines villes en Amérique du nord (SUDAS 2005 ; ICPI 2013).

Tableau 1.2 : Nombre annuel de tranchées réalisées dans des villes américaines (SUDAS 2005 ; ICPI 2013)

VILLE	NOMBRE ANNUEL DE TRANCHEES
BILLINGS, MONTANA	650–730
BOSTON, MASSACHUSETTS	25–30,000
CHICAGO, ILLINOIS	180,000
CINCINNATI, OHIO	10,000
OAKLAND, CALIFORNIE	5,000
FRESNO, CALIFORNIE	4,500
SAN FRANCISCO, CALIFORNIE	14,000
SEATTLE, WASHINGTON	10 –20,000
TORONTO, ONTARIO	4,000
PASADENA, CALIFORNIE	1800

De nombreux guides techniques et normes ont été développés pour veiller à la bonne réalisation des tranchées (l'ouverture, le remblayage, le compactage, la réfection ...). Malgré ces efforts, la performance des chaussées reste toujours insatisfaisante (*Emery and Johnston 1986 ; Khogali and Mohamed 1999 ; Lee and Lauter 1999 ; Tighe et al 2002*). Cette insuffisance conduit à une réhabilitation précoce avec des coûts supplémentaires.

1.6.1. Problématique de la tranchée

Lorsqu'une chaussée bitumineuse est construite, elle se comporte comme une structure uniforme composée de matériaux similaires. Introduire une coupe dans la chaussée et la remblayer avec des matériaux de caractéristiques différentes par rapport à l'existant (densité, teneur en eau, degré de compactage, ...) peut engendrer un comportement structural, hydraulique et thermique différent aux abords de la coupe. En conséquence, la même section de la route peut se diviser en segments agissant différemment vis-à-vis des charges routières et environnementales. Cette différence de comportement a pour effet de créer une surface ayant des zones de gonflement/affaissement sur la chaussée, de réduire le niveau de service, d'effectuer des travaux d'entretien supplémentaires et de réaliser une réhabilitation précoce ou reconstruction de la chaussée (*Karim et al. 2014*). La figure 1.10 illustre l'établissement des zones de gonflement/affaissement et l'apparition des fissures sur le revêtement dans la zone restaurée de la chaussée. 1



Figure 1.10 : Comportements différentiels entre la zone de tranchée et les zones adjacentes
(*Ainley Group 2000*)

L'impact de la tranchée ne se limite pas à la couche de surface, mais il perturbe aussi les couches de base et de forme (Jensen et al 2005) et même le sol support dans la zone située autour de l'excavation (Department of Public Works 1998). La tranchée est considérée comme la première cause de la dégradation des routes ; elle réduit considérablement la durée de service des chaussées urbaines (Department of Public Works 1998).

En 1998, le département des travaux publics (Department of Public Works) à San Francisco a conduit une étude pour déterminer l'impact des tranchées sur les routes de San Francisco en Californie. Cette étude montre que la durée de service d'une route diminue notablement en fonction du nombre de tranchées réalisées. La figure 1.11 illustre le rapport entre la durée de service et le nombre de tranchées présentes dans une section routière.

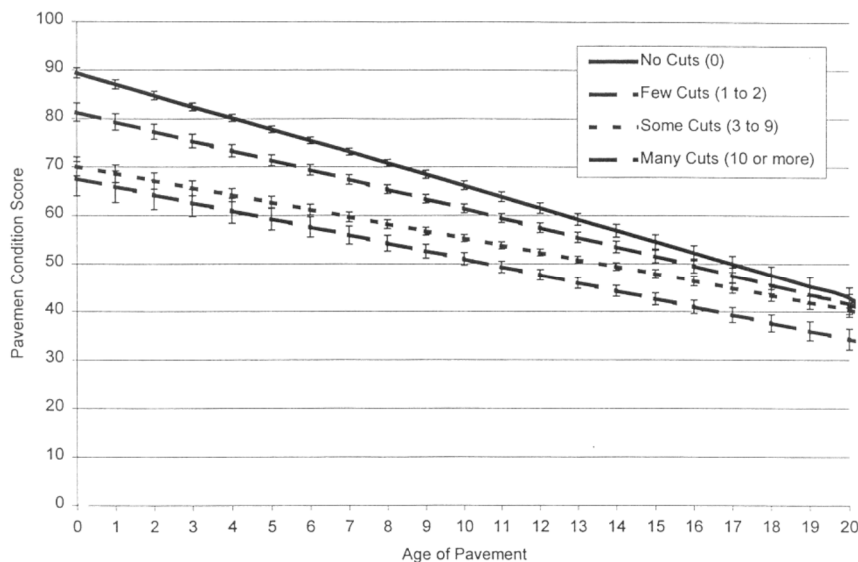


Figure 1.11 : Impact du nombre de tranchées sur la durée de service d'une chaussée (Department of Public Works 1998)

1.6.2. Effets des tranchées sur la structure de la chaussée

Les impacts de la tranchée sur la performance des chaussées peuvent être classés en trois catégories : infiltration des eaux, effets de bords et qualité de matériaux et techniques de construction (Adedapo 2007).

1.6.2.1. Infiltration des eaux

L'eau est considérée comme le premier ennemi de la route. Son infiltration dans les chaussées souples a pour effet d'accélérer le développement des dégradations. Des phénomènes climatiques contribuent également à aggraver ces dégradations, en période hivernale, le gel/dégel fragilise les chaussées en provoquant la chute de portance du sol support (LCPC 1998 ; IDRRIM 2016), et réduit, en conséquence, la durée de service de la chaussée (Fwa, 1987). En effet, les joints des tranchées représentent des plans de faiblesse structurale pour les chaussées. Si ces derniers ne sont pas suffisamment étanches, mal réalisés ou fissurés, ils permettront à l'eau de pénétrer dans la structure de la chaussée. Autrement dit, d'y avoir une quantité additionnelle d'eau, qui n'a pas été prise en considération dans le dimensionnement de la chaussée (Fwa 1987). La figure 1.12 illustre l'infiltration de l'eau dans les différentes couches de la chaussée à travers un joint.

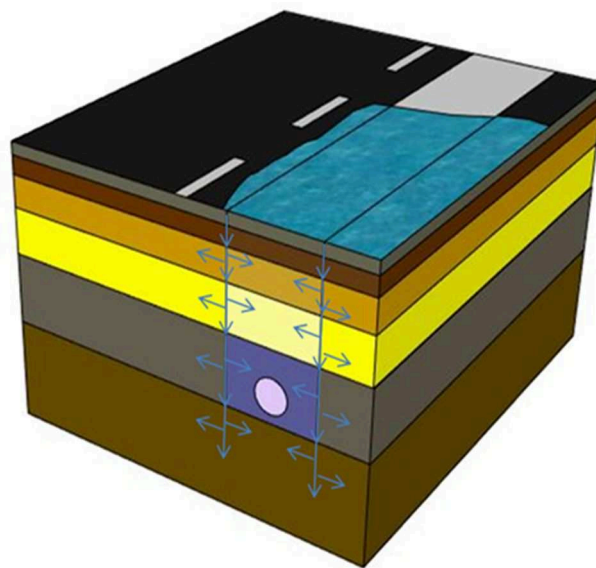


Figure 1.12 : Infiltration d'eau dans la chaussée à travers les joints de la tranchée

La figure 1.13 présente un défaut de réalisation relatif à l'absence du colmatage du joint de tranchée.

L'eau de la pluie ou de la neige fondue peut s'infiltrer également à travers les fissures présentes sur la zone adjacente de la tranchée (figure 1.14), ou à travers la couche d'asphalte la plus perméable et moins dense entre la zone restaurée et l'ancienne chaussée (Adedapo 2007).



Figure 1.13 : Absence de colmatage des joints de tranchée (*Nichols Consulting Engineers 2007*)

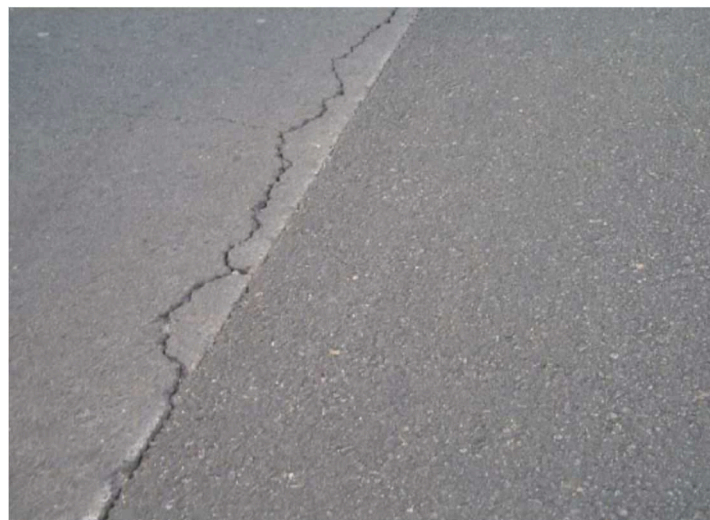


Figure 1.14 : Présence des fissures sur la chaussée dans la zone adjacente à la tranchée (*Nichols Consulting Engineers 2007*)

1.6.2.2. Effets de bords (zone d'influence d'une tranchée)

Lors de la réalisation d'une excavation, les parois latérales de la tranchée perdent leur support. Ce qui a pour effet de provoquer une relaxation des contraintes dans le sol adjacent à la tranchée. Le sol relaxé perd de sa portance, ce qui augmente, à long terme, les contraintes de traction à la base du revêtement et favorise sa dégradation aux abords de la zone excavée

(fissuration de fatigue et déformations permanentes) (*Blond et al 2000 ; Jensen et al 2005*). Les dégradations causées par la tranchée ne se limitent pas uniquement à la zone de tranchée elle-même, mais elles se propagent sur une zone voisine appelée la « zone d'influence ». La largeur cette zone et l'amplitude des dégradations dépendent de la nature du sol, de la teneur en eau et de la profondeur de la tranchée (*Yapp M. et al 2001 ; Blond E. et al 2000*). Une étude réalisée à la ville de Kansas aux Etats-Unis, indique que deux ans après la réalisation de la tranchée, la capacité structurale de la zone adjacente de la tranchée chute de 50 à 65 % par rapport à la zone centrale (*APWA 1997*). La figure 1.15 illustre la formation d'une zone d'affaiblissement autour de la tranchée.

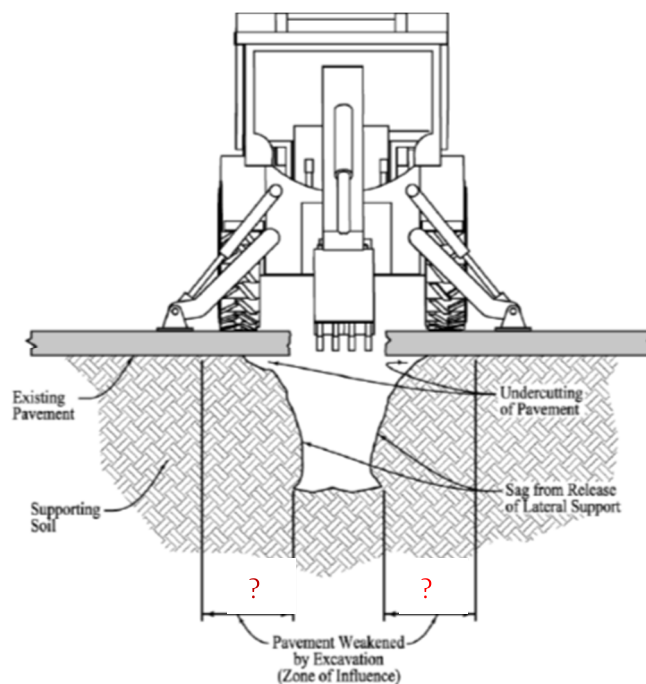


Figure 1.15 : Formation de la zone d'influence d'une tranchée (*Department of Public Works 1998 ; SUDAS 2016*)

La détermination de la zone d'impact d'une tranchée a fait l'objet de nombreuses études. Le principe adopté par ces études porte sur la détermination de la capacité portante de la chaussée sur la zone de la tranchée et la comparer avec celle d'une zone de référence se situant en dehors de la zone d'influence de la tranchée. La capacité portante de la chaussée peut être déterminée, dans ce cas, en mesurant les déflexions à l'aide d'un des outils suivants : déflectomètre à masse tombante FWD, la poutre Benkelman ou le déflectographe Lacroix. On donne ci-dessous une synthèse des principaux résultats obtenus.

Yapp et al. (2000) ont étudié l'Impact des tranchées sur la performance des chaussées dans la ville de Seattle. L'étude a porté sur trente-sept sites dont neuf en chaussées bitumineuses. Les déflexions maximales ont été déterminées en séries de points à l'aide du déflectomètre à masse tombante FWD. Chaque série est composée de (figure 1.16) :

- 1 point de contrôle à 3 mètres du bord de la tranchée d'environ (10 pieds)
- 1 point à 0.61m du bord de la tranchée d'environ (2 pieds)
- 1 point sur tranchée

Pour une chaussée bitumineuse, la courbe typique des valeurs moyennes des déflexions maximales est illustrée dans la figure 1.17. Les trois points formant la courbe sont ceux indiqués ci-dessus. Comme on peut constater sur la figure 1.17, la déflexion maximale au voisinage de la tranchée est plus grande que celle mesurée sur la tranchée ou à 3 m de la tranchée. L'étude montre que la zone d'influence de la tranchée s'étend sur une largeur minimale de **0.61** m des bords de la tranchée.

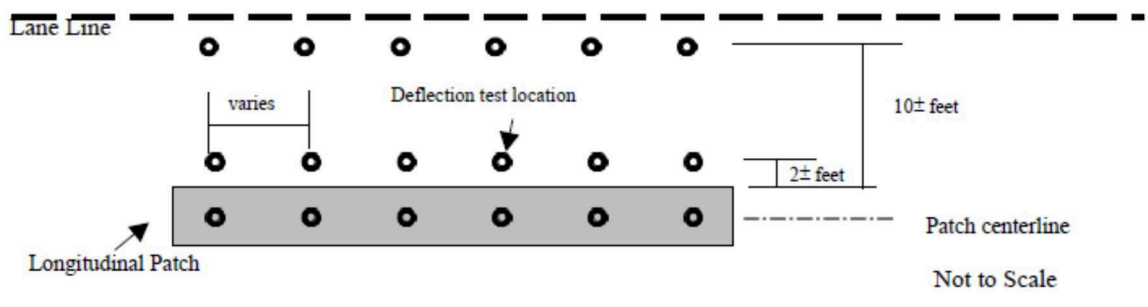


Figure 1.16 : Répartition des points de mesure des déflexions, ville de *Seattle* (Yapp M. et al 2001)

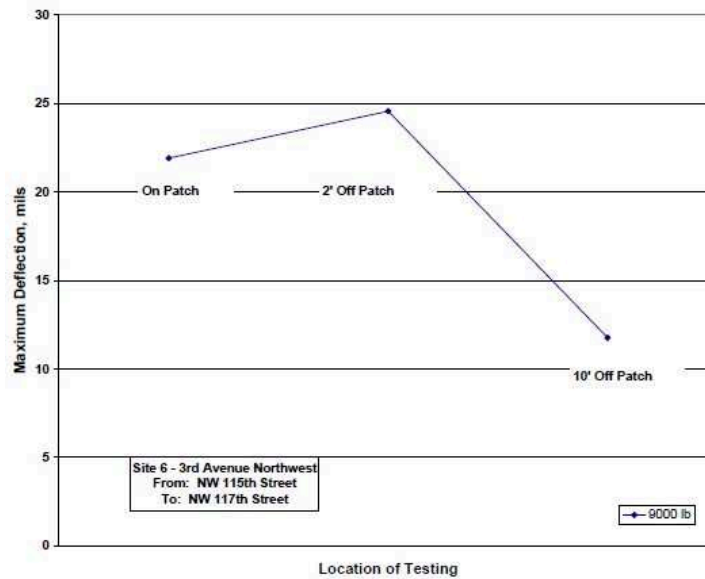


Figure 1.17 : Courbe typique des valeurs moyennes des déflexions maximales (Yapp M. et al, 2001)

Bodacsi et al. (1995) ont étudié l'impact des tranchées sur la performance des chaussées dans la ville de Cincinnati. Dans cette étude la déflexion maximale a été déterminée par la poutre Bekelman pour trente-six chaussées souples. Pour chaque site, les mesures ont été réalisées en 9 points alignés et espacés (Figure 1.18) :

- 2 points sur la tranchée dont 1 au centre et 1 en extrémité de la tranchée
- 5 points en dehors de la tranchée espacés de 0.3m (1 pied)
- Les 2 derniers points sont espacés de 0.6 m (2 pieds) dont le dernier est un point de contrôle qui se situe à 2.44 m (8 pieds) du bord de la tranchée

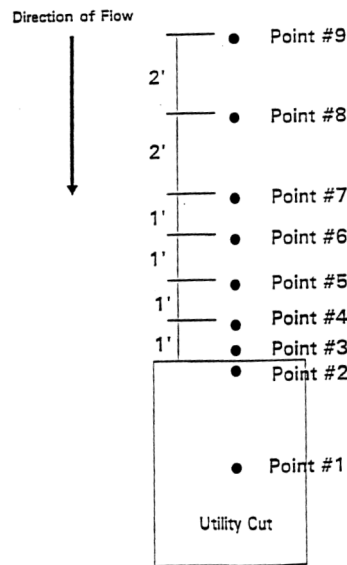


Figure 1.18 : Répartition des points de mesure de déflexion, ville de Cincinnati
(Bodocsi et al, 1995)

La courbe 1.19 représente les valeurs de déflexions maximales mesurées sur un cas type. On note que la déflexion maximale atteint sa plus grande valeur au bord de la tranchée et diminue progressivement sur une zone s'étendant à environ 0.6 m de la tranchée. L'étude montre que sur les 36 sites étudiés, la largeur moyenne de la zone d'influence d'une tranchée est de **0.9 m** (figure 1.20).

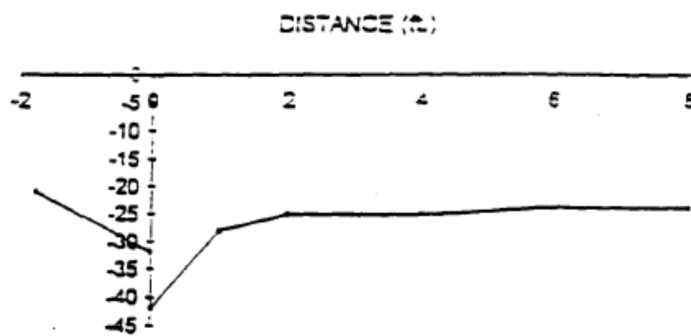


Figure 1.19 : Courbe de déflexion maximale mesurée sur un site type, ville de Cincinnati
(Bodocsi et al 1995)

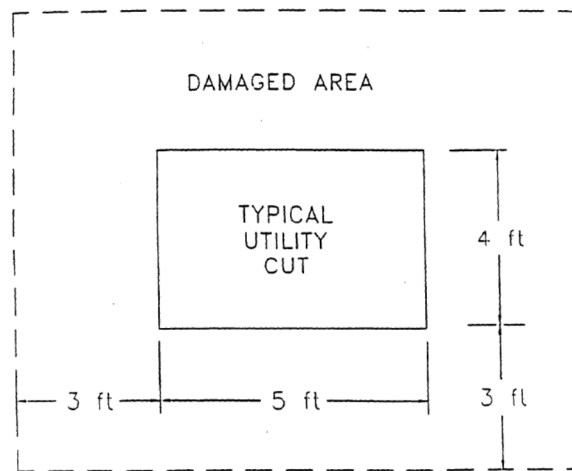


Figure 1.20 : Largeur moyenne de la zone d'influence d'une tranchée, ville de Cincinnati
(Bodocsi et al 1995)

Le tableau 1.3 récapitule les résultats obtenus par d'autres études concernant la largeur de la zone d'influence des tranchées.

Tableau 1.3 : Largeur de la zone d'influence d'une tranchée

N°	Référence	Ville, région, ou Etat/ Pays	Largeur moyenne de la zone d'influence « d »	Observations
3	<i>Lee, S. et al, 1999</i>	Ottawa- Carleton /Canada	0.55 m	
4	<i>CHEC consultants, INC., 2002</i>	Santa Clara/Etats-Unis	1.2m (4.7) pieds	Tranchée transversale
5	<i>Department of Public Works, 1998</i>	San Francisco/Etats- Unis	0.9m (3 pieds)	
6	<i>CHEC Consultants, INC, 1996</i>	Sacramento- Californie/Etats-Unis	1.10m (3.64 pieds)	Tranchée transversale

Section en T

La zone d'influence représente un élément critique qui doit être pris en considération dans le dimensionnement des tranchées. Dans la littérature, plusieurs études indiquent que la reconstruction des tranchées en section « T » permet d'éliminer ou de minimiser la détérioration des chaussées sur la zone située autour de la tranchée (*ARE Inc. and IGT 1989 ; Peters 2002*).

Par exemple, *Schaefer et al (2005)* recommandent la réalisation des tranchées avec épaulements s'étendant de 0.60 m à 1 m du périmètre de la tranchée. La figure 1.21 représente une coupe d'une tranchée réalisée sous la forme de « T ». La largeur d'épaulement recommandée varie d'une ville à l'autre. Le tableau 1.4 donne les valeurs préconisées par plusieurs états ou villes aux Etats Unis.

D'autres études indiquent qu'aucune amélioration n'a été observée entre la réfection standard et celle en « T » (*ARE, Inc. et IGT 1989 ; Todres et Wu 1990; Todres et Baker 1996; Todres and Saha 1996; Todres 1999*).

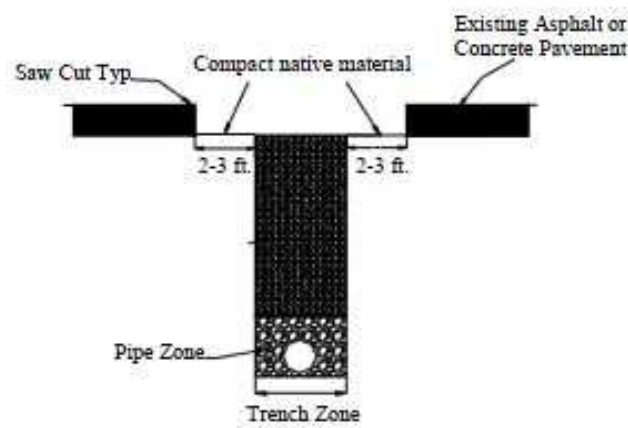


Figure 1.21 : Réalisation d'une tranchée sous forme de « T » (*Schaefer et al 2005*)

Tableau 1.4 : Largeur d'épaulement recommandée par certains états ou villes américaines (*Peters 2002 ; Schaefer et al 2005*)

Ville, Etat	Largeur d'épaulement
Salt Lake, Utah	0.61m to 0.91m (2 to 3 pieds)
Etat de Washington (matériaux granulaires)	0.61m (2 pieds)
Etat de Washington (matériaux fluides)	0.30m (1 pieds)
Etat d'Ohio	0.91m (3 pieds)

1.6.2.3. Qualité de matériaux et techniques de construction

Matériaux

Le type de matériaux utilisés (cohésifs, non-cohésifs, importés, locaux...) dans la réfection des tranchées jouent un rôle important dans les tassements dans la zone restaurée. Si la qualité de ces matériaux est inférieure à l'existant ou ils ne sont pas adaptés aux conditions du site, cela conduit à la formation d'une section dans la chaussée plus faible que son entourage. Au fil du temps et sous l'agressivité des charges routières, cette section va se dégrader plus vite que son entourage avec une propagation progressive dans la zone adjacente (*Adedapo 2007*).

Une étude a été menée à Iowa aux Etats-Unis pour identifier les facteurs conduisant au tassement de la zone de tranchée. Elle démontre que pour les tranchées dont le remblai a été réalisé avec de matériaux granulaires importés avec un contrôle de qualité limité, la vie des réfections n'a pas duré plus que deux ans (*Jensen et al 2005*). De l'autre côté, *l'APWA (1997)*, a conduit une étude en Californie sur 67 tranchées remblayées avec des matériaux locaux. Elle conclut que les matériaux granulaires locaux ayant une densité de compactage élevée s'adaptent mieux pour le remblai des tranchées.

Ghataora et Alobaidi, (2000) ont observé que dans les tranchées longitudinales réalisées avec du remblai composé de matériaux granulaires, le tassement aux extrémités est plus important qu'au centre. Tandis que, pour les tranchées transversales, le tassement le plus important se produisait dans les traces des roues. Dans les deux cas, le tassement maximal se produisait durant les deux mois après la reconstruction des tranchées.

Le choix de matériaux du remblai et les techniques de construction des tranchées varient d'un pays à l'autre et d'une région à l'autre. Plusieurs normes et guides techniques, tels que AASHTO, les normes européennes et les guides techniques de SETRA ont été établis pour définir les critères et les spécifications techniques liés au choix de matériaux de remblai.

En France, les matériaux utilisables pour le remblayage des tranchées sont classés par référence à la "Classification des matériaux utilisables en remblai et en couche de forme" définie par la norme NF P 11-300. Le guide du SETRA « Remblayage des tranchées et réfection des chaussées » fournit une coupe type d'une tranchée réalisée sous une chaussée (figure 1.22). Il détaille également les conditions de compactages relatives aux objectifs de densifications q_2 , q_3 , et q_4 .

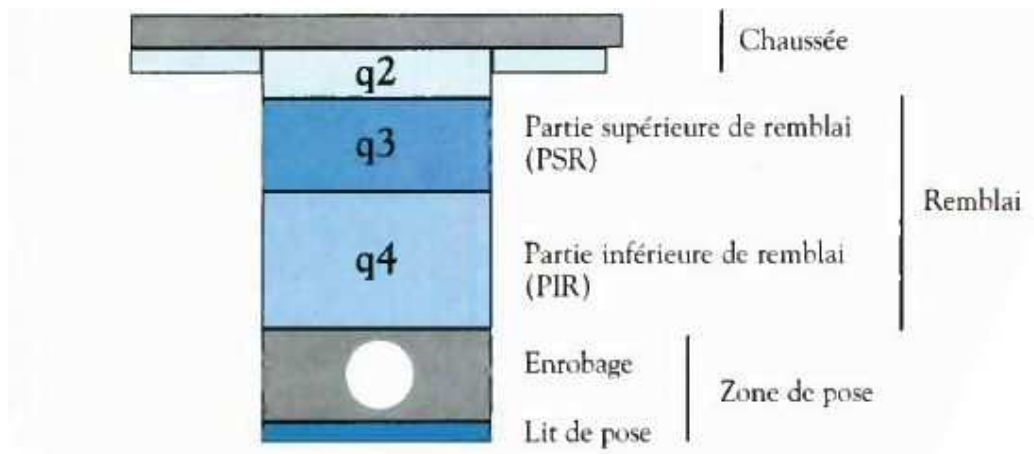


Figure 1.22 : Cas type : tranchée sous chaussée (SETRA 1994)

Compactage

La qualité des travaux en tranchée dépend pour une bonne part de la qualité du compactage dont les objectifs sont : éviter les tassements ultérieurs et des différences de perméabilité trop importantes et assurer une bonne tenue mécanique de la tranchée, et de l'ancienne chaussée (SETRA 1994). Le compactage des matériaux dépend de quatre facteurs : densité sèche, teneur en eau, équipement de compactage et propriétés du sol. Holtz et Kovacs (1981) et NAVFAC (1986) fournissent un tableau indiquant le rapport entre ces différents facteurs pour réaliser un bon compactage.

Il est nécessaire de souligner que la majorité des spécifications relatives aux techniques de compactage déterminent l'effort de compactage en fonction des résultats de l'essai Proctor, qui est approprié aux matériaux cohésifs (Monahan 1994). Néanmoins, l'essai Proctor n'est pas recommandé pour les matériaux granulaires, en raison de l'impossibilité d'établir un rapport clair entre la teneur en eau et la densité (Amini 2003), Spangler et Handy (1982) montrent que pour les matériaux granulaires, il est nécessaire d'utiliser la densité relative à la place de l'essai Proctor normal pour obtenir le bon compactage requis. La figure 1.23 illustre une comparaison entre la densité relative et l'essai de Proctor (AASHTO T99) pour un matériau non-cohésif (Spangler et Handy 1982).

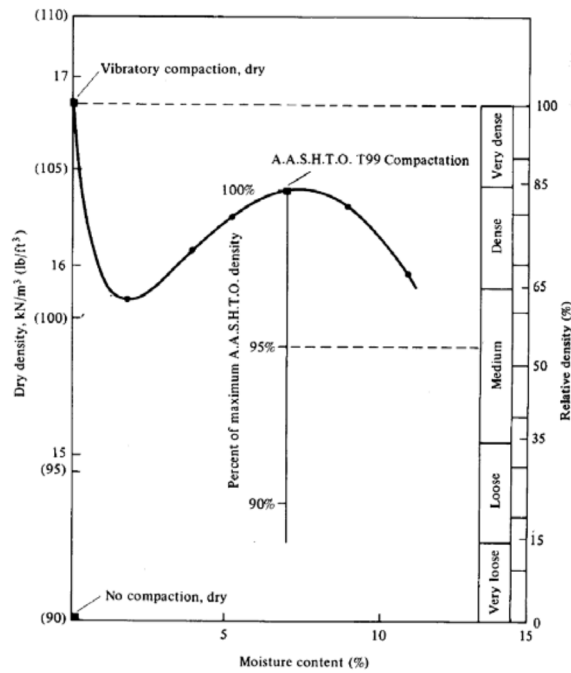


Figure 1.23 : La densité relative et le compactage d'AASHTOO T99 pour un matériau granulaire (Spangler et Handy 1982)

Matériels de compactage

Le matériel de compactage joue un rôle essentiel pour obtenir les niveaux de compactage recherchés. Le choix du matériel de compactage dépend des éléments suivants : le type de matériaux du remblai, le degré de compactage demandé, la teneur en eau de matériaux et la disponibilité du matériel de compactage (SUDAS 2005). La classification des matériels de compactage adaptés aux tranchées a fait l'objet de plusieurs documents techniques tels que : le guide du SETRA « Remblayage des tranchées et réfection des chaussées ».

Epaisseurs des couches de remblai

Le choix des épaisseurs des couches de remblai à compacter est un élément critique pour la bonne réalisation des tranchées. Il est évident que, plus les couches de remblai seront épaisses, plus leur compactage sera difficile. Monahan (1994) propose que le remblai soit réalisé en couches d'une épaisseur de 8 à 15 cm. De l'autre côté, l'APWA (1997), indique que les épaisseurs de ces dernières varient en général de 10 cm à 31 cm avec 15 cm pour l'épaisseur la plus courante.

1.6.3. Impact des tranchées sur la durée de service des chaussées

De nombreuses études basées sur l'indice de l'état de la chaussée (PCI) ou ses équivalents ont montré que les dégradations dues à la présence des tranchées influent considérablement l'état de la chaussée et sa durée de service. *Yapp et al. (2001)* ont déterminé les valeurs du PCI pour des sections routières avec ou sans tranchées (Figure 1.24). Sur cette figure, les points se situant sur la diagonale représentent l'ensemble des points ayant le même PCI, tandis que les points au-dessus et en dessous de la diagonale représentent les sections avec et sans tranchées, respectivement. On constate que les valeurs du PCI pour les sections ayant des tranchées sont inférieures à celles sans tranchées. Autrement dit, le niveau de service des sections ayant tranchée est inférieur à celles sans tranchée.

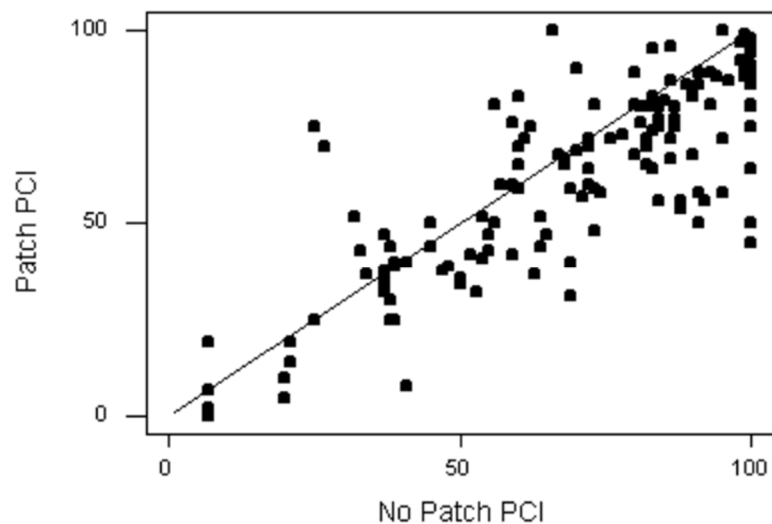


Figure 1.24 : Impact de la tranchée sur l'indice d'état de la chaussée PCI (*Yapp M. et al 2001*)

D'autre part, les données statistiques collectées par le département des travaux publics à San Francisco (1998) indiquent que le niveau de dégradation de la chaussée est fonction du nombre de tranchées réalisées sur cette dernière (Figure 1.25). En effet, cette dégradation et le niveau de service associé à la réalisation des tranchées se traduit par une perte de la durée de service de la route (Figure 1.26).

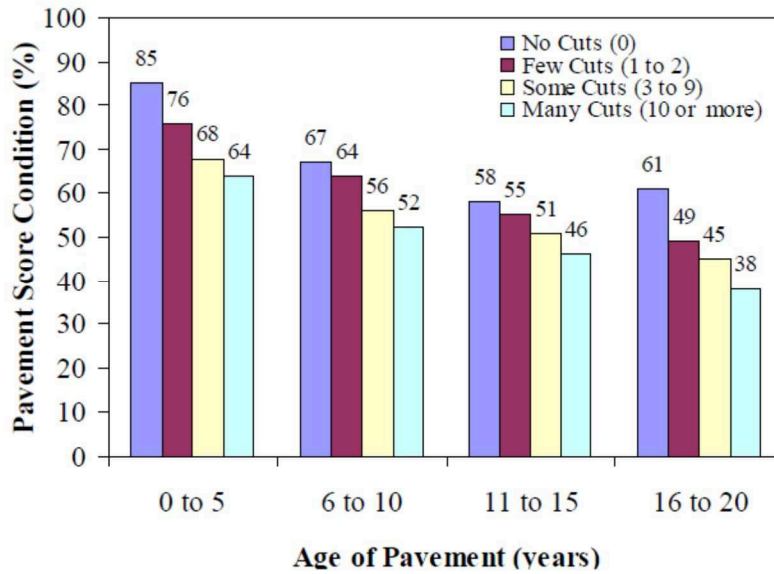


Figure 1.25 : Impact du nombre de tranchées sur l'état de la chaussée (Department of Public Works 1998)

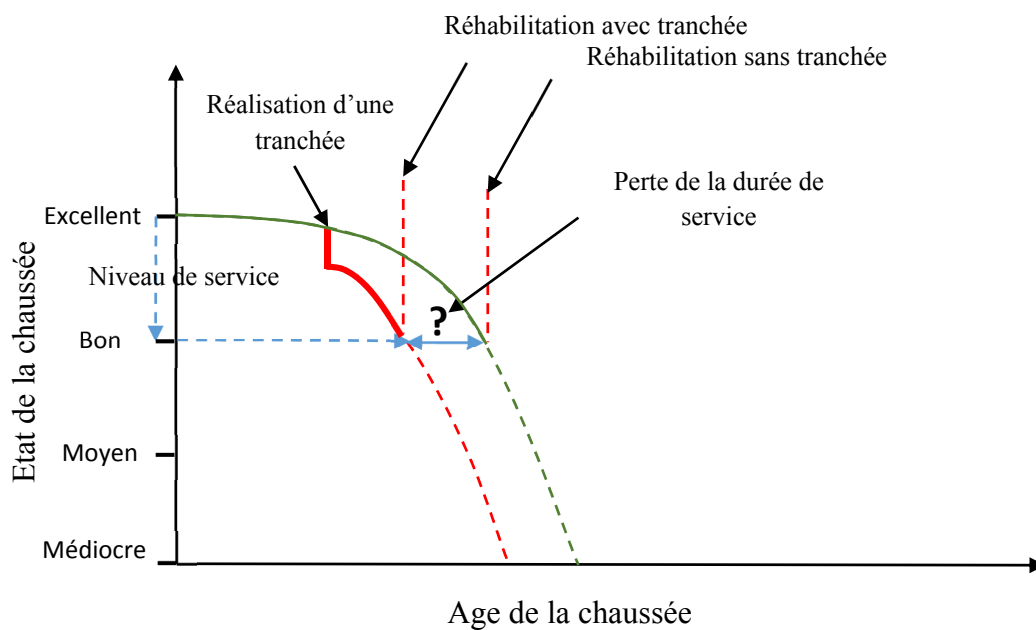


Figure 1.26 : Perte de la durée de service de la chaussée due à la présence d'une tranchée

La caractérisation de la perte de la durée de service de la chaussée due à la présence des tranchées a fait l'objet de multiples études en Amérique du nord. Le principe adopté par la majorité de ces études porte sur l'évaluation de l'état de la chaussée en se basant sur l'indice d'état de la chaussée (PCI) ou ses équivalents. Par exemple, pour chaque section inspectée, le

PCI est déterminé pour la zone de la tranchée et la zone adjacente, comme indiquée sur la figure 1.27. Les valeurs du PCI sont enregistrées ensuite dans une base de données afin de modéliser les détériorations et tracer les courbes Dégradations/Age de la chaussée. La modélisation peut être effectuée à l'aide d'un outil informatique tel que le logiciel Micro Paver. La comparaison des durées de service des deux zones indiquées ci-dessus, à partir d'une valeur critique du PCI, permet de déterminer la perte de la durée de service de la chaussée causée par la tranchée. Les résultats de ces études indiquent que la réduction de la durée de service d'une chaussée causée par les tranchées varie de 17% à 50%. Ces derniers sont récapitulés dans le tableau 1.5.

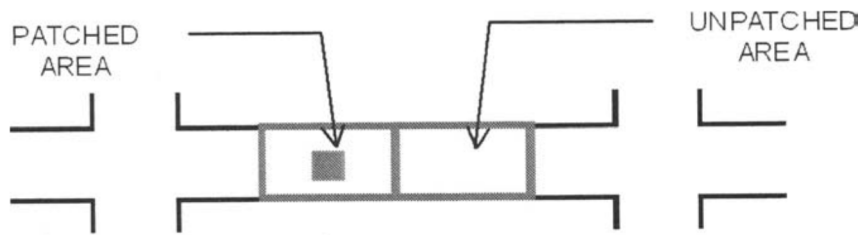


Figure 1.27 : Zones de calcul du PCI de la section étudiée (Shahin et Crovetti 2002)

Tableau 1.5 : Impact de la tranchée sur la durée de service des chaussées

N°	Référence	Ville ou Etat/ pays	Réduction de la durée de service	Remarques
1	Tighe et al. 2002	Ontario /Canada	30% de la durée de service résiduelle	
2	Shahin et al. 2002	Prince George / Etats-Unis	25%	Valeur critique du PCI = 60
3	Lee et Lauter 1999	Ottawa- Carleton / Canada	32.4%	
4	City of Phoenix 1990	Phoenix /Etats-Unis	22.5%	
5	Shahin et al 1996	Los Angeles / Etats-Unis	34% pour les voies artérielles (grandes voies) 17% pour les voies locales	Valeur critique du PCI : 55 pour les voies artérielles et 65 pour les voies locales
6	Bodocsi et al. 1995	Cincinnati / Etats-Unis	33% de la durée de service résiduelle	

7	Transtec Inc. 1995	Austin/États-Unis	17.5% pour les tranchées longitudinales 34.4% pour les tranchées transversales	
8	Shahin et al. 1986	Burlington/ États-Unis	39%	Valeur critique du PCI =70
9	Department of Public works 1998	San Francisco /États-Unis	>50% entre les chaussées ayant plus de 9 et celles avec moins de 3 tranchées	

1.6.4. Impact économique des tranchées

Les tranchées conduisent à des dégradations aux chaussées qui impactent leurs performances, durée de service et portance. Cela implique des coûts supplémentaires pour les travaux d'entretien et de réhabilitation. A titre d'exemple, ces coûts ont été estimés à la ville de Los Angeles à 16.4 millions de dollars par an (*Shahin et al 1996*).

L'évaluation de la chute de portance des chaussées due à la réalisation des tranchées a été déterminée par des méthodes d'auscultation non destructives telles que les essais de déflexion. La défaillance structurale des chaussées peut alors être convertie en couche supplémentaire d'asphalte dont l'épaisseur peut être déterminée par des logiciels de dimensionnement de chaussées tels que ALIZE. Le tableau 1.6 donne une synthèse des valeurs proposées pour l'épaisseur moyenne d'asphalte à mettre en place pour compenser la chute de portance associée à la présence d'une tranchée. Le calcul de cette épaisseur permet de déterminer le coût relatif aux travaux de réhabilitation associés à la réalisation des tranchées. Celui-ci varie d'une région à l'autre et en fonction de l'âge de la chaussée au moment de réalisation de la tranchée. La Municipalité d'Ottawa-Carleton a établi un rapport entre ce coût et l'âge de la chaussée (Tableau 1.7) (*Lee et Lauter 1999*).

Arudi (2000) a calculé le coût des travaux liés à la présence de la tranchée en fonction de l'âge de la chaussée. La figure 1.28 résume les résultats obtenus. La perte a été estimée en moyenne à 17.3\$ par mètre carré de la zone affectée par la tranchée.

Tableau 1.6 : L'épaisseur moyenne d'asphalte pour compenser la perte de portance due à la présence d'une tranchée

N°	Référence	Ville ou Etat/ pays	Epaisseur sup moyenne d'asphalte en cm
1	Nichols Consulting Engineers 2007	Las Vegas, North Las Vegas, Henderson et Clark County/Etats-Unis	4
2	Shahin et al. 2002	Prince George/ Etats-Unis	3.8
3	Shahin et al 1996	Los Angeles/ Etats-Unis	1.9 pour les voies artérielles (grandes voies) 5.8 pour les voies locales
4	CHEC Consultants, INC, 1996	Sacramento/ Etats-Unis	3.8
5	Bodocsi et al. 1995	Cincinnati / Etats-Unis	4.4
6	Shahin et al. 1986	Burlington/ Etats-Unis	3.8

Tableau 1.7 : Coût de réhabilitation de la zone de tranchée en \$ (*Lee et Lauter 1999*)

Age de la chaussée en An	Coût par m ² de la zone de tranchée
2 ou moins	\$24.00
>2 à 4	\$20.00
> 4 à 7	\$16.00
>7 à 10	\$10.00
>10	\$4.00

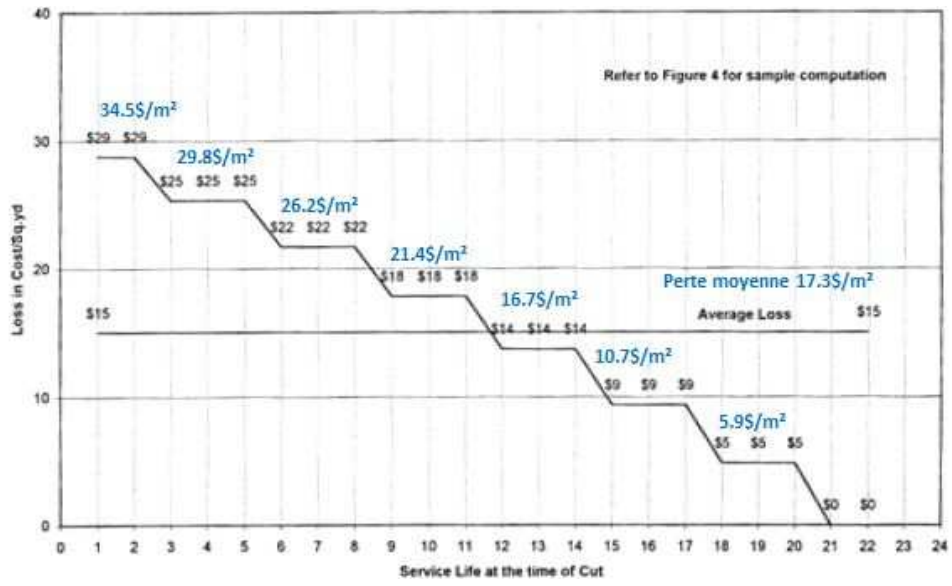


Figure 1.28 : Perte en coût de construction de la chaussée due à la présence des tranchées
 (Arudi 2000)

1.7. Conclusions

Ce chapitre a comporté une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur l'impact de la tranchée sur les chaussées, qui constitue l'une des principales sources de détérioration des chaussées urbaines. La présence de la tranchée conduit à une dégradation de la chaussée autour de la chaussée, dans une zone adjacente dont l'étendue est estimée à 1 m.

Les dégradations de la chaussée associées à la réalisation d'une tranchée réduisent son niveau de service et par conséquent, ses performance et sa durée de service. Cette réduction de la durée de service a été estimée par plusieurs études entre 17% et 50%. La tranchée induit une perte de capacité portante de la chaussée. Cette perte peut être convertie en couche d'asphalte équivalente dont l'épaisseur moyenne est autour de 4 cm.

Les dommages induits par la tranchée aux chaussées nécessitent des travaux de maintenance et de réhabilitation avec un coût économique et social important. Il est par conséquent crucial de réduire ces dommages en améliorant la réalisation et le contrôle de la tranchée. Cette amélioration nécessite d'abord une bonne compréhension de l'interaction entre la tranchée et la chaussée sous l'effet des charges d'exploitation et de l'environnement. Les travaux réalisés dans ce domaine sont basés sur des observations et des analyses statistiques sur la durée de service en se basant principalement sur l'indice de l'état de la chaussée (PCI). Ils n'ont pas exploré l'influence de la tranchée sur la réponse en déformations locales de la tranchée et de la chaussée sous l'effet des charges d'exploitation et de l'environnement. Dans ce travail de thèse, on va analyser l'influence de la tranchée sur le comportement en déformations de la chaussée à travers une expérimentation à grande échelle qui a été réalisée par la Métropole Européenne de Lille (MEL) en coopération avec Eurovia et le Laboratoire de Génie Civil et de Géo-Environnement de l'Université de Lille. Cette expérimentation sera décrite en chapitre 2. Les résultats obtenus seront discutés et analysés aux chapitres 3 et 4.

Chapitre 2

Expérimentation à grande échelle de la tranchée : Description et fonctionnement du système d'instrumentation

2.1. Introduction

La Métropole Européenne de Lille (MEL) possède un patrimoine de voiries de plus de 2 700 km. Ces voiries accueillent une grande diversité de réseaux urbains : gaz, électricité, eau, assainissement, etc. Les exploitants de ces réseaux sont amenés à intervenir régulièrement pour les réparer, moderniser et étendre dans un souci d'amélioration leurs performances et les services associés. Les interventions sur les réseaux sont généralement effectuées en creusant des tranchées qui fragilisent la voirie et réduisent sa durée de service, ce qui induit des coûts très élevés.

Une question importante se pose : comment construire une bonne tranchée ? Cette question a fait l'objet d'un projet de recherche coordonné et financé par la MEL en partenariat avec EUROVIA et Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCGE). Ce projet a consisté dans la réalisation d'une expérimentation à grande échelle avec la réalisation d'une chaussée et d'une tranchée qui ont été bien instrumentées dans le but de comparer leurs réponses à des sollicitations réelles et d'explorer ainsi l'influence de la tranchée sur le comportement de la chaussée.

Ce chapitre a pour but de présenter l'expérimentation réalisée. Il présente successivement les travaux réalisés, l'instrumentation de la chaussée et de la tranchée et le fonctionnement du système d'instrumentation.

2.2. Description de l'expérimentation

2.2.1. Choix du site expérimental

L'expérimentation a été réalisée sur l'avenue Henri Poincaré située sur Villeneuve d'Ascq à l'entrée du Campus de la Cité Scientifique à proximité de la station du métro 4 Cantons (Figure 2.1). Le choix de ce site a été motivé par les facteurs suivants :

- (i) La forte dégradation de la voirie qui nécessitait des travaux de réparation (Figure 2.2).
- (ii) L'intense trafic sur cette voirie avec notamment près de 300 passages de bus par jour.
- (iii) La réalisation sur le campus du projet SunRise Smart City avec l'instrumentation des réseaux d'eau et d'énergie.

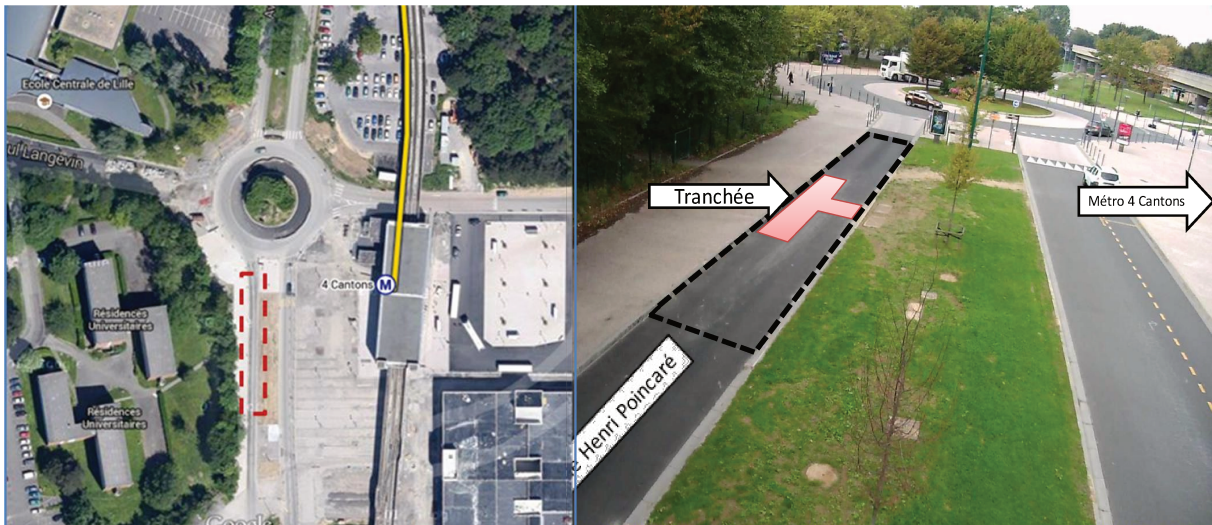


Figure 2.1 : Localisation de l'expérimentation ; Avenue Henri Poincaré, Villeneuve d'Ascq, près de la Cité Scientifique



Figure 2.2 : Etat de la chaussée avant l'expérimentation

2.2.2. Travaux de construction

Les travaux de construction du site expérimental ont été réalisés par EUROVIA en Août 2014 en deux phases.

La première phase a comporté le décaissement de la chaussée existante et sa reconstruction en plaçant les capteurs hors tranchée (Figure 2.3).

La chaussée a été reconstruite selon les règles de dimensionnement de Lille Métropole (*Lille Métropole 2000*) en trois couches (Figure 2.4) :

- Une couche de grave non traitée de 75 cm d'épaisseur.
- Deux couches d'enrobés à modules élevés (EME) de 2x10 cm d'épaisseur.
- Une couche d'enrobé bitumineuse EB-BBSG de 6 cm d'épaisseur.



Figure 2.3 : Reconstruction de la Chaussée (photo EUROVIA)

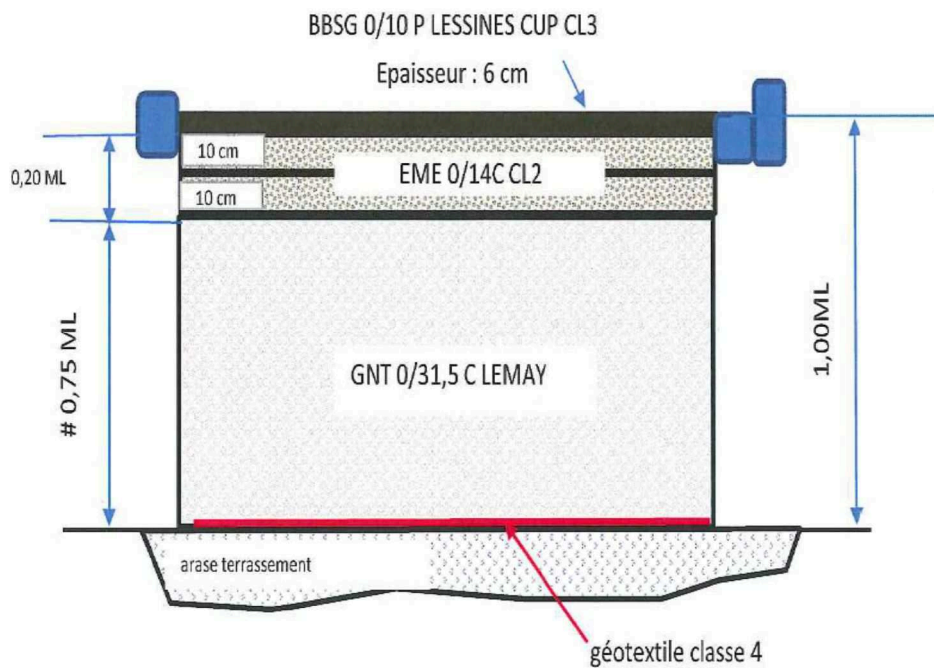


Figure 2.4: Coupe transversale de la chaussée

La seconde phase a consisté dans le creusement de la tranchée, la mise en place d'une conduite, le remblaiement par une structure identique à la chaussée tout en installant le système d'instrumentation (Figure 2.5).

La tranchée a été réalisée conformément aux règles du STERA (2001). La figure 2.6 illustre une coupe transversale de la tranchée.



Figure 2.5 : Construction de la tranchée (photos EUROVIA)

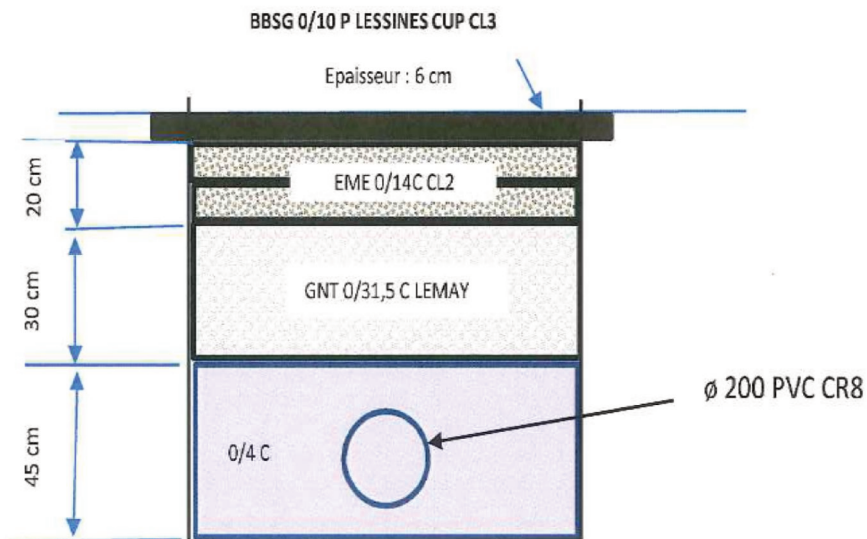


Figure 2.6: Coupe transversale dans la tranchée

2.3. Instrumentation

2.3.1. Les capteurs






L'instrumentation a été conçue dans l'objectif de pouvoir comparer la réponse mécanique de la tranchée à celle de la chaussée sous l'effet des charges d'exploitation tout en connaissant les conditions de température et d'humidité dans la chaussée et la tranchée, qui peuvent influencer d'une manière importante leurs comportements mécaniques. Cet objectif a nécessité une instrumentation intense comportant :

- Des capteurs de déformation, des capteurs des pressions, des tassomètres et de la fibre optique pour suivre la réponse mécanique.
- Des sondes de température et d'humidité pour suivre les conditions environnementales.

Le tableau 2.1 donne une synthèse des 92 capteurs installés. Ces capteurs sont répartis sur les 9 nœuds suivants (Figure 2.7) :

- P5 et P5' : deux nœuds dans l'axe de la tranchée.
- P0 : nœud de référence de la chaussée, éloigné de la tranchée, dans l'axe des nœuds P5 et P5'.
- P1 et P2 : deux nœuds de la chaussée à proximité de la tranchée, dans l'axe des nœuds P5 et P5'.
- P3, P4, P6 et P7 : 4 nœuds dans la chaussée à proximité latérale de la tranchée.

Tableau 2.1 : Capteurs utilisés

Capteur de déformation	Capteur de pression	Capteur de la température	Capteur d'humidité	Tassomètre
				
32	10	28	20	2

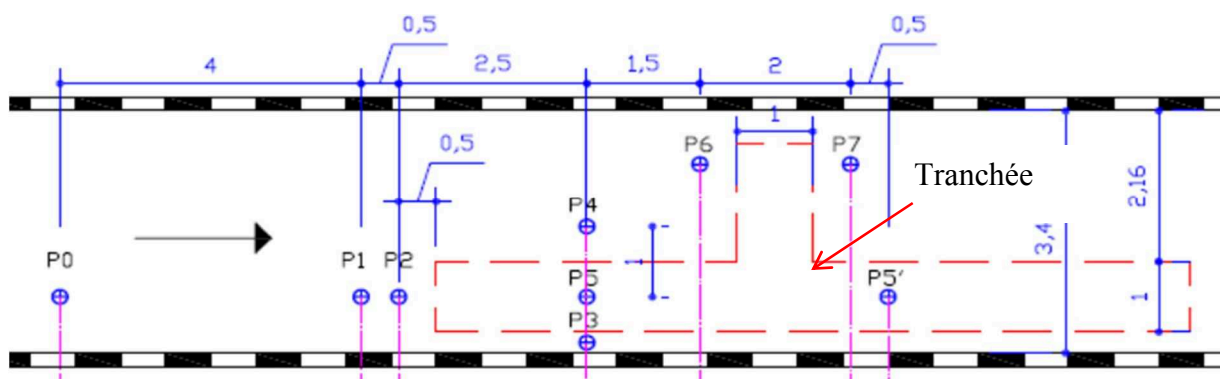


Figure 2.7 : Plan d'implantation des nœuds des capteurs

Le nœud P0 a comporté 5 sondes de température placées à différentes profondeurs, 4 sondes d'humidité, 2 jauges de déformations longitudinales (D1 et D2), 2 jauges de déformations transversales (D3 et D4) et un capteur de pression (Tableau 2.2).

L'instrumentation des nœuds P1, P2, P3, P4, P6 et P7 a comporté dans chaque nœud 3 sondes de température, 2 sondes d'humidité, 2 jauges de déformations longitudinales, 2 jauges de déformations transversales et un capteur de pression.

Le nœud P5 a comporté 3 sondes de température, 4 sondes d'humidité, 2 jauges de déformations longitudinales (D29 et D30), 2 jauges de déformations transversales (D31 et D32) et un capteur de pression. Le nœud P5' a comporté 2 sondes de température et 2 capteurs de pression.

Tableau 2.2 : Implantation des capteurs.

	Température	Humidité	Déformation Longitudinale	Déformation Transversale	Pression
P0	Surface				
	- 6 cm	T26			
	- 16 cm	T19			
	- 26 cm	T12	H10	D1 D2	D3 D4
	- 46 cm	T11	H9		
	- 66 cm		H8		
	- 86 cm	T5	H1		
P1	Surface				
	- 6 cm				
	- 16 cm	T20			
	- 26 cm	T13	H11	D5 D6	D7 D8
	- 46 cm				
	- 66 cm				
	- 86 cm	T6	H2		
P2	Surface				
	- 6 cm				
	- 16 cm	T21			
	- 26 cm	T14	H12	D9 D10	D11 D12
	- 46 cm				
	- 66 cm				
	- 86 cm	T7	H3		

P 3	Surface					
	- 6 cm					
	- 16 cm	T22				
	- 26 cm	T15	H13	D13 D14	D15 D16	
	- 46 cm					
	- 66 cm					
	- 86 cm	T8	H4			P4

P 4	Surface					
	- 6 cm					
	- 16 cm	T23				
	- 26 cm	T16	H14	D17 D18	D19 D20	
	- 66 cm					
	- 46 cm					
	- 86 cm	T9	H5			P5

P 6	Surface					
	- 6 cm					
	- 16 cm	T24				
	- 26 cm	T17	H15	D21 D22	D23 D24	
	- 46 cm					
	- 66 cm					
	- 86 cm	T10	H6			P6

P 7	Surface					
	- 6 cm					
	- 16 cm	T25				
	- 26 cm	T18	H16	D25 D26	D27 D28	
	- 46 cm					
	- 66 cm					
	- 86 cm	T1	H7			P7

P 5	Surface					
	- 6 cm	T28				
	- 16 cm	T27				
	- 26 cm		H20	D29 D30	D31 D32	
	- 50 cm		H19			
	- 75 cm		H18			
	- 100 cm	T2	H17			P8

P 5'	Surface					
	- 6 cm					
	- 16 cm					
	- 26 cm					
	- 50 cm					
	- 75 cm	T4				P10
	- 100 cm	T3				P9

2.3.2. Système d'acquisition

Tous les capteurs sont connectés via des câbles à un système d'acquisition, qui stocke toutes les données sur un disque dur, fait du traitement local et transmet les données à un serveur via une connexion 3G.

Les capteurs de déformation et de pression prennent des mesures à chaque passage de véhicule. Dès qu'un capteur détecte un passage, tous les capteurs effectuent des mesures tous les 0,8 sec. Cela permet de bien suivre la réponse de la chaussée pendant le passage d'un véhicule. Les données sont enregistrées dans un fichier texte composé de lignes et de colonnes. Chaque fichier contient 200 et 100 valeurs enregistrées par chaque capteur de déformation et de pression, respectivement.

Les capteurs de température et d'humidité enregistrent les données toutes les 5 minutes. Les données sont enregistrées dans un fichier texte composé d'une seule ligne de valeurs numériques.

2.4. Fonctionnement des capteurs

2.4.1. Méthodologie

Ce paragraphe donne un bilan général de fonctionnement des capteurs. Le bilan porte sur la période du 19/10/2014 au 14/06/2015 pour laquelle on dispose des mesures exploitables pour les déformations, la température et l'humidité. Les données des capteurs de pression n'ont pas pu être exploitées.

L'analyse pour chaque capteur porte sur la disponibilité des mesures cohérentes. Une absence de mesure peut être due à un défaut de fonctionnement du capteur, ou du système de transmission ou de stockage.

Nous avons utilisé dans l'analyse de fonctionnement le critère de fonctionnement suivant :

- 1 : donnée disponible et exploitable
- 0 : donnée absente ou inexploitable

2.4.2. Capteurs des déformations

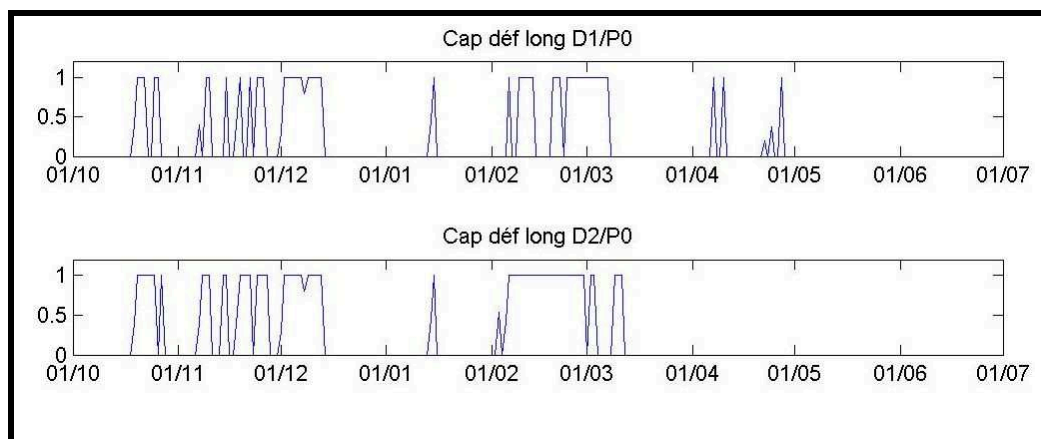
Nœud P0

Ce nœud comporte 2 jauges de déformations longitudinales (D1 et D2) et 2 jauges de déformations transversales (D3 et D4). La jauge de déformation D3 n'a pas fonctionné dès le début de l'expérimentation.

La figure 2.8 illustre les données exploitables des jauges de déformations D1, D2 et D4. Pour le capteur D1, on note une quasi-absence des données en Janvier, Février, Mars, Avril et après le 1^{er} mai. Sur l'ensemble de la période d'observation, on dispose de 22% des données exploitables.

Pour le capteur D2, on note une quasi-absence des données en Janvier, Février et après le 15 mars. Sur la période d'observation, on dispose de 27% des données exploitables.

Pour le capteur D4, on note une quasi-absence des données en Janvier, Février, et après le 1^{er} avril mars. Sur la période d'observation, on dispose de 36% des données exploitables.



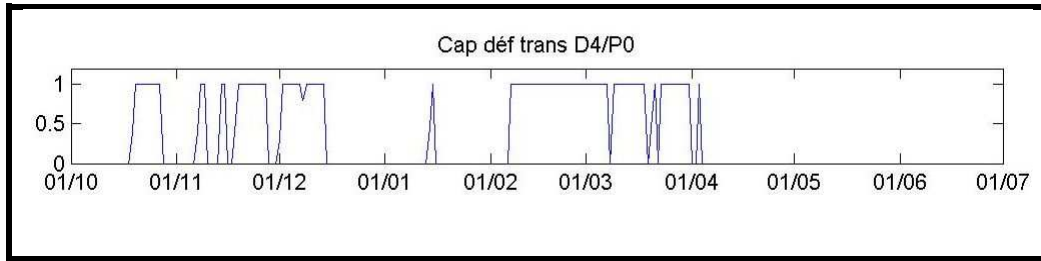


Figure 2.8 : Fonctionnement des capteurs du nœud P0 (D1, D2 et D4)

Nœud P1

La figure 2.9 illustre les données exploitables des jauges de déformations D5, D6, D7 et D8. Pour ces capteurs on note quasi absence des données en Janvier et Février et après le 15 avril pour le D5, le 10 avril pour les jauges D6 et D7 et le 7 mars pour le D8. Les jauges D5, D6 et D7 ont un taux de fonctionnement de l'ordre de 35% alors que D8 a un taux de fonctionnement de l'ordre de 30%.

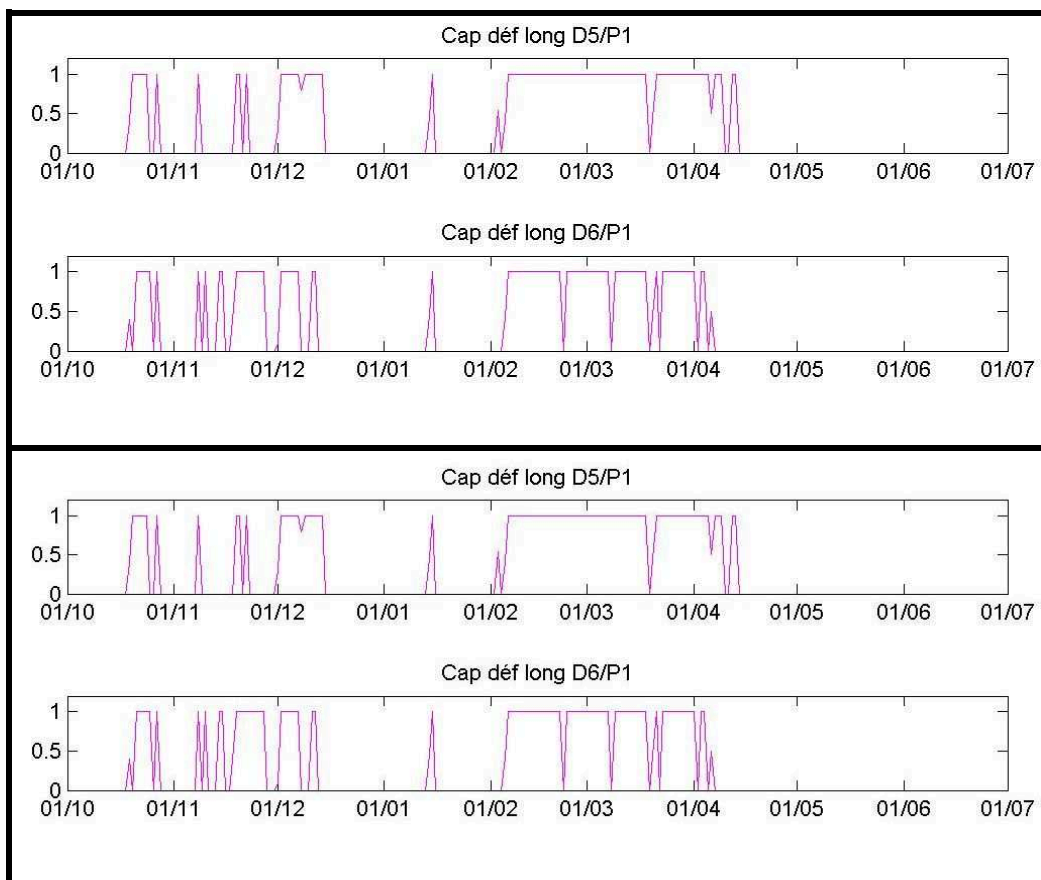


Figure 2.9 : Fonctionnement des capteurs du nœud P1 (D5, D6, D7 et D8)

Nœud P5

La figure 2.10 illustre les données exploitables des jauges de déformations D29, D30 et D31. Le capteur D32 n'a pas fonctionné.

Pour ces capteurs on note quasi absence des données en Janvier et Février et après le 15 avril pour le D29, le 10 mars pour les capteurs D30 et D31. Les jauges D30 et D31 ont un taux de fonctionnement de l'ordre de 30% alors que D29 a un taux de fonctionnement de l'ordre de 38%.

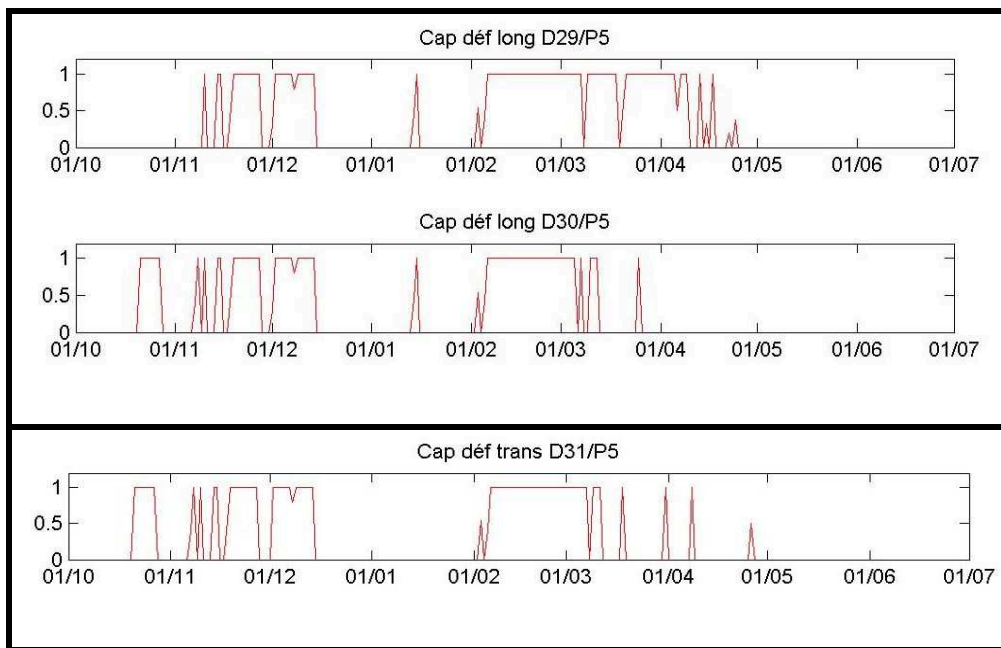


Figure 2.10 : Fonctionnement des capteurs du nœud P5 (D29, D30 et D31)

Le bilan de fonctionnement des capteurs de déformation des nœuds P2, P3, P4, P6 et P7 est donné dans l'annexe A1.

2.4.3. Fonctionnement des capteurs de température

Les courbes relatives au fonctionnement des capteurs de température aux nœuds P0, P2 et P5 sont représentées sur les figure 2.11 à 2.13. On note qu'un seul capteur (T6) n'a pas fonctionné. L'absence des mesures en décembre et janvier au due à un problème de stockage de données. Les capteurs ont fonctionné jusqu'à mi-juin. Sur l'ensemble de la période d'observation, on dispose de 60% des données exploitables.

Le fonctionnement des autres capteurs est illustré en annexe A2. On note aussi la disponibilité de près de 60% des données sur la période d'observation.

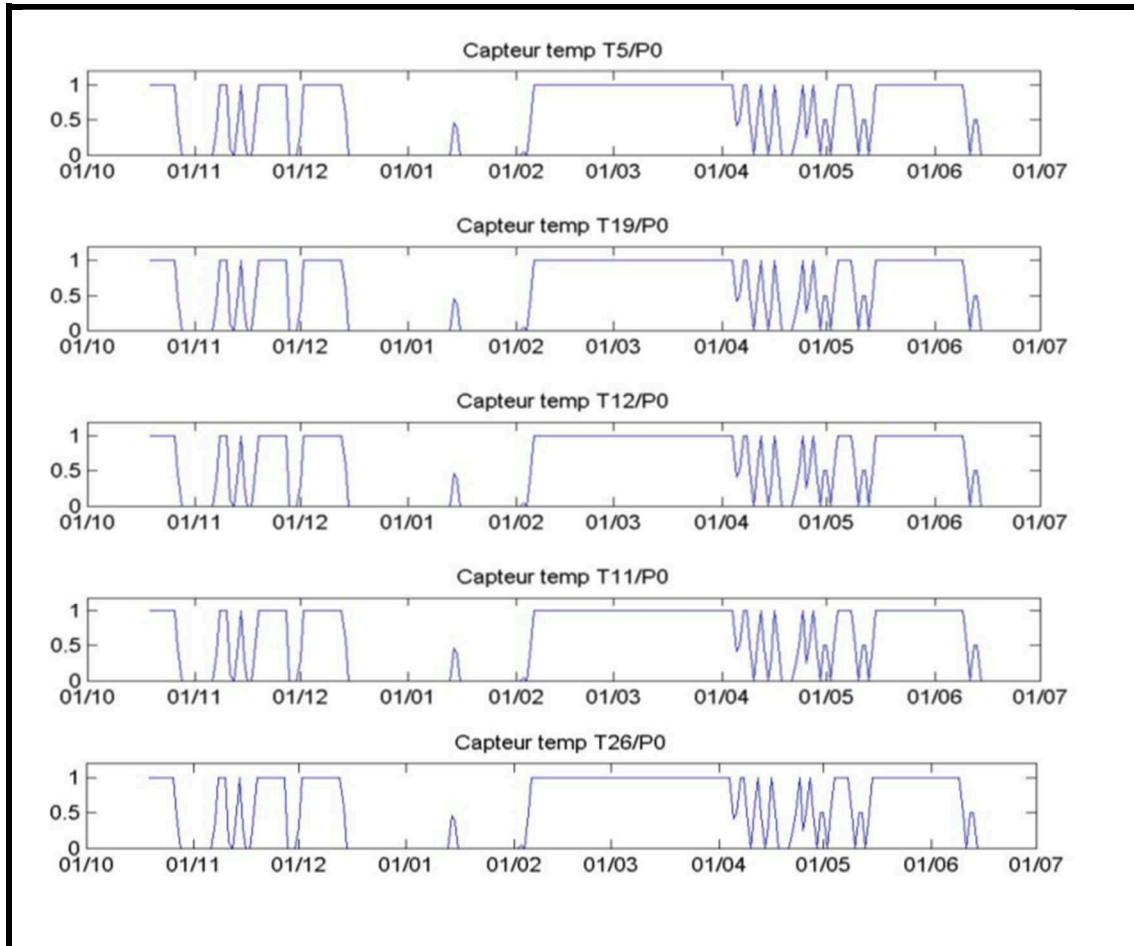


Figure 2.11 : Fonctionnement des capteurs de température au nœud P0

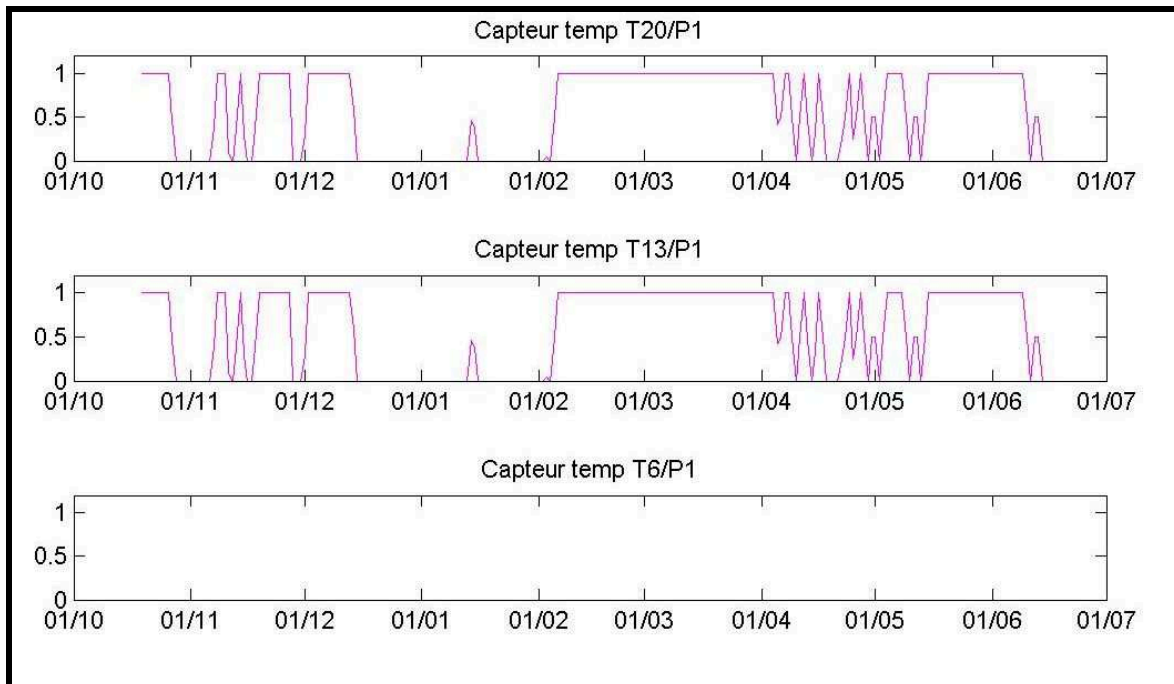


Figure 2.12 : Fonctionnement des capteurs de température au nœud P1

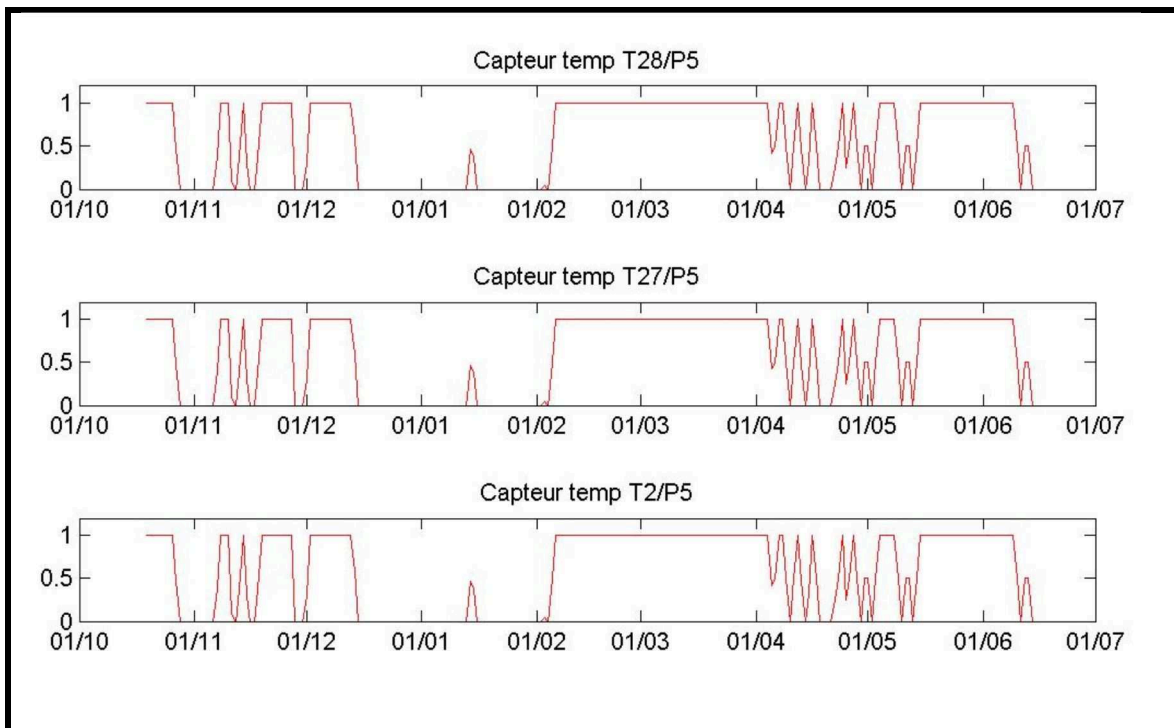


Figure 2.13 : Fonctionnement des capteurs de température au nœud P5

2.4.4. Fonctionnement des capteurs d'humidité

Le fonctionnement des capteurs d'humidité aux nœuds P0, P2 et P5 est illustré sur les figures 2.14 à 2.16. On note que trois capteurs au nœud P5 n'ont pas fonctionné. L'absence des mesures en décembre et janvier a due à un problème de stockage de données. Les capteurs ont fonctionné jusqu'à mi-juin. Sur l'ensemble de la période d'observation, on dispose de près de 70% des données exploitables.

Le fonctionnement des autres capteurs est illustré en annexe A3. On note aussi la disponibilité des données de près de 70% de la période d'observation.

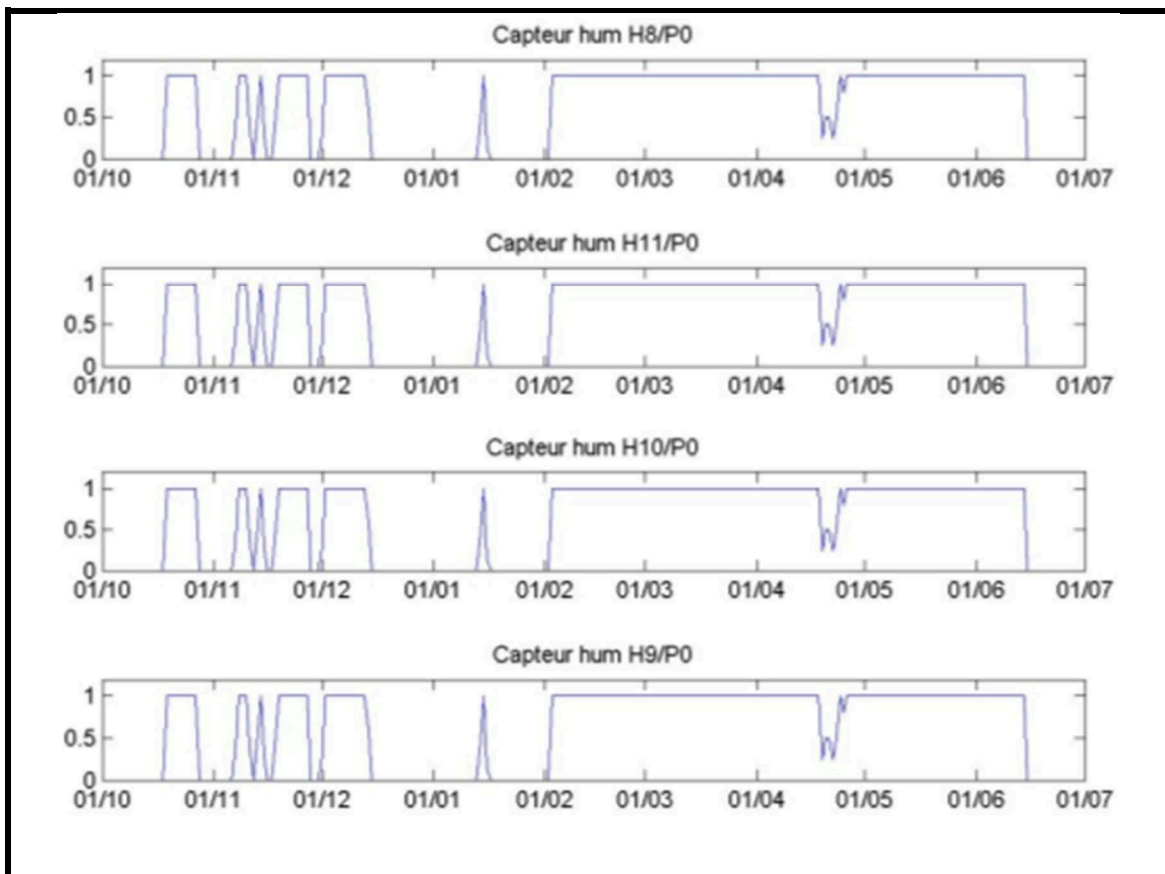


Figure 2.14 : Fonctionnement des capteurs d'humidité au nœud P0

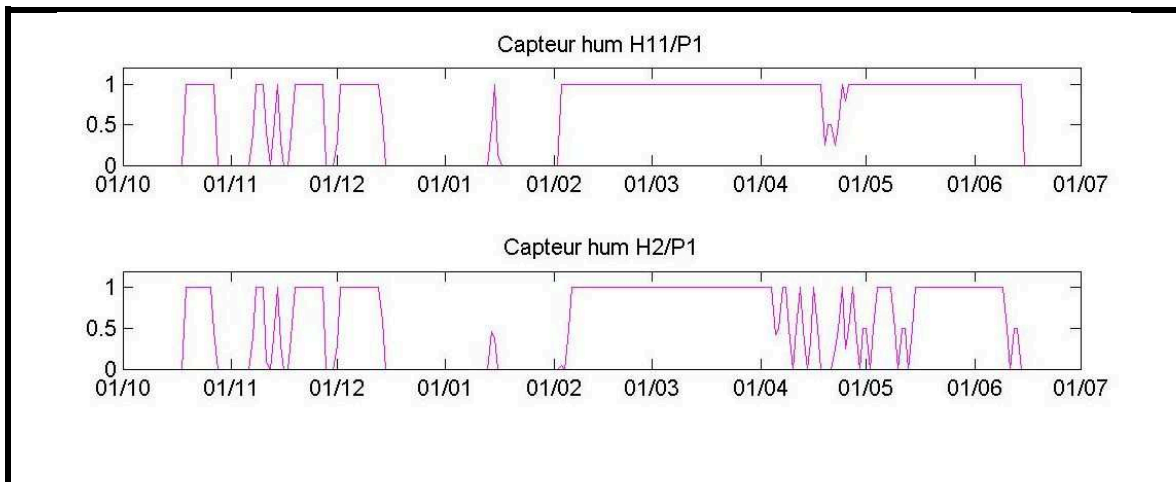


Figure 2.15 : Fonctionnement des capteurs d'humidité au nœud P1

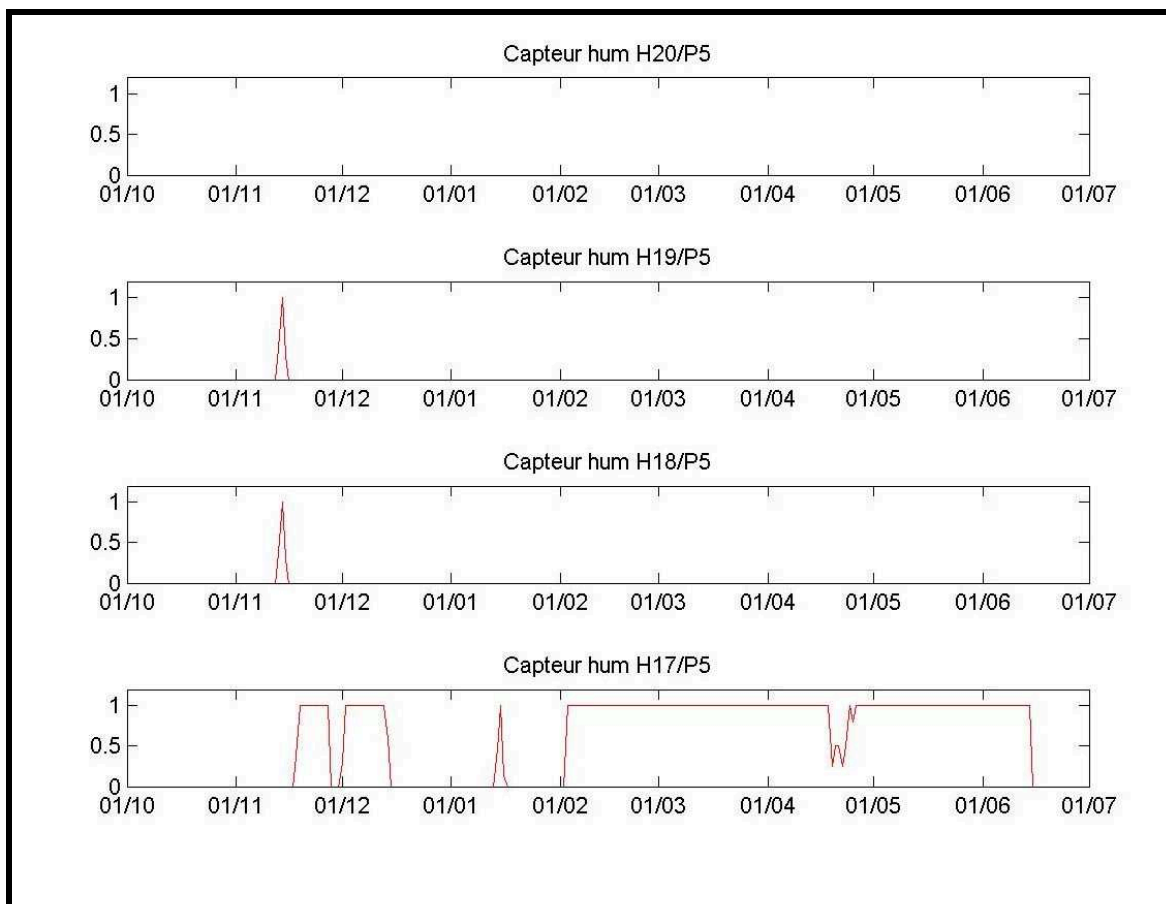


Figure 2.16 : Fonctionnement des capteurs d'humidité au nœud P5

2.5. Conclusions

Ce chapitre a décrit l'expérimentation à grande échelle qui a été réalisée à l'entrée du Campus de la Cité Scientifique pour analyser l'impact de la tranchée sur le comportement de la chaussée.

Le choix du site a été motivé par la forte intensité du trafic et la détérioration de la chaussée avant l'expérimentation, qui nécessitait des travaux de réfection.

Le site a été expérimenté par près de 90 capteurs de déformation, de pression, de température et d'humidité en 8 localisations, qui permettent de suivre la réponse de la chaussée en un point éloigné de la tranchée (comportement de référence), dans la tranchée et à sa proximité. Les capteurs des déformations et de pressions permettent de suivre la réponse mécanique alors que les capteurs de température et d'humidité donnent la température et l'humidité qui ont une influence importante sur le comportement de la chaussée. La multiplication des capteurs avait pour but de disposer d'une sécurité pour accéder aux données en cas de panne de certains capteurs.

Avec cette instrumentation, l'expérimentation réalisée est une première dans le secteur des chaussées.

Les données des capteurs sont transmises à un serveur via une connexion filaire. Le serveur transmet les données à un autre serveur via une connexion 3G.

Notre laboratoire dispose des données de mesures au cours de la période allant du 19/10/2014 au 14/06/2015, soit une période de près de 8 mois. Cette période comporte une très grande quantité des données qui seront exploitées au chapitre 4.

Sur la période d'observation, on a eu une perte de données entre le mi-décembre 2014 et début février 2015. L'effet de cette perte a été atténué par la disponibilité des mesures en hiver (Février et Mars).

L'analyse du fonctionnement des capteurs a montré que sur les 90 capteurs suivis (déformation, température et humidité), 90% ont fonctionné après la construction de la chaussée, ce qui constitue une très bonne performance pour le système d'instrumentation.

La disponibilité des données a été relativement élevée pour les capteurs de température (70%) et d'humidité (60%), mais moins bonne pour les capteurs de déformations (de l'ordre de 30%).

Dans le chapitre quatre, on présente une analyse approfondie des données collectées dans le but de déterminer l'influence de la tranchée sur le comportement de la chaussée dans différentes conditions de sollicitation et d'environnement (température et humidité).

Chapitre 3

Essais de déflexion

3.1. Introduction

Cinq campagnes de mesure de déflexion ont été effectuées sur le site expérimental présenté dans le chapitre précédent. Ces campagnes étant réalisées entre septembre 2014 et juillet 2016 dans le but d'étudier l'état structural de la chaussée. Dans ce chapitre, on présente les principaux résultats de ces essais. L'accent sera mis sur la zone d'influence de la tranchée et l'impact de la température sur son comportement structural.

Le terme « déflexion » sera employé pour désigner la valeur maximale de la déflexion. Cette valeur qui se génère lorsque la charge roulante s'applique directement sur le point de mesure comme indiqué sur la figure 3.1.

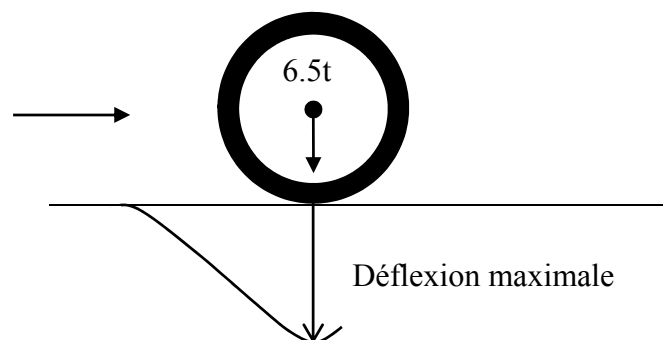


Figure 3.1 : Déflexion maximale sous une charge roulante réglementaire

3.2. Les campagnes de mesure de déflexion

Afin d'étudier l'évolution de l'état structural de la chaussée, cinq campagnes de mesure de déflexion ont été menées durant les années 2014, 2015 et 2016. Dans les quatre premières, la prise de mesure a été effectuée manuellement à l'aide de la poutre Benkelman. Tandis que le Déflectographe FLASH a été utilisé dans la dernière campagne. Les mesures ont été réalisées conformément aux normes NF P98-200-2 à 5. Le tableau 3.1 récapitule, pour chaque campagne de mesure, la date, la température de surface de la chaussée et l'appareil de mesure utilisé.

Les figures 3.2 et 3.3 illustrent le fonctionnement de la poutre Benkelman et de Déflectographe FLASH, respectivement.

Tableaux 3.1 : Campagnes de mesure de déflexion

N°	Date	Température de surface	Appareil
1	17/12/2014	10°C	Poutre Benkelman
2	17/06/2015	29°C	Poutre Benkelman
3	27/10/2015	9°C	Poutre Benkelman
4	17/12/2015	15°C	Poutre Benkelman
5	28/06/2016	23.3°C	Déflectographe FLASH



Figure 3.2 : Mesure de déflexion à la poutre Benkelman



Figure 3.3 : Mesure de déflexion au Déflectographe FLASH

3.3. Les points de mesure de déflexion

Les mesures de déflexion ont été effectuées en séries de points dans les deux bandes de roulement et sous la charge de référence de **13 t/essieu**. Longitudinalement, le pas de mesure est pris égal à :

- 2 m pour les quatre premières campagnes (poutre Benkelman).
- 1 ou 2 m pour la cinquième campagne (Déflectographe FLASH).

La répartition des points de mesure de déflexion est donnée sur la figure 3.4.

Les points de mesures sont regroupés en trois familles :

- 1- Les points situés sur la tranchée.
- 2- Les points au voisinage de la tranchée : regroupe tous les points situés à proximité de la tranchée, à une distance ≤ 0.5 m.
- 3- Les points hors tranchée : représente le reste des points de mesure.

Le tableau 3.2 donne, pour chaque campagne d'auscultation, la répartition des points de mesure en fonction de leur famille.

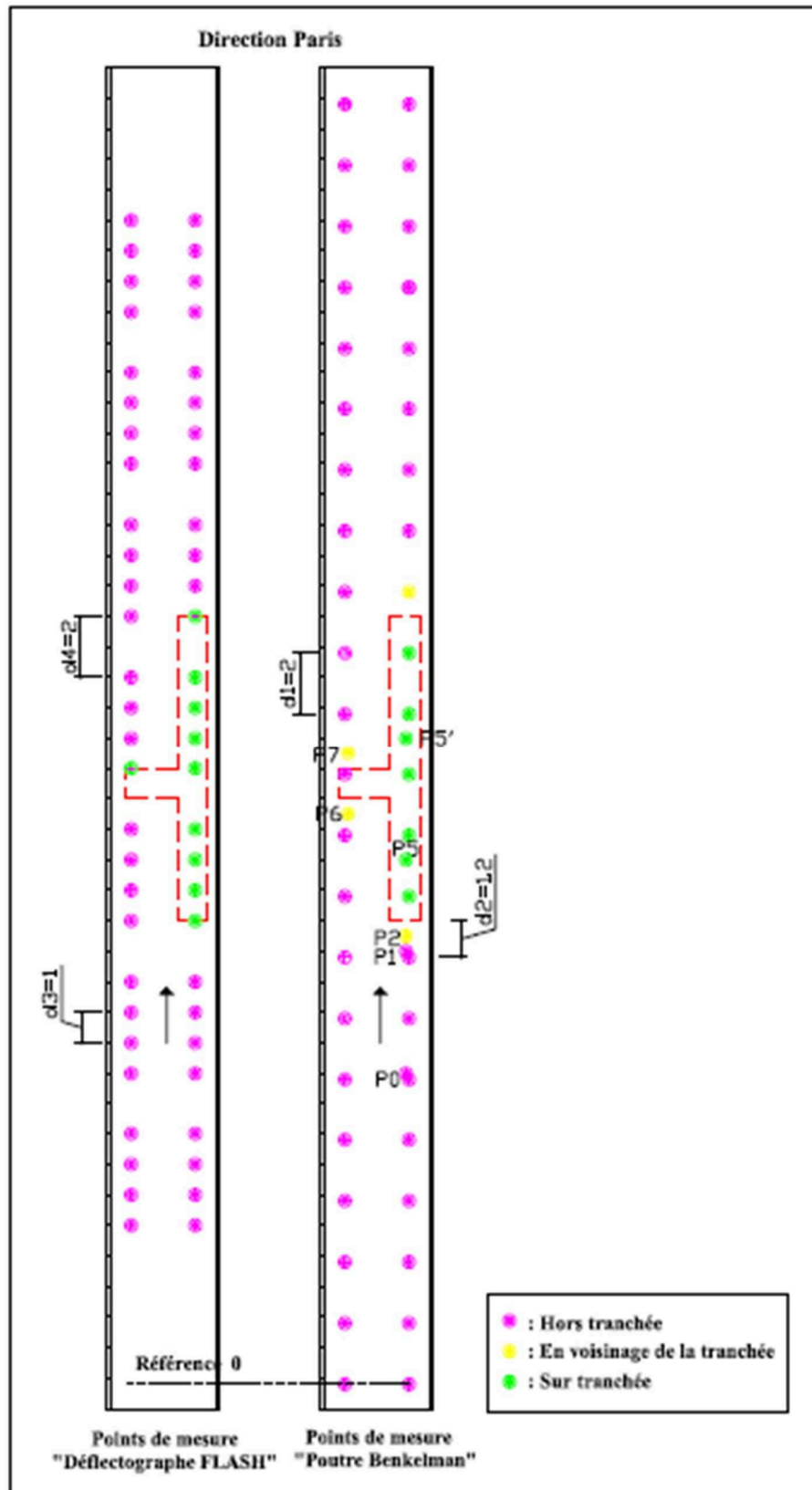


Figure 3.4 : Répartition des points de mesure de déflexion

Tableaux 3.2 : Le nombre de points de chaque famille pour chaque campagne de mesure

Campagne de mesure	Sur tranchée	Au voisinage de la tranchée	Hors tranchée
La 1 ^{ère} à la 4 ^{ème} campagne (poutre Benkelman)	7	4	39
La 5 ^{ème} campagne (Déflectographe FLASH)	10	0	46

3.4. Les mesures de déflexion

Les valeurs de déflexion enregistrées lors de chaque campagne de mesure sont fournies en Annexe A4. Elles sont représentées sur les figures 3.5 à 3.8. Les figures 3.5 et 3.6 représentent les mesures de déflexion dans la bande de roulement droite et les figures 3.7 et 3.8 représentent celles dans la bande de roulement gauche.

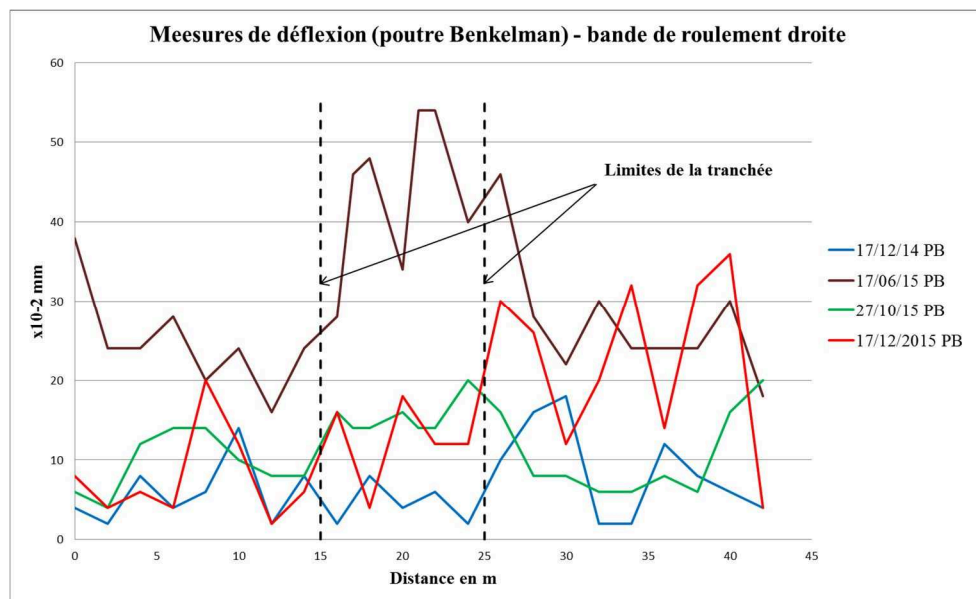


Figure 3.5 : Mesures de déflexion à la poutre Benkelman-bande de roulement droite

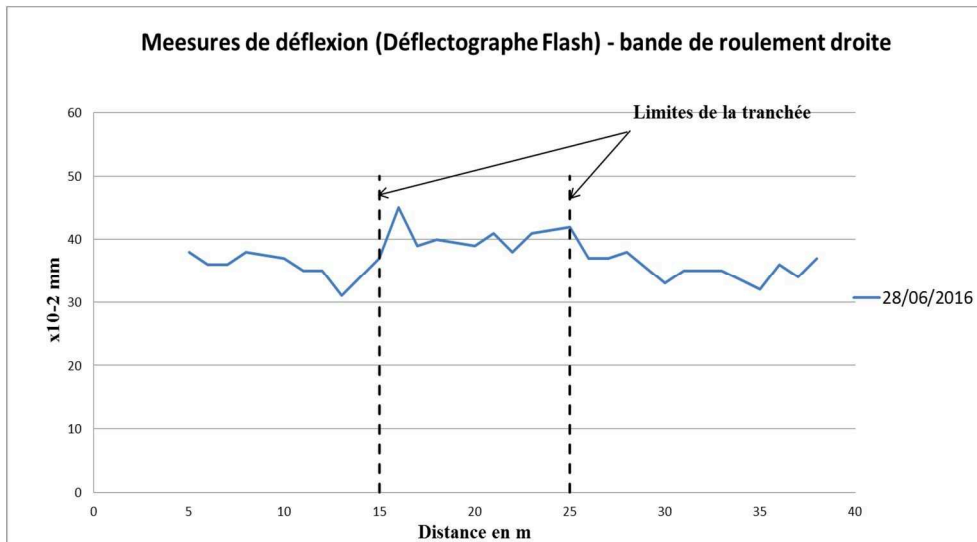


Figure 3.6 : Mesures de déflexion au déflectographe FLASH-bande de roulement droite

Les mesures de déflexion représentées sur les figures 3.5 et 3.6 permettent de distinguer clairement le comportement de la chaussée en zone de la tranchée. Ces dernières montrent que la tranchée est sensible à la variation de la température. Par exemple, pour les températures élevées, contrairement aux températures basses, les déflexions mesurées sur la tranchée sont plus importantes que celles relevées hors de la tranchée. En revanche, ce comportement n'est pas être observé lorsque la température est autour de 15 °C.

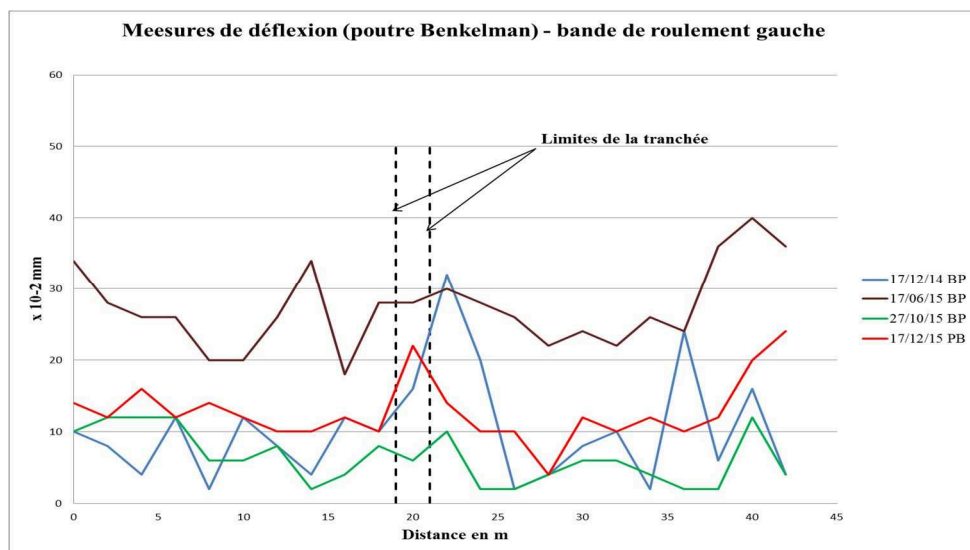


Figure 3.7 : Mesures de déflexion à la poutre Benkelman-bande de roulement gauche

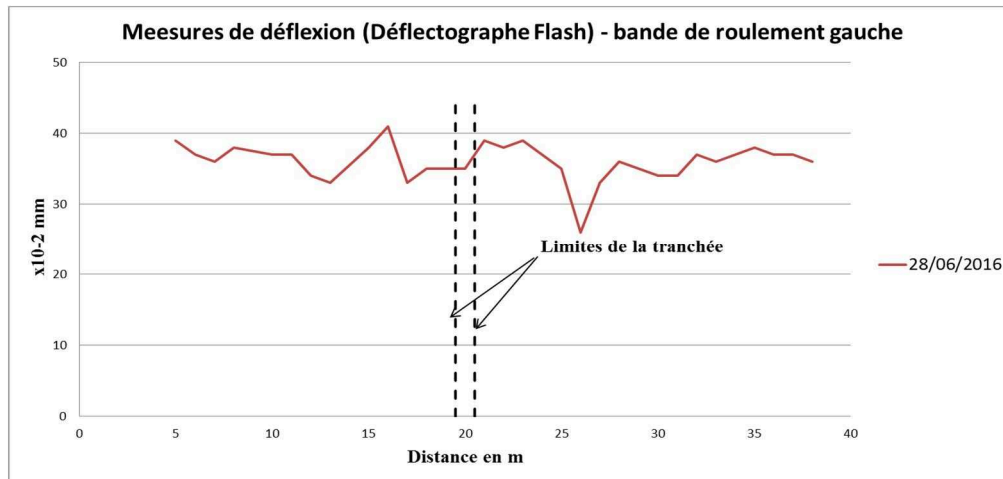


Figure 3.8 : Mesures de déflexion au déflectographe FLASH -bande de roulement gauche

Aucune information relative au comportement de la tranchée ne peut être tirée des figures 3.7 et 3.8. Cela peut s'expliquer par le fait que le seul point de mesure se trouve très proche du bord de la tranchée.

Il est rappelé que les mesures de la déflexion sont fonction de la température de matériaux bitumineux, elles peuvent être corrigées pour être ramenées à la température conventionnelle de 15°C à l'aide de la formule suivante (*Cerema et IDRRIM 2016*) :

$$D_{15^{\circ}c} = \frac{1}{1+K \times (T-15)/15} \times D_T ; \text{ Avec :}$$

- D15°C : déflexion à 15°C ;
- DT : Déflexion mesurée à la température T ;
- K : coefficient fonction du type de structure. K=0,2, pour une chaussée bitumineuse épaisse.

Le tableau 3.3 donne les valeurs du facteur de correction de température calculées à partir de la formule précédente.

Tableau 3.3 : Facteur de correction de température

Date de la campagne	Outil de mesure	T° C	facteur de correction
17/12/2014	PB	10	1.07
17/06/2015	PB	29	0.84
27/10/2015	PB	9	1.09
17/12/2015	PB	15	1.00
28/06/2016	DF	23.3	0.90

Les mesures de déflexion corrigées sont représentées sur les figures 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12.

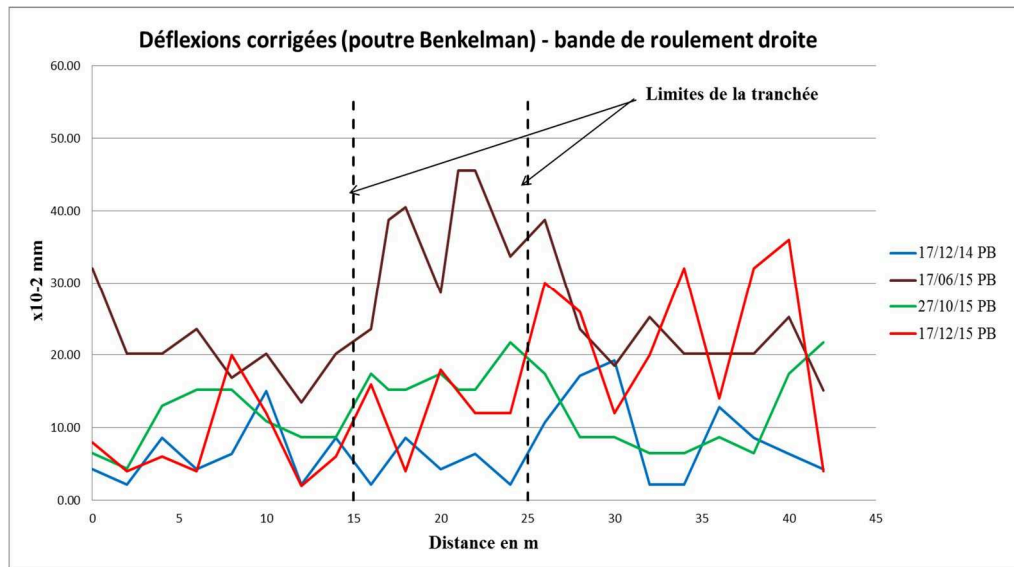


Figure 3.9 : Déflexions corrigées (poutre Benkelman)-bande de roulement droite

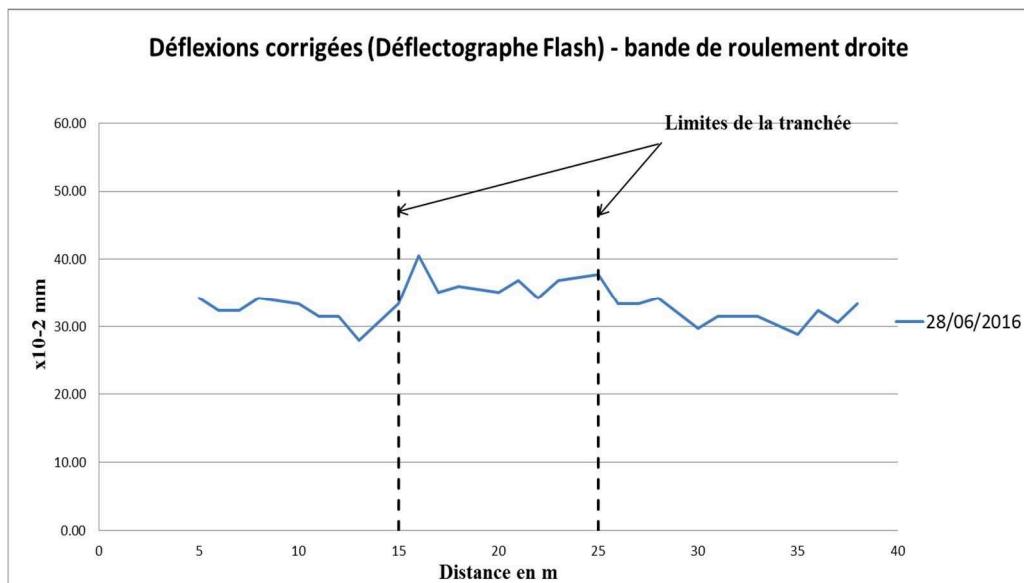


Figure 3.10 : Déflexions corrigées (déflectographe FLASH)-bande de roulement droite

L'observation des figures 3.9 et 3.10 conduit aux mêmes résultats obtenus sur les figures 3.5 et 3.6.

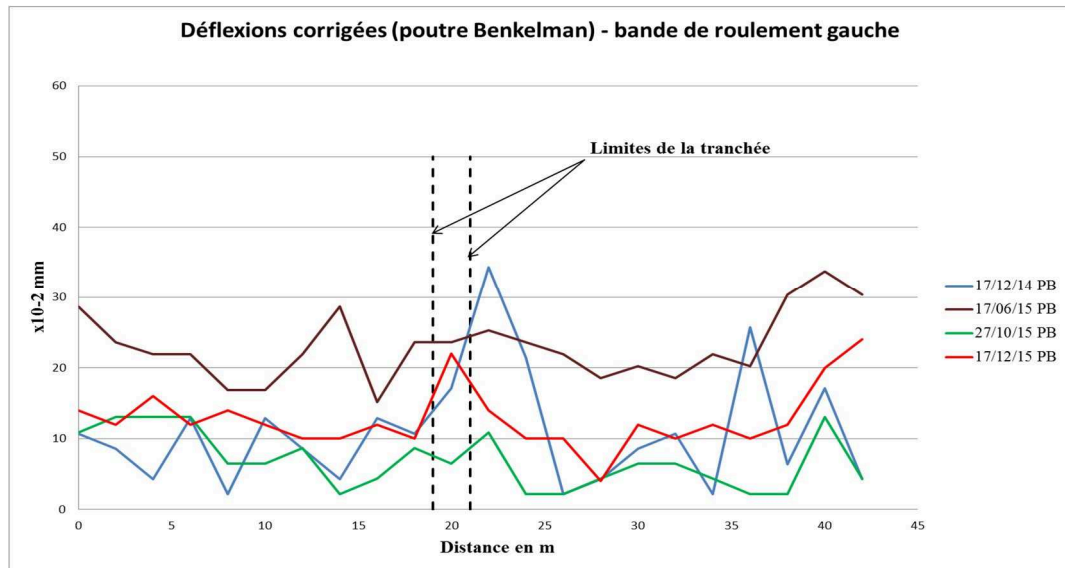


Figure 3.11 : Déflexions corrigées (poutre Benkelman)-bande de roulement gauche

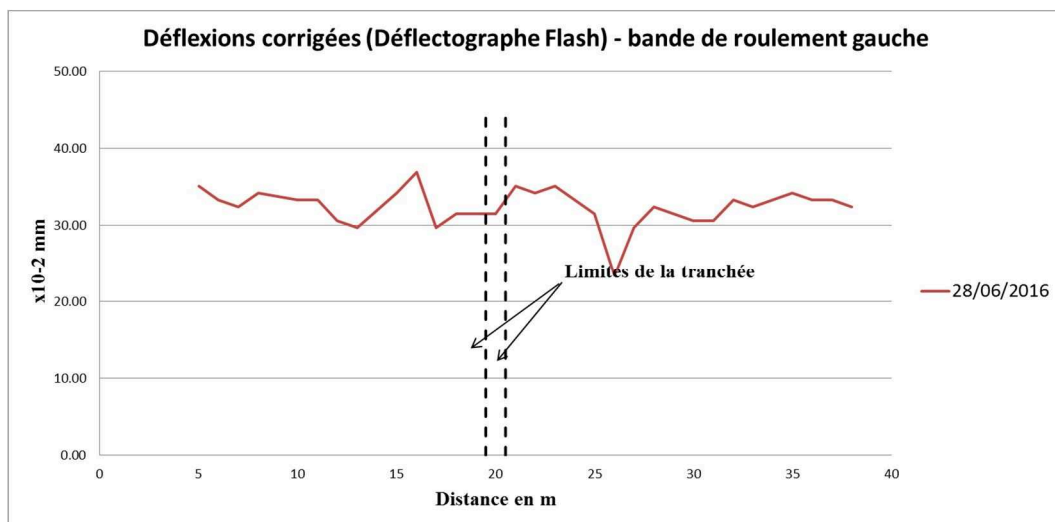


Figure 3.12 : Déflexions corrigées (Déflectographe FLASH)-bande de roulement gauche

Comme pour les figures 3.7 et 3.8, les figures 3.11 et 3.12 n'apportent pas d'information significative sur comportement de la tranchée.

Il est rappelé que les mesures de déflexions au déflectographe Flash doivent être corrigées lorsqu'elles sont inférieures ou égales à 0,03 mm. Dans notre cas, cette correction n'aura pas lieu, car les valeurs mesurées sont en majorité $> 0,03$ mm.

3.5. La déflexion caractéristique

La déflexion caractéristique constitue un indicateur du comportement mécanique de la chaussée, elle varie d'une zone à l'autre. Le comportement d'une zone donnée homogène en déflexion est caractérisé par :

- la moyenne des déflexions maximales (d_{moy}) ;
- l'écart type des déflexions maximales (σ_d)
- le seuil caractéristique à 97,5 % des déflexions maximales, appelé «déflexion caractéristique » (d_{car}), qui est calculé à partir de la formule suivante (*Cerema et IDRRIM 2016*) :

$$d_{car} = d_{moy} + 1.96 \times \sigma_d$$

En fonction de la valeur calculée de la déflexion caractéristique, la chaussée est classée en 9 catégories indiquées sur le tableau 3.4 (*Cerema et IDRRIM 2016*).

Tableau 3.4 : Classes de la déflexion caractéristique (*Cerema et IDRRIM 2016*)

Classes	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	de 75 à 99	de 100 à 149	de 150 à 199	de 200 à 299	≥ 300

Le tableau 3.5 récapitule les valeurs de la déflexion caractéristique calculées dans les cinq campagnes de mesure et pour les trois zones étudiées.

Tableau 3.5 : Déflexions caractéristiques

Date	Appareil de mesure	T° C	Sur tranchée			Hors tranchée			Au voisinage de la tranchée		
			d_{moy}	σ_d	dc x 1/100 mm	d_{moy}	σ_d	dc x 1/100 mm	d_{moy}	σ_d	dc x 1/100 mm
17/12/2014	Poutre Benkelman	10	6.70	5.30	17.09	9.44	6.61	22.39	15.00	9.09	32.82
17/06/2015	Poutre Benkelman	29	34.97	9.00	52.61	22.75	5.31	33.15	32.87	6.95	46.49
26/10/2015	Poutre Benkelman	9	15.49	4.26	23.84	8.90	4.75	18.21	14.67	4.82	24.12
17/12/2015	Poutre Benkelman	15	13.25	7.25	27.45	12.90	7.75	28.10	13.00	11.94	36.41

28/06/2016	Défectographe FLASH	23.3	35.73	2.51	40.65	32.24	2.28	36.71	---	---	---
------------	------------------------	------	-------	------	--------------	-------	------	--------------	-----	-----	-----

3.5.1. Etat structural de la chaussée

Les résultats numériques obtenus dans le tableau 3.4 sont représentés graphiquement sur la figure 3.13. L'observation de cette figure montre que la chaussée en zone de la tranchée se comporte visiblement mieux que le reste de la chaussée durant les quatre premiers mois après la reconstruction du site. En revanche, les valeurs de la déflexion caractéristique indiquent que ce comportement s'inverse au fil du temps.

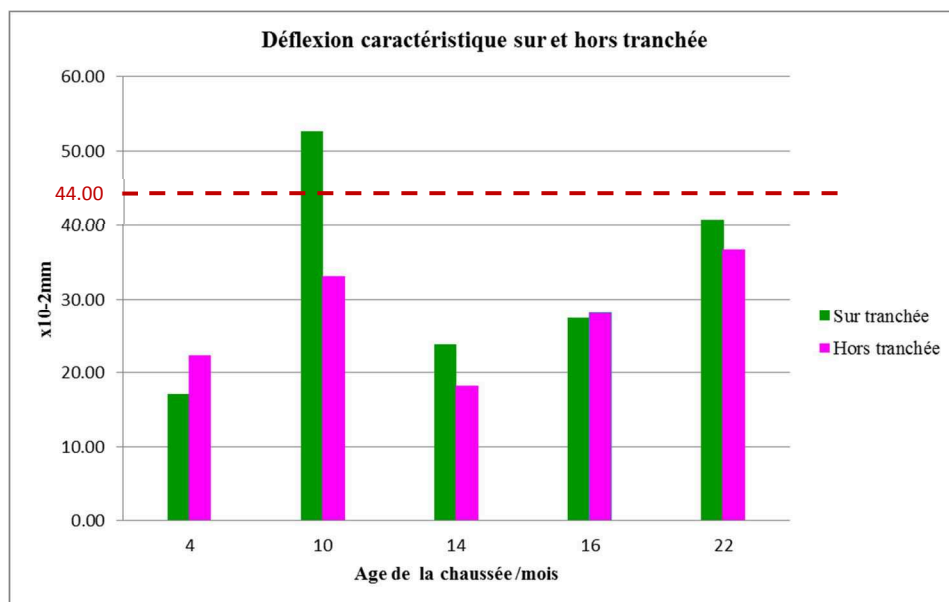


Figure 3.13 : Déflexion caractéristique sur et hors tranchée

De l'autre côté, la déflexion caractéristique peut être employé pour évaluer le comportement global de la chaussée. Le tableau 3.6 décrit le comportement d'une chaussée bitumineuse épaisse à partir de la déflexion caractéristique et la classe du trafic (*Cerema et l'IDRRIM 2016*).

Il est rappelé que pour le site de l'expérimentation, l'agressivité du trafic TMAJ ≥ 300 , donc sa classe du trafic est T1-T0.

Tableau 3.6 : Classes de la déflexion caractéristique-chaussée bitumineuse épaisse (Cerema et IDRRIM 2016)

Classes	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Seuils de déflexion caractéristique en 1/100 ^e mm	de 0 à 19	de 20 à 29	de 30 à 44	de 45 à 74	de 75 à 99	de 100 à 149	de 150 à 199	de 200 à 299	≥ 300
Niveau global de comportement en fonction de la classe de trafic									
T1 - T0	Bon		Moyen		Mauvais				
T3 - T2	Bon			Moyen		Mauvais			
T5 - T4	Bon				Moyen		Mauvais		

La comparaison des résultats obtenus avec les seuils indiqués au tableau 3.6 permet de constater que, deux ans après la mise en œuvre du site, la chaussée présente généralement un comportement structural satisfaisant.

3.5.2. Zone d'influence de la tranchée

Afin de déterminer l'impact de la tranchée sur la zone adjacente, les courbes de déflexion caractéristique des trois zones d'étude sont représentées en fonction de l'âge de la chaussée sur la figure 3.14. Cette figure ne prend pas en compte la cinquième campagne de mesure pour l'absence de mesures au voisinage de la tranchée.

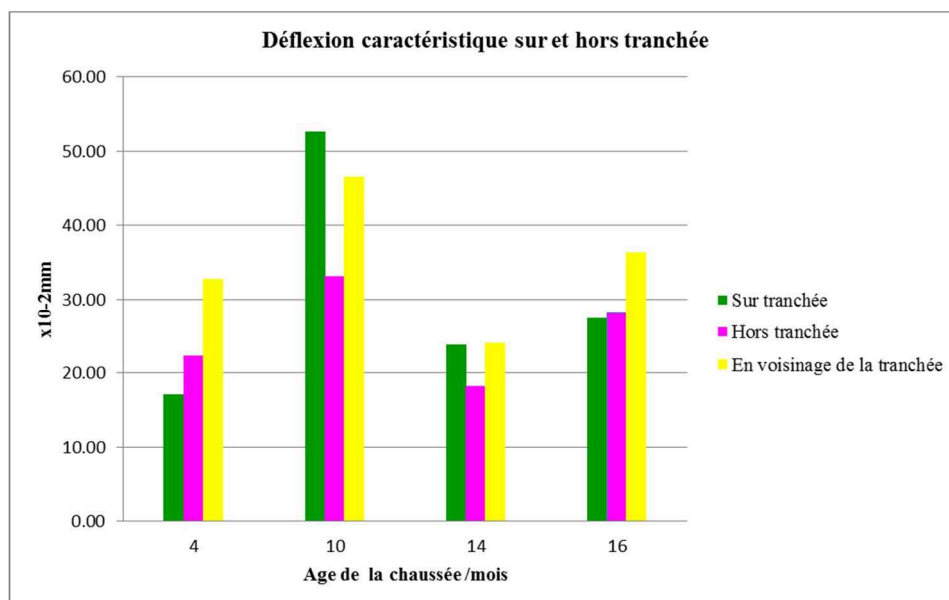


Figure 3.14 : Déflexion caractéristique sur, hors et au voisinage de la tranchée

Comme on peut observer sur la figure 3.14, la déflexion caractéristique calculée au voisinage de la tranchée est toujours supérieure à celle de la zone hors de la tranchée et elle est souvent supérieure à celle calculée sur la tranchée. Cela permet de conclure que l'impact de la tranchée sur la zone adjacente s'étend sur une zone d'une largeur supérieure ou égale **0.5m**.

3.5.3. Impact de la température

La température est un paramètre clé qui influence de façon significative le comportement structural des chaussées flexibles. Cette influence peut être observée sur la figure 3.15, qui représente la variation de la déflexion caractéristique sur les deux zones : sur la tranchée et hors de la tranchée en fonction de la variation de la température de surface de chaussée.

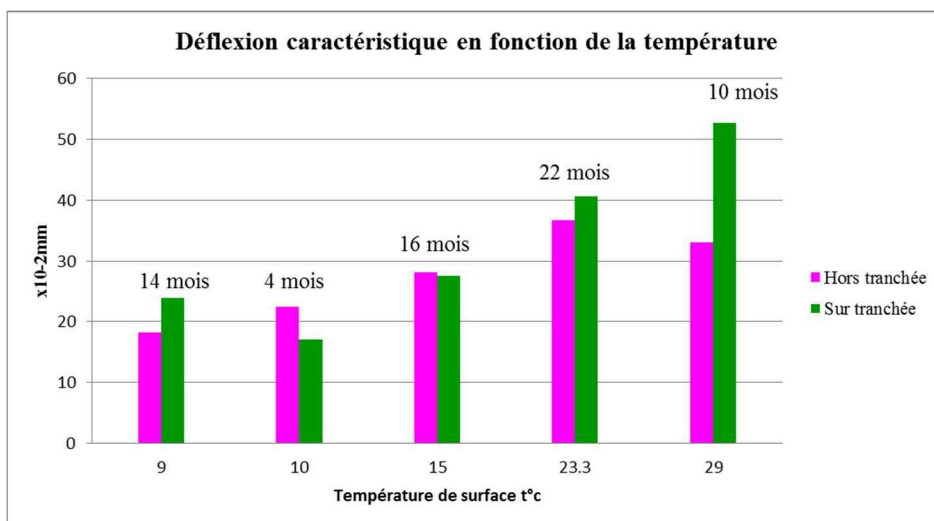


Figure 3.15 : Déflexion caractéristique sur, hors et au voisinage de la tranchée

Comme on peut constater sur la figure 3.15, la température agit de façon progressive sur le comportement de la structure de la chaussée. Cette influence est nettement plus importante en zone de la tranchée qu'en dehors de celle-ci, notamment lorsque la température dépasse les 15°. Il est à noter à ce stade, que sous les températures élevées, le comportement de la tranchée est dominé par l'effet de la température par rapport à l'impact de l'âge de celle-ci.

3.6. Conclusions

Ce chapitre a comporté une présentation des résultats des cinq essais de déflexion qui ont été réalisés entre 2014 et 2016. Les 4 premiers essais ont été réalisés par la poutre Benkelman, le Défectographe FLASH a été utilisé pour réaliser le cinquième essai.

Les mesures de déflexions ont été transformées pour les ramener à la température de référence (15°C).

L'analyse de la déflexion caractéristique, qui constitue un indicateur important du comportement structural de la chaussée, a montré :

- Durant les premiers quatre mois après la mise en œuvre du site expérimental, la chaussée en zone de tranchée se comporte mieux que la zone située hors tranchée. En revanche, ce comportement s'inverse au fil du temps.
- Durant les deux premières années après la reconstruction du site, la chaussée et la tranchée présentent un comportement satisfaisant.
- La tranchée influence la zone adjacente jusqu'à une distance de l'ordre de **0,5 m**.
- La température a une influence importante sur le comportement de la chaussée et la tranchée. Cette influence est plus importante que celle de l'âge.

Chapitre 4

Traitement et analyse des mesures

4.1. Introduction

Ce chapitre présente l'exploitation des mesures réalisées par les différents capteurs. Dans un premier temps, on présente la méthodologie suivie dans l'analyse des données. Ensuite, nous allons analyser les données des déformations pour dégager les grandes tendances de comportement de la chaussée et de la tranchée sous l'effet du trafic et l'influence de la tranchée sur ce comportement. Le chapitre est consacré par la suite à l'analyse de l'influence de la température sur l'effet de la tranchée sur le comportement de la chaussée. L'effet de l'humidité ne sera pas analysé, à cause de sa très faible variation dans la chaussée au cours de l'expérimentation.

4.2. Méthodologie

L'instrumentation de l'expérimentation donne une très grande quantité de données. Pour chaque événement (passage de véhicule), les capteurs de déformations mesurent les déformations causées par ce passage tous les 0.8 seconde. Ces données sont stockées sur un disque local et sur un serveur via une connexion 3G. Afin d'exploiter toutes ces données, nous procédons à une simplification en remplaçant la réponse de chaque capteur à un événement par une grandeur caractéristique. Le traitement des mesures brutes comprend trois phases.

Phase 1 : Création de la base de données initiale

Dans un premier temps, les fichiers texte enregistrés par les différents capteurs sont récupérés et organisés sous forme de tableaux dans une base de données. Chaque tableau est composé de lignes et colonnes dont les en-têtes représentent les noms des capteurs. La première

colonne est réservée au temps. C'est-à-dire chaque mesure indiquée dans la base de données est fonction du nom de capteur et du temps d'enregistrement. Les mesures brutes, enregistrées par un capteur de déformation donné peuvent être représentées sous forme de signaux comme illustré sur la figure 4.1. Sur cette figure, les pics de signaux représentent les déformations maximales mesurées lors des événements enregistrés.

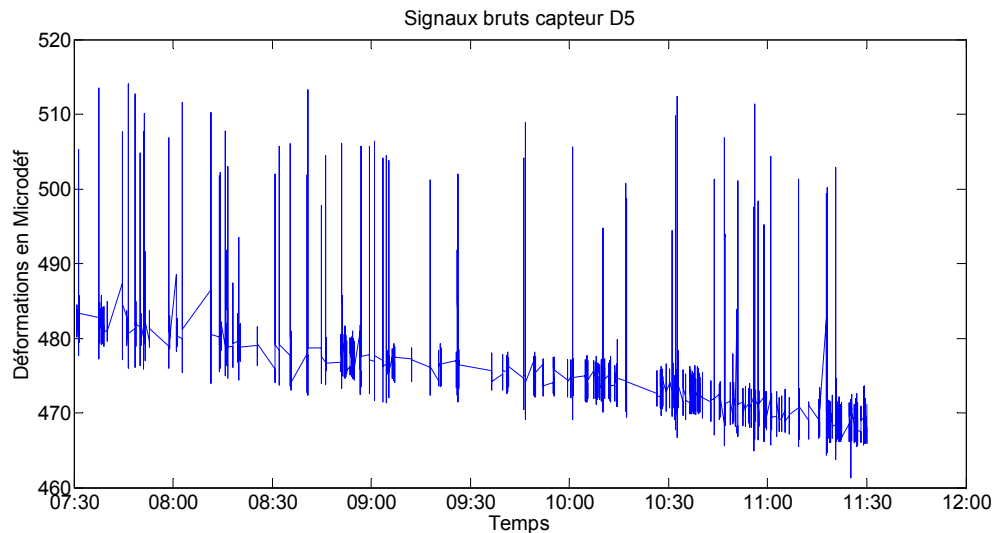


Figure 4.1 : Exemple type des mesures brutes de déformation longitudinale

Phase 2 : Mettre les données dans des références liées aux évènements

Cette phase consiste à mettre les mesures dans des références liées aux évènements. L'objectif est de translater les évènements pour mettre leurs références à « 0 ». La figure 4.2 montre les données de la figure 4.1 après transformation.

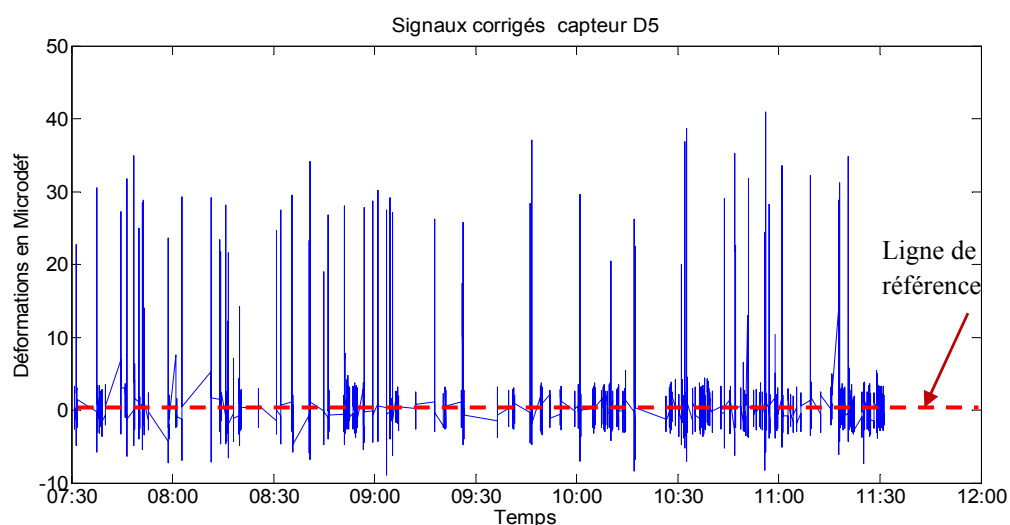


Figure 4.2 : Exemple de signaux de déformations longitudinales corrigés

Dans ce contexte, le passage de deux charges successives sur un capteur se traduit par deux signaux successifs dont les intensités maximales dépendent des magnitudes des charges. La figure 4.3 représente les signaux dus au passage d'un poids lourd composé de deux essieux sur un capteur de déformation longitudinale. Sur cette figure, les pics de ces signaux dont les intensités maximales sont D1 et D2 correspondent aux essieux avant et arrière, et l'intervalle temporel (Δt) dépend bien évidemment de la vitesse du poids lourd et de la distance entre ses deux essieux.

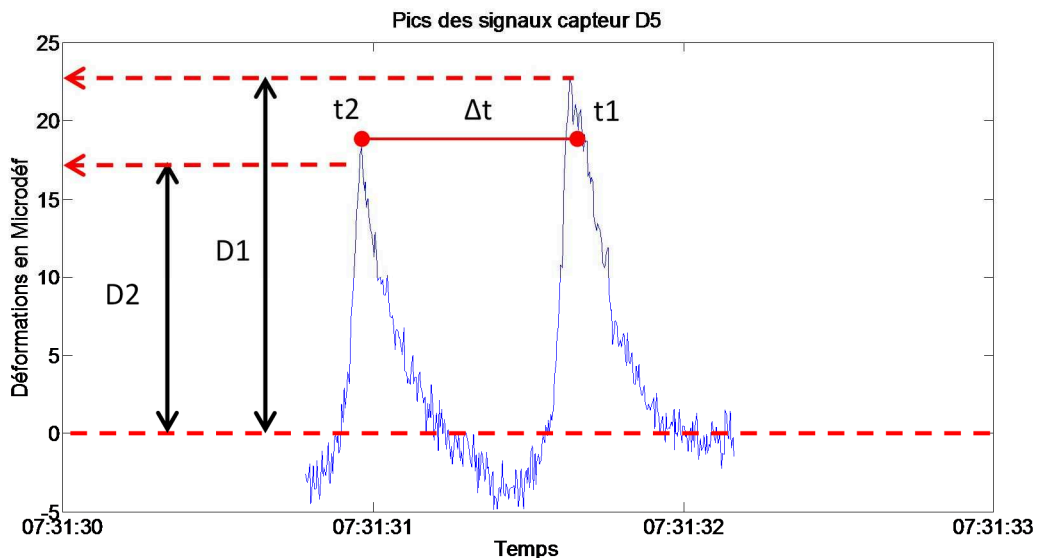


Figure 4.3 : Signaux de déformation longitudinale dus au passage d'un poids lourd

De l'autre côté, le passage d'une charge roulante sur plusieurs capteurs successifs engendre des signaux successifs dont les intervalles temporels dépendent des distances entre les capteurs et de la vitesse de roulement de la charge. A titre d'illustration, la figure 4.4 représente les signaux dus au passage d'une charge roulante sur les capteurs de déformation successifs D2, D5, D10 et D29 espacés de 4, 0.5 et 2.5m.

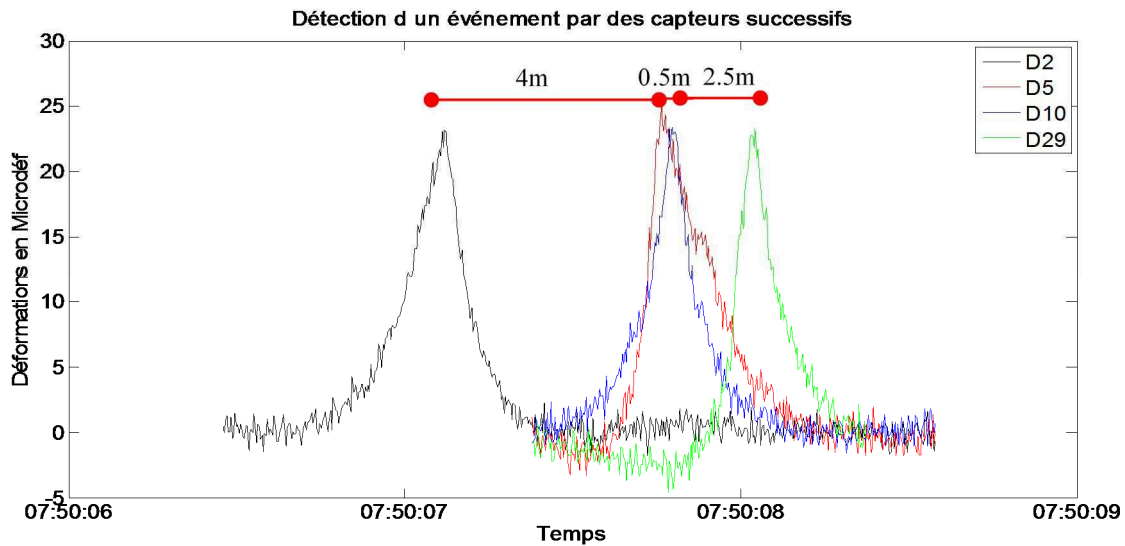


Figure 4.4 : Signaux dus au passage d'une charge roulante sur des capteurs de déformation successifs

Phase 3 : Enregistrement des pics des signaux

Dans cette phase, les pics des signaux obtenus en phase 2 sont enregistrés dans une nouvelle base de données. Avec cette transformation, chaque évènement sera caractérisé par une valeur unique correspondant à son pic. La figure 4.5 montre les résultats obtenus après la transformation des données de la figure 4.2.

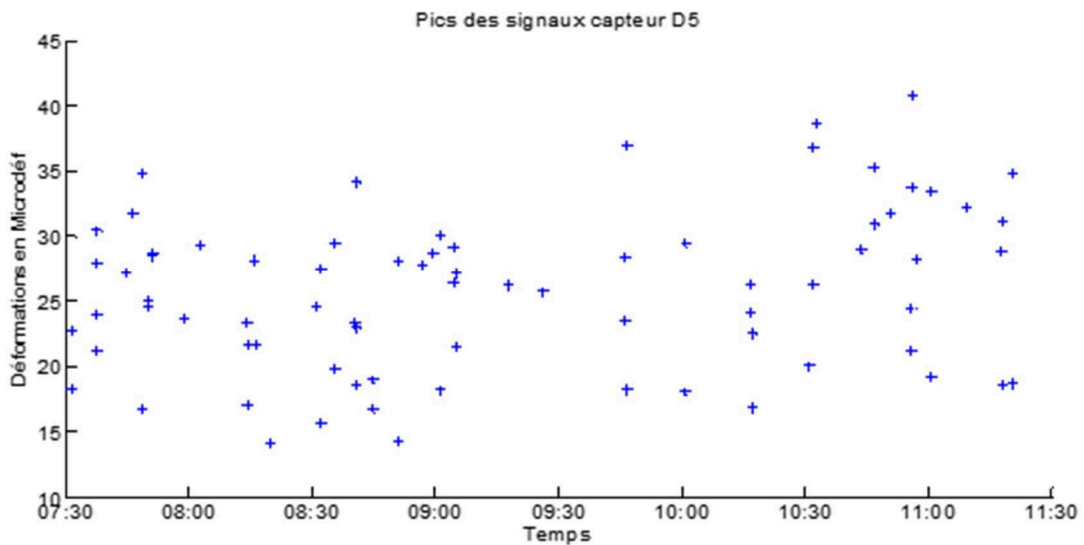


Figure 4.5 : Jeu de points représentant des signaux de déformation

4.3. Analyse globale des données

L'analyse porte sur les 3 grandeurs mesurées, la température, l'humidité et les déformations.

Les données utilisées dans cette l'analyse ont été extraites à l'aide de l'outil de SMARTVIA Viewer d'Eurovia, qui a réalisé l'expérimentation et les mesures.

4.3.1 Analyse de la température

La figure 4.6 donne les variations de la température mesurée dans la chaussée à 6 cm de profondeur (en rouge) et sa comparaison avec la température donnée par météo France. On note une bonne cohérence des mesures réalisées et des données de météo France. On note aussi des variations importantes de la température dans la chaussée sur la période d'observation. En effet, la température varie entre -4° en Décembre et 24° en Octobre. Cette importante variation va nous permettre par la suite d'analyser l'effet de la température sur le comportement de la tranchée et de la chaussée.

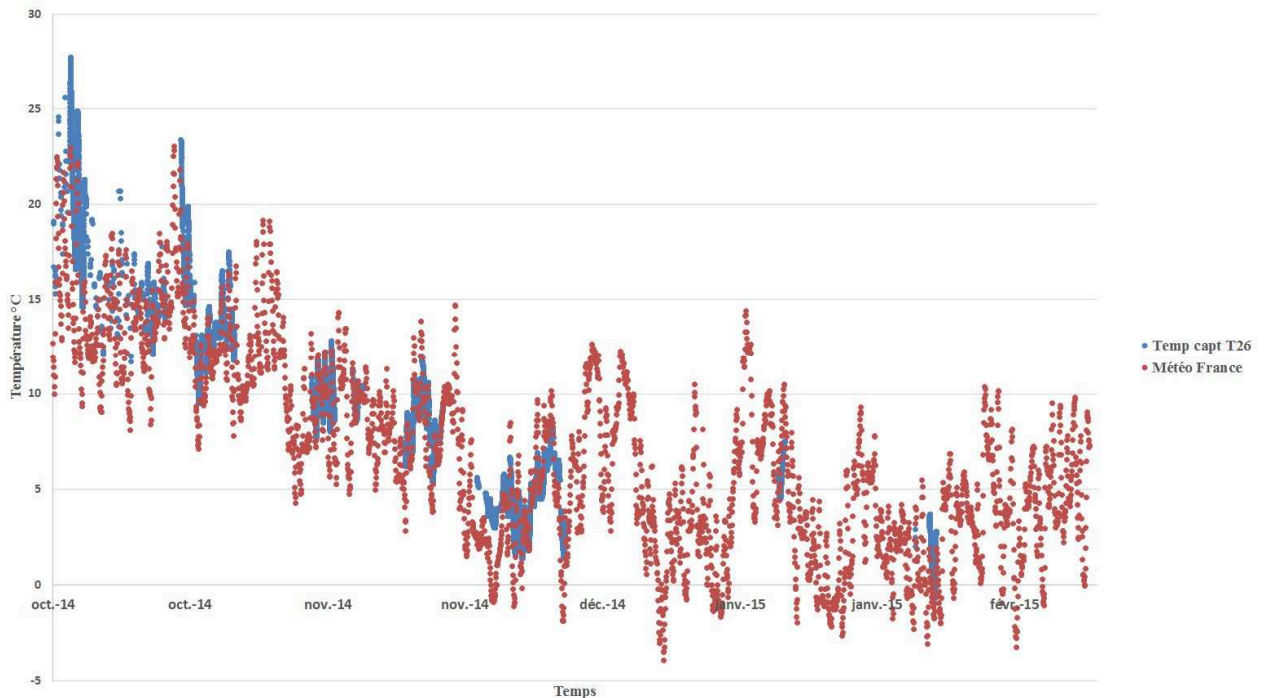


Figure 4.6 : Variation de la température dans la chaussée

4.3.2 Analyse d'humidité

La figure 4.7 illustre les variations d'humidité mesurées par les capteurs d'humidité H10 (au point P0 à 46 cm de profondeur) et H09 (au point P0 à 26 cm de profondeur). On note que l'humidité relative reste très faible, à savoir proche de 0. Cette faible variation de l'humidité indique une très bonne étanchéité de la chaussée et le maintien de cette étanchéité pendant la période d'observation. Compte tenu de la faible variation de cette étanchéité, elle ne peut pas être considérée dans la suite de l'analyse.

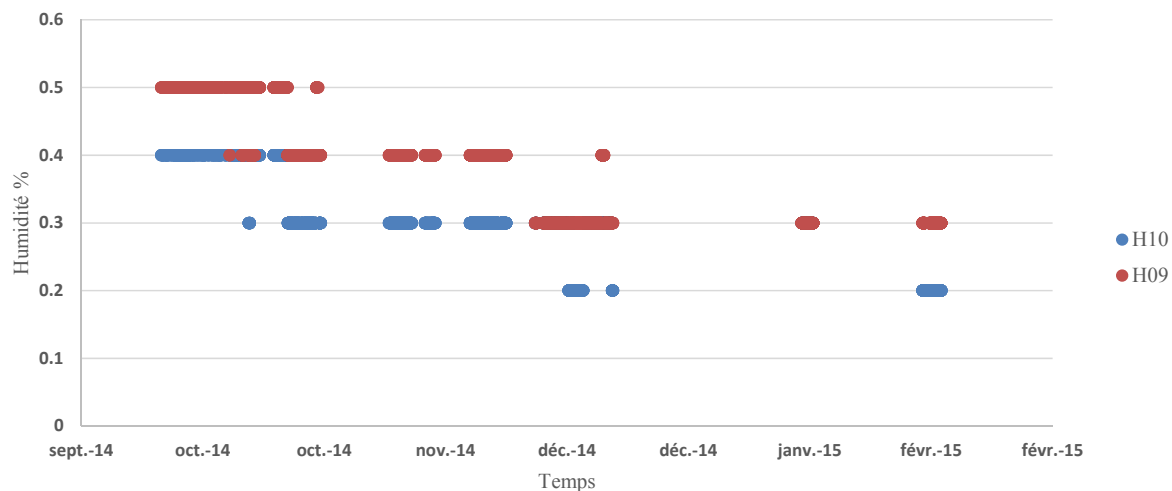


Figure 4.7 : Variation de l'humidité dans la chaussée

4.3.3 Analyse des déformations

L'analyse porte sur les mesures effectuées par la jauge de déformation longitudinale D2, placée au point P0 de la chaussée (point de référence de la chaussée) et la jauge de déformation D29 placée au point P5 dans la tranchée. Les deux jauges sont positionnées à la même profondeur et dans le même axe de la chaussée.

La figure 4.8 illustre la distribution des déformations pour des événements enregistrés par la jauge de déformation D2 excédant 10 μdef . On note que la déformation maximale est de 59 μdef avec une moyenne de 27 μdef . On note des faibles événements avec des déformations supérieures à 40 μdef .

La figure 4.9 illustre la distribution des déformations pour des événements enregistrés par la jauge de déformation D29 excédant 10 μdef . On note que la déformation maximale est

de 98 μdef avec une moyenne de déformations de 28 μdef . On note aussi des faibles évènements avec des déformations supérieures à 40 μdef .

La figure 4.10 illustre une comparaison des déformations mesurées dans la chaussée (D2) et dans la trachée (D29) correspondant à des charges élevées (déformations supérieures à 40 μdef). On note que les déformations élevées (supérieures à 50 μdef) sont concentrées dans la tranchée.

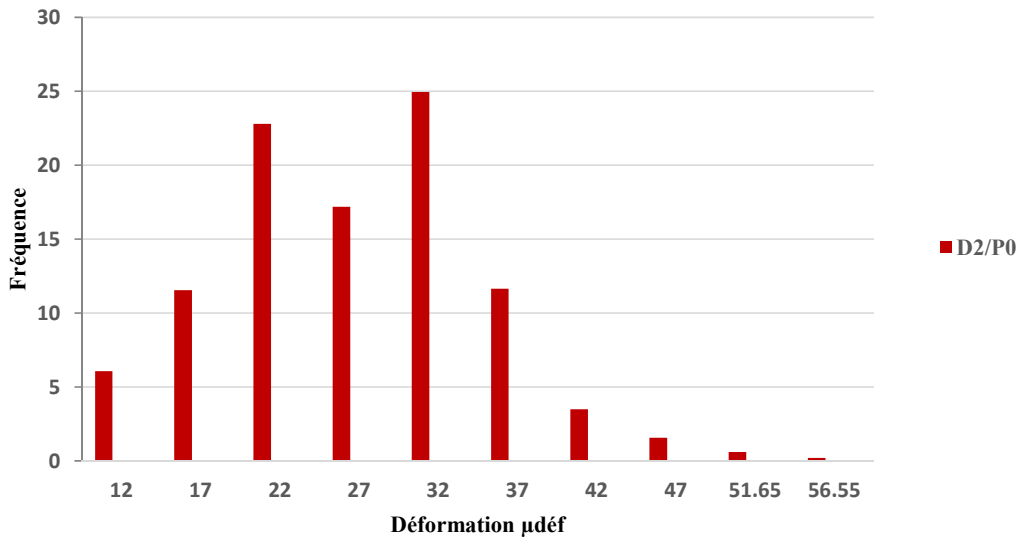


Figure 4.8: Distribution des déformations maximales mesurées par la jauge de déformation D2 (point de référence de la chaussée)

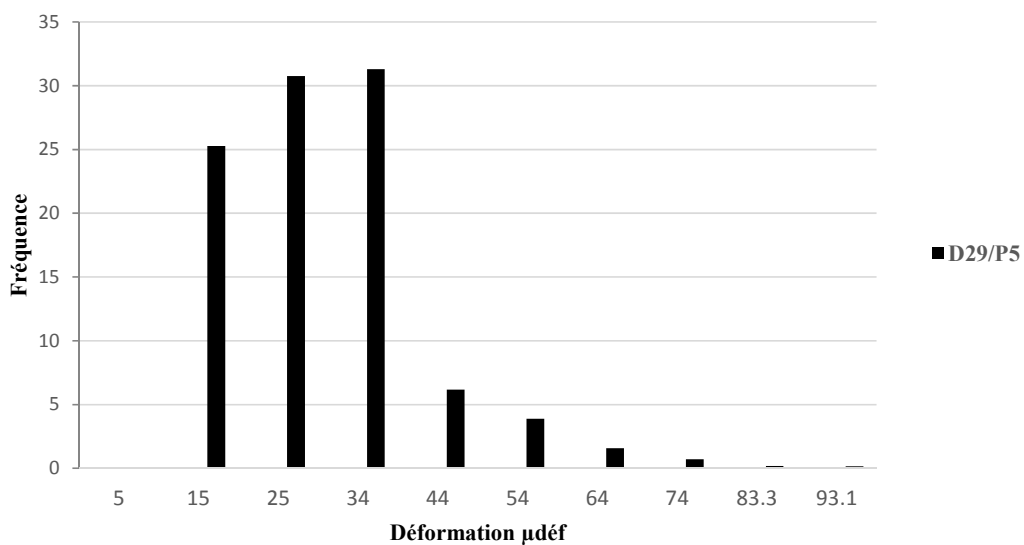


Figure 4.9: Distribution des déformations maximales mesurées par la jauge de déformation D29 (point de référence dans la tranchée)

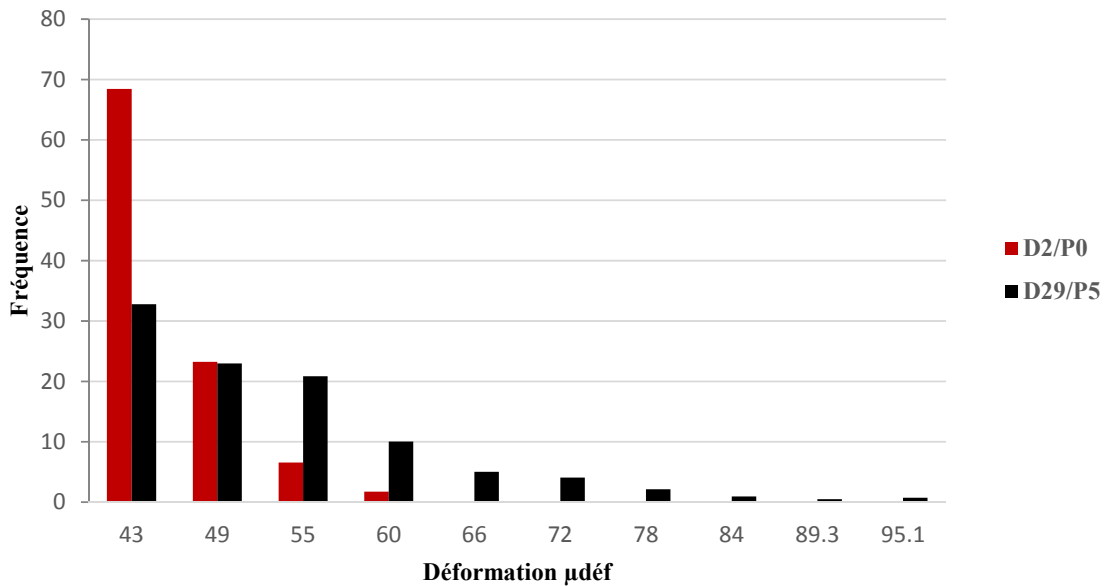


Figure 4.10: Comparaison des distributions des déformations mesurées par les jauges D2 et D29 (supérieures à 40 μdef)

4.4. Impact de la température

Cette section s'intéresse à l'analyse de l'influence de la température sur le comportement de la tranchée et de la chaussée. L'analyse sera basée sur des mesures effectuées à différentes températures. La température de référence est celle du capteur T26 qui se trouve au nœud P0 à 6 cm de profondeur.

L'analyse des données comporte les deux étapes suivantes :

- La première étape consiste à étudier la variation de la température sur le comportement de la tranchée par rapport à son environnement sur une période de trois mois
- La deuxième étape a pour objectif de comparer localement, sur des courtes périodes composées de quelques heures, les résultats obtenus dans l'analyse globale effectuée en étape 1.

4.4.1. Analyse globale

Afin d'étudier l'impact de la température sur le comportement de la chaussée et de la tranchée, nous avons considéré les mesures des capteurs de déformations D2 (point P0, référence de la chaussée), D29 (point P5, dans la tranchée) et D10 (à 0,5 m de la tranchée).

La température de la surface de la chaussée a été classée en cinq catégories allant de 1° à 28°C. Le tableau 4.1 donne les différentes catégories de température. La catégorie 1 correspond aux températures basses enregistrées au mois de décembre alors que la catégorie 5 correspond aux températures élevées mesurées en Octobre. Le tableau 4.2 donne le nombre d'évènements enregistrés par catégorie et par capteur. On note que la catégorie 1 comporte un nombre très élevé d'évènements (supérieur à 2 000), alors que la catégorie 4 comporte le plus faible nombre d'évènements, qui reste cependant supérieur à 100.

La figure 4.11 illustre les intervalles du temps et les valeurs de température pour les 5 catégories.

Tableau 4.1 : Les classes de température

Cat 1	1-7°
Cat 2	7-12°
Cat 3	12-17°
Cat 4	17-22°
Cat 5	22-28°

Tableau 4.2 : Nombre d'évènements enregistrés par capteur en fonction des classes de température

Catégorie de température	Age moyen de la tranchée	Nombre d'évènements par capteur		
		D2	D10	D29
Cat 1	4 mois +1 S	2342	2223	2001
Cat 2	3 mois +1.5 S	776	1273	653
Cat 3	2 mois +2 S	347	233	184
Cat 4	2 mois +1 S	118	106	128
Cat 5	2 mois +1 S	304	301	329

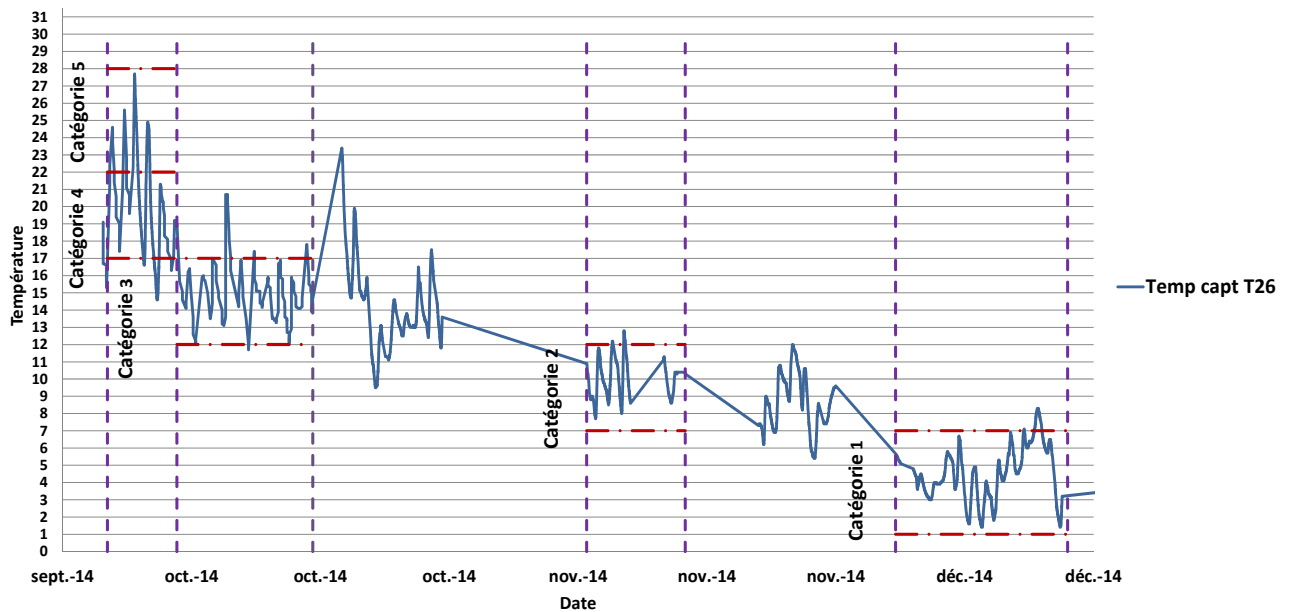


Figure 4.11 : Localisation des périodes correspondantes aux catégories de température

Les figures 4.12 et 4.13 illustrent les déformations enregistrées par les trois jauges aux faibles températures (Cat 1, 1-7°). On note que les déformations sont très proches, notamment entre les capteurs D2 et D29. Le capteur D10 (proximité de la tranchée) indique des déformations légèrement supérieures. Il est à noter que cette catégorie de température comporte un très grand nombre d'évènements (supérieur à 2000 par capteur). Ce nombre élevé d'évènement conforte la conclusion qu'à faibles températures, le comportement de la tranchée est très proche de celui de la chaussée.

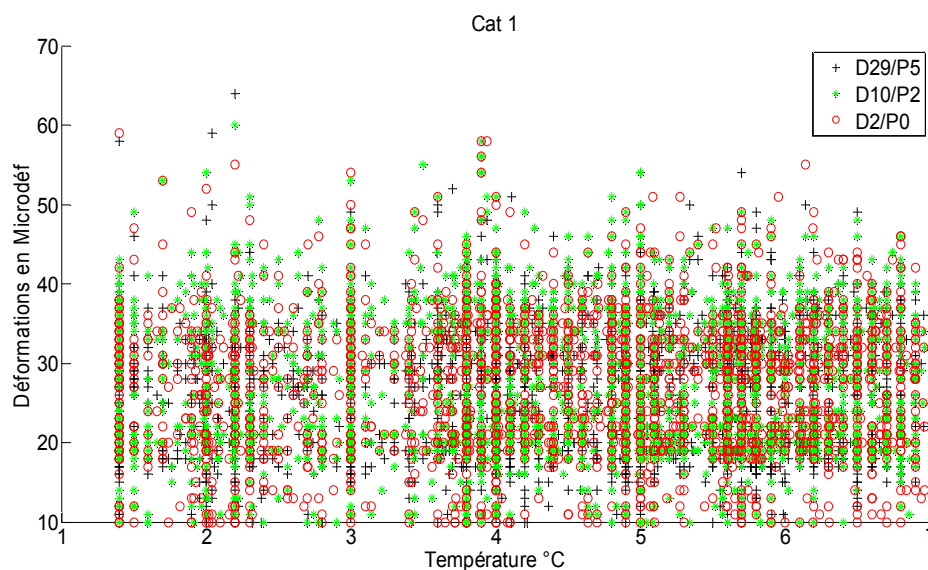


Figure 4.12 : Déformations longitudinales des 3 capteurs aux faibles températures (Cat1, 1-7°)

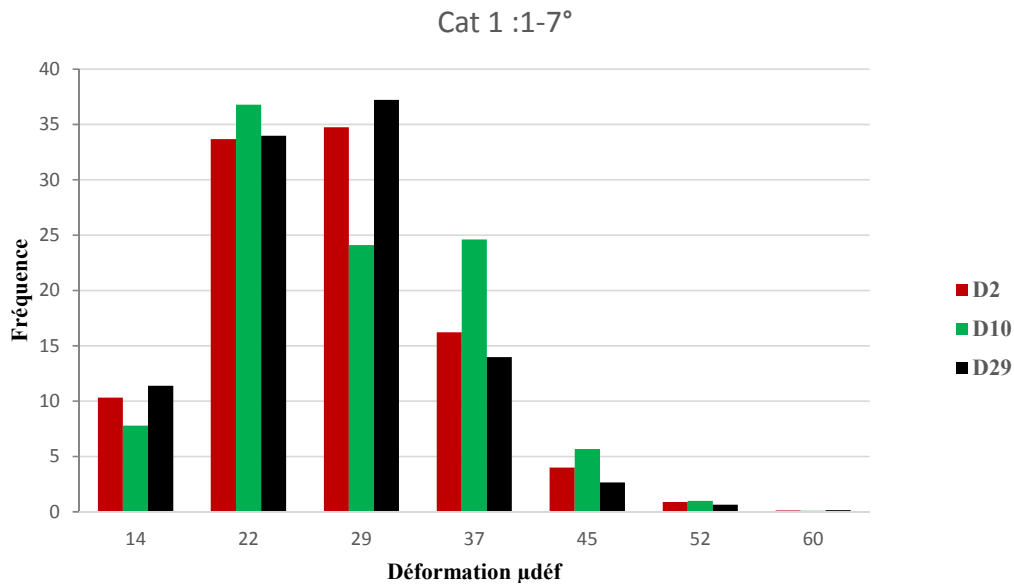


Figure 4.13 : Distribution des déformations longitudinales des 3 capteurs aux faibles températures (1° < T ≤ 7°)

Les figures 4.14 et 4.15 illustrent les déformations enregistrées aux températures élevées (Cat 5 ; 22° < T ≤ 28°). On note les déformations mesurées par les deux jauges de la chaussée (D2 et D10) sont très proches, mais que les déformations dans la tranchée sont plus élevées que celles dans la chaussée. Ce résultat est particulièrement marqué pour les déformations supérieures à 40 µdef. Ce résultat indique que la tranchée subit à température élevée et pour des évènements intenses des déformations plus élevées que la chaussée, ce qui marque un certain affaiblissement par rapport à la chaussée. Il est à noter que le nombre d'évènements enregistrés dans cette catégorie de température est de l'ordre de 300 par capteur, ce qui est significatif.

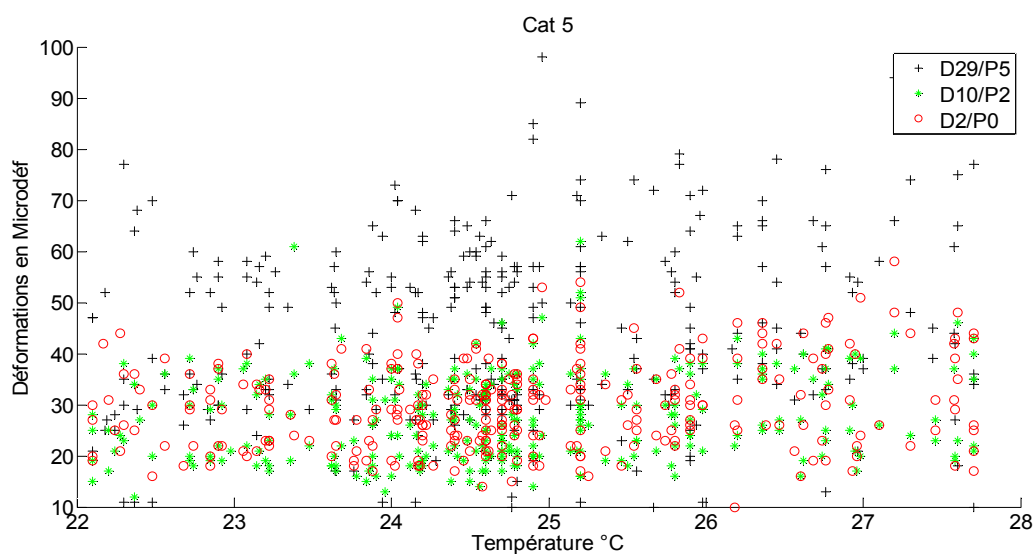


Figure 4.14 : Déformations longitudinales aux températures élevées (Cat 5, 22° < T ≤ 28°)

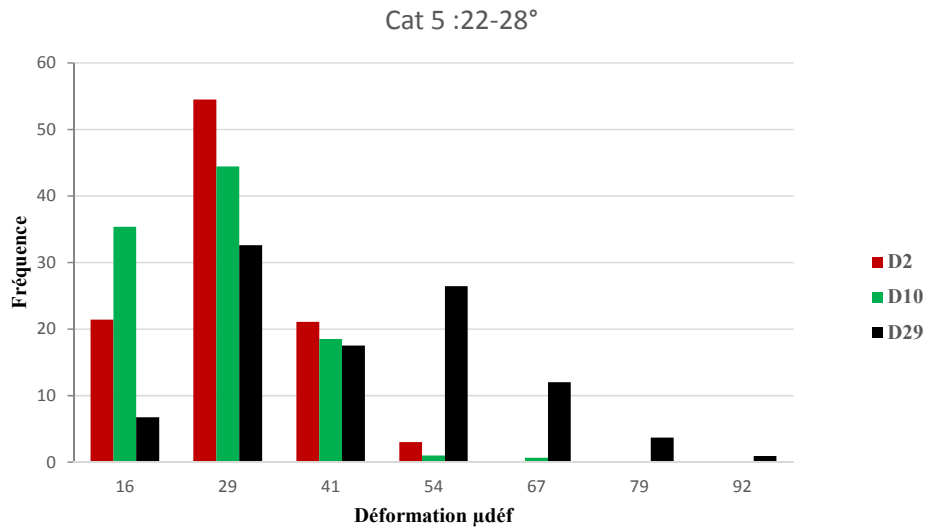


Figure 4.15 : Distribution des déformations longitudinales aux températures élevées (Cat 5, 22° < T ≤ 28°)

La figure 4.16 illustre les déformations enregistrées aux températures de la catégorie 2 (7° < T ≤ 12°C). On note que ces résultats sont très proches de ceux observés avec les températures de la catégorie 1, à savoir que les trois capteurs donnent des résultats proches. A cette catégorie de température la réponse de la tranchée est proche de celle de la chaussée.

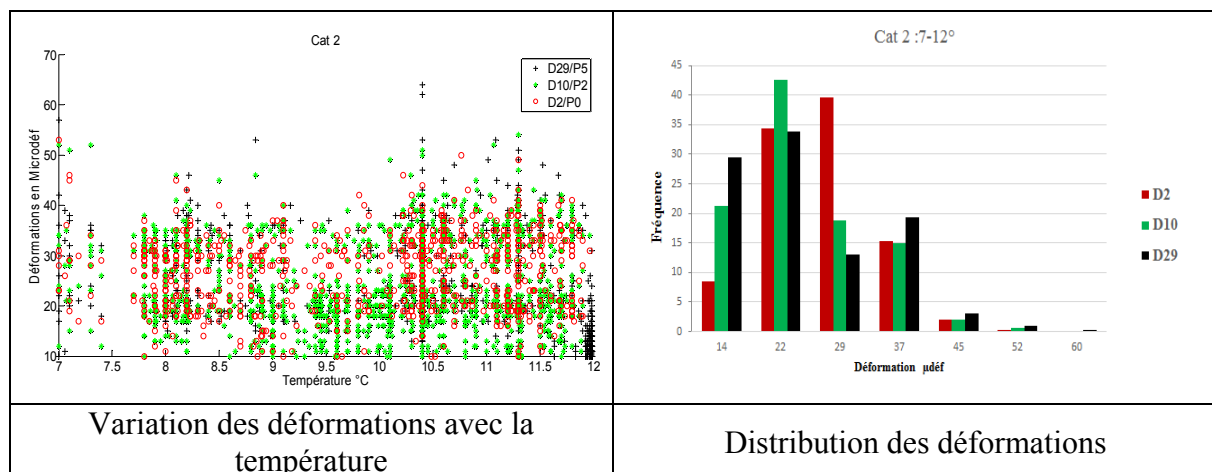


Figure 4.16 : Déformations longitudinales enregistrées pour les températures de la catégorie 2 (7° < T ≤ 12°)

Les figures 4.17 et 4.18 illustrent les déformations enregistrées aux températures de la catégorie 3 (12° < T ≤ 17°c) et de la catégorie 4 (17° < T ≤ 22°c). On note que ces résultats sont

proches de ceux observés avec les températures de la catégorie 5, à savoir que pour les évènements intenses, la tranchée subit des déformations plus élevées que celles de la chaussée.

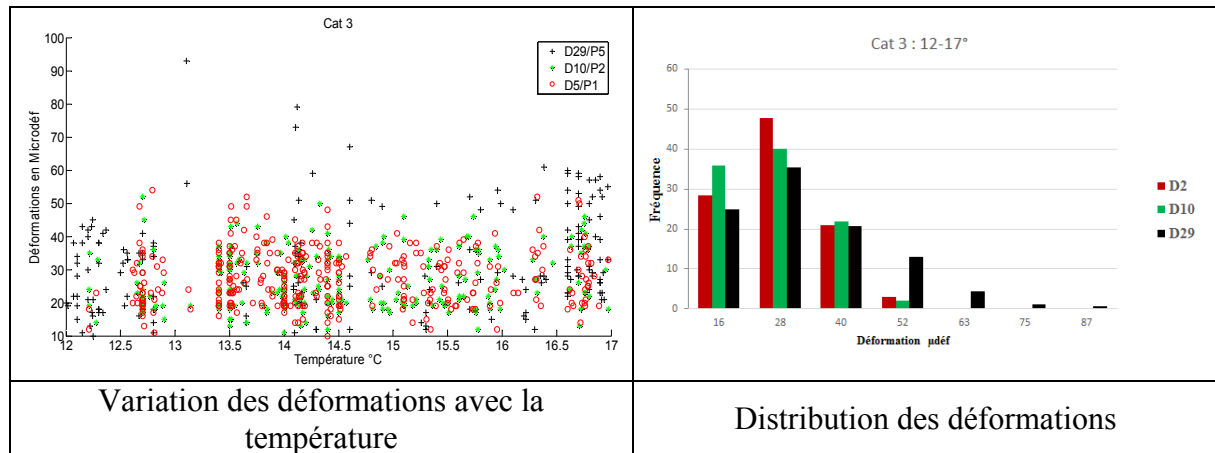


Figure 4.17 : Déformations longitudinales enregistrées pour les températures de la catégorie 3 ($12 < T \leq 17^\circ$)

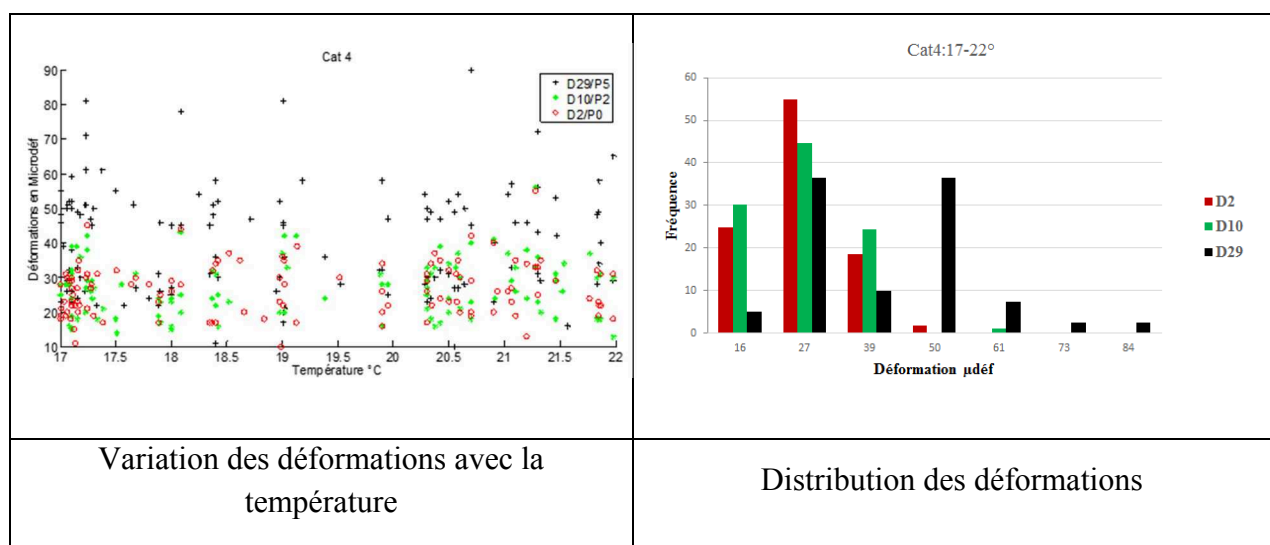


Figure 4.18 : Déformations longitudinales enregistrées pour les températures de la catégorie 4 ($17 < T \leq 22^\circ$)

La figure 4.19 donne une synthèse de l'ensemble des résultats des mesures. Cette figure montre bien que pour des températures inférieures à 14° , la réponse de la tranchée est très proche de celle de la chaussée, mais quand la température dépasse 14° , la tranchée subit pour les grands évènements des déformations plus élevées que celles subies par la chaussée. Ceci indique un certain affaiblissement de la tranchée quand la température dépasse 14° .

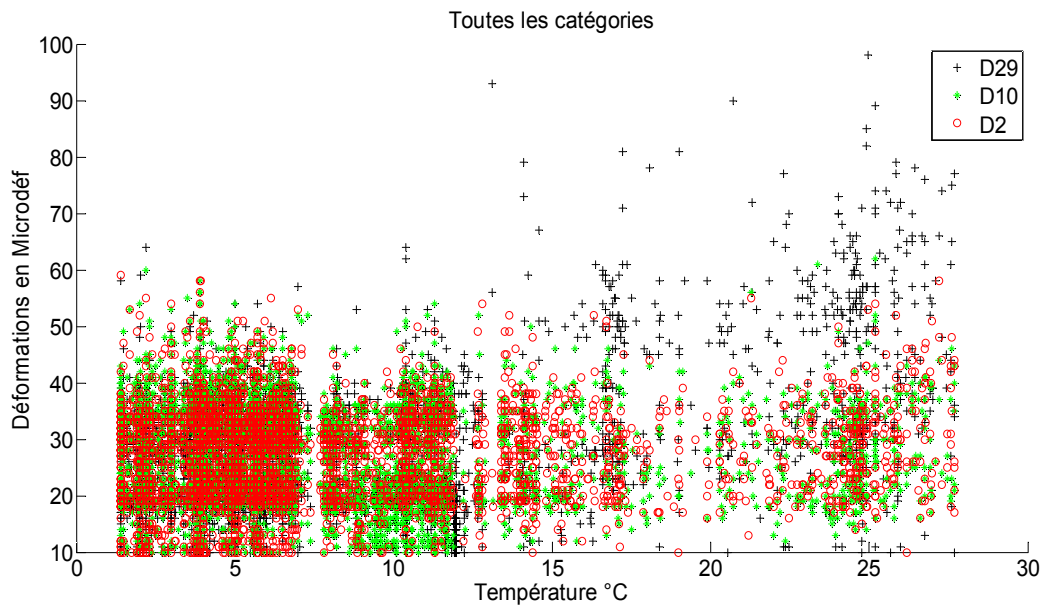


Figure 4.19 : Influence de la température sur les déformations longitudinales dans la chaussée (D2 et D10) et la tranchée (D29)

4.5. Analyse de corrélations – Influence de la tranchée sur la réponse de la chaussée

Dans cette section, on analyse les corrélations des déformations mesurées dans la tranchée (captateur D29 au point P5), à 0,5 m de la tranchée (captateur D10 au point P2) et à 1 m de la tranchée (captateur D5 au point P1) avec les déformations de références (capteur D2 au point P0). Ces analyses sont effectuées pour des mesures réalisées le 3 octobre 2014, le 23 octobre 2014, le 19 novembre 2014 et le 6 février 2015. Les températures relevées pour ces 4 jours sont résumées dans le tableau 4.3. La valeur moyenne pour ces 4 jours varie entre 0,7 et 25,2°.

Tableau 4.3 : Données de l'analyse locale

Date	Température min °C	Température max °C	température moyenne °C	Nombre d'évènements		
				D2-D5	D5-D10	D2-D29 ou D30
03/10/2014	22.4	27.7	25.2	167	179	158
23/10/2014	11.1	11.6	11.3	49	48	41
19/11/2014	9.1	9.2	9.2	108	109	108
06/02/2015	-0.7	2.8	0.7	138	143	142

Corrélation mesures chaussée (D2 au point P0) – tranchée (D29 au point P5)

La figure 4.20 illustre les corrélations entre les déformations mesurées dans la chaussée (D2 au point P0) et celles mesurées dans la tranchée (D29 au point P5). Ces résultats confirment ceux présentés ci-dessus, à savoir qu'aux faibles températures ($T_{moyenne} = 0,7 ; 9,2 \text{ et } 11,3^\circ$), les déformations dans la chaussée et dans la tranchée sont très proches, mais qu'à températures élevées ($T_{moyenne} = 25,2^\circ$), les déformations dans la tranchée sont plus élevées que celles dans la chaussée. Ce résultat confirme l'affaiblissement de la tranchée aux températures élevées.

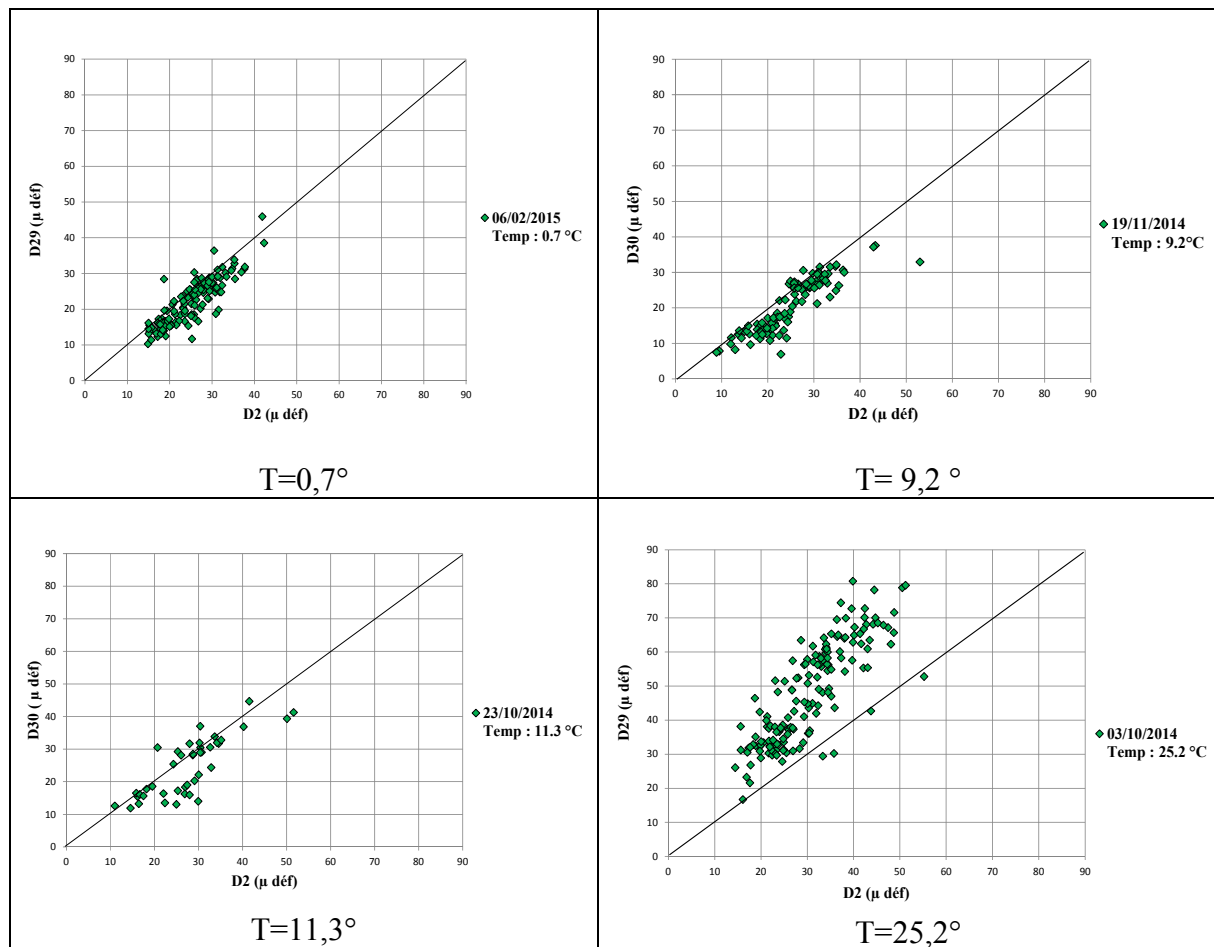


Figure 4.20 : Corrélation entre les déformations dans la chaussée (D2 au point P0) et celles dans la tranchée (D29 au point P5)

Corrélation mesures chaussée (D2 au point P0) – à 0,5 m de la tranchée (D10 au point P2)

La figure 4.21 illustre les corrélations entre les déformations mesurées dans la chaussée (D2 au point P0) et celles mesurées à 0,5m de la tranchée (D10 au point P2). Ces résultats confirment aussi ceux présentés ci-dessus, à savoir que la réponse de la proximité de la tranchée n'est pas affectée par la présence de la tranchée et ceci pour les 4 niveaux de températures de la chaussée.

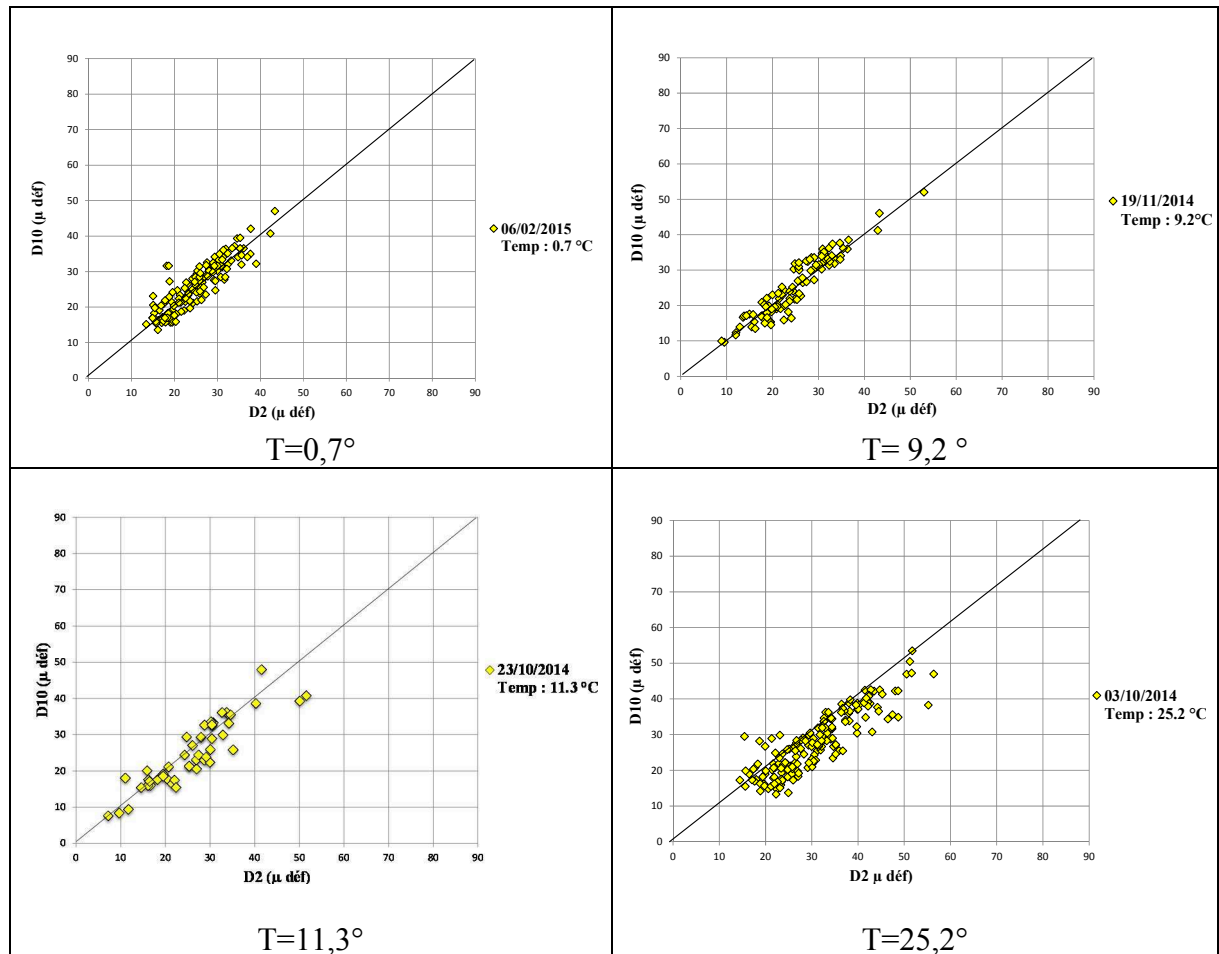


Figure 4.21 : Corrélation entre les déformations dans la chaussée (D2 au point P0) et celles à 0.5m de la tranchée (D10 au point P2)

Corrélation mesures chaussée (D2 au point P0) – à 1 m de la tranchée (D5 au point P1)

La figure 4.22 illustre les corrélations entre les déformations mesurées dans la chaussée (D2 au point P0) et celles mesurées à 1 m de la tranchée (D5 au point P1). Ces résultats sont très proches de celles obtenus avec le point P2, qui confirment que la chaussée à proximité de la tranchée n'est pas affectée par cette dernière.

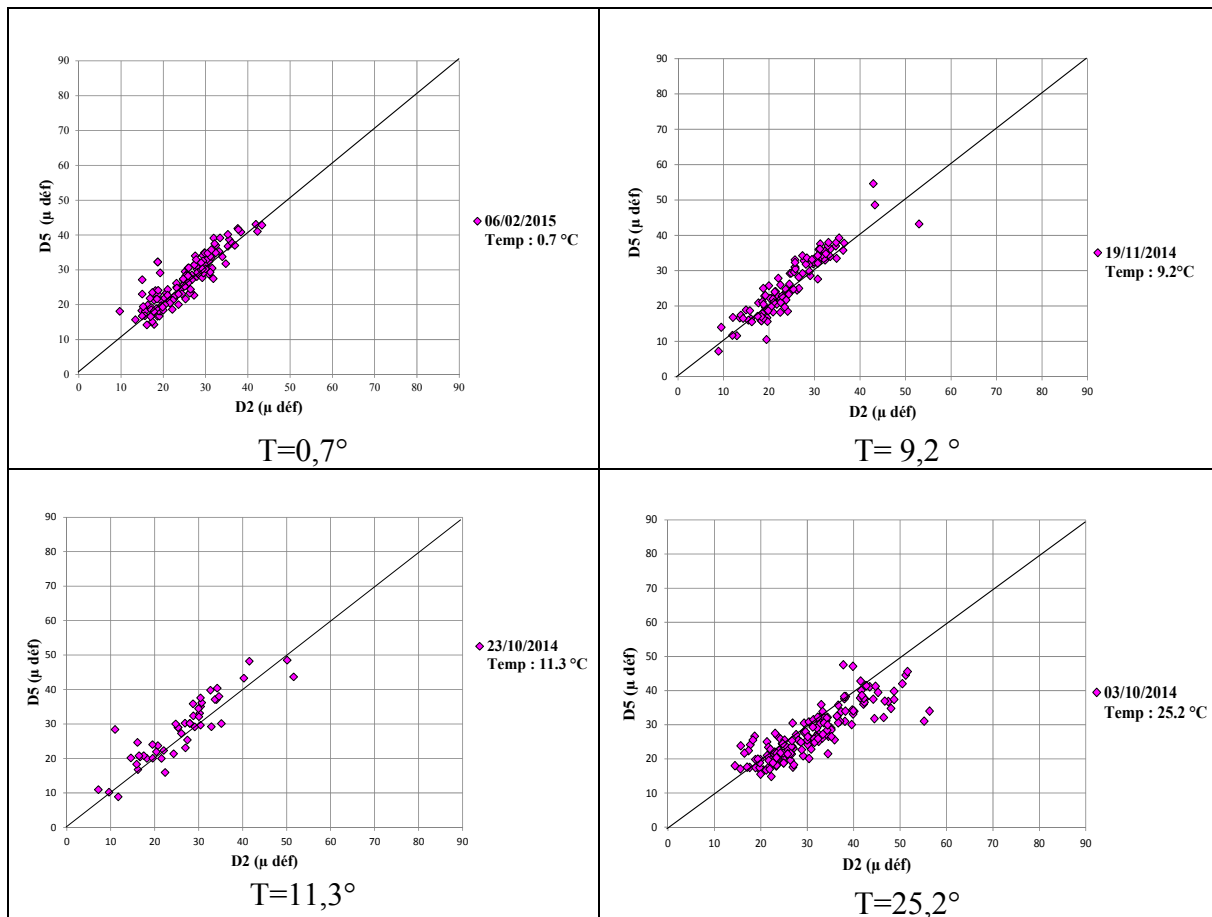


Figure 4.22 : Corrélation entre les déformations dans la chaussée (D2 au point P0) et celles à 1 m de la tranchée (D5 au point P1)

4.6. Conclusions

Ce chapitre a présenté l'exploitation des mesures réalisées lors de l'expérimentation de tranchée réalisée à l'entrée du campus de la Cité Scientifique. Cette expérimentation a permis d'obtenir une très grande quantité de données sur les déformations causées dans la chaussée et la tranchée lors de passage d'un véhicule (événement). Elle a aussi donné la température et l'humidité dans la chaussée.

L'analyse des mesures des déformations a été axée sur les déformations maximales mesurées lors des événements subis par la chaussée. Chaque événement a été caractérisé par la déformation maximale correspondante.

L'analyse globale des déformations a montré que lors des événements intenses, les déformations dans la tranchée sont plus fortes que celles dans la chaussée.

L'analyse des déformations aux différents niveaux de température a montré deux tendances : (i) pour des températures inférieures à 14°, la réponse de la tranchée est très proche de celle de la chaussée, mais (ii) aux températures plus élevées que 14°, la tranchée subit des déformations plus élevées que la chaussée, notamment pour les événements intenses.

L'analyse des corrélations entre les déformations dans la chaussée avec celles dans la tranchée et à ses proximités (0,5 et 1 m) a montré que la proximité de la tranchée n'est pas affectée par la présence de la tranchée.

Conclusion générale

La tranchée représente l'une des principales causes de dégradation du patrimoine de voirie urbaine. Elle influence considérablement la performance et la durée de service des chaussées en milieu urbain. En conséquence, elle implique des coûts supplémentaires liés aux travaux de réhabilitation précoce des chaussées. Malgré la présence de nombreux guides techniques et normes pour la bonne réalisation des tranchées, les gestionnaires de voiries sont souvent confrontés aux conséquences des tranchées.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte des travaux visant l'amélioration des pratiques dans la construction des tranchées. Il a été mené dans le cadre d'un projet de collaboration entre la MEL, le laboratoire LGCGE et EUROVIA. Le projet a comporté la réalisation d'une expérimentation à grande échelle à l'entrée du campus de l'Université Lille1. La chaussée du site a été reconstruite, selon les règles de dimensionnement de Lille Métropole (*Lille Métropole 2000*) ; la tranchée a été réalisée conformément aux règles de l'art en la matière (*SETRA 2001*). Le site a été instrumenté par près de 90 capteurs de déformation, de pression, de température, d'humidité.

L'analyse bibliographique a montré que peu de travaux de recherche ont été récemment menés sur le comportement de la tranchée. Des études réalisées, principalement aux Etats Unis indiquent que la présence de la tranchée conduit à une dégradation de la chaussée sur la tranchée et sur une zone adjacente de 1 m. Elles montrent aussi que les tranchées réduisent le niveau de service des chaussées et, par conséquence, leurs durées de service. Cette réduction de la durée de service, estimée entre 17% et 50%, s'associe à une perte de la capacité portante qui peut être convertie en couche d'asphalte équivalente dont l'épaisseur moyenne est autour de 4 cm. Cela implique, en conséquence, des coûts supplémentaires relatifs aux travaux d'entretien et de de réhabilitation des chaussées.

Une grande quantité de données de mesures a été enregistrée au cours de la période allant du 19/10/2014 au 14/06/2015. Le traitement de ces données a permis d'établir le bilan suivant de fonctionnement des capteurs :

- 90% des capteurs de déformation, d'humidité et de température ont fonctionné après la construction de la chaussée.
- Le taux de fonctionnement des capteurs de température et d'humidité est plus important que celui des capteurs de déformation. Il est de l'ordre de 70% pour les capteurs de température et 60% pour les capteurs d'humidité contre 30% pour les capteurs de déformation.
- Les données des capteurs de pression n'ont pas pu être exploitées.

Une analyse des données basée sur les valeurs maximales des déformations longitudinales a permis de dégager les conclusions suivantes :

- Lors des événements intenses, les déformations dans la tranchée sont plus importantes que celles dans la chaussée.
- Sous l'effet de la température, on peut distinguer deux cas de figure :
 - o Lorsque la température est inférieure à 14° : les réponses de la tranchée et de la chaussée sont très proches.
 - o Pour des températures supérieures à 14° : les déformations de la tranchée sont plus importantes que celles de la chaussée, notamment pour les événements intenses.
- La zone de la chaussée située au voisinage de la tranchée n'est pas affectée par la présence de la tranchée.
- Une variation très faible de l'humidité relative est observée sur la période d'enregistrement des données. Cette faible variation indique qu'une très bonne étanchéité de la chaussée et le maintien de cette étanchéité pendant la période d'observation.

De l'autre côté, une étude de l'état structural de la chaussée a fait l'objet de cinq campagnes de déflexion qui ont été réalisées à l'aide de la poutre Benkelman et au Défectographe FLASH entre 2014 et 2016. L'analyse de ces mesures montre que :

- Durant les premiers quatre mois après la mise en œuvre du site expérimental, la chaussée en zone de tranchée se comporte mieux que la zone située hors tranchée ; ce comportement s'inverse au fil du temps.
- La tranchée influence la zone adjacente jusqu'à une distance de l'ordre de 0,5 m.
- La température influence considérablement le comportement de la chaussée et la tranchée. Cette influence est plus importante en zone de la tranchée qu'en dehors de celle-ci lorsque la température dépasse les 15°.
- Durant les deux premières années après la reconstruction du site, les trois zones de la chaussée présentent un comportement généralement satisfaisant.

En perspectives, il serait intéressant de réaliser une modélisation 3D et la valider sur les résultats des mesures, notamment ceux relatifs à l'impact de la température sur le comportement de la tranchée. De l'autre côté, il est important de réaliser un étalonnage des jauges de déformation dans la chaussée afin de mieux quantifier et interpréter les réponses mécaniques de la chaussée vis-à-vis des charges du trafic.

Références

1. Arudi R., 2000. **Suggested Improvements to Cincinnati's Permit Fee Structure for the Street Right-of-Way Permit Program** (Final Report to the City of Cincinnati), Cincinnati Infrastructure Institute, University of Cincinnati.
2. Bodocsi A., Pant P.D., Aktan AB. and Arudi R.S., 1995. **Impacts of Utility Cuts on Performance of Street Pavements**, Final Report, Research performed by the Cincinnati Infrastructure Institute for the City of Cincinnati and APWA.
3. SETRA, 2001. **Etude et réalisation des tranchées** Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, Guide technique, ISBN 2-11-091784-9.
4. Khogali W.E.I., and Mohammed E., 1999. **Managing Utility Cuts: Issues and Considerations in Innovations in Urban Infrastructures**. APWA International Public Works Congress and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 14-17.
5. American Public Works Association (APWA), 1991. **Recovering Cost of Pavement Cuts**, Proc., Annual Meeting.
6. Jones C.J.F.P., 1999. **Policy, Incentives and Barriers to the use of Trenchless Technology, in Life Extension of Technologies Workshop**, New York, August 25-26, USA.
7. Henique J. et al, 2015. **Smart roads for sustainable roads, monitoring utility cuts impacts to conserve pavement**, 22nd ITS World Congress, Bordeaux, France, Paper number ITS-1237.

8. Jensen, K. A., Schaefer, V. R., Suleiman, M. T., & White, D. J., 2005. **Characterization of utility cut pavement settlement and repair techniques**. In Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Iowa State University, Ames, Iowa.
9. Karim M., Rizvi R., Henderson, V., Uzarowski, L., Chyc-Cies, J., 2014. **Effect of Utility Cuts on Serviceability of Pavement Assets – A Case Study from The City of Calgary**, Annual Conference of the Transportation, Association of Canada Montreal, Quebec.
10. Ainley Group Consulting Engineers Planners, 2000. **Management of regional rights-of-way for utility, construction and maintenance activities - consultant report**, region of Ottawa Carleton, Canada.
11. Department of Public Works, 1998. **The Impact of Excavation on San Francisco Streets**, Department of Public Works, City and County of San Francisco and Blue Ribbon Panel on Pavement Damage.
12. Adedapo A. A. 2007. **Pavement Deterioration and PE Pipe Behaviour Resulting from Open-cut and HDD Pipeline Installation Techniques**, Ph.D dissertation, University of Waterloo, Canada.
13. Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI), 2007. **Repair of Utility Cuts Using Interlocking Concrete Pavers**. Tech Spec No. 7, August 2013. http://www.icpi.org/sites/default/files/Tech_Spec_7_Web.pdf
14. Fwa T. F., 1987. **Water-induced distress in flexible pavement in a wet tropical climate**. Transportation Research Record, (1121).

15. LCPC, 1998. **Catalogue des dégradations de surface des chaussées**-version 1998. Techniques et Méthodes des laboratoires des ponts et Chaussées-Méthode d'essai LCPC, complément de la méthode d'essai n° 38-2, (52).
16. Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM), 2016. **GEPUR : Gestion et Entretien du Patrimoine Urbain et Routier** - Méthodes, outils et techniques Volet n°1 : Routes Interurbaines et traverses d'agglomérations.
17. Blond E. et al, 2000. **Analyse de la problématique du renforcement de tranchées d'utilités publiques par des géosynthétiques**. INFRA 2000 ,13 au 15 novembre 2000, Centre des congrès de Laval, Laval, Québec.
18. Yapp M., Lundy J., and Chu S., 2001. **Impact of Utility Cuts on Pavement Performance in the City of Seattle**. 5th International Conference on Managing Pavements, Seattle, Washington, August 2001.
19. City of Seattle, 2000. **Impact of Utility Cuts on Performance of Seattle Streets**. 178.1.30. City of Seattle, Seattle Transportation, Seattle, WA.
20. Nichols Consulting Engineers, CHTD, 2007. **Evaluation of pavement cuts**. Retrieved March 2, 2009.
21. Lee, S. Q., & Lauter, K. A. ,1999. **Impact of utility trenching and appurtenances on pavement performance in Ottawa-Carleton**. Environment and Transportation Department, Regional Municipality of Ottawa-Carleton, Ottawa, Ontario, Canada.
22. CHEC Consultants, INC, 2002. **Trench Cut Damage Evaluation**, Report for Santa Clara County.
https://www.sccgov.org/sites/rda/info/news/Documents/trench_cut_santa_clara_report_revised3.pdf

23. CHEC Consultants, INC, 1996. **Impact of utility cuts on street pavements**. City of Sacramento, Californie.
24. Statewide Urban Design and Specifications (SUDAS), 2016. **Urban Design Manuals, Chapter 9: Utilities, section D : Utility Cut Restoration**. http://www.iowasudas.org/manuals/design/archived-design/pdf/2016_Edition/Chapter_09-2016.pdf
25. Schaefer V., Suleiman M., White D., Swan C., & Jensen, K., 2005. **Utility Cut Repair Techniques—Investigation of Improved Utility Cut Repair Techniques to Reduce Settlement in Repaired Areas**. SUDAS. Final Report. Iowa DOT Project TR-503. Ames, Iowa: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.
26. American Public Works Association (APWA), 1997. **Managing Utility Cuts**. Kansas City, Missouri.
27. Shahin, M.Y., Chan, S., et Villacorta, R., 1996. « **The Effects of Utility Cut Patching on Pavement Life Span and Rehabilitation Costs** », City of Los Angeles, CA.
28. Peters, T., 2002. **City combats damage to city streets caused by utility cuts**. Public Works 133 (4).
29. ARE, Inc. and IGT, 1989. **Comprehensive Study to Evaluate Repair Patches for Asphalt Paved Streets, For Southern California Gas Co.**
30. Todres H. A., and C. L. Wu, 1990. **Theoretical Analysis of Utility Cut Restoration in Asphaltic Pavement**. Volume I, report by Construction Technologies Laboratories, Inc. submitted to Institute of Gas Technology, Chicago, IL, October.

31. Todres H.A., and Baker P.E. ,1996. **Utility Research in Pavement Restoration**, Presented at APWA International Public Works Congress and Exposition, Washington, D.C..
32. Todres H., and Saha N.,1996. **Asphalt Paving repairs Study – Theoretical Modeling**, APWA Reporter November 1996.
33. Todres H.A., 1999. **Utility Cuts in Asphalt Pavements: Best Engineering Practices**, in Innovations in Urban Infrastructure, APWA International Public Works Congress and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 14-17.
34. AFNOR Norme NF P 11-300. **Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.**
35. SETRA, 1994. **Remblayage des tranchées et réfection des chaussées**, Guide technique.
36. Ghataora G.S., Alobaidi I.M., 2000. **Assessment of the performance of trial Trenches backfilled with cementitious materials**. International Journal of Pavement Engineering 1 (4).
37. Monahan E. J., 1994. **Construction of Fills**. 2nd Ed. New York, NY: John Wiley & SonsInc.
38. Amini F., 2003. **Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in MDOT pavement design and construction**. FHWA/MS-DOT-RD-03-162. Jackson, MS: Department of Civil Engineering, Jackson State University.
39. Spangler, M.G. and Handy, R. L.,1982. **Soil Engineering**. 4th ed. New York, NY: Harper and Row, Publishers.

40. Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981. **An Introduction to Geotechnical Engineering**. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Prentice Hall.
41. Navel Facilities Engineering Command, 1986. **Design Manual NAVFAC DM-7: Compaction, Earthwork, and Hydraulic Fills**. Philadelphia, PA.
42. STBA, 1988. **Guide pratique d'utilisation de la méthode ACN-PCN**.
43. SETRA, 1990. **Traversées d'agglomération - Matériaux d'aménagement sur chaussées**, Guide technique.
44. SETRA, 1996. **L'entretien courant des chaussées**, Guide pratique.
45. SETRA, 1994. **Conception et dimensionnement des structures de chaussée**, Guide technique.
46. Yu, J., 2005. **Pavement service life estimation and condition prediction** (Doctoral dissertation, University of Toled, Ohio).
47. Shahin, M. Y., 1994. **Pavement management for airports, roads and parking lots**. Chapman & Hall, New York.
48. CAQ, 2014. **Gestion des chaussées aéroportuaires pour les petits et moyens aéroports**. Colloque du CAQ Septembre 2014, Faustin Habiyaremye, ing., MSc, MBA.

49. City and country of Honolulu, 2012. **Pavement condition report**. Department of Facility Maintenance. <http://www.oahumpo.org/wp-content/uploads/2013/02/Pavement-Condition-Report-Final.pdf>
50. Shahin, M.Y., Darter, M.I., Kohn, S.D., 1976. **Development of a Pavement Maintenance Management System**, Vol I, II, V, Airfield Pavement Condition Rating; US Air Force Civil Engineering Center.
51. ASTM D 6433 – 07, 2009. **Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys**. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
52. Shahin, M.Y., et Crovetti, J. A., 2002 .**Analysis of the Impact of Utility Cuts on Pavement Life and rehabilitation Cost in Prince George's County**. MD, Prince George's County, MD.
53. Shahin, M.Y., Crovetti, J. A, and Franco, J.L. Jr., 1986. **Costing the Effects of Utility Cuts in the Life Cycle of Asphalt Pavements**, City of Burlington, VT.
54. Shahin, M.Y., Chan, S., and Villacorta, R., 1996. **The Effects of Utility Cut Patching on Pavement Life Span and Rehabilitation Costs**, City of Los Angeles. CA.
55. City of Phoenix, 1990. **The Effects of Utility Cut Patching on Pavement Performance in Phoenix**, Arizona, Project 499, City of Phoenix, July 18, 1990.
56. Transtec Inc., 1995. **City of Austin Utility Cut Study, Volume I, Engineering Analysis and Utility Cut Manual Review**, a final report submitted to the City of Austin, Department of Public Works, Street and Bridge Division, Austin, Texas.

57. Tighe, S., Knight, M., Papoutsis, D., Rodriguez, V. and Walker, C. (2002). **User cost savings in eliminating pavement excavations through employing trenchless technologies.** Canadian Journal of Civil Engineering, 29(5), 751-761.
58. Baaj H., 2012. **Dégradation et usure des revêtements routiers souples.** Techniques de l'ingénieur, Réf : 42235210.
59. Berthier J., 2009. **Dimensionnement des chaussées routières.** Techniques de l'ingénieur, Réf : 42235210.
60. Perret J., 2003. **Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic.** Thèse présentée à l'EPFL Lausanne.
61. SETRA, 1991. **Catalogue des types de routes en milieu interurbain.**
62. Lille Métropole communauté urbaine, 2000. **Catalogue de dimensionnement des chaussées.**
63. Diffiné, T., 2012. **Analyse des déformations d'une chaussée contenant des matériaux bitumineux recyclés à froid** (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
64. Bodin, D., 2002. « **Modèle d'endommagement cyclique : Application à la fatigue des enrobés bitumineux** ». Thèse de doctorat en génie civil, Nantes, France, École Centrale de Nantes.
65. Di Benedetto, H., et Corté, J.F., 2004. **Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants.** Coll. « Lavoisier ».

66. Nguyen, Mai Lan. 2009. « **Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux** ». Thèse de doctorat en génie civil, Lyon (France), École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) – Université de Lyon.
67. Soltani, M.A.A, 1998. « **Comportement en fatigue des enrobés bitumineux** ». Thèse de doctorat en génie civil, Lyon (France), Institut National des Sciences Appliquées (INSA).
68. El Abd, A., 2006. « **Développement d'une méthode de prédiction des déformations de surface des chaussées à assises non traitées** ». Thèse de doctorat en génie mécanique, France, Université de Bordeaux.
69. Timm, D. et Priest A., 2004. **Dynamic pavement response data collection and processing at the NCAT Test Track. Coll. « NCAT Report »**, NCAT Report 04-03, Auburn, Alabama : Auburn University.
70. Wurckler, Sébastien. 2010. **Développement de techniques d'auscultation de chaussées**. Projet de fin d'étude en génie civil, Strasbourg, Institut National des Sciences Appliquées (INSA).
71. NF P98-200-2, 1992. Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 2 : **détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec le déflectomètre Benkelman modifié.**
72. NF P98-200-3, 1993. Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 3 : **détermination de la déflexion avec le déflectographe 02.**
73. NF P98-200-4, 1993. Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 4 : **détermination de la déflexion avec le déflectographe 03.**

74. NF P98-200-5, 1993. Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 5 : **détermination de la déflexion avec la déflectographe 04.**
75. Cerema et IDRRIM, 2016. Diagnostic et conception des renforcements de chaussées, Guide technique.

Annexe A1 : Fonctionnement des capteurs de déformation

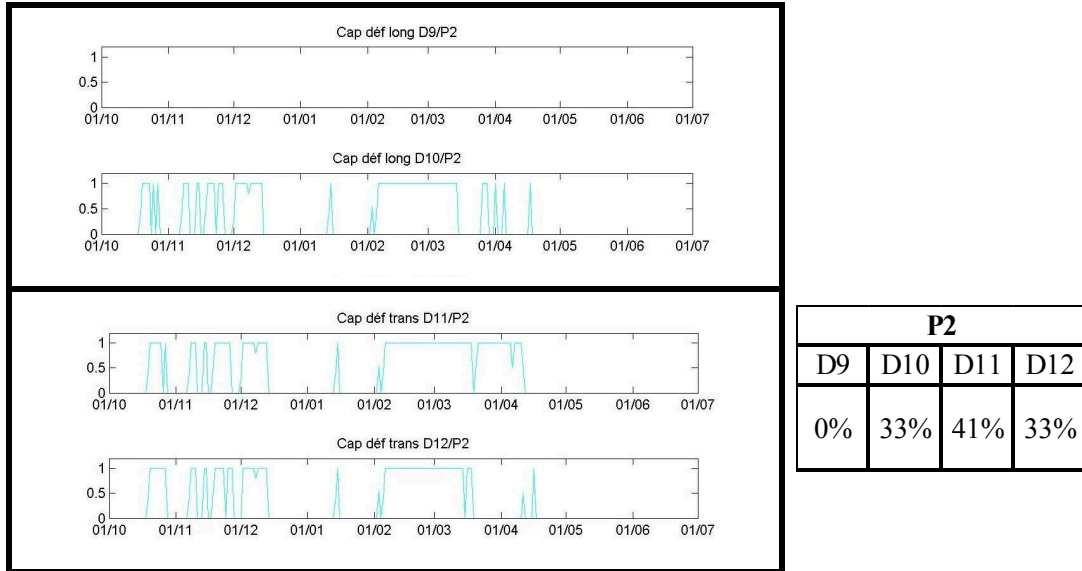


Figure A1.1 : Fonctionnement des capteurs de déformation du nœud P2

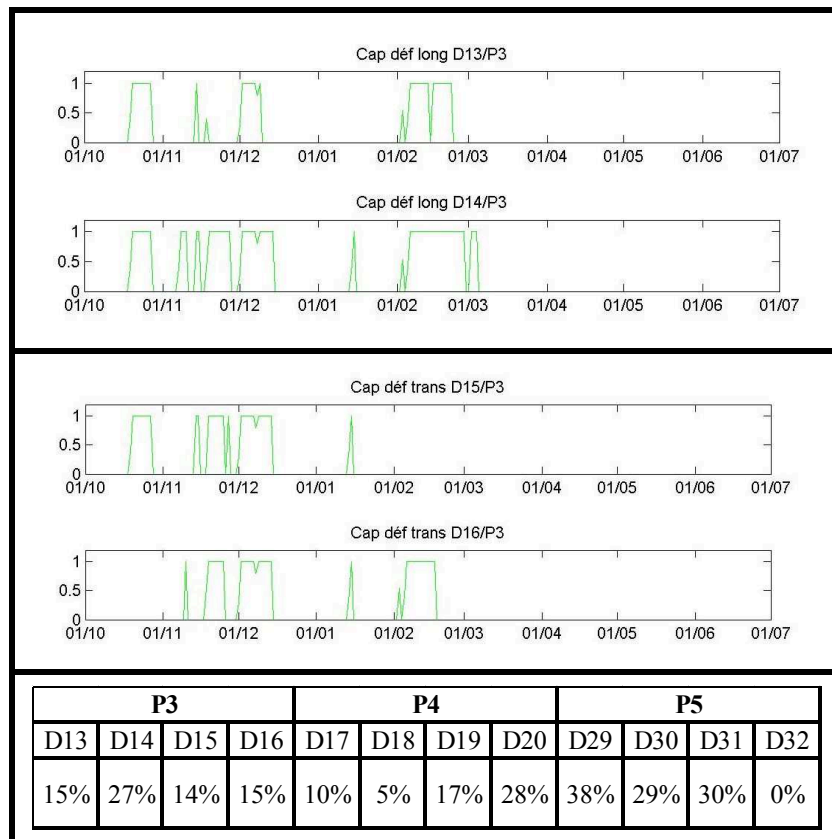


Figure A1.2 : Fonctionnement des capteurs de déformation du nœud P3

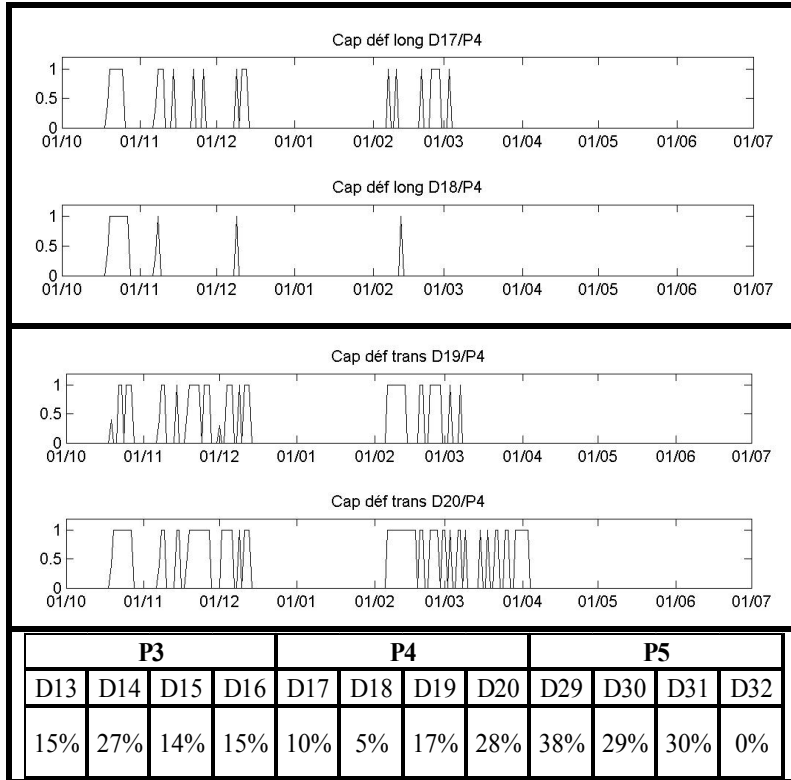


Figure A1.3 : Fonctionnement des capteurs de déformation du nœud P4

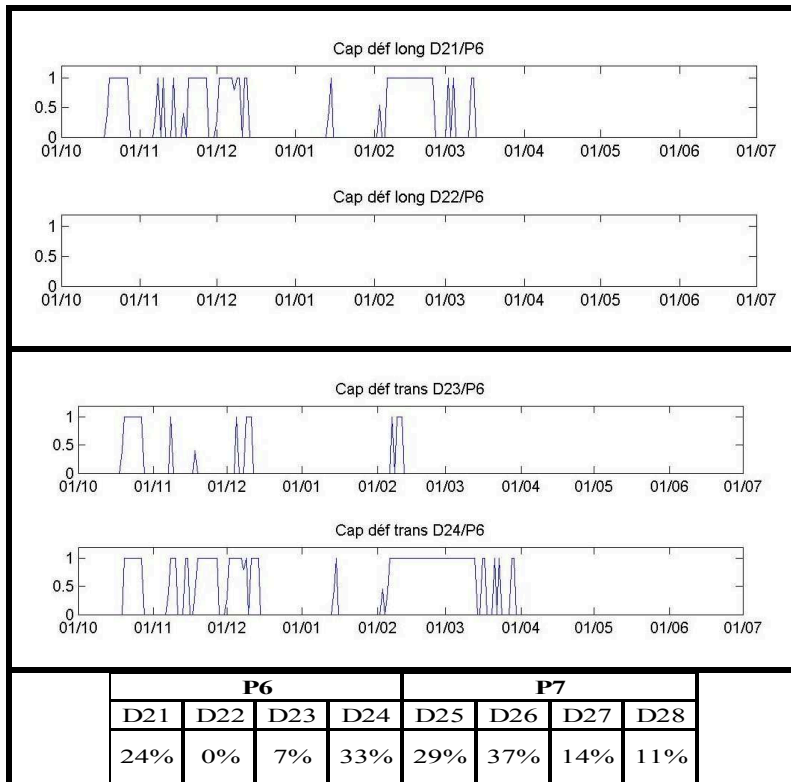


Figure A1.4 : Fonctionnement des capteurs de déformation du nœud P6

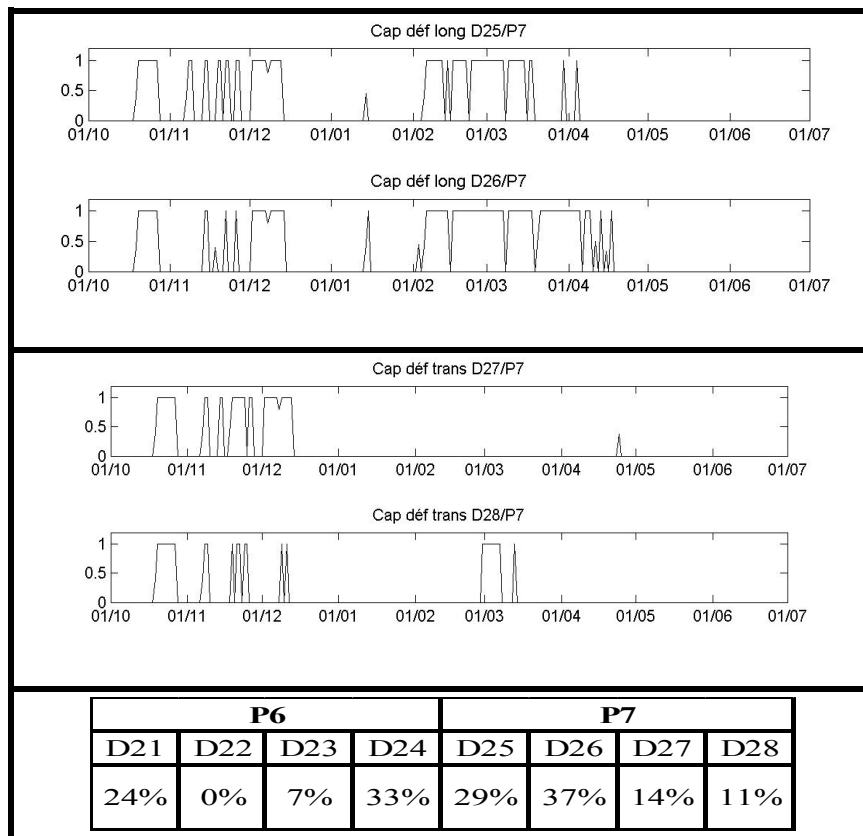


Figure A1.5 : Fonctionnement des capteurs de déformation du nœud P7

Annexe A2 : Fonctionnement des capteurs de température

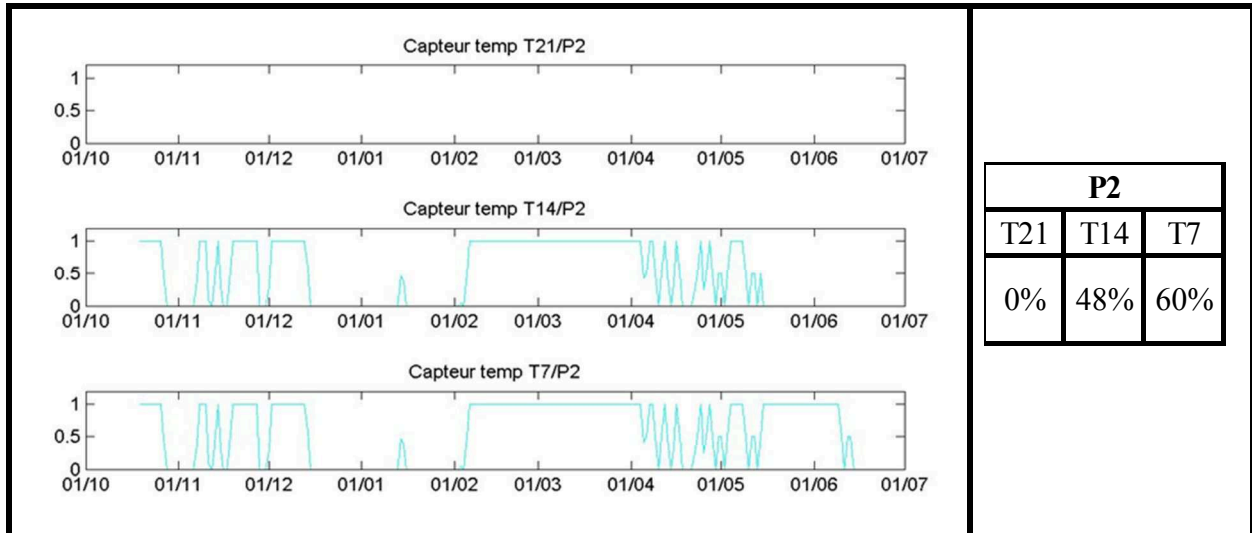


Figure A2.1 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P2

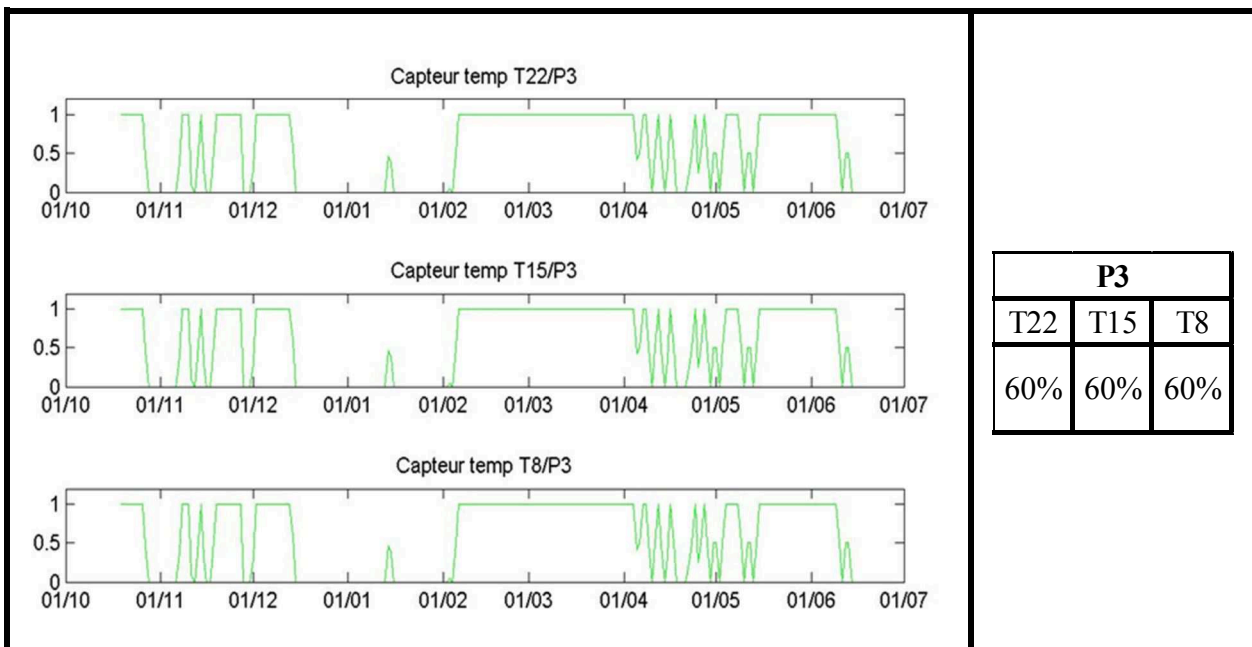


Figure A2.2 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P3

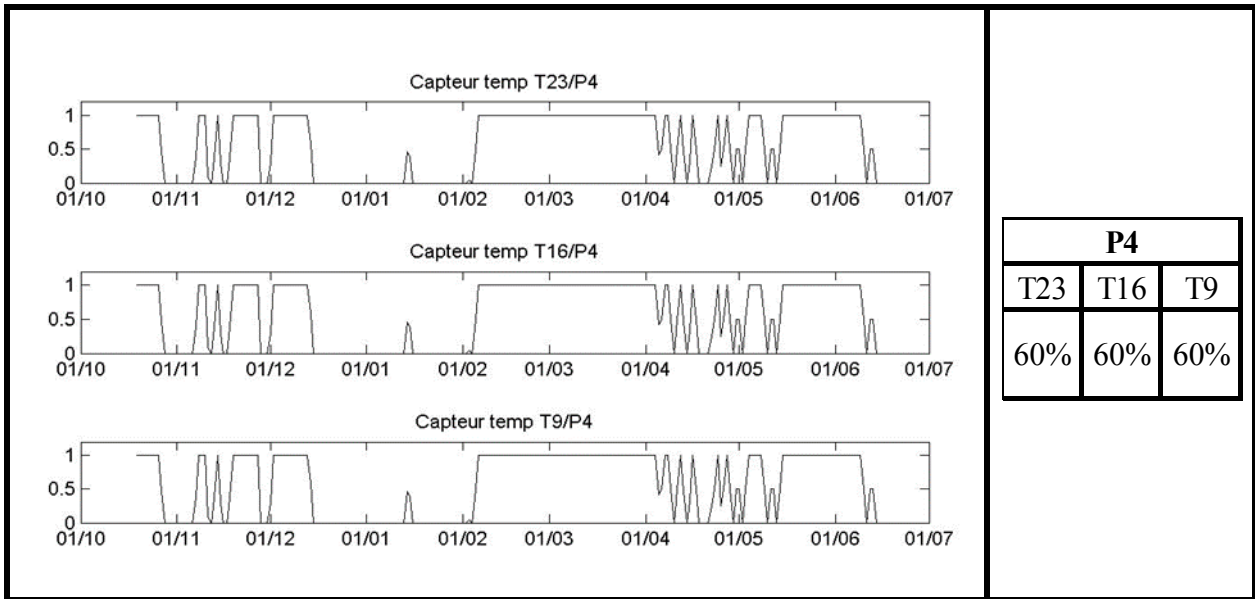


Figure A2.3 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P4

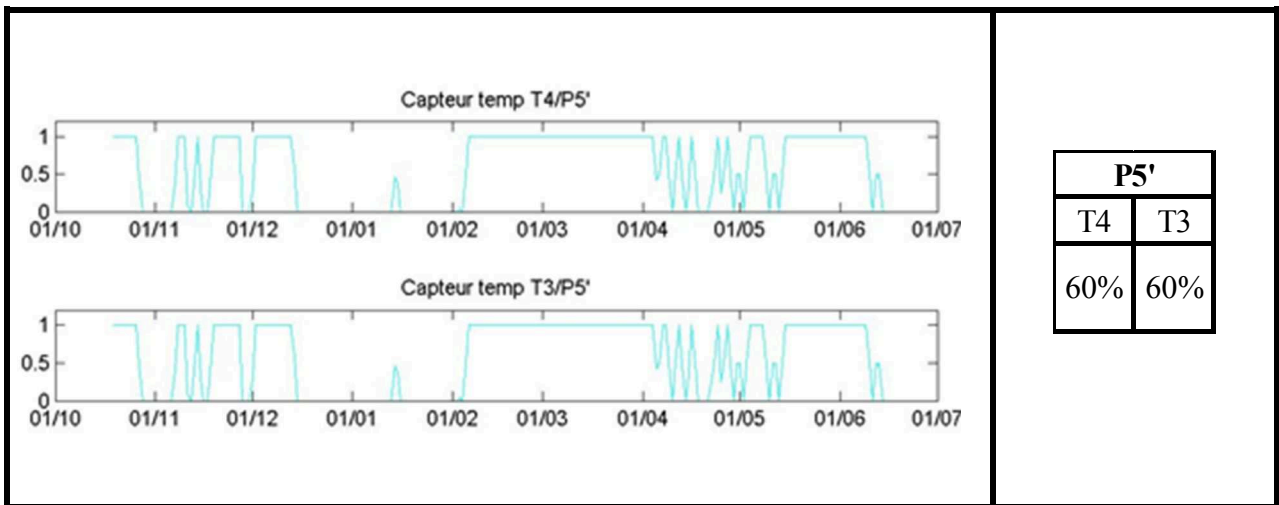


Figure A2.4 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P5'

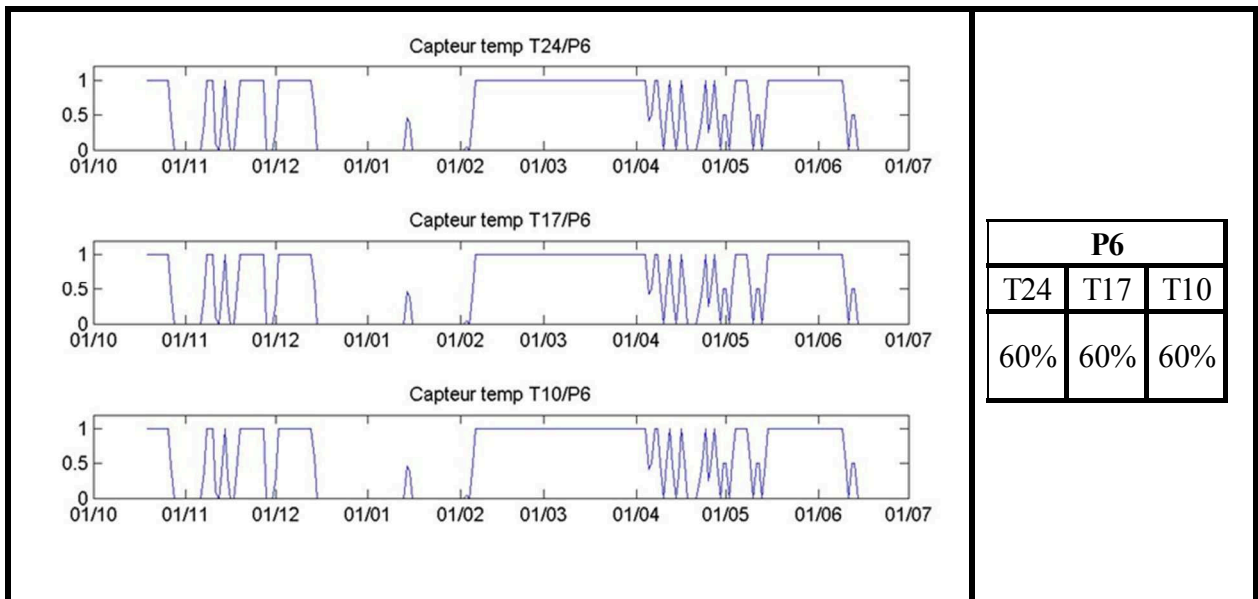


Figure A2.5 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P6

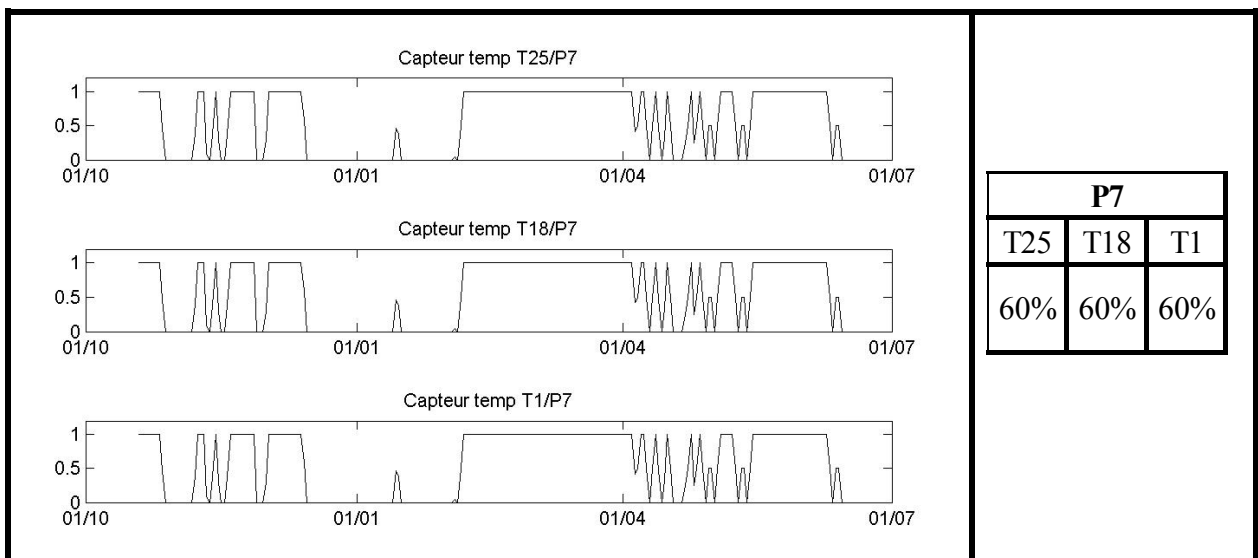


Figure A2.6 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P7

Annexe A3 : Fonctionnement des capteurs d'humidité



Figure A3.1 : Fonctionnement des capteurs d'humidité du nœud P2

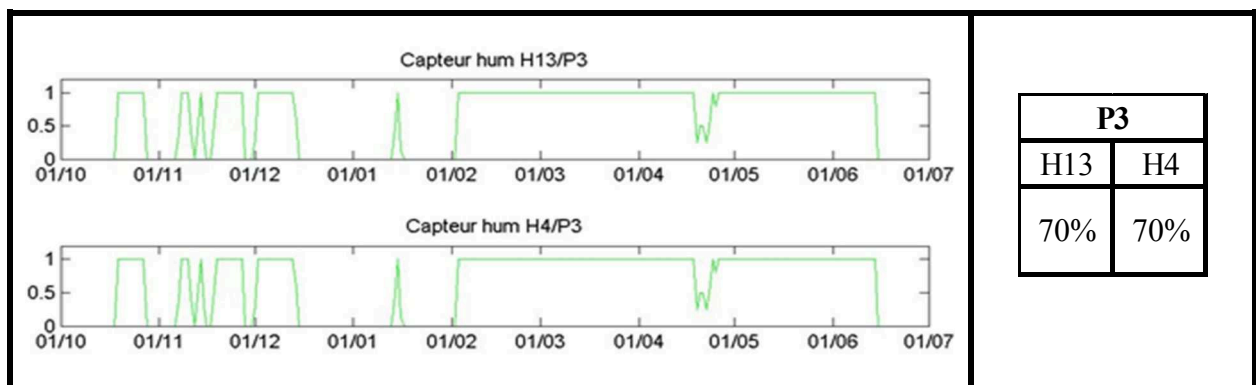


Figure A3.2 : Fonctionnement des capteurs d'humidité du nœud P3

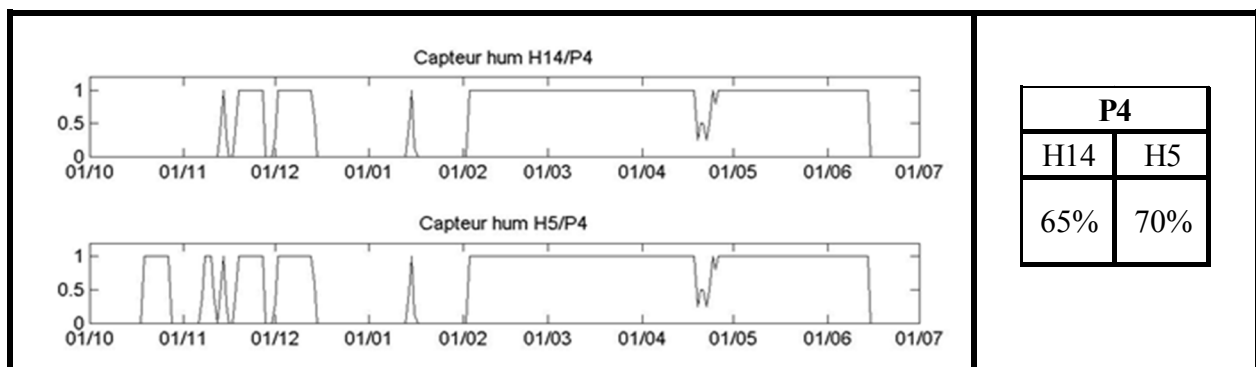


Figure A3.3 : Fonctionnement des capteurs d'humidité du nœud P4

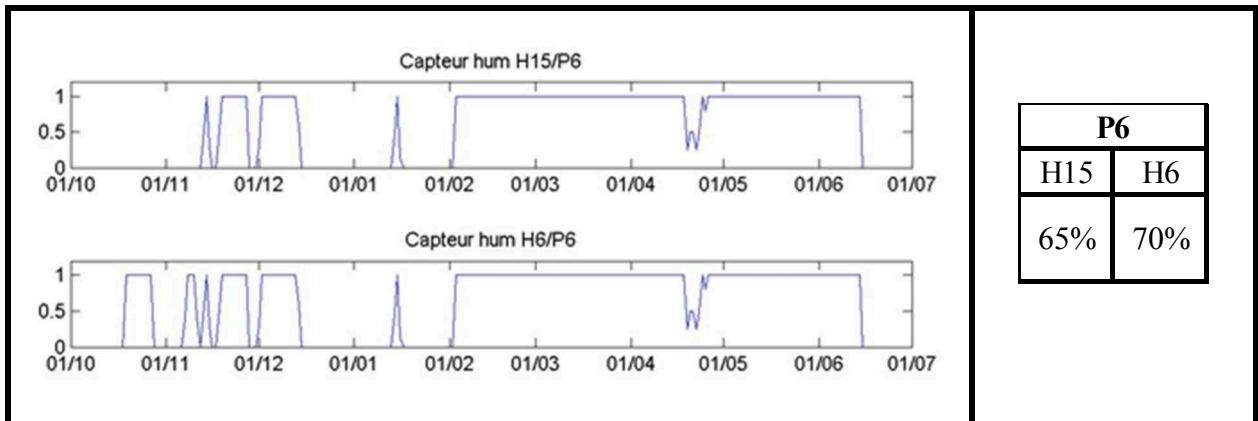


Figure A3.4 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P6

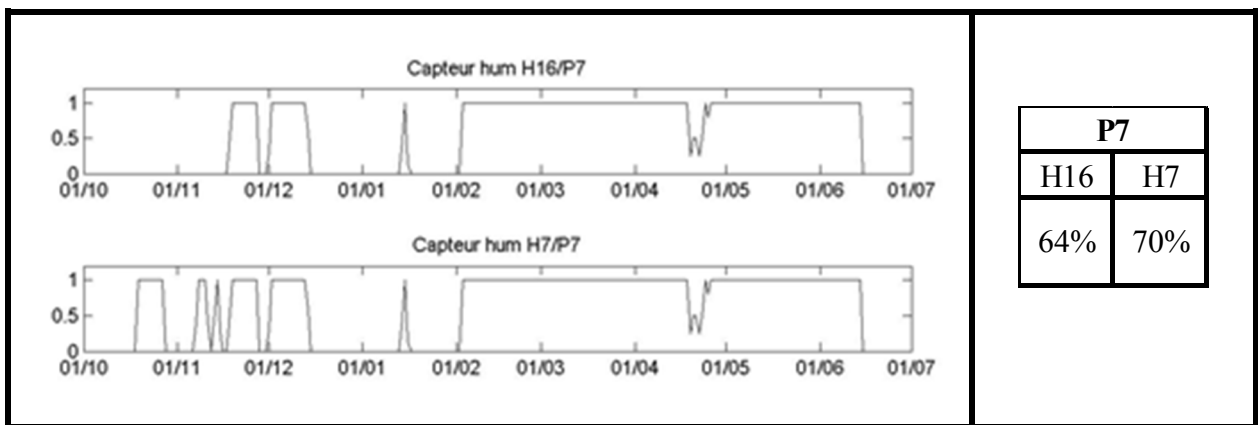


Figure A3.5 : Fonctionnement des capteurs de température du nœud P7

Annexe A4 : Mesures de déflexion

Campagne du 27/12/2014

Direction Technique et Expertise NORD 4ème Avenue du Port Fluvial B.P. 18 59374 LOOS CEDEX Tél : 03 20 00 55 10 Fax : 03 20 00 55 19 Agrément LABOROUTE n° 93.15				VILLENEUVE D'ASCQ Chantier d'instrumentation Destinataire : CRM N° DP : 14DTN0321C-C N° Chantier : 3333JBE1459301 Technicien : SVE- MSE Date (essais) : 17/12/2014	
--	--	---	--	--	--

Détermination de la déflexion avec le déflectomètre BENKELMAN Modifié

N° NORME : NF P 98-200-2

Dérégation n° 7 : mesure de la déflexion élastique

Matériel utilisé : Poutre Benkelmann, comparateur
 N° inventaire : 757-758
 Masse de l'essieu (bon de pesée) : **13t**

Couche de : Roulement
 Matériau : Existant
 T°C chaussée : **10°**

Date	Voie : Gauche		Déflexion élastique (1/100mm)	Date	Voie : Droite		Déflexion élastique (1/100mm)
	Sens : vers A1	Déflexion (1/100mm)			Sens : Vers A1	Déflexion (1/100mm)	
17/12/14	Repère	Déflexion (1/100mm)	0 20 40 60 80 100 120 140	17/12/14	Repère	Déflexion (1/100mm)	0 20 40 60 80 100 120 140
	Départ	10			Départ	4	
	2m	8			2m	2	
	4m	4			4m	8	
	6m	12			6m	4	
	8m	2			8m	6	
	10m	12			10m	14	
	12m	8			12m	2	
	14m	4			14m	8	
	16m	12			16m	2	
	18m	10			18m	8	
	tranchée 20m	16			tranchée 20m	4	
	22m	32			22m	6	
	24m	20			24m	2	
	26m	2			26m	10	
	28m	4			28m	16	
	30m	8			30m	18	
	32m	10			32m	2	
	34m	2			34m	2	
	36m	24			36m	12	
	38m	6			38m	8	
	40m	16			40m	6	
	42m	4			42m	4	
					P0	12	
					P1	2	
					P2	4	
	P6	20			P5	2	
	P7	22			P5'	10	
			Déflexion élastique (1/100mm)	Remarques :			
NOMBRE	Moyenne	9					
DE	Minimum	2					
VALEURS	Maximum	32					
51	Ecart Type	7					

DEFLEXION.XLS

Campagne du 27/10/2015

Direction Technique et Expertise NORD 4ème Avenue du Port Fluvial B.P.18 59374 LOOS CEDEX Tél : 03 20 00 55 10 Fax : 03 20 00 55 19 Agrément LABOROUTE n° 93.15			VILLENEUVE D'ASCQ Chantier d'instrumentation Destinataire : CRM N° DP : 14DTN0321C-C N°Chantier : 3333JBE1459301 Technicien : ACN Date (essais) : 27/10/2015
---	--	---	---

Détermination de la déflexion avec le déflectomètre BENKELMAN Modifié

N° NORME : NF P 98-200-2

Dérogation n° 7 : mesure de la déflexion élastique

Matériel utilisé : Poutre Benkelmann, comparateur
 N° inventaire : 757-758
 Masse de l'essieu (bon de pesée) : **13t**

Couche de : Roulement
 Matériau : Existant
 T°C chauffée : **12°C**

Date	Voie : Gauche		Déflexion élastique (1/100mm)	Date	Voie : Droite		Déflexion élastique (1/100mm)
	Sens : vers A1	Déflexion (1/100mm)			Sens : Vers A1	Déflexion (1/100mm)	
	Repère		0 20 40 60 80 100 120 140		Repère		0 20 40 60 80 100 120 140
27/10/15	Départ	10		27/10/15	Départ	6	
	2m	12			2m	4	
	4m	12			4m	12	
	6m	12			6m	14	
	8m	6			8m	14	
	10m	6			10m	10	
	12m	8			12m	8	
	14m	2			14m	8	
	16m	4			16m	16	
	18m	8			18m	14	
	tranchée 20m	6			tranchée 20m	16	
	22m	10			22m	14	
	24m	2			24m	20	
	26m	2			26m	16	
	28m	4			28m	8	
	30m	6			30m	8	
	32m	6			32m	6	
	34m	4			34m	6	
	36m	2			36m	8	
	38m	2			38m	6	
	40m	12			40m	16	
	42m	4			42m	20	
					P0	10	
					P1	8	
					P2	8	
	P6	12			P5	14	
	P7	18			P5'	14	
			Déflexion élastique (1/100mm)	Remarques :			
NOMBRE DE VALEURS	Moyenne	9					
	Minimum	2					
	Maximum	20					
51	Ecart Type	5					

DEFLEXION.XLS

Campagne du 17/12/2015

Direction Technique et Expertise NORTH 4ème Avenue du Port Fluvial B.P.18 59374 LOOS CEDEX Tél : 03 20 00 55 10 Fax : 03 20 00 55 19 Agrément LABOROUTE n° 93.15				VILLENEUVE D'ASCQ Chantier d'instrumentation Destinataire : CRM N° DP : 14DTN0321C-C N°Chantier : 3333JBE1459301 Technicien : ACN Date (essais) : 17/12/2015	
--	--	---	--	---	--

Détermination de la déflexion avec le déflectomètre BENKELMAN Modifié

N° NORME : NF P 98-200-2

Dérogation n° 7 : mesure de la déflexion élastique

Matériel utilisé : Poutre Benkelmann, comparateur
 N° inventaire : 757-758
 Masse de l'essieu (bon de pesée) : **13t**

Couche de : Roulement
 Matériau : Existant
 T°C chauffée : **15°C**

Date	Voie : Gauche		Déflexion élastique (1/100mm)	Date	Voie : Droite		Déflexion élastique (1/100mm)
	Sens : vers A1				Sens : Vers A1		
	Repère	Déflexion (1/100mm)		Repère	Déflexion (1/100mm)		
17/12/15	Départ	14		17/12/15	Départ	8	
	2m	12			2m	4	
	4m	16			4m	6	
	6m	12			6m	4	
	8m	14			8m	20	
	10m	12			10m	12	
	12m	10			12m	2	
	14m	10			14m	6	
	16m	12			16m	16	
	18m	10			18m	4	
	tranchée 20m	22			tranchée 20m	18	
	22m	14			22m	12	
	24m	10			24m	12	
	26m	10			26m	30	
	28m	4			28m	26	
	30m	12			30m	12	
	32m	10			32m	20	
	34m	12			34m	32	
	36m	10			36m	14	
	38m	12			38m	32	
	40m	20			40m	36	
	42m	24			42m	4	
					P0	8	
					P1	4	
					P2	10	
					P5	2	
					P5'	20	
Déflexion élastique (1/100mm)			Remarques :				
NOMBRE	Moyenne	13					
DE	Minimum	2					
VALEURS	Maximum	36					
51	Ecart Type	8					

DEFLEXION.XLS

Campagne du 17/06/2015

Direction Technique et Expertise
NORD
4ème Avenue du Port Fluvial
B.P.18 59374 LOOS CEDEX
Tél : 03 20 00 55 10 Fax : 03 20 00 55 19
Agrément LABOROUTE n° 93.15



VILLENEUVE D'ASCQ
Chantier d'instrumentation

Destinataire : CRM
N° DP : 14DTN0321C-C N°Chantier : 3333JBE1459301
Technicien : ACN
Date (essais) : 17/06/2015

Détermination de la déflexion avec le déflectomètre BENKELMAN Modifié

N° NORME : NF P 98-200-2

Dérégation n° 7 : mesure de la déflexion élastique

Matériel utilisé : Poutre Benkelmann, comparateur
N° inventaire : 757-758
Masse de l'essieu (bon de pesée) : 13t

Couche de : Roulement
Matériau : Existant
T°C chauffée : 29°

Date	Voie : Gauche		Déflexion élastique (1/100mm)	0 20 40 60 80 100 120 140	Date	Voie : Droite		Déflexion élastique (1/100mm)	0 20 40 60 80 100 120 140
	Sens : vers A1					Sens : Vers A1			
	Repère	Déflexion (1/100mm)				Repère	Déflexion (1/100mm)		
17/6/15	Départ	34			17/6/15	Départ	38		
	2m	28				2m	24		
	4m	26				4m	24		
	6m	26				6m	28		
	8m	20				8m	20		
	10m	20				10m	24		
	12m	26				12m	16		
	14m	34				14m	24		
	16m	18				16m	28		
	18m	28				18m	48		
	tranchée 20m	28				tranchée 20m	34		
	22m	30				22m	54		
	24m	28				24m	40		
	26m	26				26m	46		
	28m	22				28m	28		
	30m	24				30m	22		
	32m	22				32m	30		
	34m	26				34m	24		
	36m	24				36m	24		
	38m	36				38m	24		
	40m	40				40m	30		
	42m	36				42m	18		
						P0	30		
						P1	22		
						P2	34		
						P5	46		
						P5'	54		
	P6	46							
	P7	30							
			Déflexion élastique (1/100mm)		Remarques :				
NOMBRE		Moyenne	30						
DE		Minimum	16						
VALEURS		Maximum	54						
54		Ecart Type	9						

DEFLEXION.XLS

Campagne du 28/06/2016 (Déflectographe FLASH)

Deflexion x 10⁻² mm			
ABD	Droite	Gauche	TEMP c°
5	38	39	22.8
6	36	37	23.1
7	36	36	23.3
8	38	38	24.2
10	37	37	23
11	35	37	23.4
12	35	34	23.5
13	31	33	24.2
15	37	38	22.9
16	45	41	23.3
17	39	33	23.6
18	40	35	24.1
20	39	35	22.9
21	41	39	23.4
22	38	38	23.6
23	41	39	24
25	42	35	22.9
26	37	26	23
27	37	33	23.3
28	38	36	23.7
30	33	34	22.8
31	35	34	23.2
32	35	37	23.3
33	35	36	23.6
35	32	38	22.6
36	36	37	23
37	34	37	23.1
38	37	36	23.6