

# Développement d'un système pour le suivi du comportement fonctionnel et structural des chaussées

par

Eric LEDUC

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU  
DOCTORAT EN GÉNIE  
Ph.D.

MONTREAL, LE 11 OCTOBRE 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Eric Leduc, 2020

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Gabriel J. Assaf directeur de thèse  
Génie de construction à l'École de technologie supérieure

M. Michael J. McGuffin, président du jury  
Génie logiciel et des T.I. à l'École de technologie supérieure

Mme Nadjia Kara, membre du jury  
Génie logiciel et des T.I. à l'École de technologie supérieure

M. Nihad Faissal Bassis, examinateur externe  
Génie industriel et mathématique à la Polytechnique

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 8 SEPTEMBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE





## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur, Gabriel J. Assaf pour son support indéfectible, ses conseils et pour m'avoir dirigé dans la bonne direction. Je me considère chanceux d'avoir un mentor aussi compréhensif, agréable, qui m'a forcé à sortir de ma zone de confort et qui a la créativité et la rigueur nécessaire pour avoir fait de ce projet un succès. Tes conseils et tes encouragements m'ont donné la motivation nécessaire pour persévérer. Ce projet a fait de moi une meilleure personne et m'a permis d'acquérir une plus grande maturité professionnelle.

J'aimerais remercier ma mère, Marthe, qui a toujours supporté mes nouvelles idées, aussi farfelues soient-elles. Mon père Yves, également, qui m'a aidé a travaillé sur ce projet; il m'a écouté avec patience en plus de participer activement à son élaboration, de la conception de départ jusqu'à la rédaction finale.

Je tiens à remercier ma conjointe Isabelle qui m'accompagné tout au long de ce voyage et qui a toujours cru en moi. Son support m'a été inestimable, surtout dans les moments les plus difficiles. Elle m'a aidé à rédiger, m'a encouragé, m'a challengé; je suis éternellement reconnaissant d'avoir une partenaire aussi fantastique.

Enfin, par l'élaboration de ce travail colossal, j'espère que j'aurai inspiré mes deux filles, Romy et Zoé à se dépasser, à continuer d'avancer malgré les embûches et à croire en leurs rêves. La persévérance dans l'effort est une valeur qui m'est chère; je souhaite qu'elles appréhendent les défis qui se présenteront à elles avec autant d'enthousiasme que moi face à ce projet.



# **Développement d'un système intégré pour le suivi du comportement fonctionnel et structural des chaussées**

Eric LEDUC

## **RÉSUMÉ**

Cette recherche propose un modèle d'acquisition intelligent pour le suivi de l'état des chaussées et du trafic circulant sur celles-ci. L'objectif principal est de créer des chaussées connectées à l'aide d'une plate-forme de gestion des infrastructures, dans le but de proposer des interventions sur les chaussées à moindre coût pour la société. La structure de la chaussée peut ainsi être surveillée de façon permanente et le transfert d'informations s'effectuer en temps réel et de façon continue, avec le support de modules cellulaires, ultimement 5G, permettant de qualifier la qualité de la structure en tout temps et à partir de quelque endroit que ce soit. L'intérêt d'une telle innovation pour l'ensemble des parties prenantes de l'industrie routière est significatif, autant pour les ministères que pour les municipalités, les ingénieurs conseils, les fournisseurs, les universitaires et bien entendu la population qui doit avoir accès aux bénéfices associés aux taxes qu'elle paye.

À ce titre, le but premier de cette recherche est de concevoir et de valider un nouveau système mécanique inséré sous la couche de surface de la chaussée, qui mesure les déformations et le tassement de celle-ci à différentes profondeurs et selon plusieurs espacements horizontaux. Ce système mesure des caractéristiques électriques qui sont bien corrélées avec les bassins de déflexion ou de tassement sous charge. À partir de ces bassins de déflexion, la recherche fait ainsi ressortir la possibilité de déterminer les charges, via ces capteurs, et d'envoyer l'information recueillie dans une base de données. L'analyse subséquente permet alors, de déterminer :

- Le tassement des couches de la chaussée ; et,
- L'intensité des charges sur une chaussée donnée.

Cette analyse est effectuée en corrélant le tassement des couches de la chaussée, déduit des caractéristiques électriques, et la charge, via les modules de rigidité. Le système est intégré à la chaussée afin de déduire les tassements en ne retenant que les distorsions dynamiques significatives dans le temps et du fait même, en éliminant le bruit. Le système transmet par la suite, les données colligées au modèle d'acquisition qui les transforme en informations pouvant être utilisées par les gestionnaires des réseaux routiers, c'est-à-dire des charges sous essieu. Les résultats d'acquisition permettent d'obtenir le spectre de charges que subit la chaussée en temps réel, qui représente une donnée d'entrée importante au logiciel de dimensionnement et d'évaluation structurale des chaussées AASHTO 2002. Un prototype est conçu au laboratoire des enrobés de l'ETS et les essais réalisés afin de dégager la fonction qui relie les caractéristiques électriques et les charges. Ce module proposé est opérationnel.

Le but second de cette recherche est de concevoir et de valider une approche intégrée LiDAR-vidéo qui permet d'associer automatiquement un niveau de dégradation d'une surface de

chaussée à une image collectée avec une caméra et un relevé laser par LiDAR (*Time of Flight*). Ces données digitales et de profondeur permettent de qualifier, de façon autonome, avec un modèle d'apprentissage supervisé, les déformations verticales et les fissures de surface (nid-de-poule, fissure longitudinale, transversale ou en maille, ornière, etc.). Ces données digitales et de profondeur, permettent également de construire une base de données fonctionnelle pour avoir une vue d'ensemble de l'état de la chaussée, à un moment précis de son cycle de vie. Ceci devient alors une base de référence fiable permettant à terme de sélectionner l'intervention d'entretien ou de réhabilitation la plus appropriée en fonction de la localisation, du type et de la sévérité des dégradations identifiées et catégorisées, et du diagnostic de leurs causes, tout en ayant une évolution du profil des dégradations dans le temps (déformations et fissures).

**Mots-clés :** villes intelligentes, internet des objets, intelligence artificielle, optimisation des coûts.

# **Development of an integrated system in the roadway for monitoring its functional and structural behavior**

**Eric LEDUC**

## **ABSTRACT**

This research proposes an intelligent acquisition model for monitoring the condition of roadways and traffic on them. The main objective is to create connected pavements using an infrastructure management platform, with the aim of offering pavement interventions at the lowest cost to society. The structure of the roadway can thus be permanently monitored, and the transfer of information is carried out in real time and continuously, with the support of cellular modules, ultimately 5G, allowing the quality of the structure to be qualified at all times, and from anywhere. The interest of such an innovation for all stakeholders in the road industry is significant, as much for the ministries as for the municipalities, consulting engineers, suppliers, academics and of course the population who must have access profits associated with the taxes it pays.

As such, the primary goal of this research is to design and validate a new mechanical system inserted under the surface layer of the road, which measures the deformations and the settlement of it at different depths and at several horizontal spacings. This system measures electrical characteristics which are well correlated with deflection or compaction basins under load. From these deflection basins, the research thus highlights the possibility of determining the charges, via these sensors, and of sending the information collected in a database. The subsequent analysis then makes it possible to determine:

- The compaction of the road layers; and,
- The intensity of the loads on a given roadway.

This analysis is carried out by correlating the settlement of the road layers, deduced from the electrical characteristics, and the load, via the stiffness modules. The system is integrated into the roadway in order to deduce the settlements, retaining only the significant dynamic distortions over time and thereby eliminating the noise. The system then transmits the data collected to the acquisition model which transforms it into information that can be used by road network managers, that is to say axle loads. The acquisition results make it possible to obtain the load spectrum that the pavement undergoes in real time, which represents an important input to the structural design and evaluation software for pavements AASHTO 2002. A prototype is designed in the laboratory of coated with ETS and the tests carried out in order to identify the function which links the electrical characteristics and the loads. This proposed module is operational.

The second goal of this research is to design and validate an integrated LiDAR-video approach which automatically associates a level of degradation of a road surface with an image collected with a camera and a laser survey by LiDAR (Time of Flight). These digital and depth data make it possible to qualify, independently, with a supervised learning model, vertical deformations and surface cracks (potholes, longitudinal, transverse or mesh cracks, ruts, etc.).

## VIII

This digital and depth data also makes it possible to build a functional database to have an overview of the condition of the roadway, at a specific point in its life cycle. This then becomes a reliable reference base allowing to ultimately select the most appropriate maintenance or rehabilitation intervention according to the location, type and severity of the damage identified and categorized, and the diagnosis of their causes, while having an evolution of the profile of degradations over time (deformations and cracks).

**Keywords:** smart cities, internet of things, artificial intelligence, cost optimization.

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                               | Page |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCTION .....                                                                                            | 1    |
| CHAPITRE 1    OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE .....                                                                 | 7    |
| 1.1    Objectifs principaux.....                                                                              | 7    |
| 1.2    Méthodologie .....                                                                                     | 8    |
| 1.3    Originalité des travaux envisagés .....                                                                | 10   |
| CHAPITRE 2    REVUE DE LITTÉRATURE – SUIVI DE L'ÉTAT DES CHAUSSÉES .....                                      | 13   |
| 2.1    Suivi de l'état du réseau routier .....                                                                | 13   |
| 2.1.1    Imagerie aérienne.....                                                                               | 15   |
| 2.1.2    Drones .....                                                                                         | 16   |
| 2.1.3    Véhicules d'enquête.....                                                                             | 16   |
| 2.2    Méthodes visuelles.....                                                                                | 17   |
| 2.3    État des chaussées .....                                                                               | 18   |
| 2.3.1    L'uni.....                                                                                           | 19   |
| 2.3.2    Performance structurale .....                                                                        | 21   |
| 2.3.3    La résistance au dérapage .....                                                                      | 22   |
| 2.3.4    Dégradations de surface.....                                                                         | 22   |
| 2.4    Évaluation de la capacité structurale de la chaussée.....                                              | 24   |
| 2.5    Revue de littérature au niveau fonctionnel .....                                                       | 28   |
| 2.5.1    Vue d'ensemble des méthodes de collecte de données existantes.....                                   | 29   |
| 2.5.2    Système de cartographie mobile .....                                                                 | 31   |
| 2.6    Avantages de la surveillance structurale et fonctionnelle.....                                         | 34   |
| 2.7    Quantification de l'information .....                                                                  | 38   |
| CHAPITRE 3    REVUE DE LA LITTÉRATURE – NOUVELLES TECHNOLOGIES<br>POUR LA COLLECTE DE DONNÉES ROUTIÈRES ..... | 41   |
| 3.1    Structure de communication de la télémétrie.....                                                       | 41   |
| 3.1.1    Réseau de capteurs sans fil .....                                                                    | 43   |
| 3.1.2    L'architecture physique .....                                                                        | 44   |
| 3.2    Le LiDAR .....                                                                                         | 47   |
| 3.3    Systèmes de cartographie mobiles à base de laser (LiDAR) .....                                         | 48   |
| 3.3.1    Composantes du système .....                                                                         | 50   |
| 3.3.1.1    Système d'imagerie.....                                                                            | 50   |
| 3.3.1.2    Système de balayage laser .....                                                                    | 52   |
| 3.3.1.3    Système de navigation .....                                                                        | 54   |
| 3.3.1.4    Système d'acquisition des données.....                                                             | 55   |
| 3.3.2    Logiciel et traitement de données .....                                                              | 56   |
| 3.3.3    Réseau de neurones.....                                                                              | 61   |
| 3.3.4    Gestion des coûts pour l'acquisition d'informations .....                                            | 63   |

|                                                                                                                                |                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.5                                                                                                                          | Méthodes de collectes populaires .....                                                 | 64  |
| 3.3.6                                                                                                                          | Produits et solutions qui visent des objectifs similaires.....                         | 66  |
| 3.3.6.1                                                                                                                        | Système piézoélectrique.....                                                           | 67  |
| 3.3.6.2                                                                                                                        | Sondes capacitives .....                                                               | 73  |
| 3.3.6.3                                                                                                                        | Bandes de recourbement .....                                                           | 73  |
| 3.3.6.4                                                                                                                        | Cellule de charge.....                                                                 | 74  |
| 3.3.6.5                                                                                                                        | Fibre optique .....                                                                    | 76  |
| 3.3.6.6                                                                                                                        | Comparaison entre les capteurs .....                                                   | 81  |
| 3.3.6.7                                                                                                                        | Intégration de l'information provenant des capteurs dans un système d'acquisition..... | 86  |
| 3.3.7                                                                                                                          | Contexte économique.....                                                               | 90  |
| 3.4                                                                                                                            | Génération des résultats – évaluation de la chaussée.....                              | 92  |
| CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DU SYSTÈME LIDAR – VIDÉO (LiVi).....                       |                                                                                        |     |
| 4.1                                                                                                                            | Mise en contexte .....                                                                 | 95  |
| 4.2                                                                                                                            | Résultats obtenus du réseau de neurones .....                                          | 96  |
| 4.3                                                                                                                            | Résultats obtenus du LiVi.....                                                         | 98  |
| CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DU SYSTÈME DE MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHARGES (MIC)..... |                                                                                        |     |
| 5.1                                                                                                                            | Mise en contexte .....                                                                 | 105 |
| 5.2                                                                                                                            | Prototype MIC .....                                                                    | 106 |
| 5.3                                                                                                                            | Conception mécanique.....                                                              | 107 |
| 5.3.1                                                                                                                          | Module d'élasticité.....                                                               | 113 |
| 5.4                                                                                                                            | Conception électronique .....                                                          | 117 |
| 5.4.1                                                                                                                          | Principe de l'extensomètre.....                                                        | 118 |
| 5.5                                                                                                                            | Banc d'essai .....                                                                     | 125 |
| CHAPITRE 6 VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU SYSTÈME LIDAR – VIDÉO (LiVi) .....                                                      |                                                                                        |     |
| 6.1                                                                                                                            | Mise en contexte .....                                                                 | 143 |
| 6.2                                                                                                                            | Validation de l'hypothèse – premier objectif.....                                      | 144 |
| 6.2.1                                                                                                                          | Validation des données – ToF.....                                                      | 145 |
| 6.2.2                                                                                                                          | Validation des données – GoPro.....                                                    | 148 |
| CHAPITRE 7 VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU SYSTÈME DE MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHARGES (MIC).....                                 |                                                                                        |     |
| 7.1                                                                                                                            | Mise en contexte .....                                                                 | 153 |
| 7.2                                                                                                                            | Validation de l'hypothèse – second objectif.....                                       | 154 |
| 7.2.1                                                                                                                          | Détails de la validation du second sous-objectif.....                                  | 155 |
| CHAPITRE 8 DISCUSSION .....                                                                                                    |                                                                                        |     |
| CONCLUSION.....                                                                                                                |                                                                                        |     |
|                                                                                                                                |                                                                                        | 161 |



|            |                                                                                       |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ANNEXE I   | DONNÉES BRUTES DE LA ROUTE.....                                                       | 163 |
| ANNEXE II  | RÉSULTATS DE CLASSIFICATION DES IMAGES TOF AVEC LE<br>RÉSEAU DE NEURONES .....        | 201 |
| ANNEXE III | RÉSULTATS DE CLASSIFICATION DES IMAGES GOPRO AVEC<br>LE RÉSEAU DE NEURONES .....      | 207 |
| ANNEXE IV  | MOYENNE DES DONNÉES ACQUISES PAR CHARGE.....                                          | 211 |
| ANNEXE V   | RÉSULTATS DES POLYNÔMES PAR CHARGE.....                                               | 213 |
| ANNEXE VI  | ÉCART DES RÉSULTATS ENTRE LES POLYNÔMES ET LES<br>DONNÉES ACQUISES DES CAPTEURS ..... | 215 |
|            | LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                                             | 217 |
|            | BIBLIOGRAPHIE .....                                                                   | 227 |



## LISTE DES TABLEAUX

|             | Page                                                                                 |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tableau 2.1 | Méthodes et équipements de collecte de données.....29                                |
| Tableau 2.2 | Avantages et inconvénients des diverses méthodes de collecte.....30                  |
| Tableau 2.3 | Différents types de systèmes de cartographie mobiles et leurs<br>spécificités.....32 |
| Tableau 3.1 | Différences entre les méthodes ToF et de déphasage .....53                           |
| Tableau 3.2 | Coûts RFIP .....65                                                                   |
| Tableau 3.3 | Relation des coûts par distance .....66                                              |
| Tableau 3.4 | IRI : tableau d'évaluation.....84                                                    |
| Tableau 3.5 | Système de classification WIM .....85                                                |
| Tableau 3.6 | Type de conformité .....85                                                           |
| Tableau 3.7 | Comparaisons entre les types de WIM .....86                                          |
| Tableau 4.1 | Matrice de confusion avec caméra vidéo.....99                                        |
| Tableau 4.2 | Portion des résultats de la caméra GoPro pour identification.....100                 |
| Tableau 4.3 | Matrice de confusion avec caméra ToF .....101                                        |
| Tableau 4.4 | Portion des résultats GoPro pour identification.....103                              |
| Tableau 5.1 | Modèle reliant la rigidité à l'épaisseur de la couche de base.....114                |
| Tableau 5.2 | Fiche technique du capteur .....121                                                  |
| Tableau 5.3 | Résultat de la charge a 100 kN lors du mouvement des capteurs .....136               |
| Tableau 5.4 | Corrélation entre les variables en charge statique.....139                           |
| Tableau 6.1 | Résultat de détection pour l'image 110 – ToF .....146                                |
| Tableau 6.2 | Résultats de détection pour l'image 114 – GoPro .....149                             |



## LISTE DES FIGURES

|             | Page                                                                      |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Figure 2.1  | Bénéfice de la préservation .....14                                       |
| Figure 2.2  | Véhicule d'évaluation de route .....17                                    |
| Figure 2.3  | Échelle d'indice de rugosité.....20                                       |
| Figure 2.4  | Structure de la route .....22                                             |
| Figure 2.5  | PCI, relation entre les coûts et les conditions de la route .....23       |
| Figure 2.6  | Exemple de multi dommages subis par la route .....24                      |
| Figure 2.7  | Exemple de WIM.....27                                                     |
| Figure 2.8  | Marquage de GCP.....33                                                    |
| Figure 2.9  | Diagnostic, pronostic et gestion du système .....35                       |
| Figure 2.10 | La route est un patient.....38                                            |
| Figure 3.1  | Architecture de communication .....43                                     |
| Figure 3.2  | Topologie de réseau de capteurs sans fil.....43                           |
| Figure 3.3  | Architecture physique du système d'acquisition .....45                    |
| Figure 3.4  | Mode de mobilité à plusieurs têtes de grappes .....46                     |
| Figure 3.5  | Configuration des systèmes utilisés dans la cartographie mobile LiDAR.50  |
| Figure 3.6  | Différentes plateformes utilisées par Google.....51                       |
| Figure 3.7  | Méthode ToF.....52                                                        |
| Figure 3.8  | Méthode de déphasage.....53                                               |
| Figure 3.9  | Système d'acquisition de données de cartographie mobile .....55           |
| Figure 3.10 | Exemples de données utilisées pour sept types d'utilisation du sol.....57 |
| Figure 3.11 | Détection de texte de GSV.....58                                          |
| Figure 3.12 | Fissures peau d'alligator, sans et avec filtre de bruit .....60           |

|             |                                                                                                                    |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 3.13 | Réseau de neurones.....                                                                                            | 61  |
| Figure 3.14 | Réseau de neurones convolutif .....                                                                                | 62  |
| Figure 3.15 | Système WIM qui utilise un capteur piézo.....                                                                      | 68  |
| Figure 3.16 | Excavation pour installer un système piézo.....                                                                    | 70  |
| Figure 3.17 | Positionnement pour le boîtier .....                                                                               | 71  |
| Figure 3.18 | Finalisation de l'installation .....                                                                               | 72  |
| Figure 3.19 | Fin de l'installation électrique; connexion des câbles au cabinet pour<br>acquérir et transmettre les données..... | 72  |
| Figure 3.20 | Tapis Capacitifs .....                                                                                             | 73  |
| Figure 3.21 | Plaques de pliage.....                                                                                             | 74  |
| Figure 3.22 | Cellule de charge WIM.....                                                                                         | 75  |
| Figure 3.23 | WIM avec fibre optique.....                                                                                        | 77  |
| Figure 3.24 | Fibre optique basée sur le poids.....                                                                              | 78  |
| Figure 3.25 | Diagramme de bloc d'OTDR conventionnel .....                                                                       | 79  |
| Figure 3.26 | Trace OTDR typique.....                                                                                            | 80  |
| Figure 3.27 | Évaluation du poids statique et dynamique .....                                                                    | 81  |
| Figure 3.28 | Cycle de vie de la chaussée avec maintenance .....                                                                 | 89  |
| Figure 3.29 | Augmentation des dommages de la chaussée via la charge de l'essieu,<br>puissance n (4-5).....                      | 90  |
| Figure 4.1  | Vision globale pour l'AutoML pour la génération des données.....                                                   | 96  |
| Figure 4.2  | Exemples de classification d'images pour la normalisation du modèle ....                                           | 97  |
| Figure 4.3  | Représentation de l'image 54 acquise avec la caméra GoPro .....                                                    | 100 |
| Figure 4.4  | Résultat de la camera ToF pour l'image 93 .....                                                                    | 102 |
| Figure 5.1  | Trois axes dans le système d'acquisition.....                                                                      | 108 |
| Figure 5.2  | Vue isométrique de l'enveloppe mécanique .....                                                                     | 109 |

|             |                                                                                          |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 5.3  | Dimensions intérieures du système.....                                                   | 109 |
| Figure 5.4  | Dimensions extérieures du système.....                                                   | 110 |
| Figure 5.5  | Structure de la route .....                                                              | 110 |
| Figure 5.6  | Les déformations physiques sont généralement évaluées avec un écart d'un milistrain..... | 111 |
| Figure 5.7  | Modèle préliminaire, vue de haut. ....                                                   | 112 |
| Figure 5.8  | Modèle préliminaire, vue de côté.....                                                    | 112 |
| Figure 5.9  | Modèle préliminaire, vue de profil. ....                                                 | 113 |
| Figure 5.10 | Enrobé bitumineux haute performance de l'expérimentation.....                            | 115 |
| Figure 5.11 | Masse à l'air.....                                                                       | 115 |
| Figure 5.12 | Extensomètre de Vishay .....                                                             | 120 |
| Figure 5.13 | Diagramme de connexion pour un ADC et amplificateur .....                                | 122 |
| Figure 5.14 | Spécifications de l'ADC et amplificateur .....                                           | 124 |
| Figure 5.15 | Architecture réseau cellulaire .....                                                     | 125 |
| Figure 5.16 | Moule avec système d'acquisition – axe des x .....                                       | 126 |
| Figure 5.17 | Moule avec système d'acquisition – axe des z .....                                       | 127 |
| Figure 5.18 | Création de la base.....                                                                 | 128 |
| Figure 5.19 | Création de la base – vue de haut.....                                                   | 129 |
| Figure 5.20 | Ajout de sable à la base.....                                                            | 130 |
| Figure 5.21 | Le dépôt de la surface (enrobé bitumineux) sur le capteur.....                           | 130 |
| Figure 5.22 | Joint de plâtre pour réduire les mouvements. ....                                        | 131 |
| Figure 5.23 | Vue d'ensemble du module de test .....                                                   | 131 |
| Figure 5.24 | Positionnement de la presse au-dessus du module .....                                    | 132 |
| Figure 5.25 | Premier essai du module avec une presse hydraulique.....                                 | 133 |
| Figure 5.26 | Premier test à 0.5 KN.....                                                               | 133 |

|             |                                                                                                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figure 5.27 | Acquisition statique des données sur le capteur nommé X (Les résultats sont mV sur l'axe des y et kN sur l'axe des x) .....134 |
| Figure 5.28 | Acquisition statique des données sur le capteur nommé Y.....137                                                                |
| Figure 5.29 | Acquisition statique des données sur le capteur nommé Z.....137                                                                |
| Figure 5.30 | Acquisition des données dynamiques sur le capteur nommé x.....138                                                              |
| Figure 5.31 | Régression linéaire avec données originales.....140                                                                            |
| Figure 5.32 | Régression linéaire avec valeur des x corrigée qui donne l'équation $y = 0.0009x + 0.1072$ .....141                            |
| Figure 6.1  | Image 114, nid-de-poule .....145                                                                                               |
| Figure 6.2  | Résultats du modèle vs. analyse visuelle – TOF.....146                                                                         |
| Figure 6.3  | Niveau de prédiction par type de déformation.....147                                                                           |
| Figure 6.4  | Image 54 fissure longitudinale, nid-de-poule et fissure en carrelage alligator .....148                                        |
| Figure 6.5  | Résultats du modèle vs. analyse visuelle – GoPro.....149                                                                       |
| Figure 6.6  | Niveau de prédiction par type de déformation - ToF.....150                                                                     |
| Figure 8.1  | Gestion de l'information .....158                                                                                              |



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

|        |                                                                           |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|
| AASHTO | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> |
| ADA    | <i>American with Disabilities Act</i>                                     |
| ADC    | <i>Analog to Digital Converter</i>                                        |
| API    | <i>Application Programming Interface</i>                                  |
| ASCII  | <i>American Standard Code for Information Interchange</i>                 |
| ASTM   | <i>American Society for Testing and Materials</i>                         |
| CCD    | <i>Charge-coupled Device</i>                                              |
| CND    | Contrôle non destructif                                                   |
| CNN    | <i>Convolutional Neural Network</i>                                       |
| DMI    | <i>Distance Measuring Instrument</i>                                      |
| DOT    | <i>Department of Transportation</i>                                       |
| EBHP   | Enrobé bitumineux haute performance                                       |
| EMD    | <i>Empirical Mode Decomposition</i>                                       |
| ESAL   | <i>Equivalent Single Axle Load</i>                                        |
| FHWA   | <i>Federal Highway Administration</i>                                     |
| GCP    | <i>Ground Control Points</i>                                              |
| GNSS   | <i>Global Navigation Satellite System</i>                                 |
| GPS    | <i>Global Positioning System</i>                                          |
| GSV    | Google Street View                                                        |
| HCAS   | <i>Highway Cost Allocation Study</i>                                      |
| HCM    | <i>Highway Capacity Manual</i>                                            |
| HDM-4  | <i>Highway Development and Management System</i>                          |

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| HERS-ST | <i>Highway Economic Requirement System, State Version</i>        |
| IMU     | <i>Inertial Measuring Unit</i>                                   |
| INS     | <i>Inertial Navigation System</i>                                |
| IRI     | Indice de rugosité international                                 |
| IRRE    | Expérimentation Internationale de Rugosité des Chaussées         |
| ISOHDM  | <i>International Study of Highway Development and Management</i> |
| LTTP    | <i>Long-Term Pavement Performance</i>                            |
| LiDAR   | <i>Light Detection and Ranging</i>                               |
| LiVi    | <i>LiDAR and Video</i>                                           |
| LRI     | <i>Long Range Index</i>                                          |
| LVDT    | <i>Linear Variable Differential Transformer</i>                  |
| MIC     | Mesure de l'intensité des charges                                |
| MOBILE  | <i>Mobile Source Factor Model (EPA)</i>                          |
| MTQ     | Ministère des Transport du Québec                                |
| NCAR    | <i>National Center for Atmospheric Research</i>                  |
| NCHRP   | <i>National Cooperative Highway Research Program</i>             |
| NGN     | <i>New Generation Network</i>                                    |
| OSGi    | <i>Open Service Gateway Initiative</i>                           |
| OTDR    | <i>Optical Time Domain Reflectometry</i>                         |
| OWI     | <i>Offshore Wind Infrastructure</i>                              |
| P2P     | <i>Peer-to-Peer</i>                                              |
| PCI     | <i>Pavement Condition Index</i>                                  |
| PCU     | Unité de véhicule particulier (HCM)                              |

|        |                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------------------------|
| PM     | Matières particulières                                                 |
| PMS    | <i>Pavement Mangement System</i>                                       |
| RBC    | Ratio bénéfices-coûts                                                  |
| RDC    | Ratio débit-capacité                                                   |
| RED    | <i>Road Economic Decision Model</i> (Banque Mondiale)                  |
| RIP    | <i>Road Inventory Program</i>                                          |
| RONET  | <i>Road Network Evaluation Tools</i>                                   |
| R-OSGi | <i>Remote Open Service Gateway Initiative</i>                          |
| SHRP   | <i>Strategic Highway Research Program</i>                              |
| SIG    | Système d'information géographique                                     |
| SONAR  | <i>Sound Navigation and Ranging</i>                                    |
| SRI    | <i>Short Range Index</i>                                               |
| TCO    | <i>Total cost of ownership</i>                                         |
| ToF    | <i>Time of Flight</i>                                                  |
| TRB    | <i>Transportation Research Board</i>                                   |
| TSP    | <i>Telematics Service Provider</i>                                     |
| TRL    | <i>Transportation Research Laboratory Limited</i>                      |
| Uni    | Uniformité longitudinale du revêtement                                 |
| UpnP   | <i>Universal Plug and Play</i>                                         |
| US AID | <i>United States Agency for International Development</i> (États-Unis) |
| WAPA   | <i>Washington Asphalt Pavement Association</i>                         |
| WIM    | <i>Weight in Motion</i>                                                |
| WSAN   | <i>Wireless Sensor and Actuator Network</i>                            |



## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| kN    | Kilo Newtons            |
| V     | Volt                    |
| m/sec | Mètre/seconde           |
| AM    | Modulation d'amplitude  |
| FM    | Modulation de fréquence |
| h/mm  | Hauteur par millimètre  |
| k/h   | Kilomètre par heure     |
| M/s   | Mégabit par seconde     |
| Ws    | Poids statique          |
| Wd    | Poids dynamique         |
| Mm    | Millimètre              |
| G     | Gramme                  |
| kg    | Kilogramme              |
| MPa   | Mégapascal              |
| mV    | Millivolt               |
| mV/V  | Millivolt par Volt      |



## INTRODUCTION

Les chaussées se détériorent avec le temps, ce qui nécessite un suivi continu de leur état et du trafic qui y circule. Or, l'objectif principal des gestionnaires d'un réseau routier est de ralentir le taux de détérioration et d'améliorer l'état de la chaussée en temps opportun. Dans cet esprit, la gestion de la chaussée consiste, entre autres, en une série de travaux d'évaluation, d'entretien et de réhabilitation effectuée pendant la phase d'utilisation d'une route.

L'entretien périodique implique différentes méthodes et technologies permettant de prolonger la durée de vie de la chaussée en ralentissant ce taux de détérioration. Les interventions ou traitements à appliquer à une route sont sélectionnées sur la base d'un diagnostic des causes de détérioration. Idéalement, ce diagnostic doit lui-même être basé sur des données fiables, disponibles en tout temps et idéalement peu coûteuses. L'objectif de cette recherche est d'obtenir des données fiables et peu coûteuses, afin de déterminer l'état de la route et le trafic qui y circule, et, par ricochet, de sélectionner les interventions les plus appropriées.

Dans cet esprit, cette thèse vise et apporte deux contributions scientifiques. La première est la conception, le développement, l'apprentissage et la validation d'un outil qui repose sur deux technologies, le LIDAR et la Vidéo (LiVi), permettant de qualifier un état de dégradation donné d'une route, à un instant donné, afin de développer un programme d'entretien optimal.

En effet, l'intérêt d'une telle innovation pour l'ensemble des parties prenantes de l'industrie routière est significatif, autant pour les ministères que pour les municipalités, les ingénieurs conseils, les fournisseurs, les universitaires et bien entendu la population qui doit avoir accès aux bénéfices associés aux taxes qu'elle paye.

La seconde contribution scientifique de cette recherche, est la conception, le développement et la validation d'un outil qui permet de mesurer l'intensité des charges (MIC) du trafic sur une route à l'aide de capteurs à base mécanique et électronique, enfouis sous le revêtement de surface (à environ 50 mm de la surface).

En ce qui concerne la première contribution, la grande majorité des recherches disponibles s'orientent vers l'analyse des données de dégradations automatique mais en post-saisie afin de les classer par type de dégradation selon le catalogue de l'administration routière, et non vers les méthodes de détection automatique des dégradations mais en temps réel (ce qui signifie ici d'accéder à l'information en quelques minutes). (O'Brien, 1991; Wang, 1993) Une dégradation automatique est une représentation de l'automatisation de l'acquisition des données et de son interprétation. Quant aux relevés traditionnels faits sur une base visuelle, il est souvent difficile d'évaluer le niveau de qualité et de performance des processus de saisie et d'évaluation puisque ces derniers relèvent grandement de la subjectivité des techniciens. Dans le cas où une base de données routières n'existe pas, l'évaluation se limite à l'information qui peut être collectée en surface pour identifier des anomalies que l'on désigne par « dégradations ». Naturellement, la subjectivité des évaluateurs affecte négativement la fiabilité de telles évaluations. En outre, puisque le facteur subjectif est très présent, si deux opérateurs effectuent la même évaluation, il n'est pas dit que leurs résultats seront similaires, ce qui est notamment dû à de multiples facteurs tels que la fatigue, l'éclairage, la réflexion des rayons solaires, la présence de neige, etc.

Il ressort ainsi des recherches entreprises dans le passé que les informations acquises par observation sur une section de chaussée d'un réseau routier souffrent souvent de la subjectivité des évaluateurs. (Gramling, 1994; McGhee, 2004) En effet, l'acquisition d'informations se fait, dans la très grande majorité des cas, par une appréciation visuelle du réseau, pour ensuite être évaluées selon un cadre de référence particulier tel qu'un manuel de relevé des dégradations par exemple. (O'Brien, 1991; Wang, 1993) Dans cette perspective, les mesures recueillies ne permettent pas de qualifier adéquatement le comportement de la chaussée sur son cycle de vie. En outre, ces mesures demeurent, d'une part, insuffisantes et, d'autre part, manquent de rigueur du point de vue de la géolocalisation de l'information. En effet, toutes les informations sur l'état de dégradation précise de l'actif ou sur l'exactitude de sa position, font défaut.



Dans la littérature, la saisie et l'exploitation des mesures recueillies se fait souvent au niveau agrégé, dit « niveau réseau », et donc de manière globale et n'apporte, conséquemment, qu'une information générale sur la qualité des routes dudit réseau. (AASHTO, 2009; Smith, 2007; Tiong, 2012)

Or, cette thèse s'inscrit dans un cadre plus désagrégué, plus détaillé, où une information plus précise est recherchée pour suivre le comportement spécifique d'une route donnée du réseau routier. C'est le niveau désagrégué, ou « niveau projet », qui est généralement considéré dans l'analyse économique, lorsque les gestionnaires des chaussées décident de la nécessité d'intervenir sur la chaussée. Le fait de négliger l'entretien et donc la préservation de la chaussée, résulte en des coûts supplémentaires qui se chiffrent en milliards de dollars de dépenses ultérieures. Les bénéfices qui ressortent d'un entretien préventif sont les économies pour les usagers (sur les coûts d'exploitation des véhicules, notamment) et les économies pour l'administration puisque les coûts des interventions sur une chaussée, à mesure que celle-ci se détériore, sont exponentiels. (Assaf, 2017)

En ce qui concerne la seconde contribution de cette thèse, à savoir la mesure des charges circulant sur les routes et des déflexions, cette mesure est généralement effectuée de façon traditionnelle, c'est-à-dire manuellement par des techniciens utilisant des outils spécialisés (balance pour les poids lourds pour la mesure des charges, poutre Benkelman ou deflectomètre à boulet pour la mesure des déflexions). Ajoutons à cela le caractère statique et discret dans l'espace et dans le temps (à un endroit et à un instant donné) de ce type d'évaluation, qui ne permet pas un suivi constant de ces paramètres.

La détérioration des routes est le résultat de nombreux facteurs : leurs caractéristiques inhérentes (matériaux et épaisseurs des couches constitutives de la chaussée), les conditions météorologiques (cycles de température et de précipitation), les interactions dynamiques entre le véhicule et la route (vitesse, caractéristiques de la suspension des véhicules et rugosité de la surface) et les charges caractérisées par l'espacement des essieux, la pression des pneus et le poids par essieu. (New Truck, 1990) Dans tous ces éléments, c'est la charge à l'essieu du

véhicule qui s'avère être le facteur qui accélère le plus significativement l'usure de la route. De ce fait, réduire la charge à l'essieu des poids lourds ou l'agressivité, réduirait considérablement le taux d'usure de la chaussée.

Les poids lourds surchargés sont les principaux responsables de la détérioration rapide des routes. La mesure des charges embarquées dans les camions permet d'améliorer la conception de la chaussée et force la mise en place de mesure limitant la charge à l'essieu. En conséquence, la durée de vie des routes et des ponts augmenterait, tandis que les coûts d'entretien et de réhabilitation diminueraient. Par ailleurs, une étude de l'AASHTO a révélé que la suppression d'un seul camion surchargé – qui dépasse, par exemple, de 20 000 livres la limite permise, aurait le même impact positif sur les conditions routières que l'élimination de 44 500 véhicules. (Virtual, 2003 ; Virtual, 2009) Compte tenu de ces informations, il est impératif de trouver une solution pour réduire le taux de détérioration de la route résultant de la circulation de véhicules lourds surchargés.

Or, idéalement, pour ralentir la vitesse de la dégradation des routes, des systèmes de contrôle des charges transportées par les poids-lourds devraient être déployés sur les routes. Les autorités routières utilisent actuellement des stations de pesage statiques et de pesée permanente ou, en anglais, *Weight in Motion* (WIM). Les coûts d'installation élevés limitent l'implantation de ce système à l'ensemble du système routier : les coûts d'installation d'un seul WIM permanent dépassent les 200 000 USD tandis que les coûts d'une station de pesée statique dépassent les 800 000 USD.

Il existe donc, plusieurs systèmes pour mesurer les charges induites par les véhicules sur les routes. Or, ces systèmes sont dispendieux à acquérir et à maintenir et ne mesurent qu'un axe (z) puisqu'ils sont conçus pour ne mesurer que la charge des véhicules. Le système MIC proposé dans cette thèse, est conçu pour mesurer les 3 axes (x, y, z), afin de tenir compte de l'impact dans toutes les couches constitutives de la chaussée (surface, base et fondation), tout en ayant des coûts de maintenance et d'acquisition moins élevés. Ce système permet de

déduire, grâce aux capteurs, si la conception de la route est potentiellement problématique ou si des charges trop importantes endommagent la chaussée.



# CHAPITRE 1

## OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

### 1.1 Objectifs principaux

Le premier objectif (A) de la recherche est la conception, le développement, l'apprentissage et la validation d'un outil autonome et bon marché permettant de qualifier un état de dégradation donné d'une route dans le but de diagnostiquer la cause de détérioration. L'outil est une combinaison LIDAR et vidéo, deux technologies existantes sur le marché et courantes sur les nouveaux véhicules.

Le second objectif (B) de la recherche est de concevoir, développer et valider un système intégré dans la chaussée permettant de déterminer les charges du trafic, à très faible coût. L'outil est composé d'un module mécanique composé de capteurs de charge et d'un module électronique pour acquérir l'information, encastré sous la couche d'enrobé d'usure afin de mesurer les tassements causés par le trafic lourd.

Le premier sous-objectif (B1) est d'identifier les caractéristiques requises des capteurs pour mesurer les déplacements, afin de sélectionner le bon capteur à un coût d'acquisition et d'entretien raisonnable, le but étant d'implanter le système à l'échelle de tout un réseau routier. Ceci requiert la quantification des couches de la chaussée pour l'étalonnage de la courbe stochastique tassement-charge.

Le second sous-objectif (B2) est d'identifier la localisation la plus propice pour insérer le système d'acquisition intégré dans la route. Cette localisation propice prend en considération la distribution transversale des sillons de roues et la concentration de dégradations observées en surface. L'étalonnage de l'outil est basé sur les niveaux de tassements résultant de diverses charges et la corrélation entre les charges et les tassements.

## 1.2 Méthodologie

La méthodologie utilisée pour répondre au premier objectif (A) précité repose sur une combinaison du LIDAR et de la vidéo (LiVi), deux technologies populaires sur le marché et courantes sur les nouveaux véhicules, ce qui est en accord avec la volonté de développer une approche de saisie de données à peu de frais.

À ce titre, un jeu de données a été créé afin de construire une classification d'images de la dégradation de l'état de la chaussée, pour ensuite permettre de faire une identification des données acquises via les technologies LiVi. La plateforme utilisée pour faire l'apprentissage machine est Google AutoML. Cette plateforme a été utilisée avec le support d'un réseau de neurones pour qualifier automatiquement la détérioration des données acquises par le LiVi. En second plan, cet outil a servi pour classer les détériorations de la route avec un système de classification standardisée pour conserver un cadre de référence homogène.

L'approche a consisté à :

- Valider les différents types de dégradations de la chaussée et créer une base de données d'images de celles-ci.
- Effectuer une classification des images de ces types de dégradations dans un jeu de données.
- Créer un modèle d'apprentissage supervisé et établir une classification fiable par le réseau de neurones (Oliveira, 2009).
- Déployer le modèle avec les images acquises par le LiVi pour créer un cadre de référence des images des types de détérioration.
- Bâtir une base de données provenant des images qualifiées par le modèle.
- Mettre à jour les images qualifiées dans le jeu de données pour améliorer le modèle.

L'outil envisagé pour répondre au second objectif (B) est un module mécanique composé de capteurs de charge et un module électronique pour acquérir l'information, encastré dans la

couche d'enrobé d'usure (50 mm de profondeur) afin de mesurer les tassements causés par l'intensité des charges.

Il s'agit ainsi, de développer un cadre de référence afin de choisir les capteurs appropriés et les positionner à différents niveaux ( $z_i$ ) et coordonnées ( $x, y$ ) dans le but d'obtenir suffisamment d'informations pour déterminer les charges.

La seconde orientation méthodologique consiste en développer des modèles statistiques fiables permettant de déterminer les charges appliquées en surface à partir des déplacements mesurés par le système MIC. Plus particulièrement, il s'agit de :

- Procéder à l'évaluation des capteurs et des interfaces de communication sans-fil pour ensuite créer une infrastructure de capteurs avec des modems permettant d'obtenir des données fiables.
- Créer un prototype mécanique pour insérer les capteurs de mesures de charge.
- Déployer et implémenter la meilleure configuration possible des capteurs pour son emplacement pour l'épaisseur de l'enrobé bitumineux soit de l'ordre de 50 à 250 millimètres.
- Effectuer l'étalonnage des capteurs.
- Récupérer les données avec les capteurs et les intégrer dans une plate-forme pour analyser les données, il s'agit ici de Google Cloud Platform.
- Vérifier la fiabilité des données avec une comparaison des données acquises de façon conventionnelle.
- Faire l'analyse des données avec un modèle de régression linéaire avec paramètres de coefficient provenant d'une combinaison linéaire de fonction de référence.
- Développer un modèle de corrélation de coefficient entre les données de la route, les propriétés ainsi que les caractéristiques de celle-ci.
- Mettre en évidence l'importance de l'entretien des chaussées par une justification de la mise en œuvre des interventions précises et des avantages économiques.
- Réaliser une analyse des coûts de la mise en place des capteurs dans la chaussée.

### 1.3 Originalité des travaux envisagés

Depuis plusieurs années, la littérature, autant les articles scientifiques que les vastes études menées dans différents pays (FHWA, 1997; Transports Canada, 2007) traitent abondamment des coûts des transports. Cependant, pour ce qui est de la surveillance des actifs aux niveaux structural et fonctionnel, peu de documents ont été produits. La grande majorité de la littérature traitant de l'entretien des réseaux routiers, est directement liée aux observations de la surface de la chaussée. (Mei, 2014; Smith, 2007; Tiong, 2012) En effet, les derniers outils spécialisés tentent de couvrir une grande superficie du réseau routier pour identifier les dommages qui sont visibles principalement sur la couche de surface de la chaussée. La saisie des données de dégradation sur les routes est très coûteuse et le développement d'une plateforme qui a recours aux technologies des véhicules autonomes pour identifier les dégradations, données traitées ensuite par l'intelligence artificielle, est une innovation car elle permet d'obtenir les informations pour les administrateurs et gestionnaires à un coût minime. Le fait de centraliser les informations acquises et de les traiter automatiquement réduit les coûts d'opération. L'utilisation d'une plateforme centralisée dans le nuage informatique (cloud) a démontré son efficacité en termes de rentabilité ainsi que son efficience pour des entreprises de toutes tailles (Mohapatra, 2014).

L'originalité réside également dans une nouvelle avenue de recherche scientifique, principalement au niveau du cadre de référence des capteurs pour mesurer les charges. À cet effet, un dispositif conçu avec des extensomètres pour mesurer les déformations des résistances sous la charge de véhicules a été développé pour être inséré dans la chaussée. Les extensomètres permettent de mesurer les différents voltages créés sous la déformation physique des résistances afin de déduire la charge des véhicules. Le voltage acquis est fortement corrélé à la charge appliquée.

Avec cette approche, la réduction de coût pour acquérir, maintenir et implémenter le système d'acquisition permet d'obtenir davantage d'informations avec les points d'acquisitions sur les 3 axes (x, y, z) avec le MIC. Ces données permettent d'avoir une base de données complète



pour établir un cadre de référence pour la charge des véhicules se déplaçant sur la route, ainsi qu'une base de connaissances pour valider que le voltage du MIC demeure similaire avec une charge qui se déplace à différents endroits sur une chaussée. Lorsqu'on observe un changement significatif de voltage pour une même charge avec le MIC, ceci indique potentiellement une faiblesse de la chaussée aux endroits significatifs, d'où l'intérêt de l'approche.

Par ailleurs, et pour ce qui concerne le deuxième volet de cette recherche, force est d'admettre que l'utilisation du LiVi, permet d'automatiser les processus pour l'acquisition des informations, c'est-à-dire des images de la chaussée; et représente à ce titre, un changement majeur au niveau opérationnel. Ceci, couplé à un système d'apprentissage machine pour qualifier les différents types de déformations, constitue un système simple, permettant d'acquérir une grande quantité de données (sur des kilomètres de routes) et de transformer ces données en informations utiles à l'aide d'un modèle qualitatif pour la reconnaissance d'image (apprentissage machine). Ainsi, en bâtissant ce modèle, on conçoit une fondation pour que tous les types de données soient mesurées et évaluées avec une qualification d'images selon un standard unique. L'automatisation en temps réel, qu'on retrouve lors de l'acquisition et lors de la qualification des données, est l'un des points majeurs de cette innovation opérationnelle. Ces données sont insérées dans une matrice prédéfinie fournissant une vision précise, dans un moment donné, de l'état fonctionnel d'une chaussée.

Le recours au LIDAR couplé à la vidéo, permet le déploiement d'une approche très bon marché pour la saisie des données de dégradation sur les chaussées à partir des véhicules qui roulent. Ultimement, l'information est quasi-gratuite pour les utilisateurs.

Avec cette approche, le fait d'avoir deux moyens d'acquisition des données, i.e. le LiDAR et la vidéo, permet, non seulement, de qualifier de façon plus précise ou moins coûteuse différents types de déformations de la chaussée, mais apporte également une plus forte probabilité de reconnaissance des images collectées. On peut ainsi utiliser l'une ou l'autre de ces deux technologies, dépendamment du besoin, ou encore les deux conjointement.

Ceci est une innovation majeure en regard des procédés actuels de qualification de l'état du réseau routier.

## **CHAPITRE 2**

### **REVUE DE LITTÉRATURE – SUIVI DE L'ÉTAT DES CHAUSSÉES**

La thèse comprend une recherche documentaire à l'échelle internationale, portant sur l'évaluation structurale des routes et le recours à la télémétrie. Cette revue a été effectuée en considérant l'ensemble des facteurs et technologies viables de télémétrie pour le transport routier. Bien que cette revue de littérature soit d'abord dirigée vers des publications scientifiques, des efforts ont également été investis dans la recherche auprès de l'industrie auprès de partenaires qui ont un intérêt marqué pour le type d'analyses effectuées dans le cadre de la thèse envisagée.

Afin de bien baliser le développement des concepts qui sont abordés dans le cadre de cette thèse, les efforts d'acquisition d'information ont été dirigés tant vers les technologies développées que vers celles qui émergent et qui se développent.

#### **2.1 Suivi de l'état du réseau routier**

L'évaluation de la qualité de la route existante a pour but ultime de protéger les investissements importants engagés lors de la construction et de maintenir l'accès au territoire aménagé, par le biais d'un entretien adéquat moins coûteux qu'une réhabilitation ou une reconstruction de la chaussée.

À cet égard, on identifie trois types d'intervention sur une chaussée :

- Entretien ;
- Réhabilitation ;
- Reconstruction.

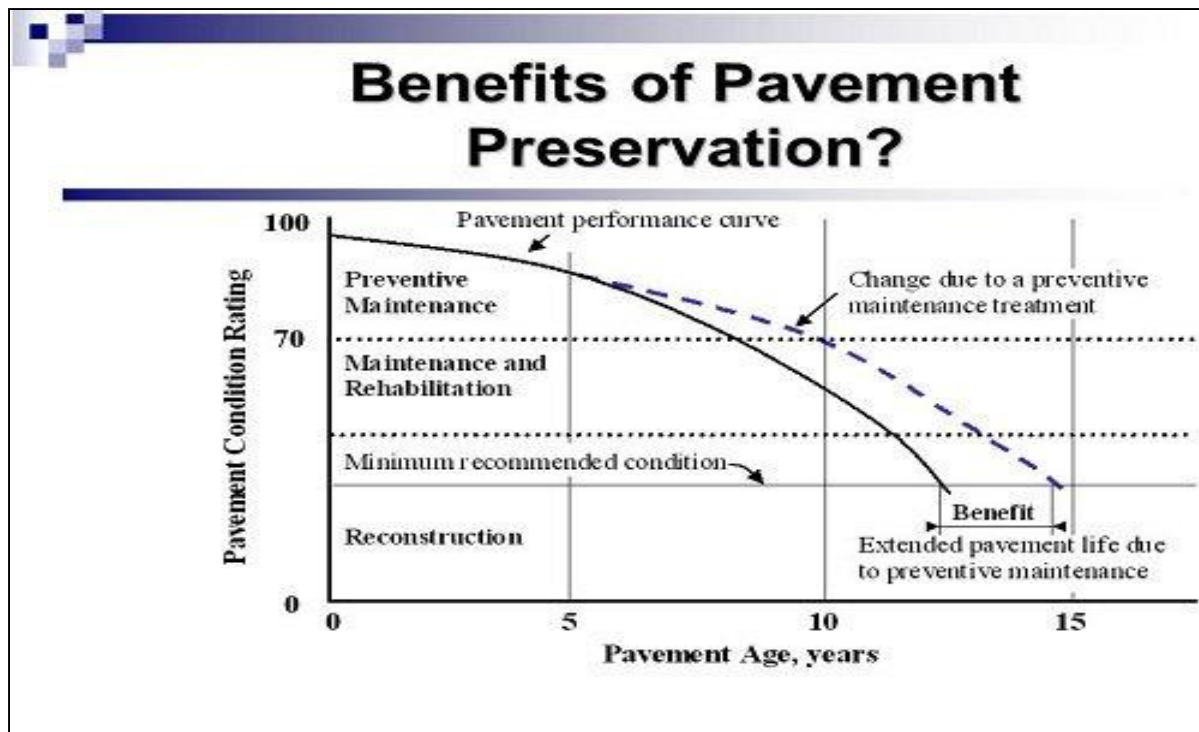


Figure 2.1 Bénéfice de la préservation (AASHTO, 2009)

Ainsi, selon l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2009), chaque dollar dépensé aujourd'hui pour maintenir une route en bon état éviterait 6\$ à 14\$ d'investissement ultérieur pour reconstruire la même route, une fois détériorée (Figure 2.1).

La détérioration du réseau routier est graduelle et inévitable qu'elle soit due au trafic lourd, ou à l'environnement (infiltrations des eaux, rayonnement UV, etc.). Il est donc critique d'en effectuer un suivi constant à l'aide d'indicateurs fiables (IRI, PCI, relevés de dégradation, etc.). Ce type d'indicateur est un mécanisme de gestion des routes qui permet d'identifier les chaussées pour lesquelles un entretien est requis et de maximiser les actifs routiers pour effectuer les interventions. (Miller, 2003).

Présentement, les informations sont recueillies régulièrement, mais de façon traditionnelle. Certaines autorités routières utilisent encore des méthodes de détection nécessitant une évaluation humaine du type « marcher, trouver, regarder et consigner » tandis que d'autres

utilisent des dispositifs mécaniques pour mesurer certaines surfaces. Les enquêtes dites « de marche » peuvent inclure 100% de la zone à mesurer, enregistrer et, parfois, cartographier. La *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) aux États-Unis a synthétisé près de 334 méthodes de capture de dommages de surface utilisant à la fois une personne physique et des méthodes automatisées. (McGhee, 2004).

Le passage du mode manuel à celui des collectes de données automatisées a augmenté au cours des 20 dernières années. Selon le NCHRP, en 1994, 40 états aux États-Unis surveillaient les dommages de la surface en utilisant essentiellement des méthodes manuelles. Cependant, quelques états américains tentaient de mettre en œuvre une certaine forme de surveillance numérique ou analogique avec un système vidéo automatisé. À partir de 2007, plusieurs entreprises bien établies sont devenues des fournisseurs de méthodes d'acquisition de données semi-automatiques. (Smith, 2007; Tiong, 2012) Aujourd'hui, la plupart des ministères du transport américains (DOT) sont ouverts à des démonstrations de fournisseurs afin de mettre en œuvre des systèmes entièrement automatisés.

Les méthodes traditionnelles fournissent des informations précises, mais l'obtention de ces données est chronophage. En outre, la localisation exacte des informations n'est généralement pas relevée. De plus, l'interprétation de la gravité des dommages relève de l'expérience mais aussi de la subjectivité de l'opérateur et de l'ingénieur (même si les critères d'évaluation sont bien établis), les résultats peuvent grandement varier. (Gramling, 1994) Par conséquent, l'intégration de la plus automatisée des méthodes de télédétection est inévitable car elle fournit des résultats fiables, lorsque générés et interprétés par un ordinateur. Le résultat de ces enquêtes automatiques est susceptible d'être moins cher, plus cohérent, plus rapide en plus de couvrir des zones plus larges.

### **2.1.1 Imagerie aérienne**

La détection des défauts de surface peut être réalisée avec des images captées par des avions qui offrent des résolutions plus élevées que celles produites par satellite. Les avions sont

couramment utilisés pour les applications de télédétection multidisciplinaire, de l'armée à l'environnement, en passant par l'architecture et l'urbanisme. Les avions peuvent être équipés de divers capteurs et de dispositifs d'enregistrement et recueillent des données opérationnelles à partir d'altitudes allant de 300 à 13 000 mètres. (Chen, 2011) L'imagerie aérienne ne permet qu'une détection des défauts de surface cependant.

### **2.1.2 Drones**

Les drones sont capables de fournir des données en haute résolution, très près de l'image en temps réel et souvent à moindre coût que les données aériennes ou spatiales. Un drone peut capturer des images de la route et des véhicules tout en fournissant des informations sur la circulation, les accidents ou les catastrophes naturelles, et ce, dans les 2 heures suivant un événement. (Feng, 2009) Les drones peuvent également identifier des défauts tels que la formation d'ornières ou de nids-de-poule sur les routes non pavées en utilisant la reconnaissance de formes et de classification d'images techniques à partir d'images 2D. Il est aussi possible d'utiliser des systèmes employant plusieurs drones pour colliger des images 3D. Leur temps de réponse rapide, leur grande maniabilité et une excellente résolution sont quelques-unes des caractéristiques qui rendent les drones très importants pour l'évaluation des catastrophes, des sites distants et non-accessibles, en plus des zones dangereuses. (Zhang, 2008; Tatham, 2009).

### **2.1.3 Véhicules d'enquête**

Une autre des méthodes de détection utilisée est celle des véhicules d'enquête qui sont employés dans le monde entier pour l'évaluation de chaussée. Ce type de véhicule permet des enquêtes sophistiquées où les défauts de surface de la chaussée, tels que la texture, la fissuration et l'orniérage peuvent être évaluées. Ce type d'information est utile puisque les données sont en continu, à haute résolution et peuvent être recueillies à vitesse d'autoroute sans interruption de trafic. (Saarenketo, 2000) Ces véhicules sont également capables de collecter des données sous les arbres, les ponts, les tunnels, etc. qui sont autrement masquées à partir de vues aériennes ou satellitaires. La collecte des données est faite à l'aide de diverses

méthodes, y compris des scanners laser, photo ou caméras vidéo, thermiques ou acoustiques pour identifier les dommages. Il s'agit d'un système d'enquête de dommage monté à bord d'un véhicule qui collecte des données en illuminant la surface de la route à l'aide d'une lumière laser à l'argon, tout en effectuant un balayage de la surface à l'aide d'un scanner laser et qui enregistre le profil en données vidéo (Figure 2.2). (Uddin, 2011; Zhang, 2015).



Figure 2.2 Véhicule d'évaluation de route (Zhang, 2015)

## 2.2 Méthodes visuelles

Les méthodes dites visuelles d'évaluation de la qualité de la chaussée, qu'elles soient manuelles ou automatiques, sont les approches les plus courantes pour la détection et la classification des dommages de surface ainsi que l'identification de dommages à grande échelle. Ces données sont recueillies de multiples façons, y compris par des scanners à bord de véhicules en mouvement ou par des vues aériennes ou des photos satellites. Les méthodes

de détection automatiques sont plus rapides et plus faciles à appliquer à plusieurs images qu'une simple interprétation manuelle. L'interprétation automatique comprend des techniques de reconnaissance de transformations et de configurations d'images pour identifier les défauts et les dommages. (Mei, 2014).

La détection des fissures à l'aide de techniques de traitement d'image est difficile car la texture de la surface de la route peut dissimuler des irrégularités. (Chambon, 2011) La détection automatique de dommages de la chaussée devient plus complexe avec les images s'il y a des changements d'éclairage, la présence d'ombres, des variations de textures de surface ou, encore, lorsque les routes ont des variations dans la réflectivité de leur surface. De plus, la plus grande lacune de ce type d'interprétation visuelle, certes simple, est qu'elle ne fournit pas d'informations à propos des défaillances du sous-sol et de son fonctionnement structural.

Pour pallier ce manque, l'AASHTO a défini les essais à réaliser sur les routes afin d'en caractériser pleinement la composition, la résistance, etc. (1958-1961). Les essais routiers de l'AASHTO définissent les caractéristiques d'une chaussée pouvant être mesurées pour ensuite être utilisées afin de déterminer la durée de vie résiduelle de la chaussée. Les essais routiers de l'AASHTO ont été révolutionnaires car ils ont conduit à une compréhension universelle de la façon dont on peut mesurer et qualifier l'état de la chaussée. (Haas, 2001).

### **2.3 État des chaussées**

L'état des chaussées est qualifié selon quatre caractéristiques principales :

- L'uni ;
- La capacité structurale ;
- La friction/la résistance au dérapage ;
- Les détériorations de surface.



### 2.3.1 L'uni

L'uni est une mesure du confort au roulement d'un utilisateur. L'indice de rugosité international (IRI), développé en 1983, et désormais devenu un standard mondial établi. (Sayers, 1986).

L'IRI est défini comme la pente moyenne corrigée d'un profil traversé par un véhicule de référence circulant à 80 km/h, soit un indice proportionnel aux déplacements verticaux cumulés de l'axe de la roue par rapport au châssis de ce véhicule. Il est exprimé en pouce/mile, en mètre/kilomètre et, le plus couramment, en millimètre/mètre. Il varie entre 0 mm/m, traduisant une surface parfaite sans rugosité, et 11 mm/m, caractérisant une route détériorée. (Sayers et al., 1986).

Le but de cet indice est de conduire à une décision sur la nécessité de réhabiliter une route. L'IRI a été développé lors de l'Expérimentation Internationale de Rugosité des Chaussées (IRRE) conduite par la Banque Mondiale au Brésil, en Angleterre, en France, en Belgique et aux États-Unis. En 1982, au Brésil, les mesures réalisées sur un grand nombre de routes dans des conditions différentes et avec une grande variété d'instruments et de méthodes ont permis d'obtenir une échelle complète de cet indice (Figure 2.3).

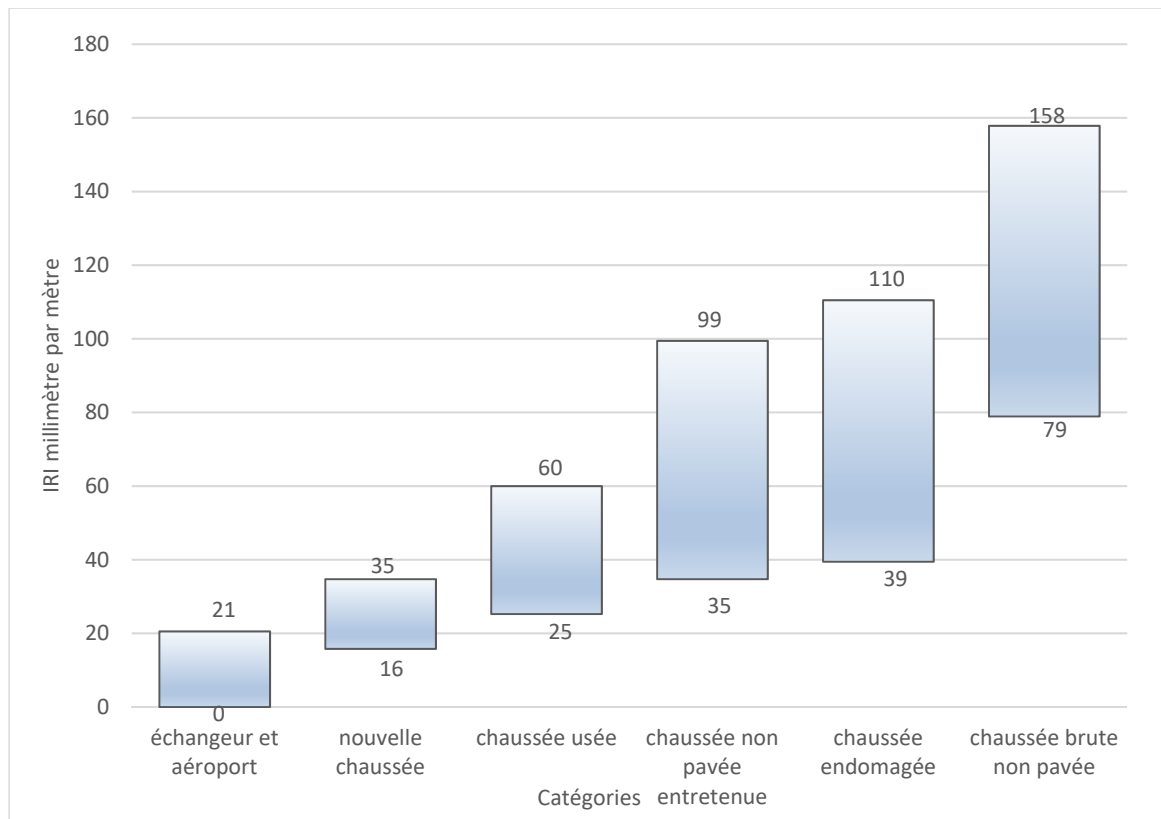


Figure 2.3 Échelle d'indice de rugosité (Sayers et al. 1986)

Pour référence, le ministère des Transports du Québec (MTQ) propose de viser la valeur d'IRI de 1,2 m/km, pour les autoroutes et les routes nationales. Si la valeur de l'IRI dépasse 1,7 m/km, la route est considérée comme en mauvais état et des travaux doivent être envisagés. (Ministère des Transports du Québec, 1999).

Il y a deux façons typiques de mesurer l'IRI. La première solution est d'utiliser un véhicule spécialement équipé pour mesurer le changement dans le profil vertical de la route. Toutefois, ce processus peut créer des problèmes de répétabilité, c'est-à-dire qu'il est possible que les résultats varient entre deux collectes de données : le véhicule de mesure ne peut maintenir ses caractéristiques précises sur des mesures répétées et ceci ne permet donc pas d'obtenir des valeurs identiques pour chaque mesure. (Shahin, 2007) Un second procédé est de mesurer le profil de la route avec un laser et de calculer mathématiquement l'indice de rugosité. La mesure de la chaussée, de cette manière directe, permet d'obtenir des résultats reproductibles.

L'utilisation de lasers est devenue plus populaire ces dernières années, notamment grâce à la diminution de ses coûts. (Shahin 2007) L'IRI est une considération importante pour le confort du conducteur. Les coûts d'exploitation des véhicules sont directement impactés par la valeur de l'IRI. (Shahin 2007) L'IRI augmente avec l'âge de la route et son degré d'utilisation. Les travaux d'entretien (comme un resurfaçage) permettent de garantir un bon IRI même après plusieurs années d'exploitation de la chaussée.

### **2.3.2 Performance structurale**

La deuxième caractéristique, celle des performances structurales, est déterminée par la capacité portante des différentes couches de matériaux constitutives de la chaussée. Une méthode de mesure dite de « contrôle non destructif » (CND) est utilisée pour déterminer la solidité d'une route existante (Shahin 2007) comme l'utilisation d'une poutre Benkelman ou d'un déflectomètre à boulet.

Pour les chaussées flexibles, il est possible, à partir des mesures obtenues avec les appareils cités ci-dessus, de déterminer les caractéristiques des différentes couches, telles que le module d'élasticité, les charges admissibles pour un nombre précis d'applications de la charge, en se basant sur les épaisseurs et les matériaux de chaque couche (Figure 2.4). (Shahin 2007) Les calculs de capacité portante permettent de déterminer la couche la plus faible (lorsqu'elle travaille en compression ou en tension). La capacité portante, couplée aux dégradations observées en surface, permet de déterminer le mécanisme et la cause de la détérioration.

Si la base de données est correctement segmentée, elle permet une prévision plus précise de la désintégration du PCI sur une route au fil du temps.

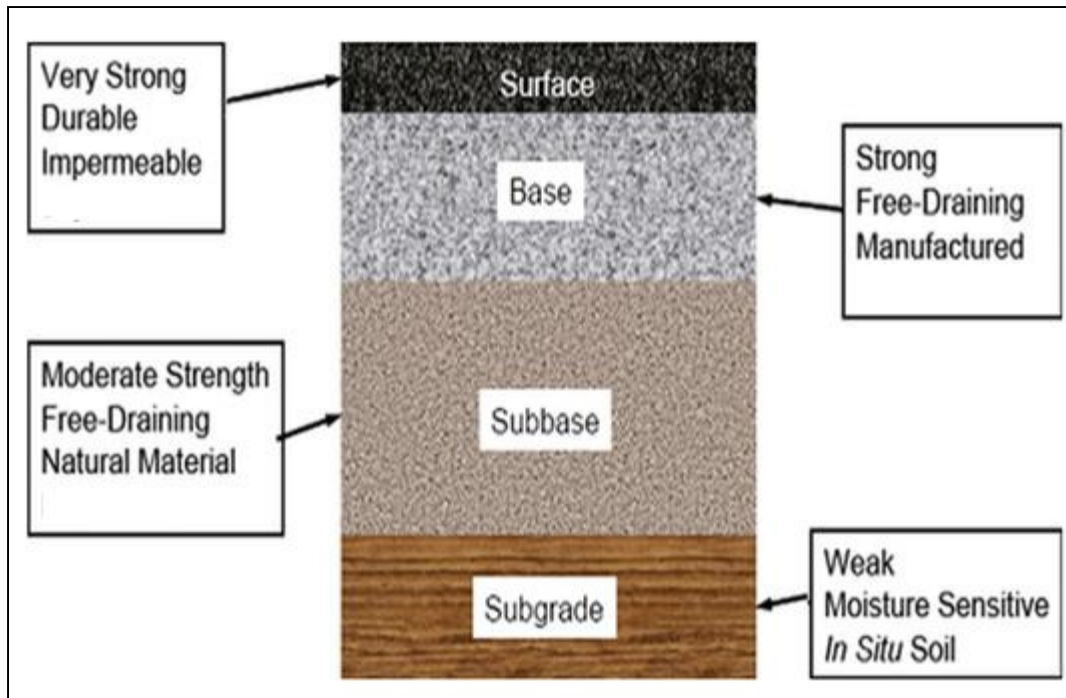


Figure 2.4 Structure de la route (FHWA, 2007)

### 2.3.3 La résistance au dérapage

La troisième caractéristique associée à l'état des routes est la résistance au dérapage, c'est-à-dire la capacité de la chaussée à fournir à un véhicule une surface avec friction. Le frottement sur une route pavée sèche n'est pas évalué comme un facteur majeur de la santé de la chaussée, toutefois, la friction devient importante dans des conditions mouillées ou verglacées lorsque la maniabilité du véhicule diminue de manière significative. La raison principale qui pousse à déterminer le facteur de friction est donc une question de sécurité et de diminution des probabilités d'accidents susceptibles de se produire. (Shahin, 2007) La réhabilitation d'une chaussée a également pour objectif d'améliorer la sécurité surtout sur une route à débit élevé de circulation. Un resurfaçage permet de résoudre les problèmes liés au manque de friction.

### 2.3.4 Dégradations de surface

La dernière caractéristique est l'indicateur des conditions de la route, classé par le PCI. Le PCI a été développé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine avec l'objectif d'établir une

méthode reproductible pour l'enregistrement des informations qualitatives de la route. (Shahin, 2007) Le PCI identifie différents problèmes de la route et définit leurs niveaux de gravité (Figure 2.5).

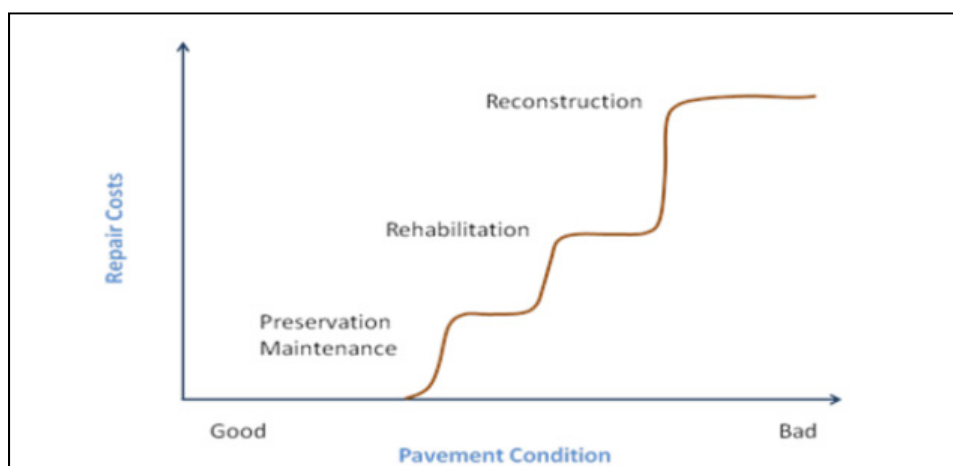


Figure 2.5 PCI, relation entre les coûts et les conditions de la route (FHWA, 2013)

De plus, l'indice suggère des méthodes de réparation de ces problèmes et identifie les causes possibles. Le PCI est uniquement déterminé par les niveaux de détresse. (Shahin, 2007) Par conséquent, les données et l'évaluation sont extrêmement importantes pour les prévisions de la durée de vie de la route (Figure 2.6).

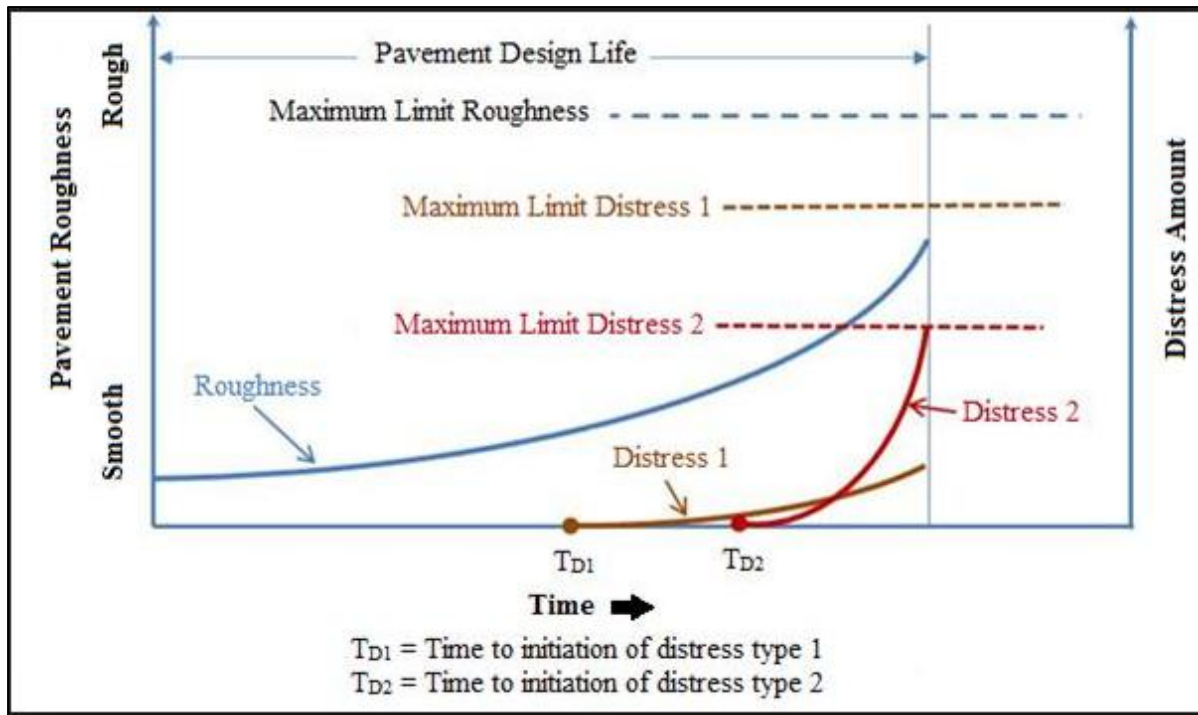


Figure 2.6 Exemple de multi dommages subis par la route (FHWA, 2001)

La charge de trafic, les températures fluctuantes ou de mauvaises constructions sont des exemples de causes pour une chaussée en mauvais état. (Shahin, 2007) Étant donné que l'obtention des données et des informations reliées au PCI est si importante, le présent document se propose d'examiner les différentes méthodes de collecte de données utilisées dans les dernières années. L'avantage d'acquérir ces informations est de les utiliser ultérieurement pour valider les nouvelles données acquises avec la télémétrie.

Le PCI est un indice qui limite le diagnostic des causes de détériorations lorsque fournit seul. En effet, il donne une note sur l'état général de la chaussée mais ne détaille pas les dégradations observées, ni leur localisation.

## 2.4 Évaluation de la capacité structurale de la chaussée

Cette section présente un court résumé historique de la politique américaine pour limiter les charges des poids lourds, d'après une publication du *US Department of Transportation* (DOT)

en 2000. Dans la foulée de la publication du *Truck Size and Weight Study* en 2000, le gouvernement fédéral américain applique les premières limites pour les charges des camions avec son *Federal Aid Highway Act* de 1956. Cette loi impose ainsi une charge limite pour les véhicules commerciaux sur les autoroutes : le poids total maximal est fixé à 73 280 livres, soit 18 000 livres pour les essieux simples et 32 000 livres pour les essieux doubles. Quelques années plus tard, en 1974, le congrès vote la *Federal Aid Highway Amendments* qui augmente le poids total autorisé à 80 000 livres, 20 000 livres pour les essieux simples et 34 000 pour les essieux doubles.

En 1990, une équipe de recherche conduit une étude qui permet de quantifier l'impact potentiel sur les routes de 10 camions si les limites en vigueur sont augmentées. (Truckweight, 1990) Les chercheurs découvrent alors qu'une augmentation de seulement 10% des charges par essieu, représente un coût additionnel de 25 millions de dollars pour de nouvelles chaussées et pour les travaux de reconstruction, sans oublier les 350 millions nécessaires pour procéder au resurfage des chaussées déjà en place. Il a été observé, entre autres, qu'un seul camion de 80 000 livres fait autant de dommages à la route que 9600 voitures. Une augmentation des limites permises signifie également une mise à jour des guides de conception des routes, puisque l'épaisseur des chaussées doit être augmentée, considérant l'accroissement des charges et du trafic, ce qui engendre des coûts supplémentaires considérables. En outre, le contexte économique de l'époque fait en sorte que les états octroient davantage de permis pour des camions dits surchargés et cette tendance est à la hausse année après année.

Les autorités routières utilisent actuellement des stations de pesage statiques et de pesée permanente ou, en anglais, *Weight in Motion* (WIM). Un système WIM remplit principalement deux fonctions pour la préservation de la route :

1. Collecte de données ; et,
2. Classification des véhicules.

Il s'agit donc d'un outil majeur pour collecter automatiquement les données de trafic, y compris le poids des véhicules, leurs volumes, le type de véhicules et leur vitesse. Les informations sur

le trafic sont essentielles pour un programme de gestion des autoroutes et servent à l'exploitation et au contrôle de la circulation tout comme à la conception structurale des routes et des ponts. (Mcall, 1997, Quinley, 1996).

Les WIM traditionnels sont généralement divisés en trois catégories : systèmes permanents, semi-permanents et portables. Chacun est généralement composé de deux éléments principaux (un capteur et un contrôleur) servant à la collecte et à l'analyse des données. On trouve aussi des capteurs de poids/balance, des détecteurs de boucle inductive et un ordinateur avec interface. Les détecteurs de boucle inductive sont utilisés pour détecter les véhicules en approche et mesurer la distance entre les essieux ainsi que la vitesse du véhicule. L'interface de l'ordinateur est généralement un enregistreur de données équipé d'un microprocesseur qui surveille et stocke les données de trafic (y compris l'espacement des essieux, le poids brut du véhicule et sa vitesse). Ces données peuvent être récupérées sur place ou transmises avec ou sans fil, depuis un emplacement rural/urbain vers le bureau central où les données brutes seront ensuite transformées en informations. Des applications diverses, des périphériques optionnels, des interfaces d'identification automatique de véhicule, des caméras vidéo, modems, etc. peuvent être ajoutés au besoin.

Ce sont les capteurs de poids – ceux qui pèsent les véhicules, qui constituent le matériel clé du système. Ces capteurs peuvent être portables ou installés de manière permanente en fonction des exigences du système et les catégories sont différenciées en fonction de la portabilité de l'équipement : les dispositifs permanents collectent et analysent les données sur un seul emplacement, tandis que les systèmes semi-permanents disposent de capteurs intégrés à la chaussée et c'est alors le contrôleur du système qui se déplace d'un site à l'autre. Les équipements pour les appareils portables, par définition, peuvent être déplacés d'un système à l'autre. Cependant, mesurer avec précision le poids du véhicule à l'aide d'un WIM s'avère difficile en fonction des conditions sur place, des exigences et de facteurs divers tels que le type du site de déploiement, l'installation du capteur WIM, son emplacement sur la route, l'étalonnage du système, la dynamique du véhicule au moment où le capteur WIM est touché, la précision de la classification véhicule, etc. (Mcall, 1997, Quinley, 1996).



Les critères de sélection pour implanter un système WIM sur un site incluent : la pente, la courbure, la pente transversale, la largeur, la vitesse, l'adhésion de la surface, la formation d'ornières sur la chaussée, la visibilité et les effets de la poussière ou des restes de sable/sels/roches déposés en hiver au besoin. Un nivellement est aussi nécessaire pour éviter les effets du transfert de poids entre les essieux avant et arrière d'un camion chargé. Les performances du site WIM sont optimales lorsque le trafic se déplace à une vitesse constante. Une section droite et visible de la route devrait être choisie pour empêcher les conducteurs de changer de vitesse ou de voie, et les sites devraient être situés à l'écart des bretelles d'entrée et de sortie (Figure 2.7). Les dynamiques de vitesse, d'accélération et de décélération des véhicules ont une incidence sur la précision de la mesure lorsqu'ils passent sur le capteur WIM. (Midleton, 2007) De même, la pression atmosphérique et la direction du véhicule (par exemple, le changement de voie) sont des facteurs ayant une incidence sur la précision des mesures. Contrairement aux premiers critères de sélection listés ci-dessus et qui concerne la géométrie de la route, cette dynamique échappe au contrôle lors de la sélection de sites WIM. (Rakha, 2003).



Figure 2.7 Exemple de WIM  
(<http://www.dot.ca.gov/traficops/wim>)

L'amélioration de la précision et de la longévité des systèmes WIM a été largement étudiée ces dernières années. Généralement, les chercheurs discutent de deux approches. La première est en lien avec l'amélioration des techniques de calibration, qui peuvent être établies, soit en tirant parti de l'analyse statistique des chaussées et des données des véhicules, soit en appliquant des techniques de traitement du signal créé par capteur, augmentant ainsi l'immunité du système au bruit. La deuxième approche consiste à appliquer de nouvelles technologies de capteurs, telles que les ondes acoustiques WIM, les fibres optiques WIM ou les ponts WIM. Or, bien que des idées aient été présentées pour les améliorer, les systèmes WIM demeurent souvent inadéquats et engendrent des coûts d'installation et de maintenance élevés. (Papagiannaki, 1995; Yi, 2008; McCormak, 2005; Cebon, 2001; Hill, 2002; Leming, 2002).

Dans la dernière décennie, la technologie WIM a été utilisée généralement pour le contrôle des charges sur les véhicules transportant des charges importantes comme les camions ou les convois exceptionnels. Aujourd'hui, le système est utilisé dans une grande variété de tâches, incluant, mais non limitée à la protection et la gestion des autoroutes et autres investissements en infrastructures (Taylor, 1995).

## **2.5 Revue de littérature au niveau fonctionnel**

L'inspection de la chaussée est l'un des éléments les plus importants pour l'implémentation de la base de données sur l'état de la route en surface. Pour conserver un inventaire logique dans un système, il est nécessaire de segmenter le réseau routier en sections homogènes, pour bien catégoriser les données de chacun des tronçons et mettre à jour les données de performance de la chaussée. Ce processus permet d'obtenir des informations pour déterminer l'entretien préventif et les travaux de réhabilitation à effectuer ainsi que pour déterminer les projets prioritaires du réseau routier. Il existe, dans la littérature actuelle, bon nombre de rapports sur l'évolution de la chaussée classifiée selon le *Pavement Condition Index* (PCI). (ASTM, 2018) Les informations peuvent être acquises non seulement à courte distance de la chaussée (vidéo embarquée dans un véhicule), mais également à de plus grandes distances (imagerie aérienne ou satellite, drone).

### 2.5.1 Vue d'ensemble des méthodes de collecte de données existantes

Pendant de nombreuses décennies, les agences locales et divers départements aux États-Unis ont collecté des données sur les autoroutes, principalement pour aider les décideurs à évaluer et gérer efficacement les actifs, ainsi qu'à prévoir le trafic. (Jalayer et al., 2015) Les techniques couramment utilisées sont détaillées dans le Tableau 2.1 :

Tableau 2.1 Méthodes et équipements de collecte de données  
Adapté de Gong et al., 2013.

| <u>Méthode de collecte de données</u>     | <u>Équipement et méthode</u>                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inventaire de terrain                     | Utilisation d'un GPS, d'outils de mesure de distance et d'un ordinateur portable pour obtenir les informations souhaitées sur le terrain.                                             |
| Journal photo/journal vidéo               | Conduire un véhicule le long de la route tout en prenant des photos ou des vidéos pour obtenir un enregistrement visuel qui pourra ensuite être analysé pour en extraire les données. |
| Systèmes de cartographie GPS/SIG intégrés | Utilisation d'un enregistreur de données de terrain GPS/SIG intégré pour enregistrer les informations d'inventaire et les stocker simultanément dans une base de données SIG.         |
| Photographie aérienne/imagerie satellite  | Analyser des images haute résolution prises à partir d'un avion ou d'un satellite pour identifier les informations d'inventaire d'autoroute.                                          |
| Scanners laser terrestres fixes           | Utilisation des informations ponctuelles 3D précises (nuages de points) obtenues à partir de scanners laser 3D fixes pour extraire des données d'inventaire routier.                  |

Sur la base des recherches effectuées au cours des deux dernières décennies, nous pouvons dire que, selon la tâche pour laquelle elle est utilisée et les types de caractéristiques à collecter, chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients, tel que présenté dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Avantages et inconvénients des diverses méthodes de collecte de données  
adapté de Gong et al., 2013

| <b><u>Méthode de collectes de données</u></b> | <b><u>Avantages</u></b>                                                                                                                                                                              | <b><u>Désavantages</u></b>                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inventaire de terrain                         | Faible coût initial, faibles efforts de réduction des données, peuvent collecter des données d'inventaires routiers riches.                                                                          | Exposition des équipages à la circulation, temps de collecte de données sur le terrain long, données moins précises.                                         |
| <b><u>Études connexes</u></b>                 | Khattak et al. (2000)                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                              |
| Journal photo / journal vidéo                 | Moins d'exposition à la circulation, temps de collecte de données de terrain court.                                                                                                                  | Aucune dimension de fonctionnalité de mesure, efforts de réduction de données importants.                                                                    |
| <b><u>Études connexes</u></b>                 | Wang et al. (2010), Hu et al. (2002), Wu et Tsai (2006), Degray et Hancock (2002), Jeyapalan (2004), Maerz et McKenna (1999), Jeyapalan et Jaselskis (2002), Tsai (2009), et Robyak et Orvets (2004) |                                                                                                                                                              |
| Systèmes de cartographie GPS/SIG intégrés     | Coût initial faible, moindres efforts de réduction des données, les données d'inventaire peuvent être transférées via une connexion 3G                                                               | Exposition de l'équipage à la circulation, temps de collecte de données sur le terrain long, problèmes de panne du GPS causés par les arbres                 |
| <b><u>Études connexes</u></b>                 | Caddell et al. (2009)                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                              |
| Photographie aérienne/imagerie satellite      | Temps de collecte de données court, aucune exposition à la circulation, aucune interruption du trafic, compatibilité des images ortho-rectifiées avec le GPS                                         | Impossible d'identifier correctement certains types de caractéristiques à partir d'images verticales (telles que des panneaux de signalisation)              |
| <b><u>Études connexes</u></b>                 | Hallmark et al. (2001) et Veneziano (2001)                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                              |
| Scanners laser terrestres fixes               | Peut fonctionner à la lumière du jour ou dans l'obscurité, haute précision des données                                                                                                               | Temps de collecte des données sur le terrain long, exposition au trafic, coût initial élevé, temps de réduction des données long, grande taille des données. |
| <b><u>Études connexes</u></b>                 | Pagounis et al. (2009), California State Department of Transportation (2011), et Slattery et Slattery (2010)                                                                                         |                                                                                                                                                              |

À la suite d'une enquête menée aux États-Unis en 2015, Jalayer et al. constatent que, malgré leurs inconvénients majeurs, la cartographie GPS/SIG intégrée, l'inventaire sur le terrain et l'imagerie aérienne restaient les trois technologies les plus utilisées par les états répondants. Aucune explication détaillée n'étant donnée pour ces résultats, nous pouvons seulement supposer que les services de transport et les autres agences locales continuent à utiliser ces technologies par habitude, car elles sont relativement faciles à utiliser : les employés savent les manipuler et les logiciels nécessaires pour interpréter les données collectées sont bien rodés. Cela concorde avec les conclusions d'une étude précédente selon laquelle, bien que l'équipe de recherche ait identifié le LiDAR mobile comme une méthode prometteuse, le coût de l'équipement, les efforts considérables de réduction des données nécessaires après la collecte et la formation du personnel constituaient ses inconvénients majeurs. (Zhou et al., 2013) Nous abordons cet aspect plus loin dans le présent document.

### **2.5.2      Système de cartographie mobile**

La cartographie mobile implique que les données géospatiales soient collectées à l'aide de capteurs de cartographie et de navigation montés de manière rigide sur une plateforme mobile (voiture, train, avion, sous-marin, navire, etc.). (Tao et Li, 2007) Il existe deux types de technologies de cartographie mobile : les systèmes de cartographie mobiles basés sur l'imagerie et les systèmes de cartographie mobiles basés sur le laser. Le matériel comprend généralement :

- Capteurs de cartographie : systèmes d'imagerie et/ou de balayage laser.
- Système de navigation : système mondial de navigation par satellite (GNSS) et système de navigation par inertie (INS).
- Capteurs de point mort complémentaires : instrument de mesure de distance (DMI), odomètre ou boussole numérique. (Maynooth, 2012)

Ces dernières années, les deux technologies sont devenues de plus en plus abordables, en partie à cause des progrès techniques et technologiques récents, mais principalement parce que l'utilisation faite des données collectées compense souvent pour les coûts d'obtention de ces

données. Voici, au Tableau 2.3, un aperçu des systèmes de cartographie mobiles utilisant une caméra ou une combinaison de laser et de caméra et leurs spécificités :

Tableau 2.3 Différents types de systèmes de cartographie mobiles et leurs spécificités

| <b><u>Nom et développeur</u></b>                    | <b><u>Capteurs de navigation</u></b>                           | <b><u>Capteurs de cartographie</u></b>                       | <b><u>Précision de la position</u></b>                         | <b><u>Application principale</u></b>                                                       |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| GPSVan, Ohio State University                       | GPS, INS à base de gyroscope, odomètre                         | Système de vision numérique, caméras vidéo couleur           | 1 à 3 m                                                        | Cartes routières numériques et inventaires des autoroutes                                  |
| VISAT, University of Calgary                        | DGPS, INS, DMI                                                 | Huit appareils photo numériques, une caméra vidéo couleur    | 0.3 m                                                          | Système d'arpentage routier                                                                |
| KISS, University of the Federal Armed Forces Munich | GPS, IMU, deux inclinomètres, compteur kilométrique, baromètre | Paire d'appareils photo numériques, une caméra vidéo couleur | 0.1 m                                                          | Caractéristiques routières et cartographie environnante                                    |
| CDSS, Geodetic Institute Aachen                     | Deux GPS code C/A, deux odomètres, baromètre                   | Deux caméras vidéo                                           | Moins de 1 m sur les routes et jusqu'à 3 m dans les villes     | Cartographie des caractéristiques de la route à l'aide d'un système matériel à faible coût |
| PHOTOBUS, Institut fédéral suisse de technologie    | GPS bi-fréquence, INS                                          | Caméras vidéo orientées verticalement et horizontalement     | 0.2 à 0.4 m                                                    | Cartographie des panneaux routiers                                                         |
| TruckMap, John E. Chance & Associates               | Plusieurs récepteurs GPS, capteur d'attitude numérique         | Télémètre laser, caméra vidéo                                | 0,31 m en horizontal                                           | Relevé de couloirs de lignes de transmission d'électricité, cartographie urbaine           |
| GEOMOBIL, Institut cartographique de Catalogne      | Deux ensembles de GPS, IMU, DMI                                | Paire de caméras numériques stéréoscopiques, scanner laser   | 0,18 m et 0,35 m en horizontal et 0,13 m en position verticale | Cartographie urbaine                                                                       |
| StreetMapper, 3D Laser Mapping and IGI mBH          | GPS, IMU, DIA                                                  | Appareil photo numérique, deux scanners laser                | 0.01 à 0.03 m                                                  | Autoroutes, caractéristiques des routes et cartographie urbaine                            |
| IP-S2, Topcon                                       | GNSS, IMU, compteur kilométrique                               | Caméra panoramique, trois scanners laser                     | 0.015 à 0.040 m                                                | Services publics, gestion des actifs SIG et transport                                      |
| LYNX M1, Optech                                     | GPS, IMU, DMI                                                  | Quatre appareils photo numériques, deux scanners laser       | 0.05 m                                                         | Infrastructure routière, gestion des actifs, services publics                              |

Tableau 2.3 Différents types de systèmes de cartographie mobiles et leurs spécificités (suite)

| <u>Nom et développeur</u>        | <u>Capteurs de navigation</u> | <u>Capteurs de cartographie</u>                      | <u>Précision de la position</u>                       | <u>Application principale</u>                                                                             |
|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MoSES, 3D Mapping Solutions GmbH | DGPS, IMU, odomètre           | Huit appareils photo numériques, deux scanners laser | 0,03 m en horizontal et 0,003 m en position verticale | Relevés de chantiers routiers et ferroviaires, gestion de la qualité de trajectoire, cartographie urbaine |
| StreetView, Google               | DGPS, IMU, odomètre           | Neuf appareil photo numérique, trois scanners laser  | N/a                                                   | Cartographie de la rue à des fins de visualisation                                                        |
| SITECO, PaveScanner4             | GPS, INS, IMU, DMI            | Deux scanners laser, caméra sphérique                | 0.01 m                                                | Inspection de la surface de la chaussée                                                                   |

Le principal avantage des systèmes de cartographie mobiles, qu'ils soient basés sur l'image ou sur le laser, est que, contrairement à d'autres technologies, il n'est pas nécessaire de disposer de points de contrôle au sol ou *Ground Control Points* (GCP) ; sa capacité à géoréférencer directement les données dans le cadre de coordonnées global supprime la nécessité de tout autre système de référencement géographique externe. (El-Sheimy, 2005) Les GCP sont des marques physiques de couleurs contrastantes placées sur une zone qui servira de guide ; comme le logiciel de cartographie sait exactement où se trouve chacune de ces marques, il peut référencer leur emplacement lors de la mise en correspondance de tous les autres points de la carte (Figure 2.8).



Figure 2.8 Marquage de GCP (<https://support.dronedeploy.com/docs/working-gcp-step-by-step>)

Les GCP peuvent augmenter la précision des données dans certains projets de systèmes de cartographie mobile, mais ils ne sont pas obligatoires comme avec d'autres méthodes d'arpentage. (Ellum et El-Sheimy, 2002).

## **2.6 Avantages de la surveillance structurale et fonctionnelle**

L'utilisation de technologies télémétriques offre un nouveau potentiel pour les gestionnaires des réseaux routiers afin de contrôler une grande surface en peu de temps. La surveillance structurale est un domaine en plein essor qui propose beaucoup de nouvelles approches innovatrices attirant les intérêts scientifiques et techniques, telles que l'évaluation de la santé des bâtiments (*Structural Health Monitoring*). (OWI, 2013). Ce sujet est d'une importance majeure puisque beaucoup de structures sont âgées et le coût de leur entretien ou de leur réhabilitation représente des investissements importants. Créer un système de surveillance continue permet d'enrayer les interventions inutiles et de se concentrer uniquement sur les interventions nécessaires les plus adéquates. (Mednis, 2011).

Cette surveillance est directement concernée par l'évaluation de l'état de la structure puisqu'elle cherche à détecter la présence et l'étendue des dommages structuraux et fonctionnels. Cette approche est similaire à l'approche adoptée par la méthodologie de CND, la nuance est que, dans notre approche, des capteurs seront utilisés pour effectuer la détection de mouvements et que ces capteurs seront installés en permanence dans la structure.

L'intérêt qui réside dans la possibilité de surveiller et de détecter les dommages rapidement est omniprésent dans les domaines du génie mécanique, aérospatial et génie civil. Les méthodes actuelles de détection des dommages sont, généralement, visuelles ou localisées avec des méthodes expérimentales telles que les méthodes acoustiques ou ultrasoniques, les méthodes de champ magnétique, la radiographie, le radar, la thermographie infrarouge, ou la détection hyperspectral. (Clark, 2003; Clark, 1999; Diefenderfer, 2006; Maser 1996).



Toutes ces techniques expérimentales exigent que les déformations soient connues et identifiées a priori et que la portion de la structure en cours de contrôle soit facilement accessible. Soumises à ces limitations, les méthodes expérimentales peuvent seulement détecter les dommages qui sont à proximité de la surface de la structure. Il est donc nécessaire, pour effectuer une détection de dommages globale, d'utiliser une nouvelle méthode quantitative qui pourra être, par la suite, appliquée à des structures complexes (Figure 2.9).

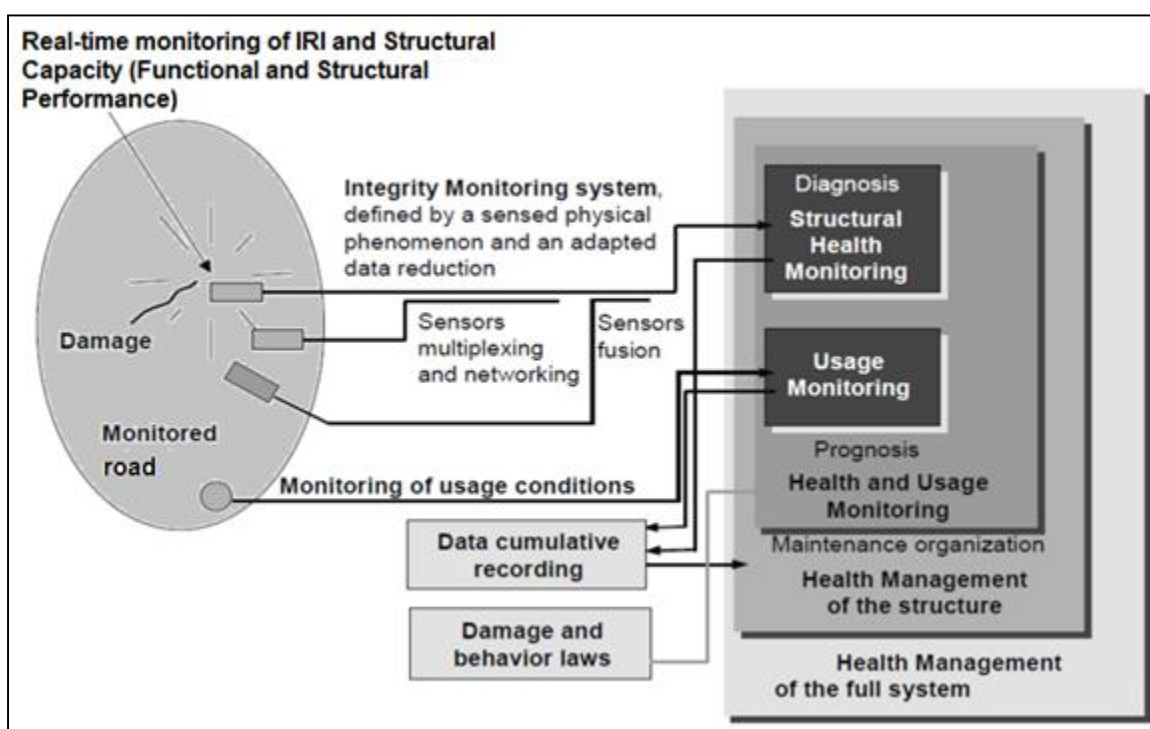


Figure 2.9 Diagnostic, pronostic et gestion du système (Balageas dans OWI, 2013)

La prémisses de base de la détection de dommages repose sur les indices de vibrations, la température, l'humidité, le tassement et la modification de la compaction du sol. Le dommage est associé à la modification de la rigidité de la masse ou toutes propriétés initiales du système. Bien que l'assise pour la détection de dommages apparaisse intuitive, ses applications réelles dénombrent de nombreux défis techniques. Le défi le plus fondamental est le fait que les dommages sont généralement un phénomène local et peuvent ne pas influencer de manière significative la réponse globale d'une structure. Ce défi touche de nombreuses questions pratiques associées à des mesures précises et reproductibles à un nombre limité

d'emplacements sur les structures opérant souvent dans des environnements défavorables. (Carden, 2004; Fan, 2010).

Lorsque les capteurs fournissent des informations corrélées pointant vers une détérioration des actifs, il est alors possible de faire une inspection visuelle en utilisant des indicateurs conventionnels, qui, en échange, obtiennent des images en temps réel pour permettre une analyse plus précise de la situation. Cela permet de disposer d'informations sur la situation actuelle de la structure des actifs grâce à des capteurs de télémétrie.

Un avantage majeur de l'utilisation de ce système est lié à l'aspect non linéaire de propagation de la fissure structurale. La plupart des pronostics techniques reposent sur des hypothèses linéaires enracinées dans les tests de laboratoire effectués en vertu de conditions bien définies. Cependant, les conditions d'exploitation réelles sont loin d'être idéales et intègrent un certain nombre de facteurs inconnus tels que les effets de contraintes, la variation de spectre de charge et les surcharges. Ces effets sont du domaine de la mécanique de la rupture et en faire la prédiction précise est très difficile. Toutefois, les données peuvent être enregistrées par un système intégré et pourraient être utilisées comme information pour créer un cadre de référence sur le comportement structural. De plus, elles pourraient permettre un ajustement des hypothèses de base pour améliorer les conceptions futures dans le monde du génie civil. (Sakaris, 2015; Farra, 2001).

Avec l'utilisation de termes plus généraux, les dommages peuvent être définis comme des changements introduits dans une infrastructure qui nuisent à la performance actuelle ou future de cette dernière. En termes d'échelle de temps, les dommages peuvent s'accumuler progressivement sur de longues périodes, mais peuvent également résulter d'événements discrets réguliers, tels que la surutilisation de camions lourds ou, encore, d'événements imprévus, tels que des tremblements de terre, des bris de conduites d'eau, etc. Par conséquent, la définition de dommages est limitée ici à des modifications aux propriétés géométriques de matériel et/ou de ces systèmes, y compris les modifications apportées à la connectivité du système qui peut nuire à sa performance.

Ce qui est implicite dans cette définition est le fait que les dommages ne sont pas significatifs sans qu'il y ait comparaison entre deux états différents du système : l'état initial, et le second qui est altéré. Le but de la présente étude est donc de déceler les dommages dans l'infrastructure et son fonctionnement.

Beaucoup de systèmes routiers continuent d'être utilisés malgré le vieillissement de leur infrastructure souvent dû à l'accumulation de dommages inhérents à une maintenance déficiente. Par conséquent, la capacité de surveiller l'état de la structure de ces systèmes est de plus en plus nécessaire. Un résumé des développements dans le domaine de la surveillance mondiale de la santé structurale des trente dernières années est d'abord présenté. Nous décrivons ensuite le processus d'évaluation de dommages, sous différentes formes, grâce à des capteurs qui permettent la détection des dommages, ce qui est décrit comme un problème dans la reconnaissance des formes statistiques. (Farrar, 2011).

Ce processus se compose de trois phases, détaillées dans la Figure 2.10 plus bas :

- Acquisition de données;
- Sélection des fonctionnalités associées à la route, la température, les impacts, déformations, etc.;
- Développement de modèles statistiques probabilistes.

L'acquisition de données permet de faire un diagnostic et de découvrir quels sont les problèmes de la chaussée, tout comme le fait un spécialiste de la santé lorsqu'il ausculte un patient. La sélection des fonctionnalités, grâce au modèle préétabli, permet de faire un pronostic sur les déformations des trois axes. Finalement, une interprétation des données doit être effectuée avec la relation des coûts/bénéfices avec la gestion de la maintenance.

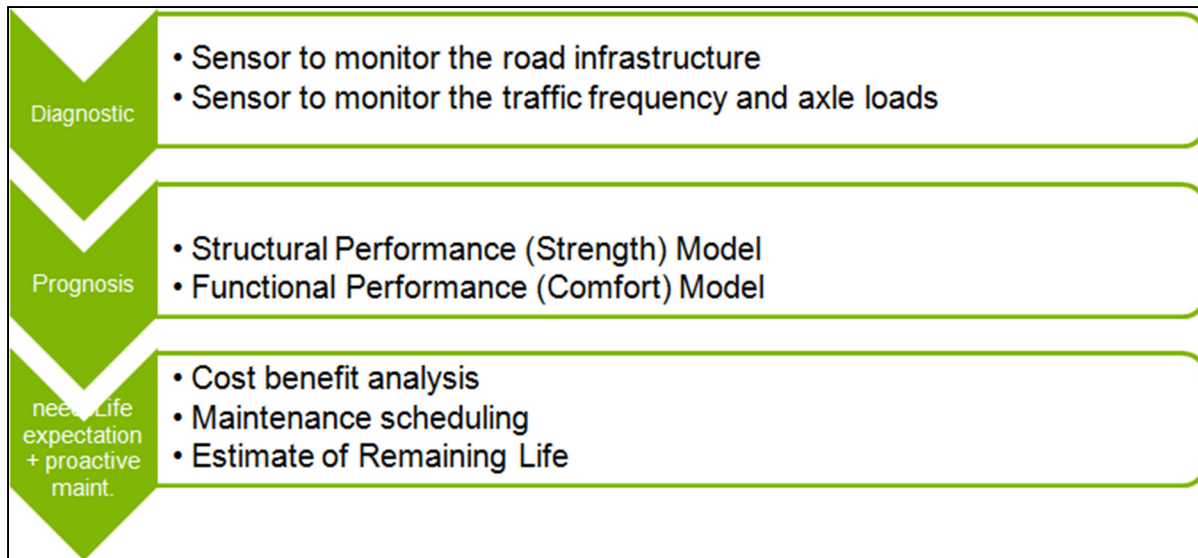


Figure 2.10 La route est un patient

Les recherches en lien avec la sélection des fonctions de surveillance ainsi que le développement de modèles statistiques sont effectuées après l'acquisition des données lors des tests sur le terrain.

Pour les nouvelles structures, il faut inclure dans la conception un système de surveillance permanent avec capteurs et télémétrie, ce qui permet de réduire le Coût Total de Possession (TCO) du projet.

## 2.7 Quantification de l'information

L'état d'un système de dommages peut être décrit comme un processus en cinq étapes dont chacune déboule d'une question (Rytter, 1993) :

1. Y a-t-il des dommages dans le système (l'existence)?
2. Où est le dommage dans le système (lieu)?
3. Quels types de dommages sont présents (type)?
4. Quelle est la gravité du dommage (mesure)?
5. Combien reste-t-il de vie utile (pronostic)?

Les réponses à ces questions dans l'ordre présenté permettent d'accroître la connaissance des dommages. Les modèles statistiques sont utilisés pour répondre à ces questions par une définition claire et de manière quantifiable. Les techniques expérimentales d'évaluation structurales peuvent être utilisées pour répondre aux deux premières questions, avec mode d'apprentissage non supervisé (tel que regroupement et association) ou supervisé (tel que régression et classification). Pour identifier le type de dommages, les données de structures et les types spécifiques de dommages doivent être disponibles pour la corrélation avec les caractéristiques mesurées et, par conséquent, une approche d'apprentissage supervisé doit être faite, telle que la classification (Oliveira, 2009, Cassola, 2019).

Des modèles analytiques sont généralement nécessaires pour répondre aux quatrièmes et cinquièmes questions, sauf si un cadre de référence est disponible à partir du système qui présente des niveaux variables de dommages. Les quatrièmes et cinquièmes questions doivent donc être abordées dans un mode d'apprentissage supervisé et ne peuvent être traitées sans d'abord identifier le type de dommages présents. Les projections de la charge future que devra supporter le système sont également nécessaires pour résoudre complètement les quatrièmes et cinquièmes questions (Rytter, 1993).

Les fausses indications de dommages se répartissent en deux catégories :

- Faux-positif (indication de dégâts quand aucun n'est présent);
- Faux-négatif (aucune indication de dégâts lorsque le dommage est présent).

Bien que la deuxième catégorie soit nuisible au procédé de détection d'endommagement et peut avoir de graves conséquences, des lectures faussement positives érodent également la confiance dans le processus de détection de dommages.



## CHAPITRE 3

### REVUE DE LA LITTÉRATURE – NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR LA COLLECTE DE DONNÉES ROUTIÈRES

#### 3.1 Structure de communication de la télémétrie

La télémétrie est utilisée depuis plusieurs années pour ses capacités de déploiement de grande envergure ainsi que pour l'accès aux informations et aux contrôles d'équipement qui lui sont associés. Dans un système de télémétrie conventionnel, le fournisseur central de service, aussi nommé en anglais *Telematics Service Provider* (TSP), fournit les services aux usagers qui peuvent être des capteurs, des ordinateurs ou des terminaux mobiles. Vu la croissance rapide du nombre de services et d'informations qu'un utilisateur peut demander, le TSP ne peut pas tout fournir. Un tiers parti peut alors jouer le rôle du fournisseur des services publics, comme les stationnements, les hôtels, les restaurants, les centres touristiques; c'est ce que l'on nomme des hotspots. Le *Universal Plug and Play* (UpnP) est l'équipement qui se charge de chercher ces services en se connectant à une passerelle (*gateway*). Le UPnP n'a cependant aucune connaissance a priori du réseau et c'est pour cette raison que l'information obtenue par l'utilisateur doit être universelle. Cela constitue le principe du *Peer-to-Peer* (P2P) entre les différents usagers.

L'architecture distribuée, P2P, peut aussi être déployée, par exemple, dans une infrastructure intelligente où l'architecture conventionnelle est habituellement un serveur-central. L'architecture distribuée présentée est basée sur les plateformes multiples d'*Open Service Gateway Initiative* (OSGi). L'architecture *Remote Open Service Gateway Initiative* (R-OSGi) est parfaitement compatible avec l'OSGi. L'aspect important du R-OSGi est sa transparence, c'est-à-dire les frontières naturelles entre les modules sont transparentes à la distribution. Les contrôles d'informations seront envoyés par l'UPnP, lon Works ou X10 pour contrôler les équipements sans capacité de traitement. (Jianku, 2008).

Les systèmes P2P permettent à plusieurs usagers de communiquer via un réseau, de partager de manière simple des objets, tels que des fichiers, mais également des flux multimédias continus et des services. Le P2P a permis une décentralisation des systèmes (auparavant basés sur quelques serveurs) en permettant à tous les ordinateurs de jouer le rôle de client et serveur. Plus particulièrement, les systèmes de partage de fichiers permettent de rendre les objets d'autant plus disponibles qu'ils sont populaires, et donc répliqués sur un grand nombre de nœuds. Cela permet alors de diminuer la charge en nombre de requêtes imposées aux nœuds partageant les fichiers populaires, ce qui facilite l'augmentation du nombre de nœuds et donc de fichiers dans le réseau. (Parra, 2009).

L'utilisation d'un système P2P nécessite pour chaque nœud l'utilisation d'un logiciel particulier qui remplira alors à la fois les fonctions de client et de serveur. C'est là l'origine du terme pair (de l'anglais : *peer*) que l'on trouve dans pair-à-pair : les communications et les échanges se font entre des nœuds qui ont la même responsabilité dans le système.

Le modèle P2P va bien plus loin que les applications de partage de fichiers cependant : il permet en effet de décentraliser des services et de mettre à disposition des ressources dans un réseau. Tout nœud d'un réseau P2P peut alors proposer des objets et en obtenir sur le réseau. Les systèmes pair-à-pair permettent donc de faciliter le partage d'informations, ce qui fait d'eux des outils de choix pour décentraliser les services qui doivent assurer une haute disponibilité tout en permettant de faibles coûts d'entretien. Toutefois, ces systèmes sont plus complexes à concevoir que les systèmes client-serveur (Taylor & Harrison, 2006; Schultz & Sartini, 2017).

Dans le contexte de la télématique, lorsque le nombre de services est en croissance continue et qu'il y a une convergence vers les réseaux IP et les réseaux de nouvelle génération ou New Generation Network (NGN), l'utilisateur doit avoir accès aux services indépendamment des technologies déployées sous le réseau. Autrement dit, les fonctions liées aux services sont indépendantes des technologies sous-jacentes liées au transport et aux interfaces normalisées et ils supportent l'interopérabilité entre les différents opérateurs. (Ross, 2010) Dans ce projet,



nous utilisons un diagramme de communication similaire à celui de la Figure 3.1. Les informations sont ainsi acquises par le nœud, envoyées à la passerelle via le réseau cellulaire, passent par l'internet (*nuage/cloud*) et sont enfin enregistrées sur la base de données.

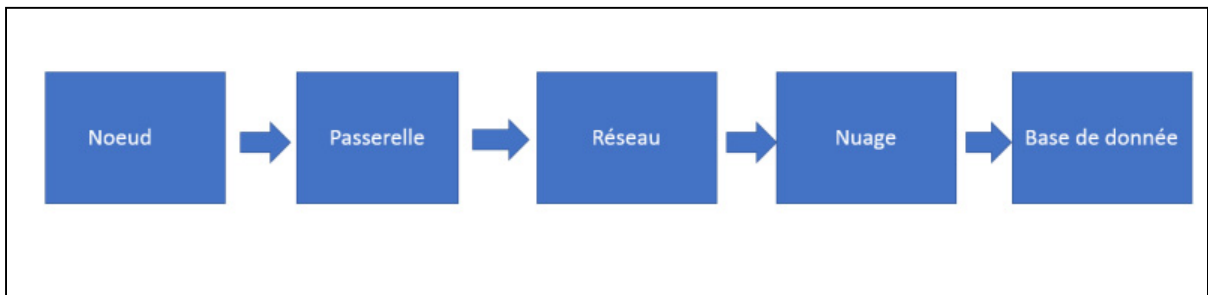


Figure 3.1 Architecture de communication

### 3.1.1 Réseau de capteurs sans fil

Une différence importante entre les réseaux traditionnels et les réseaux de capteurs sans fil est le déploiement à haute densité. Dans le domaine des capteurs de réseau sans fil, une haute densité de capteur possède un avantage en termes de couverture et connectivité puisque les capteurs peuvent transmettre l'information beaucoup plus simplement. Les nœuds possèdent généralement trois états distincts : dormant, actif ou en écoute (Figure 3.2).

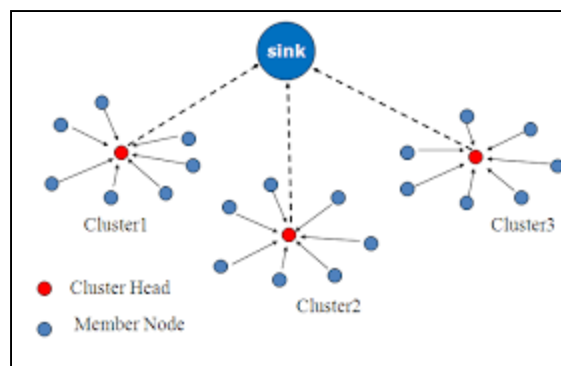


Figure 3.2 Topologie de réseau de capteurs sans fil (Sharma, 2014)

Les protocoles de grappes ont les avantages suivants : scalabilité, efficacité énergétique et table de routage dorsale. Plus il y a de capteurs installés dans la chaussée, plus il y aura de données colligées, permettant ainsi d'acquérir une vision globale des diverses variables qui interagissent avec cette chaussée. Or, les données recueillies (les données brutes) doivent absolument être remises en contexte pour être significatives. En effet, le climat, le type d'environnement, la circulation, l'entretien général, les politiques d'intervention, les accidents, etc. auront tous un impact sur l'interprétation des données, traduisant ainsi la complexité de mettre en corrélation les données brutes recueillies. L'aspect de duplication des données doit également être pris en considération. Ainsi, pour arriver à une planification efficace, il est primordial d'avoir un accès simple et rapide aux données provenant des capteurs afin de centraliser l'information en temps réel et permettre d'établir des correctifs stratégiques servant au maintien de la chaussée. Pour cet essai nous avons établi un protocole de communication point à point pour envoyer les informations en continue à la base de données. Par ailleurs, plusieurs techniques de communication sont rapportées dans la littérature, nous avons utilisé, dans le cadre de la présente thèse, la communication point à point. L'utilisation de différents protocoles de communication est certes possible, cependant, les évaluations nécessaires au choix d'une technique plus appropriée sortent du cadre de cette thèse.

### **3.1.2 L'architecture physique**

Dans ce projet, chaque nœud est équipé de capteurs avec une alimentation, un sous-système de communication, d'emménagement, de ressource computationnelle et de convertisseur (analogique à digital). Le bloc capteur est constitué d'une multitude de capteurs où l'information provenant d'un phénomène physique est acquise. L'acquisition de l'information analogique est ensuite convertie avec le convertisseur analogique-numérique (*Analogic to Digital Converter*, ADC) puis traitée par le microcontrôleur et finalement transmise vers le réseau (Figure 3.3).

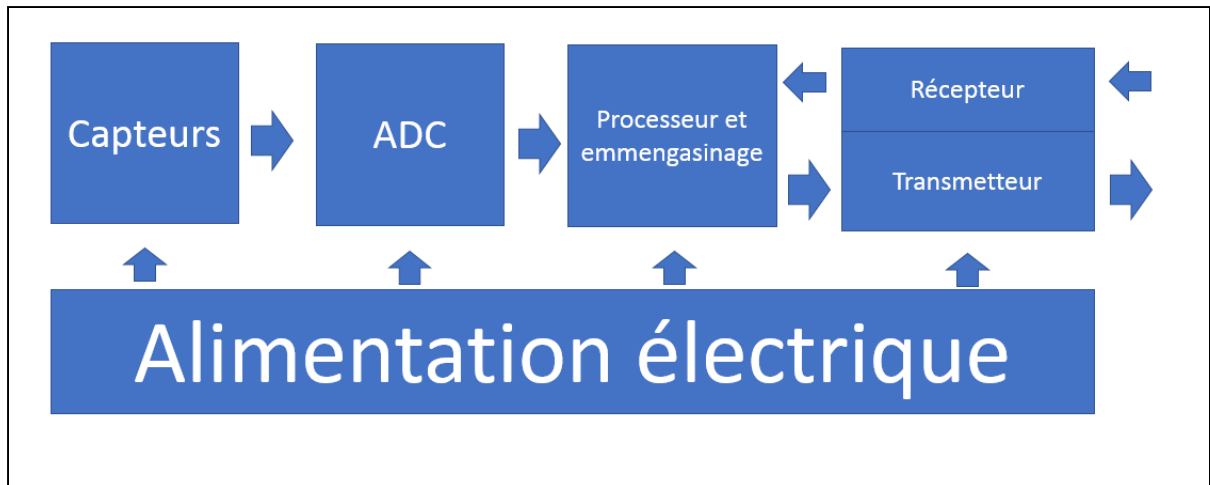


Figure 3.3 Architecture physique du système d'acquisition

Les demandes principales pour les communications dans le réseau sont :

- Le temps réel : le protocole de communication en temps réel associé au délai contenu dans les contraintes applicatives.
- Efficience énergétique : dans une conception de protocole WSN, le protocole doit être efficient au niveau de l'énergie pour la communication ainsi que pour les capteurs et acteur (actuateur et autres).
- Ordonnancement des événements : les différents événements doivent être séquencés en ordre lorsqu'ils sont envoyés au transmetteur.
- Synchronisation des événements : les protocoles de communication doivent aussi permettre la synchronisation avec les différents capteurs pour arriver à une réponse cohérente entre les événements d'une même région.

L'objectif de l'optimisation des données est de faire un arbre d'agrégation de données de tous les capteurs se trouvant dans un même lieu géographique pour des événements particuliers. Un arbre d'agrégation de données est compilé avec les agrégations de flux de données où le flux de données est la connexion entre les capteurs et la base de données (Figure 3.4). On peut observer ce type de relation dans une grappe constituée d'une multitude de nœuds dans l'arbre d'agrégation.

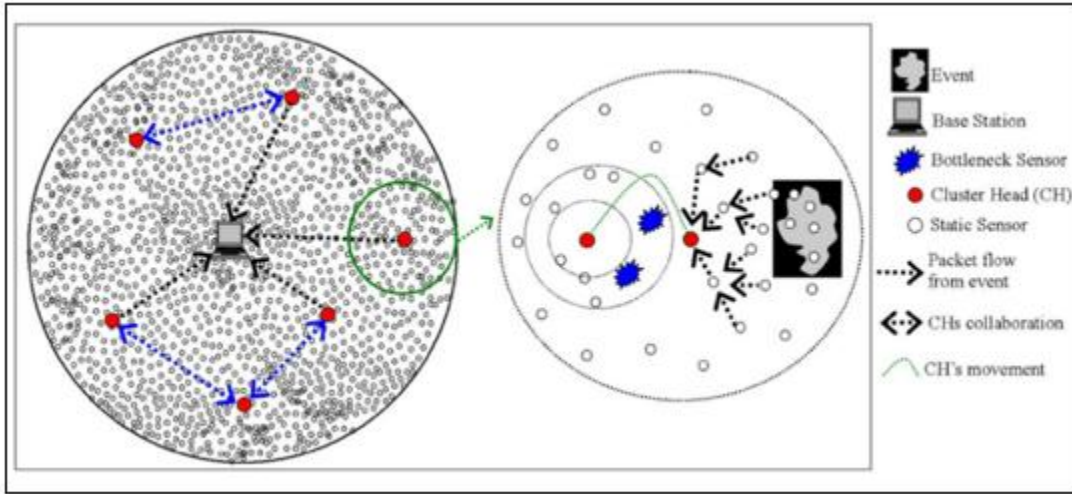


Figure 3.4 Mode de mobilité à plusieurs têtes de grappes (Khan, 2014)

La stratégie optimisée pour des grappes basées sur des événements peut être trouvée avec l'utilisation d'un programme d'intégration linéaire. (Ahuja, 1993) Pour ce type de topologie, on doit assumer qu'au moins un chemin est possible avec chaque capteur. Il tend à minimiser le coût total, qui lui est défini par :

$$C_{tot} = \sum_{k \in S^a} \sum_{(i,j) \in S^e} x_{ij}^k * C_{ij} + \gamma * Q \quad (3.1)$$

Le premier terme représente le total de l'énergie consommée dans chacune des destinations jusqu'au capteur, le deuxième terme est la pénalité pour l'utilisation de nœuds qui ne peuvent transmettre leur information avec la latence prescrite. « Q » représente le nombre de nœuds qui ne sont pas conformes et gamma ( $\gamma$ ) est le coefficient de pénalité. (Akyildiz, 2010).

Ce type d'architecture réseau représente une solution viable pour le réseau de nœud requis afin de mesurer les déformations sur un réseau routier. Un réseau de nœuds est un point de connexion permettant de recevoir, émettre ou enregistrer des données. Ceci nous mène aux différents types de systèmes d'acquisition de données qui existent présentement sur le marché.

### 3.2 Le LiDAR

La technologie LiDAR est apparue pour la première fois dans les années 1960, à la suite de l'invention du laser. Le principe est assez simple : une petite lumière brille sur une surface et des capteurs et équipements appropriés mesurent le temps nécessaire pour revenir à sa source. La détection de la distance par la lumière (LiDAR), tout comme les radars et la navigation par le son (SONAR), découlent d'un phénomène naturel observé, entre autres, chez les chauves-souris et les baleines. Ces deux mammifères utilisent effectivement l'écholocalisation comme système de guidage ; en émettant des sons et en écoutant leur écho, ils peuvent localiser et, dans une moindre mesure, identifier les obstacles dans leur environnement.

Les premiers à utiliser le LiDAR ont été les météorologues du *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Rapidement, la technologie se fait connaître du public avec la mission Apollo 15, en 1971, au cours de laquelle les astronautes utilisent un altimètre laser pour cartographier la surface de la lune. Peu de temps après, la cartographie du terrain par le LiDAR commence, mais comme les systèmes initiaux étaient à faisceau unique, leur utilisation était plutôt limitée par l'absence de géoréférencement précis. (Portland State, 2012) Il faut encore quelques années avant que le LiDAR soit considéré comme un outil de sondage viable. C'est l'arrivée du GPS en 1978 qui permet le positionnement précis d'un véhicule (un avion dans ce cas) qui permet la surveillance par le LiDAR. À ce jour, les informations recueillies à l'aide du LiDAR ont des applications dans la sécurité routière, l'urbanisme, la détection des plaines inondables, des ponts et des lignes de transmission, la cartographie des glaciers et des avalanches, la bathymétrie, la géomorphologie et les études forestières. (Burtch, 2002).

Il n'est pas surprenant que de nombreux ministères des transports et des agences de sécurité routière considèrent le LiDAR comme un outil prometteur : il offre une précision impossible à atteindre pour les humains, notamment parce qu'il a la capacité d'acquérir des données la nuit et dans une couverture forestière dense. (Roe, 2009) Le LiDAR offre également un haut niveau d'automatisation lors de la capture de données (Maynooth, 2012), ce qui apporte une

solution au problème de sécurité : avec les méthodes de collecte de données traditionnelles, les travailleurs enquêteurs sont souvent exposés à un trafic routier dangereux.

Aux États-Unis, pour être conformes, les départements de transport ont besoin d'une grande variété de données pour étayer leurs programmes de gestion (mesure du débattement des ponts, inventaire des actifs, enquêtes sur l'état d'avancement, études topographiques techniques, études de corridors et enquêtes de planification, conformité selon le *American with Disabilities Act* (ADA), enquêtes de déformation, enquêtes environnementales, analyse de la distance de visibilité, analyse de l'érosion de la zone côtière, études de terrassement, prévision des accidents, etc.) pour lesquelles la collecte de données géospatiales représente des centaines de millions de dollars. (Gong et al., 2013) Compte tenu de l'importance d'un bon entretien des routes, pour des raisons économiques, ainsi que de sécurité et de conformité, des méthodes moins coûteuses et plus sûres permettant de collecter de meilleures données deviennent certainement une nécessité.

### **3.3 Systèmes de cartographie mobiles à base de laser (LiDAR)**

Si les systèmes de cartographie mobiles capturent généralement les données au niveau de la rue avec plus de précision que les méthodes d'arpentage traditionnelles, leur efficacité est limitée : elles sont liées à l'éclairage et aux conditions météorologiques, aux ombres portées par les objets en bordure de route et aux occlusions causées par les véhicules en mouvement et les piétons. (Tsogas et al., 2011) En d'autres termes, la qualité des données collectées par les systèmes de cartographie mobile à base d'images dépend fortement des conditions dans lesquelles elles ont été collectées. Ainsi, par exemple, si l'éclairage est insuffisant, si la température est inadéquate ou si un certain nombre d'objets ombragent le système, ce dernier n'est pas précis et les données présenteront un niveau de distorsion élevé. (Guan et al., 2016).

En ce qui concerne le laser, Roe affirme qu'il s'agit d'une technologie susceptible de créer un changement révolutionnaire, non seulement dans l'industrie de la topographie et de la cartographie, mais aussi dans de nombreuses autres qui sont directement ou indirectement

liées. (2009) Roe détaille les trois principales plateformes où le balayage laser (LiDAR) est utilisé aujourd'hui :

- Aérien : peut capturer des données dans l'obscurité, en mesure d'obtenir la topographie à travers une couverture forestière dense et, en même temps, peut fournir des informations très précises sur les modèles de hauteur et de surface des objets de la couverture.
- Trépied : plus sûr, augmente la productivité, élimine les déplacements sur le terrain, fournit des données 3D quasiment impossibles à obtenir à partir d'une autre méthode d'enquête.
- Mobile : peut acquérir des données plus rapidement, de manière plus sûre et très précise.

Dès 2009, l'auteur prédit que le mobile deviendra la plateforme privilégiée pour la cartographie des infrastructures en raison de la rapidité avec laquelle il acquiert des données. (Roe, 2009) Cette conclusion est également partagée par d'autres : l'intégration du laser dans les systèmes de cartographie mobiles permet une capture plus facile et moins chère des données 3D. En outre, l'utilisation du laser élargit les domaines où les systèmes de cartographie mobiles peuvent être utilisés : cartographie urbaine et de corridors 3D, études de simulation de trafic, modélisation de la réalité virtuelle, cartographie des services publics. (Maynooth, 2012) La rapidité (Lato et al., 2009) et la sécurité accrue de la collecte de données (Huber et al., 2008), ainsi que la richesse et la réutilisabilité des données collectées jouent certainement un rôle dans l'adoption généralisée de cette méthode. (Gong et al., 2013) Les systèmes de cartographie mobile à laser deviennent de plus en plus petits et compacts et sont donc relativement peu coûteux, tout en étant rapides et faciles à déployer. Ils ont également besoin d'un minimum d'équipement existant pour le support opérationnel. (Guan et al. 2016).

Enfin, une étude de 2011 distingue les avantages tangibles (réduction globale des coûts, réduction du nombre d'employés, réduction du parc de véhicules, etc.) et intangibles (moins de dioxyde de carbone, aucune interruption de la circulation, moins d'exposition au trafic et aux risques pour l'environnement, etc.) et conclut que l'un des grands avantages du système de

cartographie LiDAR mobile est la rapidité avec laquelle les données peuvent être collectées : le long délai entre « données demandées » et « données fournies » est souvent la cause des retards de projet et des dépassements de coûts. (Yen et al., 2011).

### 3.3.1 Composantes du système

Les composantes d'une cartographie mobile LiDAR sont une combinaison de systèmes d'imagerie, de balayage laser, de navigation et d'acquisition de données (Figure 3.5).

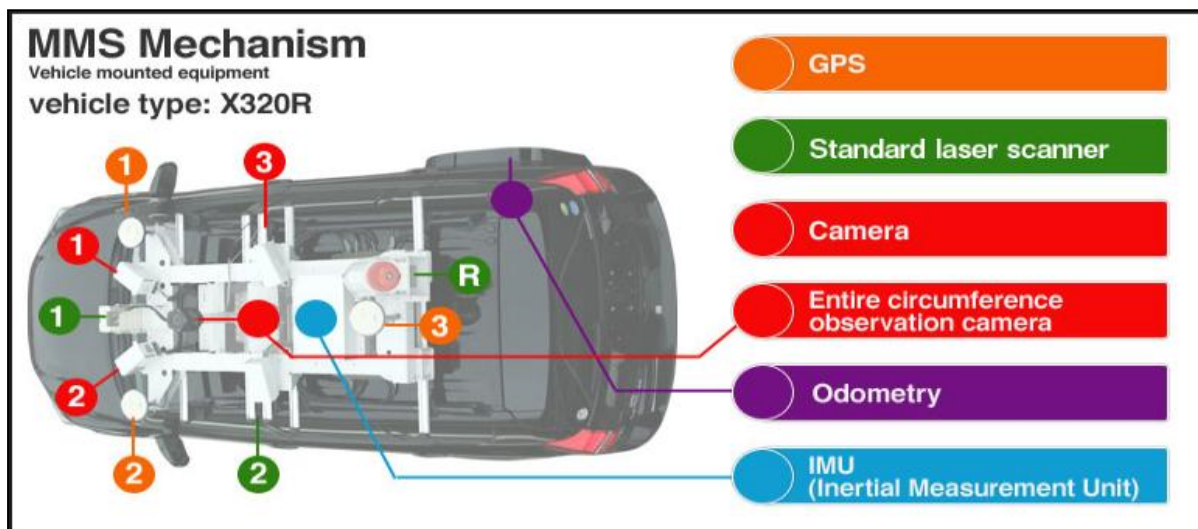


Figure 3.5 Configuration des systèmes utilisés dans la cartographie mobile LiDAR  
(<https://www.aisantec.co.jp/english/mms.html>)

#### 3.3.1.1 Système d'imagerie

Le choix d'un système d'imagerie dépend de la précision, de la fiabilité, des exigences de l'application finale et de la flexibilité opérationnelle souhaitées. (El-Sheimy, 2005) Bien que la plupart des systèmes LiDAR incorporent une combinaison d'appareils photo numériques, leur déploiement spécifique est personnalisé en fonction des besoins des utilisateurs et/ou des projets. (Guan et al., 2016) Google, par exemple, utilise un système intégré composé de neuf caméras CCD individuelles, dont huit sont disposées à distance égale dans un anneau concentrique dirigé vers l'extérieur, la neuvième caméra étant orientée verticalement vers le



haut afin de produire des images panoramiques. (Petrie, 2010) En règle générale, le système d'imagerie, ainsi que les systèmes de navigation et de balayage laser sont montés sur la plateforme mobile choisie (Figure 3.6). (Li et Chapman, 2008).



Figure 3.6 Différentes plateformes utilisées par Google

(<https://digitach.net/google-street-view-india-what-it-is-why-googles-plans-were-rejected-by-modi-government/>)

L'obturateur de la caméra est synchronisé avec le GNSS/IMU, ce qui permet de géoréférencer les images capturées avec précision. Un processus d'étalonnage est nécessaire, avant un déploiement sur le terrain, afin d'extraire des informations précises et fiables du système d'imagerie. La méthode d'étalonnage la plus courante est appelée « bloc de paquets » et remonte aux années 1970 ; elle est réalisée un peu comme les GCP mais sans la peine de marquer physiquement la zone étudiée. Après avoir sélectionné une scène avec des points cibles identifiants, un appareil photo numérique est utilisé pour capturer plusieurs images de

la scène à partir de différents emplacements connus de l'appareil photo. Les points cibles sont ensuite identifiés dans chaque image et sont entrés dans un modèle mathématique du bloc de faisceaux qui conduit à la détermination de tous les paramètres IO. (Maynooth, 2012).

### 3.3.1.2 Système de balayage laser

Comme avec le système d'imagerie, la disposition et le type de scanners laser choisis dépendent du projet pour lequel le système de cartographie LiDAR mobile est utilisé. Actuellement, deux types de scanners laser, mesurant différents éléments, se trouvent couramment dans le LiDAR mobile : la mesure du pouls (ou temps de vol) et la mesure du déphasage.

Dans une méthode temps de vol ou *Time of flight* (ToF), un laser émet des faisceaux d'impulsions qui vont heurter les objets et se refléter sur le capteur. (Guan et al., 2016) Ce capteur enregistre le temps d'aller-retour du faisceau pour mesurer la plage en fonction de la vitesse de propagation de la lumière, comme illustré à la Figure 3.7.

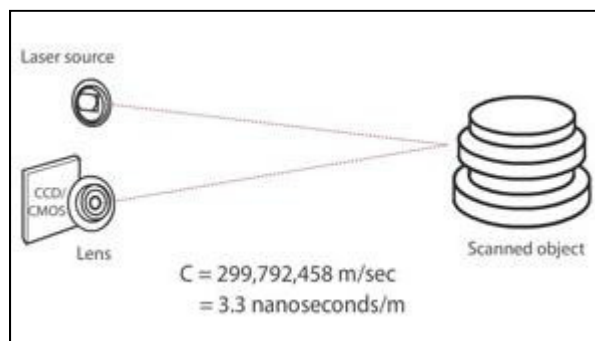


Figure 3.7 Méthode ToF (Guan et al., 2016)

La méthode de déphasage émet des ondes continues, modulées en modulation d'amplitude (AM) ou en modulation de fréquence (FM) afin de mesurer les plages cibles (Figure 3.8). La modulation d'amplitude mesure la plage en utilisant la différence de phase entre le faisceau laser émis et la lumière renvoyée ; la modulation de fréquence permet également de mesurer la plage mais en exploitant plutôt les fréquences de battement. (Guan et al., 2016).

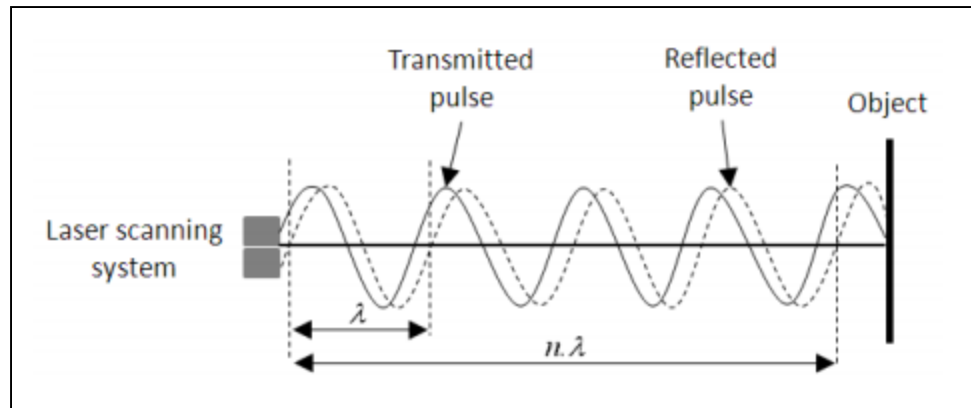


Figure 3.8 Méthode de déphasage (Guan et al., 2016)

La qualité d'un scanner laser est déterminée par divers facteurs tels que la sécurité des yeux, la précision, le champ de vision, le débit de données, la fréquence de balayage et la portée. (Guan et al., 2016)

Voici les caractéristiques résumées pour les deux méthodes (Tableau 3.1) :

Tableau 3.1 Différences entre les méthodes ToF et de déphasage

|                         | <u>ToF</u>                     | <u>Déphasage</u>                  |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Débit de données</b> | $\leq 500\,000$ points/seconde | Jusqu'à 1 000 000 points/seconde  |
| <b>Plage de mesure</b>  | 800 m                          | $\leq 100$ m                      |
| <b>Précision</b>        | Sous-centimètre à centimètre   | Sous millimètre à sous centimètre |

D'une part, comme le montre le Tableau 3.1, la méthode ToF doit être utilisée dans des projets nécessitant de mesurer des distances comprises entre quelques centaines de mètres et plusieurs centaines de kilomètres. (Petrie et Toth, 2008) D'autre part, la méthode de déphasage est plus précise sur de courtes distances. Le mode ToF est couramment utilisé pour les systèmes LiDAR mobiles utilisés à des fins commerciales, tandis que le mode déphasage est principalement utilisé pour les systèmes LiDAR terrestres, tels que les tripodes. (Guan et al., 2016).

### 3.3.1.3 Système de navigation

Comme indiqué précédemment, c'est le développement et l'avancement du GPS et d'autres systèmes de navigation à la fin des années 1970 qui ont permis au LiDAR de devenir un outil de mesure prometteur : les paramètres de navigation enregistrés sont utilisés pour calculer les paramètres de position et d'orientation d'objets du monde réel dans un cadre de référencement global. (Maynooth, 2012) C'est ce qu'on appelle le géoréférencement.

La composante principale d'un système de navigation LiDAR mobile est le système de navigation par satellite (GNSS) qui fournit trois mesures cruciales : l'heure, la position et la vitesse (vitesse et direction). (Guan et al., 2016) Les récepteurs GNSS sont puissants et précis en environnement ouvert. Toutefois, comme le système repose sur des signaux satellites, il souffre lorsque ces signaux sont obstrués ou déformés par des bâtiments ou des tunnels, par exemple. Entre alors l'IMU qui fournit des informations « d'attitude » sur la base des informations reçues de ses accéléromètres et de son gyroscope. (Maynooth, 2012) Contrairement au GNSS, l'IMU n'a pas besoin d'un signal satellite pour détecter les accélérations et les rotations angulaires sur trois axes, bien que la précision de ces informations se dégrade avec le temps. Les deux systèmes sont utilisés ensemble car les positions du GNSS sont augmentées par l'IMU en période de mauvaises conditions de satellite, tandis que le GNSS fournit des informations de position actualisées à l'IMU. (Guan et al., 2016) Ce sont donc des systèmes qui compensent les faiblesses l'un de l'autre.

Les systèmes de cartographie LiDAR mobiles sont également équipés d'un instrument de mesure de distance (DMI) ou d'un odomètre dont la fonction principale est d'estimer la distance parcourue par le véhicule. Le DMI complète les informations des GNSS et IMU avec des informations de positionnement supplémentaires et aide à réduire les doublons lorsque le véhicule est à l'arrêt. (Guan et al., 2016).

### 3.3.1.4 Système d'acquisition des données

Le système d'acquisition de données dans le LiDAR mobile comprend des unités de commande, de synchronisation et d'alimentation, ainsi que des unités de stockage de données. (Figure 3.9)

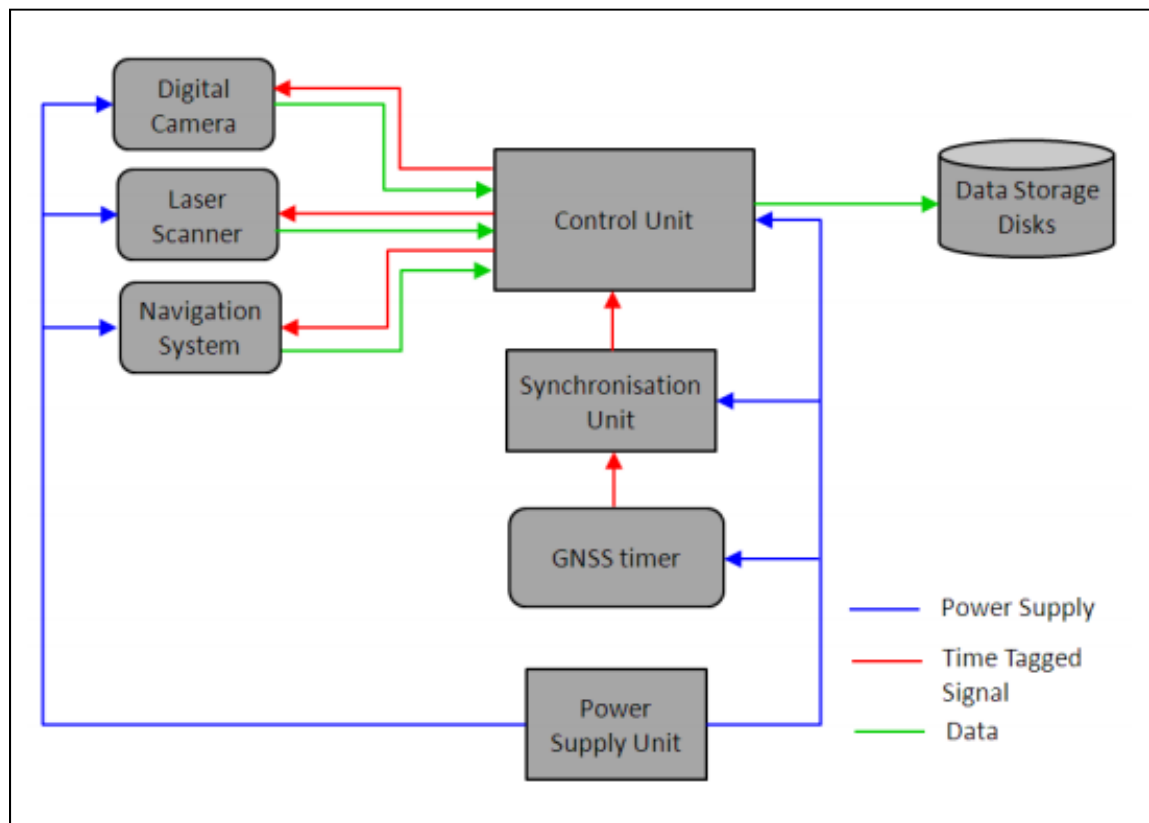


Figure 3.9 Système d'acquisition de données de cartographie mobile (Maynooth, 2012)

Un système d'enregistrement et de stockage des données est nécessaire pour enregistrer les volumes importants de données collectées par les capteurs de cartographie et de navigation. Les unités de synchronisation et de stockage de données sont contrôlées par une unité centrale, tandis que l'unité d'alimentation fournit de l'électricité pour permettre un fonctionnement continu des capteurs de cartographie et de navigation, ainsi que des unités de synchronisation et de contrôle. (Maynooth, 2012).

### 3.3.2 Logiciel et traitement de données

Présentement, la demande pour faire des modèles de l'environnement en trois dimensions est de plus en plus grande. Les besoins sont au niveau d'une haute résolution et haute précision dans des secteurs d'activité tels que le génie civil et le génie de l'environnement pour la protection et la planification. L'objectif de ces modèles est d'avoir des standards plus élevés en termes d'estimations de coûts en plus d'établir des structures de maintenance préventive pour la gestion des risques. Il s'agit donc de créer des modèles en 3D pouvant être consultés dans des bases de données afin de visualiser l'information pour ensuite l'utiliser, le cas échéant. Le niveau de détails requis peut changer les coûts de production, tout comme le coût d'acquisition et les techniques de modélisation. Cependant, ajouter des textures, de la profondeur et des couleurs rend complexe la production des informations. (Noronha, 2001).

Pour remplir ces objectifs, le LiDAR est probablement la technologie la plus efficace grâce au niveau d'automatisation de l'acquisition des données avec les données brutes, ainsi que la précision et la densité des données en 3D. Le véritable objectif présentement est d'avoir une technique de filtration (qui consiste à enlever le bruit des données) et de classification de données brutes pour réduire le temps de travail en lien avec les correctifs nécessaires (Roh, 2009, Li, 2017). L'utilisation de Google Street View (GSV) permet d'avoir un excellent service pour voir et classifier automatiquement l'information (Figure 3.10). Or, jusqu'à maintenant, aucune grosse ville n'utilise le service de GSV pour classifier l'information et permettre des corrélations entre différentes bases de données afin d'avoir une plus grande précision dans la validité de l'information acquise via le LiDAR. Obtenir les images de GSV se fait via l'application de Googles Maps. Il est ainsi possible d'avoir les images statiques via une demande http avec des paramètres URL (Google, 2017). Jusqu'à présent, très peu de recherches ont été effectuées en lien avec les corrélations qui peuvent être faites entre la dérivation de l'information provenant de GSV et l'optimisation d'informations acquises d'une nouvelle source.

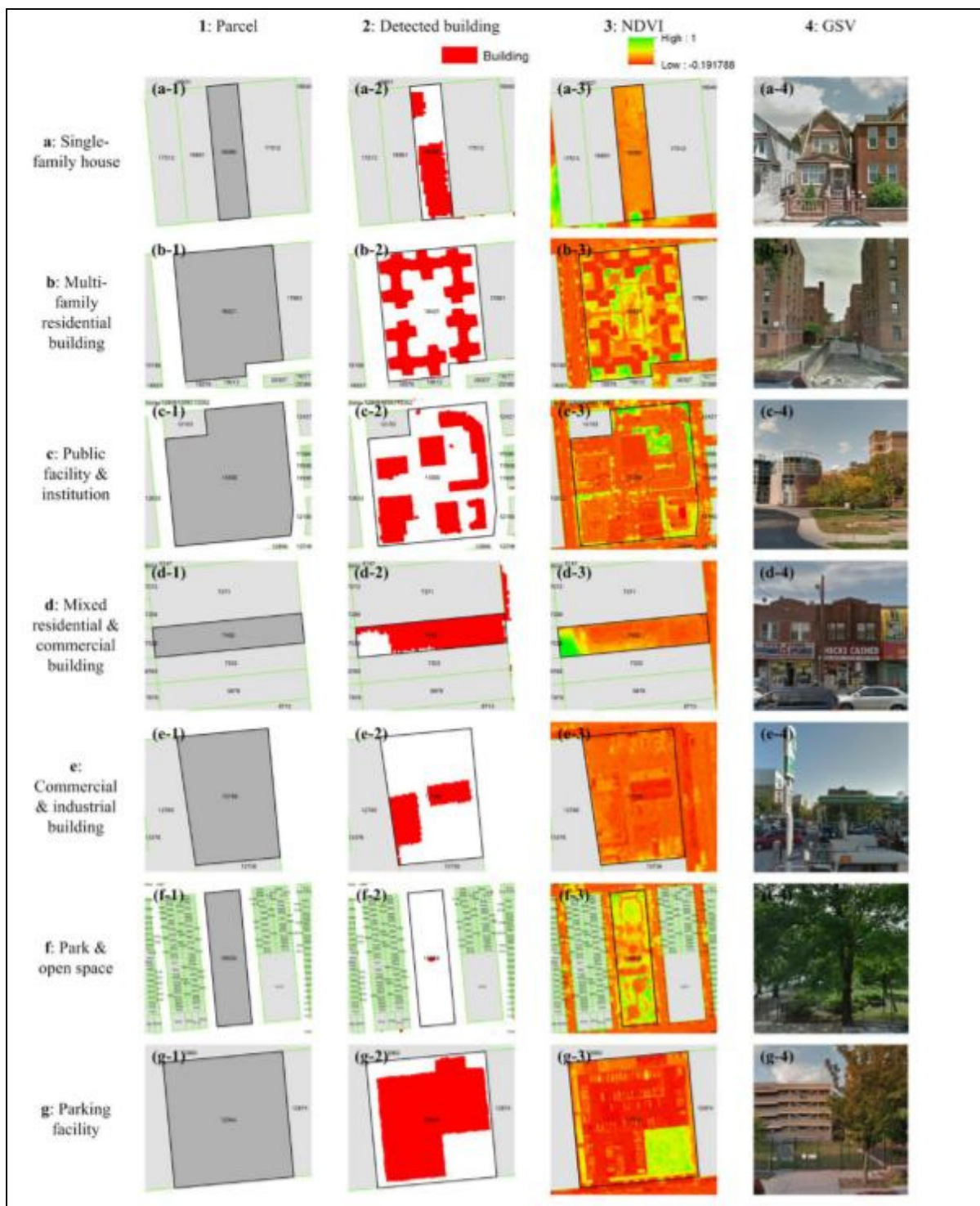


Figure 3.10 Exemples de données utilisées pour sept types d'utilisation du sol (Zhang, 2017)



La classification des données est un facteur critique pour le LiDAR : la complexité de l'utilisation de l'information réside dans la faible précision de la classification, notamment lorsqu'il est question de voir si l'utilisation de différentes sources servant à vérifier que l'information est bel et bien valide, et non pas un faux positif. (Wu, 2007) Ainsi, par exemple, si la classification est mal effectuée au niveau des routes, l'information est moins précise et potentiellement non utilisée car mal catégorisée.

La reconnaissance des images à des fins de classification est critique pour obtenir des données utilisables : plusieurs travaux ont ainsi porté sur la détection de textes des images de bâtiments publics provenant de GSV dans le but de faire une corrélation des données (Figure 3.11)

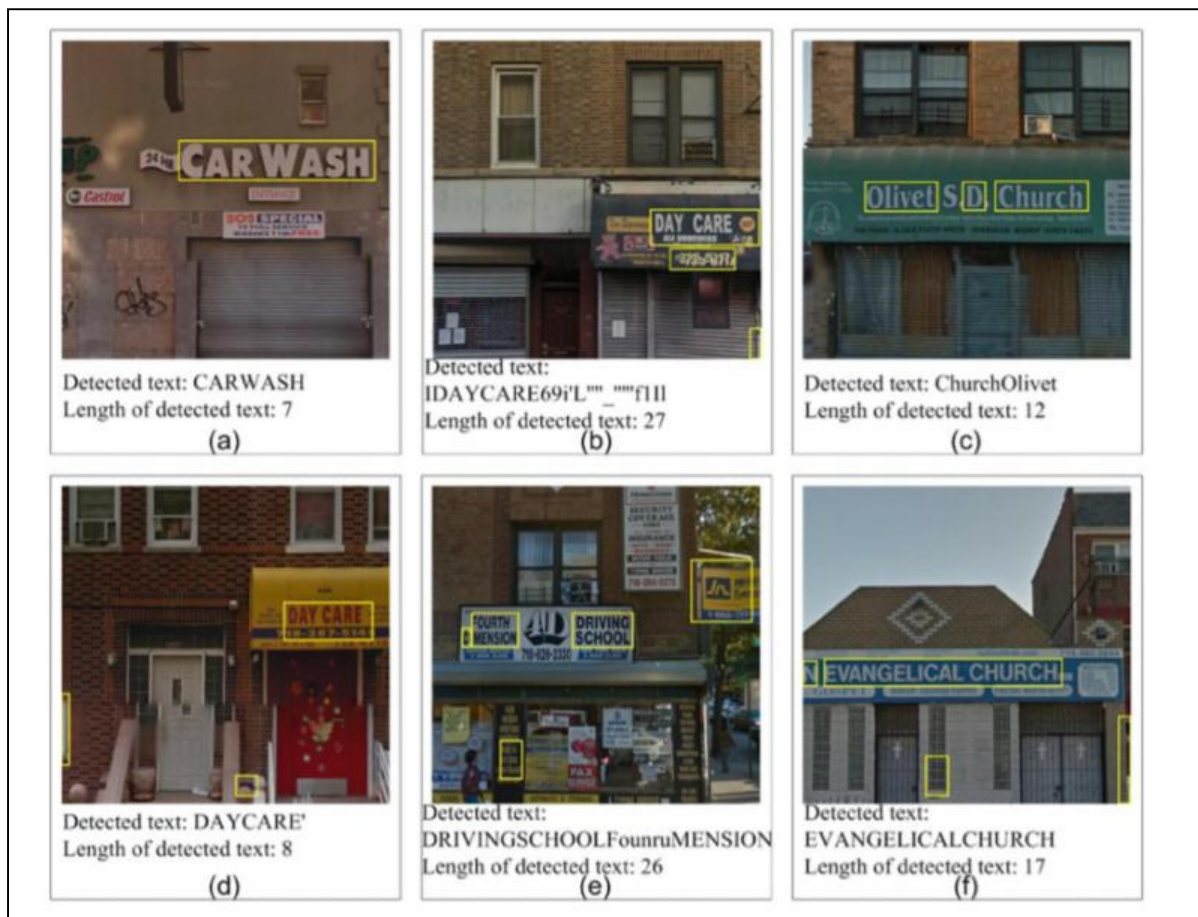


Figure 3.11 Détection de texte de GSV (Zhang, 2017)



L'un des défis importants au niveau de l'acquisition des données est de définir les points que l'on veut conserver (route, bâtisses, pont, etc.) et les points non nécessaires (végétation et autre objets). Plusieurs stratégies ont été proposées, basées sur des déviations de surface paramétrique. (Kraus, 1998).

La méthode traditionnelle pour faire la détection de problèmes de surface de la chaussée est basée sur une inspection visuelle de la route, effectuée de façon intensive, mais peu efficace. L'inspection périodique des routes demeure une étape importante pour l'évaluation de la condition de la chaussée qui est comptabilisée dans un *Pavement Management System* (PMS). Ce type de système est divisé en sous-segments logiques permettant de créer des évaluations de priorisation de maintenance et de réhabilitation sur le long terme. (Oliveira, 2009).

Dans la littérature, il existe différents indices pour l'évaluation de la condition de la chaussée. L'évaluation est effectuée avec des critères similaires : le nombre de dégradation, la précision de la dégradation et la qualification de la dégradation. Un exemple est le *Pavement condition Index* (PCI). (ASTM, 2018) Les exemples de dégradations de chaussée sont nombreux : faible qualité de roulement, fissurations dites en peau d'alligator, ornières, fissurations en bloc, bosses et affaissements, ondulations, dépressions, fissurations des bords, fissurations des joints, chute de voie, fissurations longitudinales et transversales, rafistolages divers, nids-de-poule, sillons, fissurations par glissement, gonflements, etc.

La majorité des détections de fissures automatisées sont faites avec des caméras CCD pour qualifier le type de dommage à la chaussée en 2D. Pour les problèmes liés à la luminosité, l'algorithme devient cependant moins précis et plus instable pour détecter les problématiques puisque les données primaires reçues ne sont pas d'une qualité uniforme. L'avantage d'utiliser les données en 3D, c'est qu'elles permettent de faire fi des problèmes de luminosité, d'huile, de ligne de rue et d'ombrage qui constituent des enjeux communs dans l'acquisition de données en 2D. (Ouyang, 2013).

Une méthode bien connue d'extraction des données réduisant le bruit est celle du *Empirical Mode Decomposition* (EMD) qui permet de faire l'analyse du signal non stationnaire et qui possède l'avantage d'être local et adaptatif. (Huang, 1998) La première étape est d'enlever le bruit des données acquises. La méthode de base se construit en trois parties distinctes (Figure 3.12) :

1. Classifier les données de routes normales ;
2. Classifier les bruits ;
3. Classifier les données de route endommagée en surface.

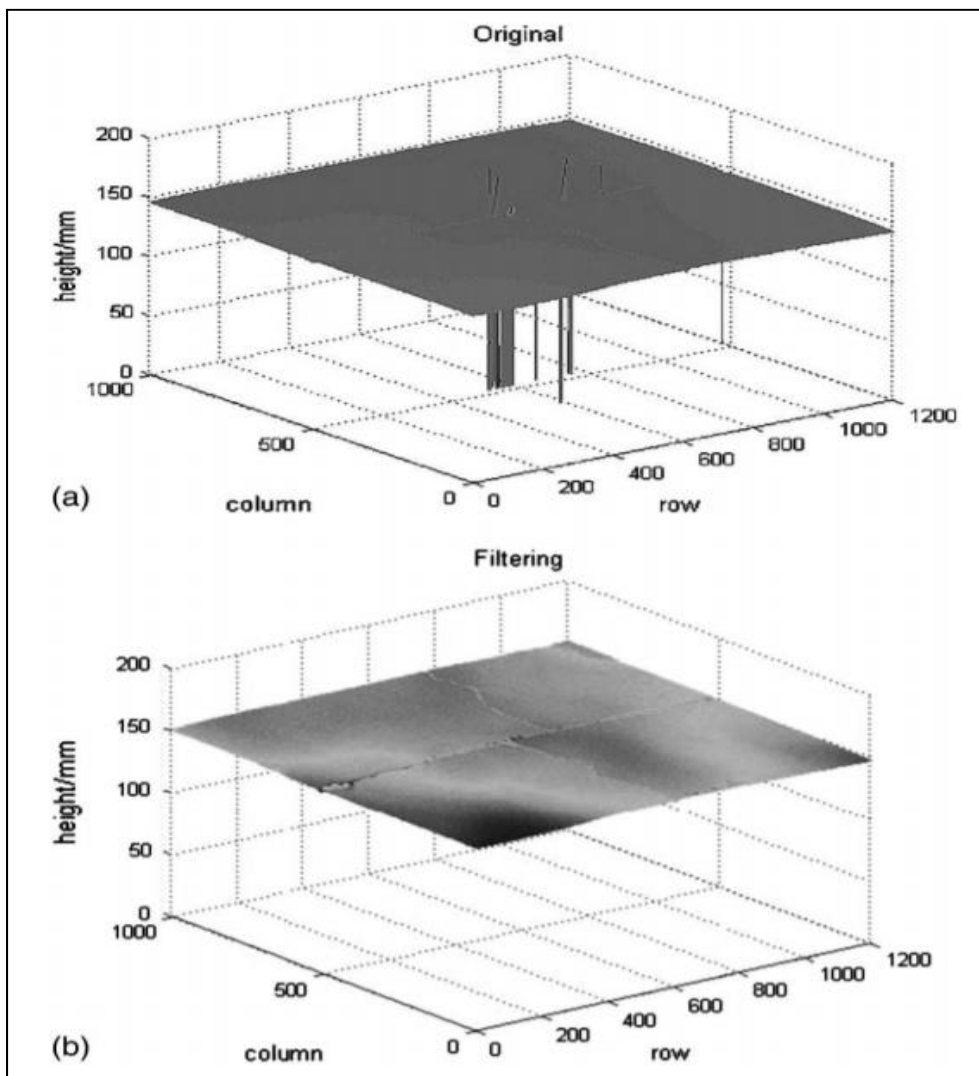


Figure 3.12 Fissures peau d'alligator, sans et avec filtre de bruit (Li, 2017)

### 3.3.3 Réseau de neurones

Le réseau de neurones est utilisé afin de choisir les emplacements les plus propices pour insérer les modules d'acquisition (MIC) pour mesurer des déformations structurales. Il est utilisé ici pour le traitement des images des déformations de la chaussée.

L'apprentissage automatique est l'une des applications de l'intelligence artificielle qui démontre énormément de potentiel, notamment lorsque le nombre de données à manipuler est très important. Le réseau de neurones démontre alors toute son utilité, en particulier pour établir une corrélation entre les données acquises par les capteurs, et les données collectées en surface (dégradations, par exemple).

L'apprentissage automatique (*machine learning*) représente le cœur de l'intelligence artificielle et se divise ainsi : apprentissage supervisé, apprentissage non-supervisé, apprentissage semi-supervisé et apprentissage par renforcement. L'option la plus appropriée pour notre projet est celle de l'apprentissage supervisé pour l'agrégation des données. Cette technique est conçue pour envoyer une donnée ( $in(t)$ ) et préciser le résultat attendu ( $out(t)$ ). Ce processus doit être répété plusieurs fois jusqu'à obtention du bon résultat. Son fonctionnement est plutôt simple avec les entrées ( $x$ ), le poids ( $w$ ), le biais ( $w$ ) et une sortie comme démontré dans la Figure 3.13. Il s'agit d'un opérateur comportant plusieurs entrées et une sortie unique, toutes binaires. Pour calculer la sortie, chaque entrée  $i$  est pondérée par un poids  $w_i$ . Le poids est une valeur réelle censée donner plus ou moins d'importance à une entrée.

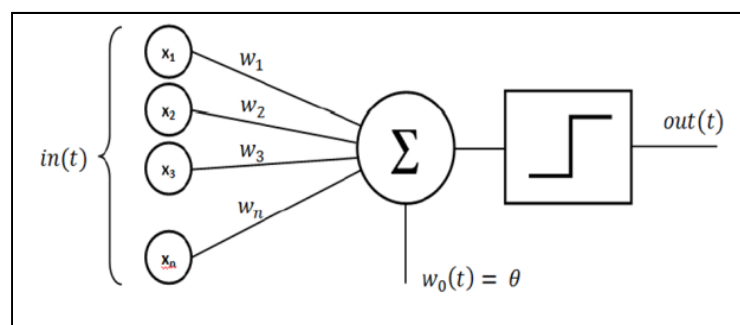


Figure 3.13 Réseau de neurones (Rajarajan, 2015)

Le réseau de neurones convolutifs ou réseau de neurones à convolution (*Convolutional Neural Network* ou CNN) avec apprentissage automatisé est davantage associé à la classification d’images. Dans un réseau de neurones, chaque élément d’entrée est connecté aux éléments de la couche suivante et ainsi de suite jusqu’à la couche de sortie. Pour l’analyse d’une image de 64 pixels par 64 pixels, il est donc nécessaire d’utiliser 4096 entrées pour l’analyse.

Plusieurs méthodes ont été développées pour régler des problématiques au niveau de l’architecture CNN. (Gu, 2018) Gu a par ailleurs identifié les avancées récentes dans ce domaine (Figure 3.14) :

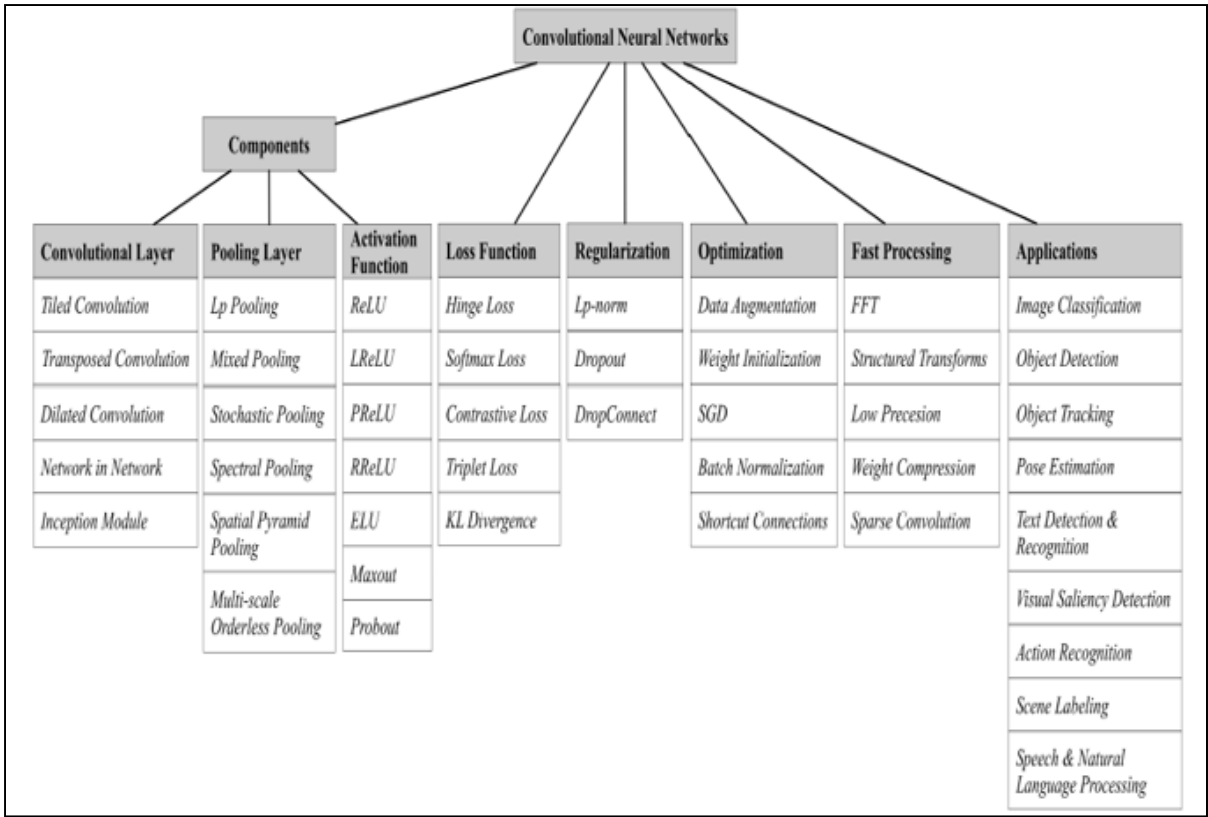


Figure 3.14 Réseau de neurones convolutif (Gu, 2018)

La classification des images a grandement évolué depuis 2012 lorsque AlexNet a obtenu les meilleures performances au ILSVRC 2012. Depuis ce temps, la précisions de la classification a augmenté, tout comme la profondeur du réseau, grâce à la réduction des filtres. Ceci a permis

de guider le présent ouvrage directement vers la classification d'images pour la gestion des données de la route (Gu, 2018).

### **3.3.4 Gestion des coûts pour l'acquisition d'informations**

Cependant, ce que nous avons compris des différents articles faisant référence au LiDAR, c'est que ce n'est pas nécessairement la technologie en elle-même qui est complexe, mais plutôt l'interprétation des données collectées avec la technologie ; la quantité d'informations n'est pas moins que gigantesques et les ordinateurs « normaux » ne semblent pas pouvoir tout traiter. En 2016, Guan et al. ont d'ailleurs suggéré que toute l'infrastructure informatique devait être mise à niveau (logiciels, postes de travail, serveurs, stockage de données et réseau fédérateur). Tel que le mentionne Guan (2016), la mise à niveau consiste à mettre à jour les équipements technologiques puisque la taille et la complexité des données sont considérées comme des défis importants. Les fabricants de matériel continuent de construire des systèmes LiDAR mobiles avancés. Le post-traitement des données est la clé d'une solution complète pour les utilisateurs finaux (par exemple, les ingénieurs/agences de transport) car ils sont moins intéressés par les données réelles du nuage de points que par les informations routières géométriques formatées par ordinateur (CAO). Le traitement manuel de gros volumes de données LiDAR mobiles pour l'extraction d'informations routières prend beaucoup de temps. (Guan, 2016).

Pour traiter efficacement l'ensemble de l'ensemble de données, la plupart des progiciels actuels adoptent la stratégie commune, où les données sont sous-échantillonnées ou segmentées en petites tuiles / sections. De plus, la majorité des méthodes existantes développées pour réaliser un inventaire routier sont d'une grande complexité de calcul. Des méthodes efficaces de reconnaissance d'objets seront nécessaires pour réaliser la géométrie de la route et les données physiques de la route en temps opportun. En outre, compte tenu de la reconnaissance d'objets dans les données LiDAR mobiles, plusieurs attributs, notamment l'élévation, la largeur d'impulsion d'intensité, la portée, l'angle d'incident et les informations d'écho multiples, peuvent être explorés pour extraire les caractéristiques de la route.

En outre, les logiciels de post-traitement des données doivent également être mis à niveau, car ce n'est pas dans les données brutes que la valeur est trouvée, mais plutôt dans la conversion des données en un modèle pouvant être facilement consulté ou interprété par le client/utilisateur. (EIJ, 2015).

Il existe actuellement sur le marché plus d'une quinzaine de logiciels post-traitement de nuages de points : 3DReshaper, VisionLidar, Bentley Descartes, Surface finale, Pointools, RealityCapture, FARO Scene, Trimble RealWorks, LIS, Leica CYCLONE, PointSense, PointCab, PolyWorks, ReCap, RevLib, Scalypso. (Guan, 2016).

### 3.3.5 Méthodes de collectes populaires

En plus d'être plus fiables que les techniques d'enquête traditionnelles, les systèmes LiDAR mobiles offrent des économies de coûts par rapport à d'autres méthodes. (Williams, 2015) Une étude réalisée en 2011 pour le compte du ministère des Transports de l'état de Washington a répertorié les coûts de trois programmes distincts : le programme d'inventaire des caractéristiques du bord de la route (RFIP), le programme d'inventaire des caractéristiques de l'*American with Disabilities Act* (ADA) et la mesure de dégagement des ponts (BCM). La conclusion était sans équivoque : le LiDAR est plus sûr, plus précis et moins cher. (Yen, 2011).

Les trois programmes nécessitent des données différentes à des fins diverses :

- RFIP : les données collectées sur les éléments routiers (glissières de sécurité, ponceaux, panneaux de signalisation, etc.) sont utilisées pour la gestion des actifs, la conception de projets et de systèmes et l'analyse globale des systèmes.
- ADA : les données collectées sur les caractéristiques (trottoir, rampes, passages pour piétons, entrées de cour, etc.) sont utilisées pour garantir la conformité aux normes et réglementations de l'ADA.
- BCM : les données collectées sur les ponts (colonnes, piliers, poutres, restrictions aériennes, etc.) sont transmises à différentes agences pour la planification des itinéraires, l'entretien et même l'évaluation des effets des risques environnementaux.

Or, l'un des problèmes rencontrés avec les méthodes actuelles de collecte de données est le chevauchement : de nombreux équipages ont collecté des informations similaires indépendamment les uns des autres, ce qui a entraîné des efforts et des dépenses en double. De plus, il est souvent constaté que les données ne sont pas systématiquement stockées dans un format standard universel, ce qui empêche toute utilisation partagée et toute maintenance appropriée de ces données. (Yen, 2011).

La méthode de collecte du RFIP, par exemple, est la suivante : l'équipe de RFIP se compose de 2 personnes ou de 4 si la vitesse de collecte des données doit être augmentée. En règle générale, un utilisateur procède à l'entraînement, à pied ou en voiture, et consigne les attributs de l'entité dans un ordinateur. Les données sont ensuite traitées dans le bureau par un spécialiste de la planification des transports, assisté par un agent de T.I. spécialiste. Le programme est géré par un ingénieur technique des transports. (Yen, 2011).

Tableau 3.2 Coûts RFIP  
Adapté de Yen, 2011

| <u>Description</u>                                                | <u>Coût</u>         |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Véhicule                                                          | 600\$/mois          |
| Ordinateur portable                                               | 1500\$/équipe       |
| Équipement d'enregistrement de données (un par membre d'équipage) | 6000\$/unité        |
| Dépenses de déplacements                                          | 3600\$/année/région |
| Coûts divers (cellulaires, fournitures, réparation, etc.)         | 1000\$/mois/équipe  |
| Technicien de transport 2                                         | 4200\$/mois         |
| Technicien de transport 3                                         | 4800\$/mois         |
| Office software maintenance                                       | \$3500/année        |

Bien que les dépenses liées au RFIP varient (Tableau 3.2), le coût de l'enquête et de la gestion des données par autoroute est relativement constant (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Relation des coûts par distance  
Adapté de Yen, 2011

| <u>Année</u>      | <u>Coût annuel du programme RFI</u> | <u>Nombre de miles parcourus</u> | <u>Coût par mile</u>    |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 2010              | 638 381\$                           | 443                              | 1442.41\$               |
| 2009              | 836 960\$                           | 644                              | 1299.63\$               |
| 2008              | 1 179 356\$                         | 709                              | 1831.30\$               |
| 2007              | 1 319 550\$                         | 911                              | 1448.46\$               |
| 2006              | 884 504\$                           | 879                              | 1006.26\$               |
| <b>Sous total</b> | 4 858 752\$                         | 3585                             | Coût moyen<br>1355.20\$ |

### 3.3.6 Produits et solutions qui visent des objectifs similaires

Un grand nombre de solutions concurrentielles ont été introduites et développées pour une multitude d'applications WIM dans les dernières années; chacune de ces technologies possède évidemment des caractéristiques différentes, tout comme son propre lot d'avantages et de désavantages. Chaque application possède en outre des requis différents pour une foule de facteurs différents, ce qui inclut, par exemple : les coûts de fabrication et d'exploitation, la précision, l'environnement, l'installation, les restrictions de temps pour prendre une mesure, etc.

Les coûts des technologies dépendent évidemment de leur niveau de précision ainsi que de la qualité et de la quantité des informations acquises; ces caractéristiques permettent en retour d'établir le choix de leurs applications dans l'environnement. En principe, la logique derrière le choix d'un WIM est évaluée au moment de la conception de la route en tenant compte de facteurs divers : maintenance envisagée, modèles prédictifs, nombre de véhicules estimé basé sur la charge par essieu. (Jacob, 1999).

Si le WIM est utilisé pour mesurer une charge dynamique, c'est la découverte de la charge statique qui en est le véritable objectif. En d'autres mots, la charge dynamique et la calibration des capteurs permettent d'estimer la charge statique d'un véhicule. À la base de cette



technologie se trouvent les jauges de contraintes, les cellules de charges, le système piézoélectrique, la fibre optique et les sondes capacitives. Les solutions qui utilisent les jauges de contraintes permettent une solution à faible coût avec une installation plutôt simple et qui présentent des performances moins bonnes quand on les compare aux solutions qui utilisent les cellules de charges ou un système piézoélectrique. Ces deux technologies prennent des mesures beaucoup plus précises et sont facilement manipulables, mais requiert, en contrepartie, des coûts plus élevés en termes d'acquisition du matériel et d'installation. Enfin, la fibre optique peut être une solution envisageable puisqu'elle permet une mesure précise et un coût relativement abordable. (Caussignac, 1999; Bushman, 1998). On peut consulter la section 3.3.6.5 pour plus de détails sur l'utilisation de la fibre optique pour la mesure d'une charge dynamique.

#### **3.3.6.1 Système piézoélectrique**

La technologie de piézoélectricité permet de mesurer le poids d'un véhicule et de déterminer sa classification (détection d'essieu et vitesse du véhicule). Pour obtenir la charge, les capteurs nécessitent des caractéristiques précises différentes de celles utilisées pour effectuer la simple classification. Les capteurs piézoélectriques existent sous plusieurs formes, mais fonctionnent tous de la même manière : lorsqu'une force est appliquée sur le matériel piézoélectrique, un voltage est généré en proportion de la force; cette relation entre la force et le voltage peut être quantifiée et utilisée pour déterminer le poids des roues ou des essieux qui croisent les capteurs. Le système WIM de type piézoélectrique (Figure 3.15) utilise généralement un système de senseurs à quartz pour détecter un changement de voltage mesuré par le poids de la pression induite par la charge de l'essieu. Ce principe de transduction fonctionne seulement lorsque la charge est dynamique; cette technologie ne s'applique donc pas lorsque les mesures doivent être prises très lentement et ne peuvent être utilisées pour les charges statiques. Lorsqu'un véhicule passe sur le senseur piézoélectrique, celui-ci crée une charge électrique qui est ensuite calculée pour la charge dynamique. La charge statique est estimée via la mesure de la charge dynamique avec l'aide de paramètres prédéfinis et des calibration particulières. (Bushman, 1998).

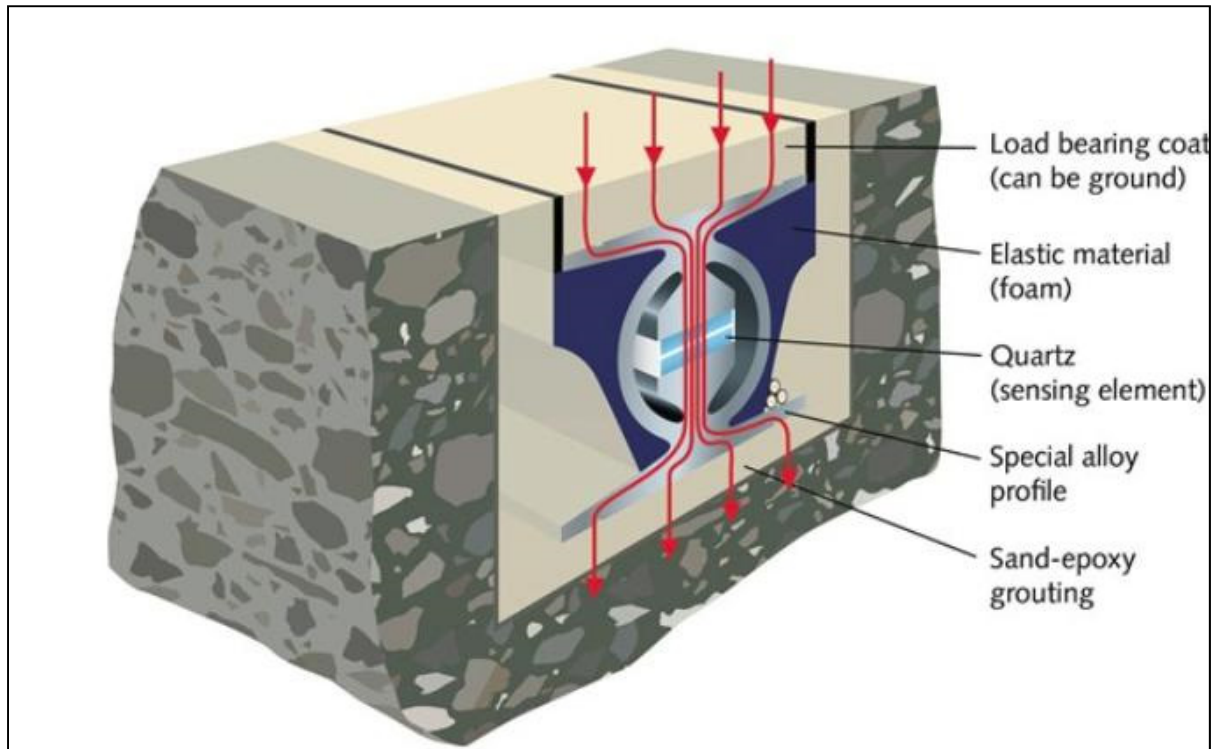


Figure 3.15 système WIM qui utilise un capteur piézoélectrique  
[\(https://www.kistler.com/en/glossary/term/wim/\)](https://www.kistler.com/en/glossary/term/wim/)

À l'instar des cellules de charges et plaques de recourbement qui seront vues plus loin dans le document, le système piézoélectrique nécessite une boucle (*loop*) inductive afin d'initier le processus de mesure lorsque la présence d'un véhicule est détectée.

Trois types de capteurs piézoélectriques existent pour les applications WIM :

1. Les capteurs en piézocéramique : les capteurs de piézocéramique sont constitués de poudre de céramique compressée entre un centre de cuivre et une enveloppe de cuivre. Le capteur est de petit diamètre, semblable à un câble coaxial. Lorsqu'ils sont utilisés dans un système de WIM, les capteurs de piézocéramique sont typiquement insérés dans un cadre rigide en métal rempli de fibre de verre renforcie avec de la résine d'époxy. Le dessus du capteur doit être installé à la surface de la chaussée, c'est-à-dire scellé dans un trou de 2 pouces carrés coupée dans la chaussée. Ce type de capteur

permet d'avoir une précision moyenne et a davantage d'utilité dans un cas de classification de véhicule. (Hallenbeck, 2004).

2. Les capteurs en piézopolymère : les capteurs en piézopolymère sont des capteurs entourés d'un boîtier en laiton. Ce type de capteur peut être installé à environ 1 pouce de profondeur par 0.75 pouce de diamètre dans la chaussée. Ce type d'installation nécessite un châssis de support qui, une fois installé, doit être scellé dans la chaussée. Ces capteurs ont des restrictions qui réduisent la qualité des mesures de poids et sont plus couramment utilisés comme détecteurs d'essieux pour la classification des véhicules. (Hallenbeck, 2004).
  
3. Les capteurs de piézoquartz : les capteurs de piézoquartz sont les plus récents des capteurs piézoélectriques disponibles pour la collecte de mesures de poids avec un système WIM. Le matériau piézoélectrique utilisé dans ce capteur n'est pas sensible aux changements de température, contrairement aux autres de la même famille. La conception de l'emballage du capteur est également fondamentalement différente de celle des autres types de capteurs piézoélectriques. Ils sont en outre plus chers que les autres types de capteurs, mais se sont révélés capables de fournir des mesures de poids de bonne qualité. Les capteurs de piézoquartz sont installés dans une fente d'environ 2 pouces de large, creusée à même la surface du trottoir et scellée sur place. Plusieurs capteurs doivent être installés bout à bout sur la même ligne pour couvrir toute la largeur d'une voie de circulation. Une conception de système WIM utilisant ces capteurs de poids comprend généralement une seule ligne de capteurs et deux boucles inductives, ou deux lignes distinctes de ces capteurs et une ou deux boucles inductives. (Hallenbeck, 2004).

Le système piézoélectrique est généralement représenté avec un capteur ou plus, installé de façon perpendiculaire à la direction de la circulation des véhicules sur la chaussée. L'installation se fait normalement sous la chaussée avec une coupe de la voie (Figure 3.16, Figure 3.17, Figure 3.18 et Figure 3.19) ou, encore, en surface, directement collé sur la surface

de la chaussée. Ce type de système permet la classification des véhicules, leur vitesse, poids et dégât fait à la chaussée, grâce à l'information acquise avec des corrélations de métadonnées. Ce type d'installation peut être effectuée dans des zones difficiles et exigeantes pour l'équipement dû à sa robustesse. (Bushman, 1998).



Figure 3.16 Excavation pour installer un système piézo (IRD, 2001)



Figure 3.17 Positionnement pour le boîtier (IRD, 2001)





Figure 3.18 Finalisation de l'installation (IRD, 2001)



Figure 3.19 Fin de l'installation électrique; connexion des câbles au cabinet pour acquérir et transmettre les données (IRD, 2001)

### 3.3.6.2 Sondes capacitives

Les sondes capacitives ou tapis capacitifs (*capacitive mats*) sont normalement constitués de 2 boucles inductives et de senseurs d'évaluation de charge. Dans un système dit portable, ce type de solution est utilisée pour une durée moyenne de 30 jours. Dans une configuration permanente, l'installation est effectuée sous la route avec des plaques de métal à la surface de la chaussée (Figure 3.20). Le tapis est installé de façon perpendiculaire à la direction des véhicules.



Figure 3.20 Tapis Capacitifs (Sun et al., 1998)

### 3.3.6.3 Bandes de recourbement

Les bandes de recourbement sont des plaques avec des capteurs de type extensomètre qui sont normalement installés sous des panneaux rectangulaires en acier renforcé. Les capteurs sont connectés à un circuit de pont de Wheatstone (*Wheatstone bridge*) qui, lorsqu'un véhicule passe, capte le tassement afin de calculer la force exercée. Ce type d'installation se trouve dans la chaussée et les plaques d'acier de différents formats (en moyenne : 20 pouces par 49 pouces). Généralement, deux systèmes distincts sont installés côte-à-côte, c'est-à-dire un par voie (Figure 3.21). Toutes les bandes de recourbement possèdent une boucle inductive à une certaine distance permettant de détecter la présence d'un véhicule afin de débiter la séquence

de mesure du WIM. Lorsqu'un véhicule passe sur la plaque, le système capte le changement dans la distorsion de la plaque grâce à l'extensomètre et permet d'évaluer la charge dynamique. Ce type d'équipement est souvent utilisé pour les stations de mesure sur les autoroutes et peut être installé de façon permanente ou temporaire.



Figure 3.21 Plaques de pliage (<https://www.viscoindia.com/bending-plate-medium-speed-weigh-in-motion-mswim.aspx>, 2018)

#### 3.3.6.4 Cellule de charge

Le WIM avec cellule de charge utilise, comme son nom l'indique, une cellule de charge (*loadcell*) pour le capteur de poids. Un WIM utilise ainsi normalement une seule cellule de charge avec deux balances permettant de détecter les essieux et poids de chaque côté des essieux simultanément.

Une cellule de charge est un transducteur qui permet de convertir les forces ou poids externes et est appliqué dans un signal électrique proportionnel. Dans ce cas, une cellule de charge peut être un équipement hydraulique avec un piston et un cylindre; la grande majorité des cellules de charge WIM sont utilisées avec un extensomètre ou un capteur de vibrations. L'élément



sensitif d'une cellule de charge consiste généralement en une paire d'extensomètres, qui ont la capacité de mesurer de grandes forces.

Un montage typique comprend une cellule de charge installée dans un boîtier d'acier sous le centre d'une plaque d'acier rectangulaire (Figure 3.22). Toute charge sur la plaque d'acier est directement transférée à la cellule de charge avec pour objectif de calculer la force exercée sur celle-ci.

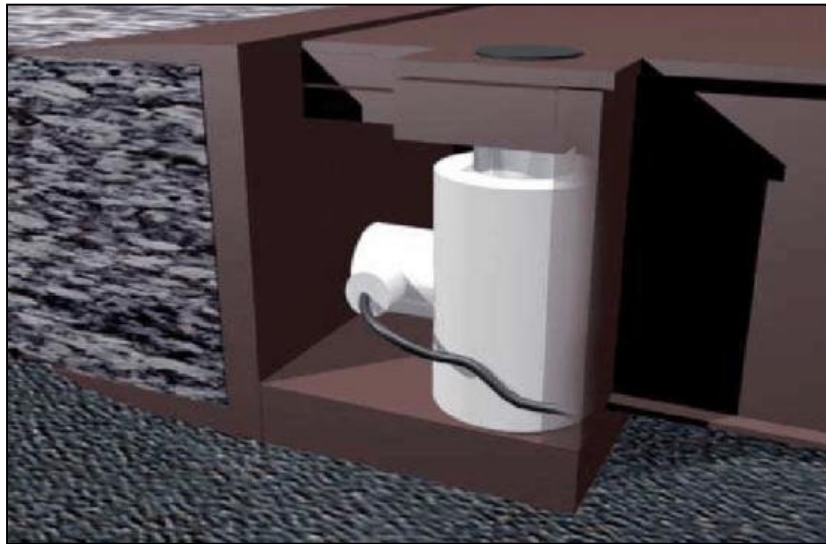


Figure 3.22 Cellule de charge WIM (Pinna, Della Chiara, 2010)

Un autre montage commun est d'utiliser quatre cellules de charge pour la même plaque d'acier rectangulaire; chaque cellule de charge est installée dans un coin de la plaque et on mesure la force exercée sur la plaque en additionnant le total des forces exercées sur chaque capteur. Lorsqu'un véhicule se déplace au-dessus des cellules de charge, le système détecte une acquisition de données avec la mesure de chaque cellule et additionne le tout pour obtenir le résultat de la charge de l'essieu. La cellule de charge est normalement installée perpendiculairement au sens de chaussée et de la circulation; sa superficie est d'environ 30 pouces par 72 pouces, afin d'être assez large pour que chaque pair de roues puisse être mesurée individuellement. Les cellules de charge nécessitent une fondation renforcée qui est, finalement, assez dispendieuse et très laborieuse à construire. Cependant, une cellule de charge

WIM adéquatement installée et calibrée permet d'obtenir le poids du véhicule avec une précision de plus ou moins 6% pour plus de 95% des véhicules mesurés. (Bushman, 1998).

Les cellules de charge sont régulièrement utilisées pour des stations de mesure temporaires/mobiles. L'installation permanente nécessite des excavations mineures dans la structure de la route où il est possible de faire une application portable.

#### **3.3.6.5 Fibre optique**

L'utilisation de la fibre optique pour détecter, localiser et classifier les véhicules est reconnue dans plusieurs types de projets ayant trait à la prise de mesures précises. L'idée générale est d'obtenir les changements de pression au niveau structural de la chaussée avec la fibre enfouie sous la terre. Les résultats sont obtenus en surveillant constamment la fibre avec un photodétecteur, ce qui permet d'observer et d'analyser les variations des véhicules ou gens qui se déplacent au-dessus ou près de la fibre enfouie (Figure 3.23). Le matériau en soi est polyvalent et permet autant la mesure des déplacements que les déformations, accélérations, pressions, températures, débits, voltages, champs magnétiques, indices de réfraction, etc. que la détection de produits chimiques, du niveau d'un liquide ou même d'anomalies biologiques, dépendamment du principe de fonctionnement du capteur.

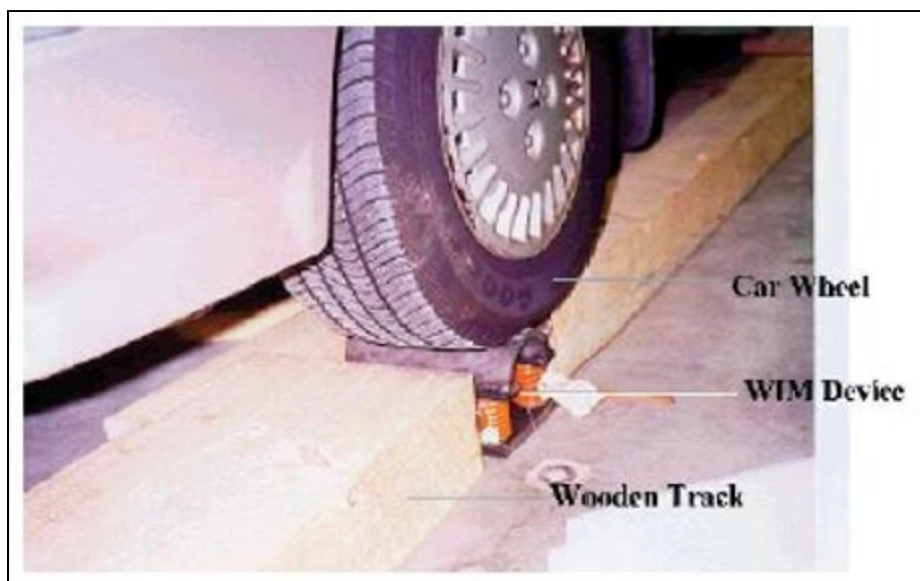


Figure 3.23 WIM avec fibre optique (Malla, 2000)

Dans un système d'acquisition de données WIM, la fibre optique est conçue avec deux tronçons de métal soudés en circonférence d'une fibre optique. Le principe pour obtenir l'information est celui de la photoélasticimétrie de la fibre de verre sous une force de compression verticale. Ceci permet d'obtenir deux modèles de propagation : un mode rapide, en compression verticale et un plus lent, en compression horizontale (Figure 3.24). La pression transférée à la fibre optique crée un déphasage entre les deux modèles qui est directement relié à la charge sur la fibre. (Arturo, 2001) La fibre optique pour le WIM est souvent reconnue pour permettre une bonne précision d'acquisition des données à un coût raisonnable comparativement aux solutions existantes sur le marché. (Caussignac, 1999) De plus, le système demeure précis même avec des véhicules à grande vitesse ( $\pm 120$  k/h) et des conditions météorologiques robustes. Ils sont considérés plus simples et moins coûteux au niveau de l'installation (excavation, etc.) comparativement aux autres systèmes WIM. La fibre optique possède la caractéristique d'être immunisée aux interférences électromagnétiques, ce qui lui permet d'être plus avantageuse près des centrales électriques ou chemin de fer, par exemple.

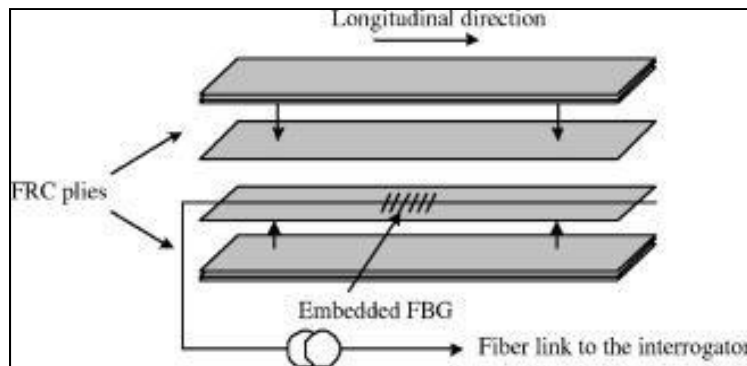


Figure 3.24 Fibre optique basée sur le poids (Ke, 2006)

L'une des qualités des capteurs à fibre optique réside dans ses propriétés uniques qui en font souvent la seule option envisageable pour certaines applications. D'une part, l'une des vertus les plus connues de la fibre optique est certainement son immunité, tel que mentionné plus haut, à l'interférence électromagnétique, mais également à l'interférence radio. Les environnements électromagnétiques perturbent les mesures de bien des capteurs conventionnels (capacitifs, piézoélectriques, jauges de déformation, potentiomètres, LVDT, etc.) D'autre part, la résistance de la fibre et de son enveloppe à de hautes températures et à un environnement corrosif lui donne d'excellentes propriétés pour fonctionner dans un contexte aussi hostile qu'une chaussée. (Xiao, 2005) Les capteurs à fibres optiques présentent également de nombreux avantages en raison de leur petite taille, de leur poids réduit, de leur consommation d'énergie réduite, de leur sensibilité accrue, de leur largeur de bande plus large, de leur coût réduit et de leur robustesse. (Choi, 2003) En outre, le prix de la fibre elle-même est abordable (Udd, 1991); c'est plutôt l'installation qui demande beaucoup de précision, de temps ainsi que l'acquisition du conditionneur de signal et son installation permanente au site qui font monter les prix. La fibre est généralement enfouie entre 8 et 18 pouces dans le sol.

La sensibilité d'un câble à fibres optiques à la pression d'une charge est un facteur important pour la détection. Même s'il est possible de calculer le déphasage du câble en raison de la pression latérale, ces calculs ne tiennent pas compte adéquatement de l'influence du câble lui-même et la composition et les conditions du sol environnant. (Juarez, 2005).

La réflectométrie optique dans le domaine temporel ou *Optical Time Domain Reflectometry* (OTDR) est une technique de mesure sophistiquée qui trouve une application à la fois en laboratoire et sur le terrain pour la caractérisation de l'atténuation des imperfections et des emplacements d'épissage (*splicing*) dans les grandes longueurs de fibres. Les principales applications de l'OTDR sont les mesures de perte d'épissure, de connecteur, de perte de micro-flexion, de fluctuation de diamètre et d'impulsion de longueur de fibre, lancées dans la fibre par un laser pulsé traversant un coupleur directionnel. La lumière rétrodiffusée est détectée à l'aide d'un photodétecteur et passe à travers une unité de traitement de signal, puis est observée à l'aide d'un oscilloscope (Figure 3.25).

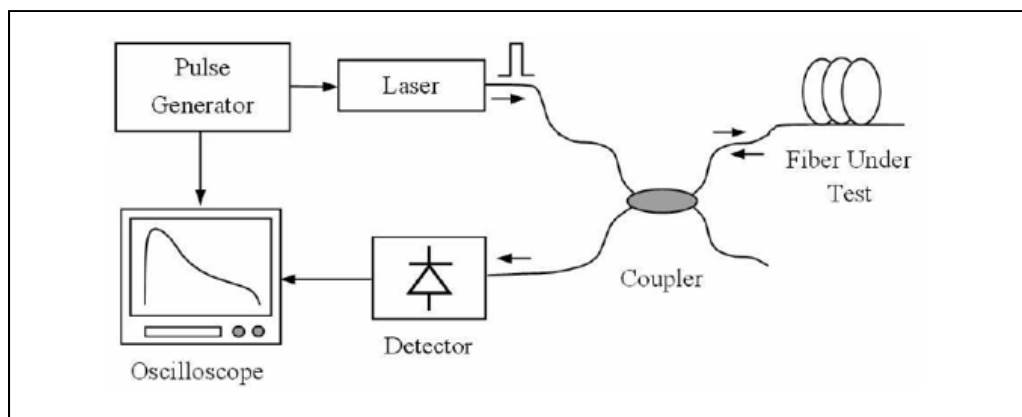


Figure 3.25 Diagramme de bloc d'OTDR conventionnel (Park, 1992)

La puissance optique détectée diminue de façon exponentielle avec la distance le long de la fibre. Des pertes dues à la réflexion du béton par un joint de fibre ainsi qu'une discontinuité à cause d'une perte excessive résultant d'une imperfection ou d'une défaillance de la fibre et à la réflexion de Fresnel sont observées sous forme de pics brusques (Figure 3.26).

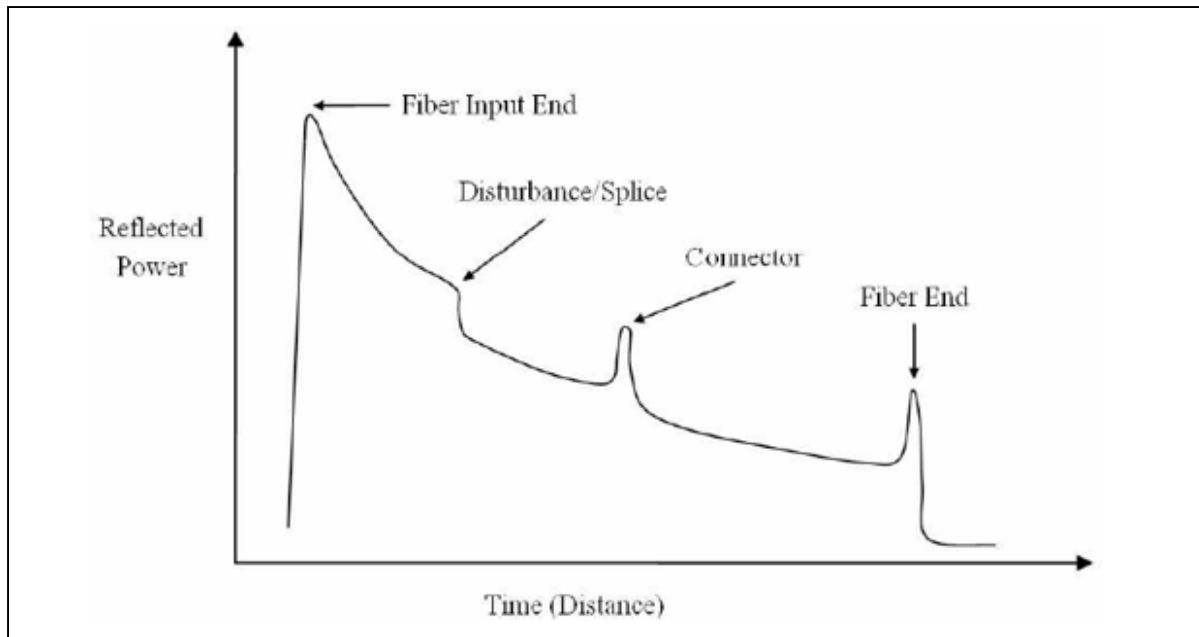


Figure 3.26 Trace OTDR typique (Park, 1992)

Le OTDR, initialement présenté il y a plus de deux décennies, est maintenant largement utilisé pour localiser les coupures et autres anomalies dans les liaisons et les réseaux de fibres optiques. Le capteur a été configuré comme réflectomètre optique dans le domaine temporel avec un laser hautement cohérent comme source de lumière. L'OTDR conventionnel peut détecter la présence et l'emplacement de la perturbation mais ne détecte pas les changements de phase de la lumière rétrodiffusée. Le système a été modifié au fil des années pour produire un capteur d'intrus plus pratique, plus sensible et plus fiable. (Seo, 1994, Park, 1992).

Or, ceci demande du temps tout en étant onéreux. L'inconvénient de ce type de solution est effectivement le coût d'acquisition élevé du matériel de détection et de générateur de signal ainsi que les coûts d'installation. Il est nécessaire d'effectuer un effort économique substantiel pour avoir une évaluation structurale globale du réseau routier.

La fibre optique permet ainsi d'évaluer l'impact de la pression des véhicules sur la résistance en fatigue des chaussées. La précision de la fibre est un avantage indéniable, certes, mais elle présente tout de même les désavantages classiques associés aux capteurs à modulation

d'intensité : mesure affectée par l'instabilité de la source, faible sensibilité du capteur, mesure sensible aux pertes d'insertion des fibres et comportement pas nécessairement linéaire. (Park, 1992).

### 3.3.6.6 Comparaison entre les capteurs

Une calibration du système est effectuée pour compenser les effets spécifiques au site, en incluant la température de la chaussée, la vitesse du véhicule, le type de chaussée et son état, pour éventuellement faire l'estimation des poids aussi proche que possible des poids statiques correspondants. Cependant, comme l'illustre conceptuellement la Figure 3.27, un écart existe normalement entre les poids d'un véhicule enregistrés statiquement ( $W_s$ ) et les poids enregistrés dynamiquement ( $W_d$ ). Par exemple, dériver le signal de sortie change lentement et indépendamment la valeur mesurée de la répartition des masses acquises par le WIM. Ceci est un indicateur d'un problème de calibration en surpoids ou insuffisant en poids connu par de nombreux systèmes WIM. De plus, chaque site est unique dû à la particularité des usagers, du terrain, de la topographie, des températures, du sol, etc. Par conséquent, il est très important de mener à bien l'étalonnage périodique afin d'assurer la précision d'un système WIM.

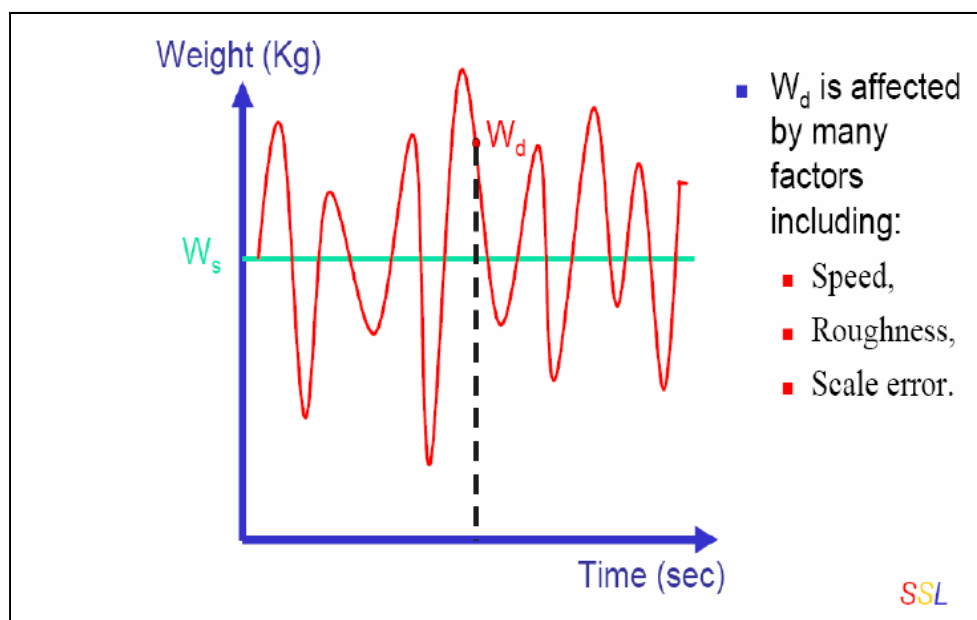


Figure 3.27 Évaluation du poids statique et dynamique (IRD, 2001)

Un calibrage du système doit être appliqué immédiatement après l'installation initiale d'un système WIM sur un site. Lors du recalibrage d'un WIM, il doit potentiellement être suivi d'une réinstallation partielle due aux accès limités aux capteurs. On doit prévoir un nombre considérable de maintenance, de modifications importantes et inerrantes aux conditions du site où le WIM a été installé, sans oublier les composantes du système en soi. Des modèles de données inhabituelles peuvent également indiquer un besoin de recalibration. (ASTM, 2011) Il est généralement recommandé de faire un calibrage du WIM comme une procédure générale : il nécessite deux véhicules-tests pré-mesurés sur une balance statique pour qu'ensuite chacun d'eux effectue plusieurs passages sur les capteurs du système WIM dans chaque voie à des vitesses spécifiques. Basé sur des différences entre les valeurs estimées et les valeurs de références respectives telles que : différences entre la vitesse du véhicule, la charge par essieu, l'espacement des essieux et les poids à l'épreuve du véhicule. Les facteurs de calibration peuvent donc être dérivés grâce à l'information provenant de ces mesures.

Les capteurs de système WIM sont normalement intégrés aux routes sur des sites spécifiques. Ils sont soumis à des conditions environnementales rigoureuses ainsi que les conditions de circulation, par exemple, la température de la chaussée, l'humidité, la déflexion et la vitesse du véhicule peuvent tous avoir une incidence sur les résultats des mesures réelles des véhicules, c'est-à-dire la précision. Pour assurer la précision, il est donc important de traiter les facteurs auxquels les capteurs WIM sont sensibles.

Comme la plupart des capteurs, les capteurs de systèmes WIM sont sensibles à la température ; leur force de signal pour une force d'essieu donnée n'est pas uniforme avec les changements de température. Ceci est dû aux propriétés du capteur lui-même et aux réactions de la chaussée à la température. Les pratiques ont ainsi constaté que les capteurs WIM intégrés dans les chaussées en enrobé sont moins cohérents que ceux intégrés au béton. (ASTM, 2011) L'une des raisons est que les chaussées en enrobé se ramollissent lorsque la température est chaude.

Or, si un capteur WIM est utilisé en dehors de la plage de température prévue par le fabricant, il devient impossible de garantir que les sorties des capteurs répondent à



certaines spécifications car ils sont alors considérés hors plage. Il a été expérimenté par plusieurs que lors de la calibration d'un WIM, il y avait peu de chance de réussir à calibrer des tests de capteurs piézoélectriques sur une longue période en raison de l'impact de la variation de la température dans le temps. La calibration d'un système WIM doit impliquer une compensation de l'impact du changement de température pour le plan de maintenance. (ASTM, 2011).

Comme les véhicules pesés sont en mouvement, l'uni de la surface de la route joue un rôle sur la dynamique des véhicules : la rugosité de longueur d'onde courte affecte le mouvement de l'essieu, et la rugosité de longueur d'onde longue affecte le mouvement du corps du véhicule. Plus la rugosité est mauvaise, plus l'erreur d'échelle est importante.

L'uni est une mesure des variations à petite échelle à la hauteur d'une surface physique. La norme ASTM E867 définit l'uni de la chaussée comme suit : « La déviation d'une surface par rapport à une vraie surface plane avec des dimensions caractéristiques affectera la dynamique du véhicule et la qualité de conduite ». (ASTM, 2011).

Deux distinctions de la rugosité de la chaussée sont identifiées comme influençant les erreurs d'échelle de la performance à long terme de la chaussée :

- Rugosité « à courte portée », couvrant la plage d'une chaussée comprenant environ 3,05 mètres précédant l'échelle, l'échelle elle-même, environ 0,31 mètre au-delà ; la rugosité correspondante est appelée indice de courte portée ou *Short Range Index* (SRI). (Karamihas, 2004).
- Rugosité « à longue portée », couvrant la plage d'une chaussée comprenant environ 24,4 mètres précédant l'échelle, l'échelle elle-même, environ 3,05 mètres et au-delà ; la rugosité correspondante est appelée *Long Range Index* (LRI). (Karamihas, 2004).

Comme un véhicule en mouvement interagit avec la chaussée où des capteurs sont intégrés, de nombreuses propriétés du véhicule pourraient avoir une incidence sur la précision :

- La classe du véhicule utilisé, y compris le système de suspension du véhicule;
- Les types de pneus et pressions, nombre d'essieux, etc.;

- La vitesse du véhicule (vitesse locale, vitesse sur autoroute, etc.);
- Les schémas de chargement du véhicule (déchargé, chargé, surchargé, etc.)

Une recherche a démontré que, en supposant des vitesses constantes, la variation des charges dynamiques mesurées par un système WIM peut être obtenue en fonction approximativement proportionnelle à la racine carré de l'IRI, le rapport dépend des propriétés dynamiques du véhicule, où IRI est l'indice de rugosité internationale (Tableau 3.4). (Sun et al., 1998).

Tableau 3.4 IRI : tableau d'évaluation  
Tiré de Sun et al., 1998

| AUTOROUTES<br>IRI (m/km) | QUALITÉ DE<br>ROULEMENT | URBAIN<br>IRI (m/km) |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| < 1,10                   | Très bon                | 0 – 4,7              |
| 1,11 – 1,60              | Bon                     | 4,7 – 7,0            |
| 1,61 – 2,50              | Passable                | 7,0 – 8,8            |
| 2,51 – 3,50              | Mauvais                 | 8,8 – 10,5           |
| > 3,50                   | Très mauvais            | > 10,5               |

Avec les systèmes actuels, tout est un équilibre entre la précision et les coûts. Plusieurs analyses ont d'ailleurs été faites pour qualifier les systèmes WIM dans leurs précisions et coûts. (Bushman, 1998) ASTM classe ainsi les systèmes WIM en tant que type I, II, III ou IV. (ASTM, 2011) Le classement est fait en fonction de la vitesse, des capacités d'acquisition des données et des applications prévues. Les Tableau 3.5 et Tableau 3.6 ci-dessous indiquent les exigences de performance fonctionnelle pour les systèmes WIM, du type I au type IV ainsi que les niveaux de précision qui y sont associés.

Tableau 3.5 Système de classification WIM  
Tiré de ASTM, 2011.

|                                  | CLASSIFICATION                 |                                |                                  |                                  |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                                  | TYPE I                         | TYPE II                        | TYPE III                         | TYPE IV                          |
| Speed Range                      | 16 - 113 km/h<br>(10 - 70 mph) | 16 - 113 km/h<br>(10 - 70 mph) | 24 - 80 km/h<br>(15 - 50 mph)    | 24 - 80 km/h<br>(15 - 50 mph)    |
| Application                      | traffic data<br>collection     | traffic data<br>collection     | weight<br>enforcement<br>station | weight<br>enforcement<br>station |
| Number of Lanes                  | up to four                     | up to four                     | up to two                        | up to two                        |
| Bending Plate                    | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Piezoelectric Sensor             | X                              | X                              |                                  |                                  |
| Load Cell                        | X                              | X                              |                                  | X                                |
| Wheel Load                       | X                              |                                | X                                | X                                |
| Axle Load                        | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Axle-Group Load                  | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Gross Vehicle Weight             | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Speed                            | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Center-to-Center Axle Spacing    | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Vehicle Class                    | X                              | X                              |                                  |                                  |
| Site Identification Code         | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Lane and Direction of Travel     | X                              | X                              | X                                |                                  |
| Date and Time of Passage         | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Sequential Vehicle Record Number | X                              | X                              | X                                | X                                |
| Wheelbase (front to rear axle)   | X                              | X                              |                                  |                                  |
| Equivalent Single-Axle Load      | X                              | X                              |                                  |                                  |
| Violation Code                   | X                              | X                              | X                                | X                                |

Tableau 3.6 Type de conformité  
Tiré de ASTM, 2011.

| Function             | Tolerance for 95% Probability of Conformity |            |            |                       |               |
|----------------------|---------------------------------------------|------------|------------|-----------------------|---------------|
|                      | Type I                                      | Type II    | Type III   | Type IV               |               |
|                      |                                             |            |            | value $\geq$ kg (lb)* | $\pm$ kg (lb) |
| Wheel Load           | $\pm 25\%$                                  | n.a.       | $\pm 20\%$ | 2,300 (5,000)         | 100 (250)     |
| Axle Load            | $\pm 20\%$                                  | $\pm 30\%$ | $\pm 15\%$ | 5,400 (12,000)        | 200 (500)     |
| Axle-Group Load      | $\pm 15\%$                                  | $\pm 20\%$ | $\pm 10\%$ | 11,300 (25,000)       | 500 (1,200)   |
| Gross Vehicle Weight | $\pm 10\%$                                  | $\pm 15\%$ | $\pm 6\%$  | 27,200 (60,000)       | 1,100 (2,500) |
| Speed                | $\pm 2$ km/h (1mph)                         |            |            |                       |               |
| Axle Spacing         | $\pm 150$ mm (0.5 ft)                       |            |            |                       |               |

\*Lower values are not normally a concern in enforcement

Lorsque le système de piézoélectrique est installé dans les règles de l'art, on peut estimer un résultat avec une précision d'environ 15% de la charge du véhicule pour 95% de la totalité des véhicules. La marges d'erreur des extensomètres, en assumant que l'installation et la calibration sont effectuées adéquatement, descend à 10% de précision de la charge du véhicule dans 95% de la totalité des véhicules. Pour une cellule de charge, la précision descend à 6%

pour 95% de la totalité des véhicules. Il faut ajouter les coûts de réparation et de maintenance nécessaires puisque les capteurs doivent être remplacés sur une période de temps qui diffère selon la technologie, ce qui a un impact direct sur le coût total d'acquisition.

Ainsi, par exemple, la durée de vie de capteurs piézoélectriques est en moyenne 4 ans, celle des extensomètres est d'environ 6 ans et, quant aux plus dispendieux, les cellules de charges, elle est d'environ 12 ans (Tableau 3.7). Bien entendu, les estimés de temps de vie doivent être en corrélation avec plusieurs facteurs tels que la température, le type de route, la densité d'activité sur la route, la composition du trafic, etc.

Tableau 3.7 Comparaisons entre les types de WIM  
Tiré de Zhang, 2007.

| <b>Characteristic</b>                |                                              | <b>Bending Plate</b> | <b>Single Load Cell</b> | <b>Piezoelectric Sensor</b> | <b>Quartz-Piezoelectric Sensor</b>         |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| Cost                                 | Initial installation cost per lane (USD)     | Medium (~\$20,000)   | High (~\$50,000)        | Low (~\$9,000)              | Medium (~\$20,000)                         |
|                                      | Annual maintenance and operation costs (USD) | Medium (~\$6,000)    | High (~\$8,000)         | Low (~\$5,000)              | High                                       |
| Accuracy (GVW 95-percent confidence) |                                              | ±10 percent          | ±6 percent              | ±15 percent                 | ±10 percent                                |
| Sensitivity                          |                                              | Medium               | Medium                  | High                        | None to temperature, but high to roughness |
| Expected life (years)                |                                              | 6                    | 12                      | 4                           | Expected > 15                              |
| Reliability                          |                                              | Medium               | High                    | Low                         | Medium                                     |

### 3.3.6.7 Intégration de l'information provenant des capteurs dans un système d'acquisition

La majorité des demandes de systèmes WIM sont basées sur des requis divers : la demande du trafic, la sécurité routière, parfois la protection environnementale, etc. La majorité est cependant associée au besoin de l'infrastructure d'accumuler de l'information et de l'utilisation de la chaussée pour les programmes de gestion de la maintenance, de conception de route ou

de nouveau système de gestion des coûts. Les données acquises par les WIM peuvent être utilisées en temps réel ou en acquisition hors ligne, intégrées dans les systèmes d'informations appropriés.

L'acquisition de données en temps réel peut être utile pour la gestion dynamique de la congestion routière : il est possible de collecter l'information concernant tous les véhicules et faire la gestion complète de la congestion routière comme par exemple : donner la priorité à certaines voies pour les camions lourds ou les autobus, retirer l'accès aux camion le week-end, etc.

Les données acquises sont envoyées automatiquement à une station locale de traitement d'information, conçue avec des algorithmes spécifiques. Les données provenant du WIM sont traitées et peuvent être attribuées à certaines fonctions (gestion d'alarmes) et à des seuils (circulation de camions hors normes ou trop chargés). Ce type d'alarme peut être préprogrammé en avance pour alerter les autorités compétentes afin qu'elles effectuent les interventions nécessaires.

Les données acquises hors ligne sont normalement utilisées de façon à découvrir une tendance systémique pour l'acquisition de données afin de révéler des éléments et tendances d'évaluation du trafic et de sa composition dans le temps. Ceci permet de mieux comprendre le réseau routier et de faire des choix de conception plus pertinents pour les décideurs.

Les composantes électroniques WIM traditionnelles capturent les signaux numériques émis par les senseurs, puis les interfacent avec le compteur de trafic pour que le logiciel traite les données. Le processus d'acquisition de données comporte plusieurs étapes :

1. Acquisition des données brutes (*raw data*) analogiques ou digitales ;
2. Transformation en données (*data*);
3. Transformation en information.

Les données du WIM sont généralement téléchargées à partir du contrôleur et sont converties à partir de chaînes binaires ou fichiers ASCII, qui sont à leur tour convertis en fichiers Excel. Les fichiers Excel contiennent des données sur les codes de voie, la durée d'enregistrement, la vitesse du véhicule, le nombre d'essieux, la longueur du véhicule, l'espacements des essieux et le poids des essieux. Les données doivent encore être filtrées car elles contiennent beaucoup de faux positifs et bruit non utilisable (interférence, signal trop faible, etc.). Les données doivent être manipulées avant que les analyses puissent être faites. Pour afficher les formes d'onde quand les véhicules passent, un oscilloscope est nécessaire pour se connecter aux capteurs. Les données sont ensuite généralement téléchargées à partir de l'enregistreur de données sur le site. (Wapa, 2002).

La composition du trafic a un impact direct sur la détérioration de la chaussée et peut être utilisée comme facteur pour expliquer sa condition et justifier le besoin de maintenance préventive et corrective. Faire une prévision précise de la composition du trafic ainsi que le niveau de celui-ci permet de prendre des décisions avisées au niveau de la maintenance des routes. Lorsque les prévisions de trafic sont supérieures au niveau actuel, ceci peut obliger à remettre à plus tard des activités de maintenance avec comme résultat une économie de fonds ou, à tout le moins, une réattribution de fonds pour d'autres activités. Contrairement à une estimation sous-évaluée qui mènera à un besoin de maintenance avant l'échéance prévue lors de la conception de la route. Ceci représente donc un risque sous-jacent de coût élevé de reconstruction car la chaussée se détériorera sous un niveau acceptable. La décision d'investir des fonds peut être supportée par les données acquises via la composition du trafic. (Zhang, 2007).

Les stratégies peuvent être la superposition non structurale, le rapiécage et le scellement de la couche. Au-delà d'un certain niveau d'entretien courant, il n'est pas plus efficace pour les chaussées déficientes ; la réhabilitation doit être utilisée pour remettre la chaussée en état et inverser la détérioration en remplaçant les matériaux de la chaussée. (Wapa, 2002, Assaf, 2017) Dans la pratique, la superposition est une méthode typique pour augmenter les capacités structurales des chaussées. L'entretien et la réhabilitation garantissent le meilleur niveau de

service, tel que le confort de conduite et la sécurité publique. La Figure 3.28, ci-dessous, montre l'intention d'entretien et de réhabilitation : la courbe mauve explique que, sans entretien ni réhabilitation, une chaussée se détériore d'abord lentement puis se détériore à un rythme croissant plus soutenu. La courbe rouge, quant à elle, démontre qu'un entretien et réhabilitation régulière, permettent de meilleures conditions de la chaussée et rallongent sa durée de vie. Les charges de la circulation sont responsables de la plupart des dégradations de la chaussée telles que les ornières et les fissures. (Wapa, 2002).

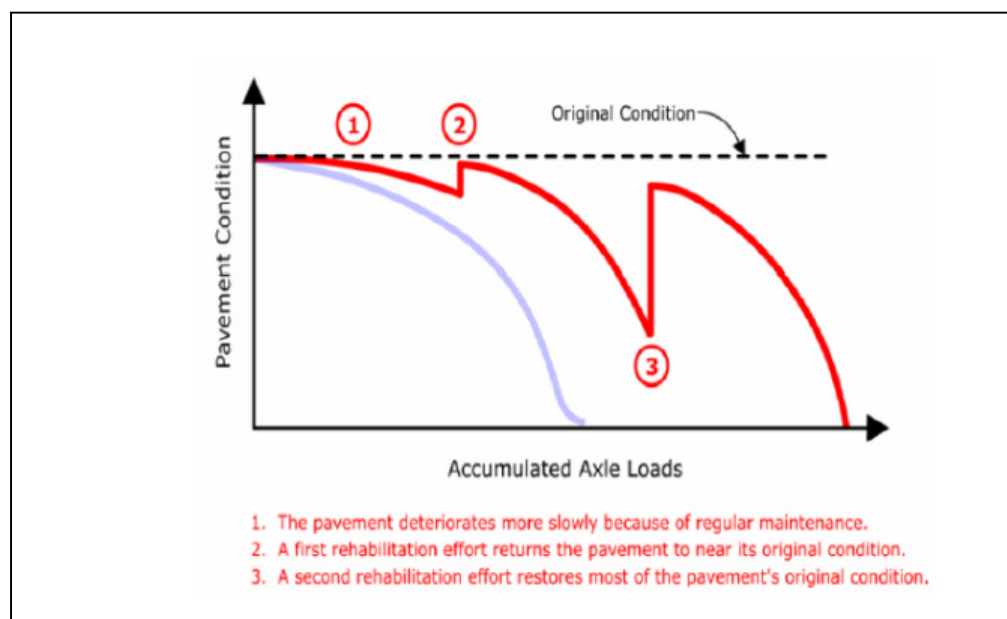


Figure 3.28 Cycle de vie de la chaussée avec maintenance (WAPA, 2002)

Comme le montre la Figure 3.29 ci-dessous, la charge à l'essieu qui dépasse une certaine limite de poids augmente les dommages de la chaussée. Ainsi il est très important d'obtenir et d'analyser efficacement les données de trafic et contrôler avec succès la charge du trafic pour une préservation économique de la chaussée. (Santero, 2005).

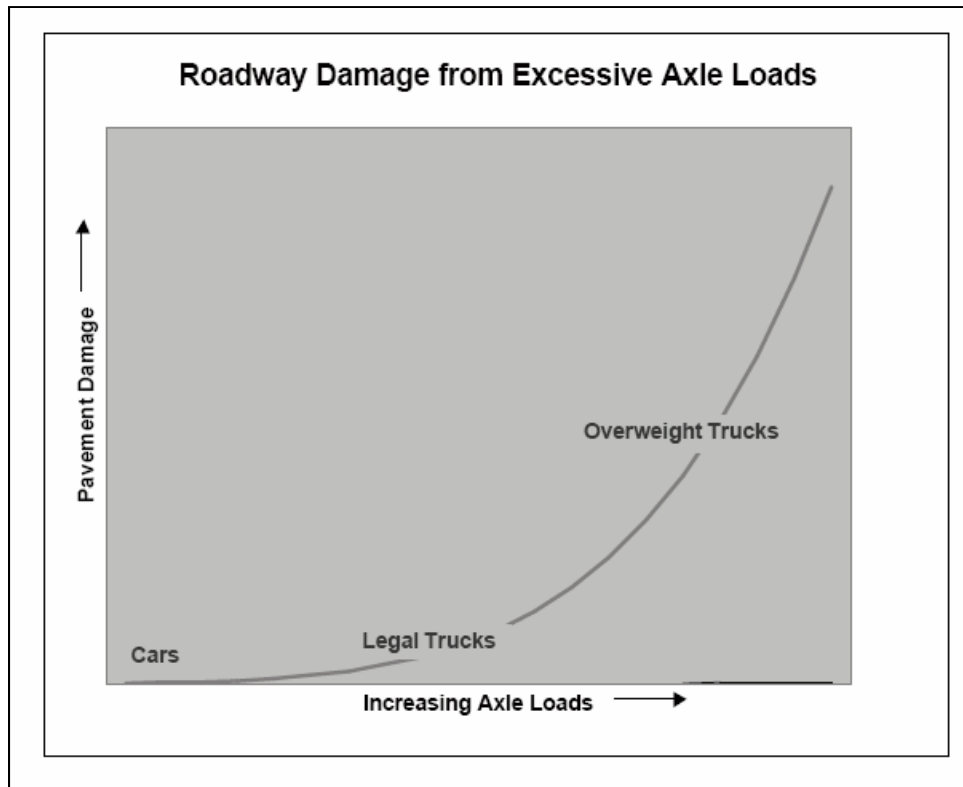


Figure 3.29 Augmentation des dommages de la chaussée via la charge de l'essieu, puissance  $n$  (4-5) (Santero, 2005)

### 3.3.7 Contexte économique

Tout l'intérêt de la technologie de l'évaluation de la charge réside dans le fait qu'elle permet de capturer le poids des véhicules en infraction, de réduire le temps de trajet pour les déplacements commerciaux à cause d'arrêts pour contrôler le poids, réduire les embouteillages, réduire les risques d'accident de la circulation, échanger des informations sur le trafic, et, éventuellement, aider à atteindre l'objectif de préservation de l'infrastructure routière sur un réseau routier global. L'analyse économique a pour but de déterminer si l'investissement dans des composantes ou un sous-système T.I. est économiquement avantageux pour atteindre l'objectif, et d'évaluer le retour sur l'investissement par rapport à celui des solutions alternatives (système WIM versus station de pesage statique). L'analyse économique se concentre également sur la quantification des valeurs monétaires spécifiques de tous les



impacts sur les économies régionales et nationales, les utilisateurs, les agences et l'environnement.

Une analyse économique tente de tout réduire à un seul rapport avantages/coûts. Or une analyse économique complète pourrait être très compliquée pour plusieurs raisons : manque d'information sur la nouvelle technologie, manque de données et d'hypothèses appropriées, nouvelles approches ou méthodes d'évaluation inadéquates, double comptage et valorisation abusive d'avantages, interaction complexe et incertitude. Cependant, si une analyse économique est utilisée pour comparer les alternatives plutôt que pour développer des valeurs absolues d'avantages ou de coûts, beaucoup d'hypothèses difficiles ont alors tendance à s'annuler et l'analyse peut fournir des résultats utiles.

La réduction de délais sur le réseau routier demeure un avantage prédominant avec la technologie WIM. Le WIM prend automatiquement des mesures lorsque des véhicules passent sur les capteurs, sans interruption de circulation afin que seuls les contrevenants potentiels ciblés soient soumis à des inspections ultérieures aux stations de pesage statiques. Par conséquent, le WIM supprime entièrement les retards inutiles causés par une station de pesage statique. Le WIM est une stratégie économique pour minimiser les retards inutiles pour les transporteurs commerciaux et peut également remplir les objectifs de contrôle. De plus, à l'instar des délais et des embouteillages, les émissions de gaz et la consommation de carburant sont également réduits grâce à la technologie WIM.

La sécurité des véhicules commerciaux est un objectif important de l'application des lois par les agences de véhicules commerciaux depuis plusieurs années. (Zhang, 2007) La manutention et la stabilité des camions sont affectées par les poids et configuration de ceux-ci puisqu'une surcharge pourrait endommager le fonctionnement du véhicule. De plus, un camion en surpoids peut être sujet à des accidents et son accélération ou décélération sont ralenties. Par conséquent, les camions en surpoids sont plus susceptibles d'être impliqués dans des accidents de la route souvent fatals pour les automobilistes. Les systèmes WIM ont un taux de traitement élevé, de sorte que plus de camions peuvent être pesés sur la même période ce qui aurait comme

effet d'identifier et de retirer des routes plus rapidement les camions en surpoids illégaux. Il y a donc là un potentiel de diminution des accidents et d'économies considérables pour l'industrie et le public. (Zhang, 2007).

La technologie WIM rend les conditions de charges réelles disponibles pour la conception de la chaussée. Avec une précision et des informations détaillées du réseau routier en temps réel, la conception des chaussées devient de plus en plus fiable et adéquate, ce qui diminue les coûts engendrés par une conception sous-estimée ou surestimée de la capacité des routes. (Bergan et al. 1998).

En pratique, l'épaisseur de la chaussée a été conçue de manière conservatrice en raison du manque d'informations de charge de trafic précises et détaillées. Or, concevoir et construire des chaussées, en se basant sur des informations erronées peut avoir des conséquences très onéreuses, non seulement au niveau de la maintenance de la chaussée, mais également de son espérance de vie. (Assaf, 2017) Les données WIM peuvent être utilisées pour prévoir le volume de trafic futur pour planifier les activités de maintenance, devenant ainsi des indicateurs pour effectuer certains travaux d'entretien avant qu'une réhabilitation coûteuse ou une reconstruction complète soit nécessaire. Les données WIM garantissent que la maintenance est programmée correctement, plutôt qu'utilisée en urgence après que l'intégrité de la structure de la chaussée a déjà été atteinte. (Bergan et al. 1998).

### **3.4 Génération des résultats – évaluation de la chaussée**

Cette étape consiste en la génération des résultats. Plus précisément, il s'agit d'effectuer les caractérisations des procédures existantes avec l'utilisation des nouvelles données et d'effectuer le développement de nouvelles procédures avec l'utilisation de nouvelles technologies permettant de mesurer la charge et en acquérir les données sous la charge. Les différentes catégories d'information seront quantifiées et qualifiées en fonction de divers paramètres de modélisation.

Les types d'information qui sont aussi considérés sont les suivants :

- Construction de la route;
- Entretien des chaussées;
- Réhabilitation des ouvrages existants;
- Amélioration des infrastructures routières;
- Durée de vie résiduelle;
- Exploitation des véhicules;
- Accidents;
- Temps de transport.

Les paramètres de modélisation utilisés prennent en compte les variables indépendantes suivantes :

- Évaluation de l'IRI;
- Connaissance de la qualité de l'infrastructure du niveau structural de la chaussée;
- L'indice PCI pour l'état des routes.

Un modèle d'acquisition de données a été développé à partir des résultats obtenus lors de l'acquisition des informations pour permettre un cadre de référence afin de connaître l'état actuel de la route. Une analyse probabiliste a également été effectuée pour les différentes catégories d'informations et de paramètres permettant une évaluation de l'espérance de vie et une planification de maintenance proactive efficiente.



## CHAPITRE 4

### MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DU SYSTÈME LIDAR – VIDÉO (LiVi)

#### 4.1 Mise en contexte

Ce chapitre présente l'approche méthodologique suivie pour déterminer les déformations et les fissures sur une route à partir de deux technologies complémentaires et bon marché, et l'apprentissage profond. Le but est de rendre l'évaluation des dégradations de surface des chaussées, automatique et bon marché. La technologie proposée peut être intégrée au système d'évaluation de la chaussée existant, en vue d'augmenter les bénéfices économiques liés aux bonnes pratiques de la gestion routière.

Dans cet esprit, cette thèse propose une méthodologie de quantification et de qualification de l'état de surface des actifs routiers. Cette méthodologie est établie en vue d'être fonctionnelle dans le cadre de toutes les étapes du cycle de gestion des infrastructures (i.e. planification de politiques d'intervention routière, programmation pluriannuelle des travaux et des budgets, mise en œuvre de projets routiers et suivi de la performance).

Le positionnement des capteurs dans la chaussée demeure un enjeu majeur pour déterminer les endroits les plus propices pour les insérer et obtenir des informations sur les problèmes structuraux, s'il y a lieu, en lien avec les déformations en surface. Pour qualifier l'ensemble des routes d'un réseau routier, avec ses déformations typiques dans le temps, il est primordial d'obtenir des indicateurs de déformation structurale de l'ensemble de la structure. Un réseau de neurones est nécessaire pour classifier et qualifier le réseau routier rapidement et objectivement en utilisant une matrice de qualification. De ce fait, on doit établir différents moyens d'acquérir les données de déformation afin de créer une base de connaissances servant à élaborer le modèle probabiliste en apprentissage machine. Les deux moyens utilisés ici, sont une caméra haute résolution ainsi que la technologie *Time Of Flight* qui permet une catégorisation plus précise, mais plus dispendieuse en matériel.

## 4.2 Résultats obtenus du réseau de neurones

Dans l'apprentissage profond (*deep learning*), une sous-catégorie de l'apprentissage automatique, on tente de reproduire le cerveau humain pour extraire des données provenant de données complexes. Cette division de l'apprentissage automatique permet, entre autres, d'interpréter des données brutes ou complexes comme des images qui, normalement, ne pourraient être traitées par l'apprentissage automatique conventionnel.

Des recherches récentes dans le AutoML se concentrent sur une architecture de réseau de neurones usant d'algorithmes d'apprentissage par renforcement et d'algorithmes évolutionnistes. Les résultats provenant des tâches de détections d'objets et de classification d'images ont apporté des performances compétitives comparativement au CNN (Figure 4.1). (He, 2019).

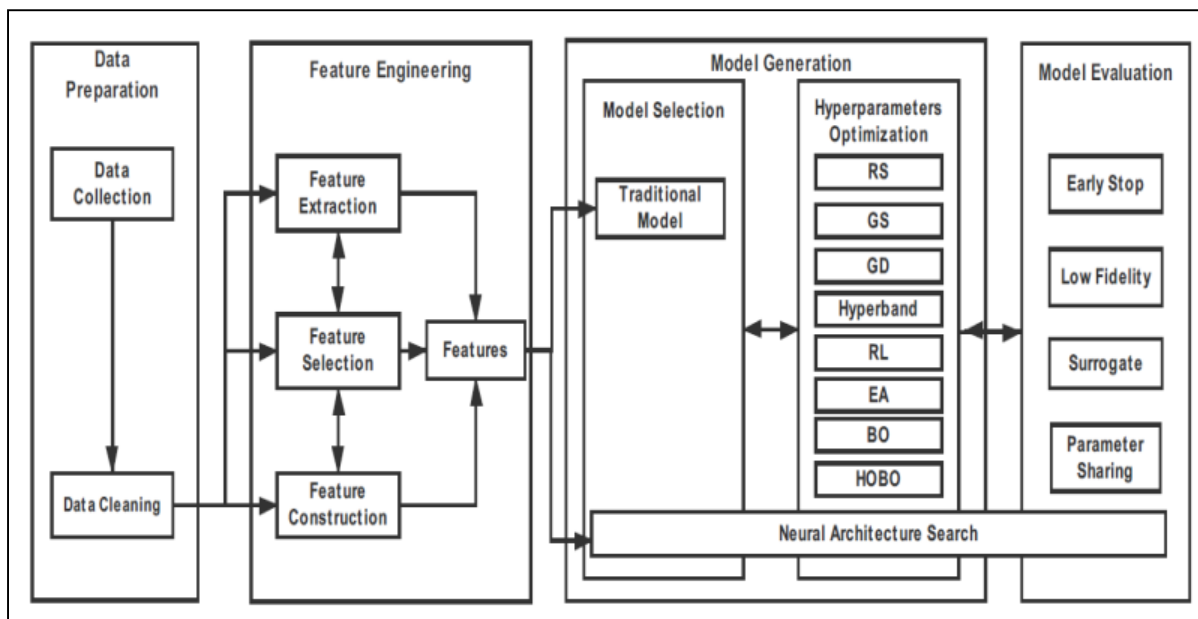


Figure 4.1 Vision globale pour l'AutoML pour la génération des données (He, 2019)

Pour ce projet, nous catégorisons, à l'aide d'un modèle d'apprentissage automatisé, des images de routes comportant des déformations afin de les normaliser pour ensuite automatiser leur détection avec un cadre de référence servant à bâtir une base de connaissances (Figure 4.2).



Figure 4.2 Exemples de classification d'images pour la normalisation du modèle

Pour l'élaboration du modèle, nous utilisons une fonction de classification du CNN incluant différents types d'algorithmes, comme le réseau neuronal. La première étape est de préparer les données, c'est-à-dire les images de déformations, et de les normaliser en différentes catégories afin d'obtenir des données claires sur les dégradations recherchées. Les images de classification ont été catégorisées ainsi :

- Fissure longitudinale ;
- Fissure transversale ;
- Nid-de-poule ;
- Fissure carrelage alligator ;
- Ornière ; et,
- Fissuration puisard.

Une fois les données classifiées, il s'agit de choisir les fonctions du modèle et d'effectuer la création du modèle en question. Pour le projet dont il est question ici, plusieurs systèmes auraient pu être utilisés : TensorFlow, PyTorch, etc. Le choix de l'outil s'est cependant arrêté sur le modèle AutoML de Google pour des raisons d'homogénéité puisque la fonction de Google d'enregistrement des données avait été utilisée lors de l'acquisition des informations pour les déformations via différents API.

### 4.3 Résultats obtenus du LiVi

Environ 300 images ont été acquises pour ensuite être réparties, manuellement, en 6 catégories distinctes de dégradations :

- Fissure longitudinale (59 images) ;
- Fissure transversale (80 images) ;
- Nid-de-poule (25 images) ;
- Fissure carrelage alligator (82 images) ;
- Ornière (26 images) ; et,
- Fissuration puisard (26 images).

La matrice de confusion pour le modèle prédictif de classification d'images statistique est utilisée avec un apprentissage supervisé, une architecture d'AutoML et les données acquises avec la caméra GoPro. Ceci permet d'identifier les vrais positifs, vrais négatifs, faux négatifs et faux positifs. L'apprentissage du modèle est sous-entraîné à cause du faible nombre d'images disponible. En fait, certaines catégories d'images n'étaient pas disponibles en assez grande quantité pour obtenir une meilleure précision sur la classification des images (Tableau 4.1).



Tableau 4.1 Matrice de confusion avec caméra vidéo

| Étiquette Vrai                 | Étiquettes prédites   |                      |              |                                |         |                 |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|--------------------------------|---------|-----------------|
|                                | Fissure longitudinale | Fissure transversale | Nid-de-poule | Fissure carrelage en alligator | Ornière | Fissure puisard |
| Fissure longitudinale          | 25%                   | 13%                  | 13%          | 25%                            | 25%     | -               |
| Fissure transversale           | -                     | 80%                  | -            | 20%                            | -       | -               |
| Nid-de-poule                   | -                     | -                    | 67%          | 33%                            | -       | -               |
| Fissure carrelage en alligator | -                     | -                    | -            | 100%                           | -       | -               |
| Ornière                        | 20%                   | -                    | -            | -                              | 80%     | -               |
| Fissure puisard                | -                     | -                    | -            | -                              | -       | 100%            |

La photo ci-dessous (Figure 4.3) a été captée par une caméra de type GoPro avec un angle de 60 degrés et une acquisition de 15 images par seconde. Notre modèle peut, avec les données déjà disponibles, identifier plusieurs types de déformations selon différentes prédictions (0.69 de précision pour le nid-de-poule). La précision moyenne du modèle est de 84,7%; le taux de rappel est de 75,61% avec un seuil de confiance de 50%. La formation a été complétée avec 16 nœuds par heure pendant 4 heures, avec 215 images avec 33 pour effectuer des tests matriciels sous 7 classifications différentes. On peut observer dans l'image 54 de la figure 4.3 3 types de déformations : fissure longitudinale, nid de poule, et carrelage en alligator comme on peut le voir dans le tableau 4.2.

Le modèle est capable d'identifier les déformations avec une prédiction comprise entre 0.50 et 0.92, comme le montre le Tableau 4.2. Le modèle fonctionne malgré le nombre peu élevé d'images utilisées pour l'apprentissage (287 images). Il faut normalement près de 2000 images (<https://cloud.google.com/vision/automl/docs/beginners-guide>) pour construire une banque de données qui possède une précision suffisante.



Figure 4.3 Représentation de l'image 54 acquise avec la caméra GoPro

Pour calculer la précision nous utilisons l'équation suivante :

$$F(\text{mesure}) = (2 * \text{Precision} * \text{Recall}) / (\text{precision} + \text{Recall}) \quad (4.1)$$

Tableau 4.2 Portion des résultats de la caméra GoPro pour identification

| Identification                      | Type de détresse            | Prédiction |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------|
| C:\testML\images\goPro\pic (48).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,733      |
| C:\testML\images\goPro\pic (49).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,806      |
| C:\testML\images\goPro\pic (50).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,924      |
| C:\testML\images\goPro\pic (51).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,533      |
| C:\testML\images\goPro\pic (53).jpg | nid_de_poule                | 0,584      |
| C:\testML\images\goPro\pic (54).jpg | fissure_longitunal          | 0,675      |
|                                     | nid_de_poule                | 0,691      |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,502      |
| C:\testML\images\goPro\pic (55).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,569      |

Tableau 4.2 (Suite)

| Identification                      | Type de détresse            | Prédiction |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------|
| C:\testML\images\goPro\pic (56).jpg | fissure_transversale        | 0,533      |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,557      |
| C:\testML\images\goPro\pic (57).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,582      |
| C:\testML\images\goPro\pic (58).jpg | fissure_longitunal          | 0,590      |
|                                     | fissure_transversale        | 0,504      |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,592      |
| C:\testML\images\goPro\pic (59).jpg | fissure_longitunal          | 0,514      |

Le deuxième modèle de classification d'images qui a été testé est également un modèle supervisé avec une architecture AutoML. La classification a cependant été faite avec moins de types d'images différents, notamment parce que le modèle avait besoin davantage de filtrage d'image pour que l'œil humain puisse facilement les classer (Tableau 4.3). Les efforts ont donc été concentrés sur les nids de poule et la fissuration carrelage.

Tableau 4.3 Matrice de confusion avec caméra ToF

| Étiquette Vrai              | Étiquette prédite |                             |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
|                             | Nid-de-poule      | Fissure carrelage alligator |
| Nid-de-poule                | 80%               | 20%                         |
| Fissure carrelage alligator | -                 | 100%                        |

L'image ci-dessous (Figure 4.4) a été acquise via une camera ToF avec un angle de 90 degrés par rapport à la route. Le tout avec une acquisition de 15 images par seconde, une exposition de 789 microsecondes, une fréquence modulaire de 90 Mhz et une illumination de 70%. 46 images de carrelage en alligator ont été catégorisées et 41 pour les nids-de-poule.

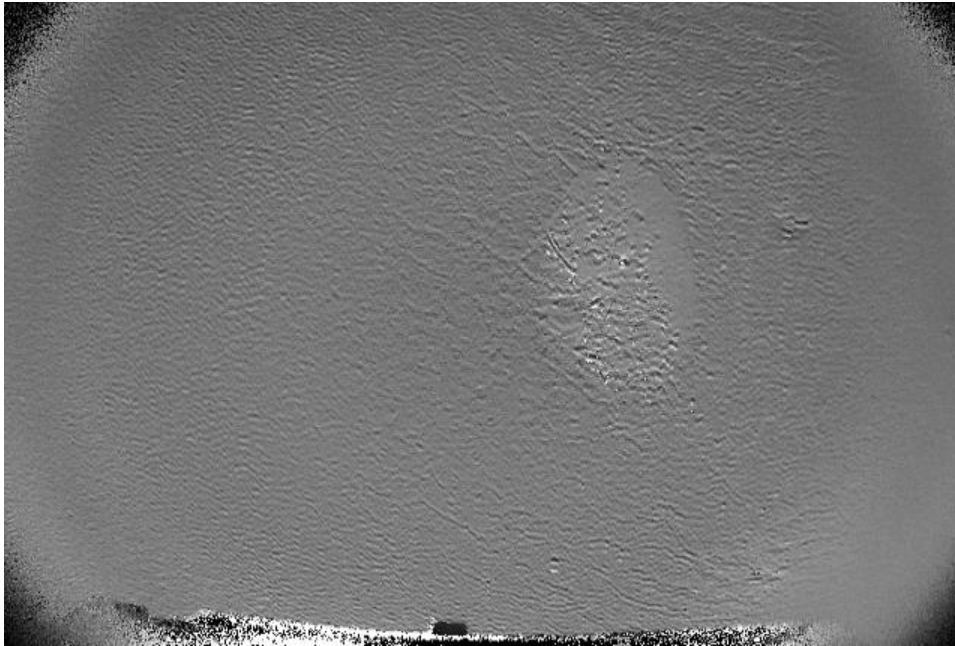


Figure 4.4 Résultat de la camera ToF pour l'image 93 (représentant un nid-de-poule)

Notre modèle peut, avec un modèle supervisé, permettre d'obtenir des données avec plus de facilité et de précision. La prédiction des déformations, bien que le modèle soit entraîné avec peu d'images (87 images), est plus performante. Il faut normalement près de 2000 images pour obtenir une banque de données qui possède une précision suffisante (<https://cloud.google.com/vision/automl/docs/beginners-guide>). Le modèle de 87 images a été testé avec 2 classifications de 11 images test. Le modèle possède une précision moyenne de .958 avec une précision de 90% et un rappel de 81.82%. Il a été entraîné avec 16 nœuds/heure pendant 4 heures.

Un des points importants de ce type d'acquisition est qu'il est plus facile de mesurer les détails (longueur, largeur et profondeur) au niveau des déformations. Il permet donc une classification plus détaillée des types de déformation pour en faire une catégorisation plus précise. Le tableau ci-dessous présente la prédiction obtenue avec ce modèle.

Tableau 4.4 Portion des résultats GoPro pour identification

| Identification                    | Type de détresse | Prédiction |
|-----------------------------------|------------------|------------|
| C:\testML\images\tof\pic (93).png | nid_de_poule_01  | 0,693      |

Avec cette preuve de concept, il est plausible d'utiliser cet outil pour catégoriser automatiquement les déformations de la chaussée.



## **CHAPITRE 5**

### **MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DU SYSTÈME DE MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHARGES (MIC)**

#### **5.1 Mise en contexte**

Ce chapitre présente l'approche méthodologique suivie pour concevoir un nouveau système mécanique inséré sous la couche de surface de la chaussée, qui mesure les déformations et le tassement de celle-ci à différentes profondeurs et selon plusieurs espacements horizontaux. Ce système mesure des caractéristiques électriques qui se corrèlent bien avec les bassins de déflexion ou de tassement sous charge. A partir de ces bassins de déflexion, la recherche fait ainsi ressortir la possibilité de déterminer les charges, via ces capteurs, et d'envoyer l'information recueillie dans une base de données. L'analyse subséquente permet alors, de déterminer :

- Le tassement des couches de la chaussée ; et,
- L'intensité des charges sur une chaussée donnée.

Cette analyse est effectuée en corrélant le tassement des couches de la chaussée, déduit des caractéristiques électriques, et la charge, via les modules de rigidité. Le système est intégré à la chaussée afin de déduire les tassements en ne retenant que les distorsions dynamiques significatives dans le temps et du fait même, en éliminant le bruit. Le système transmet par la suite, les données colligées au modèle d'acquisition qui les transforme en informations pouvant être utilisées par les gestionnaires des réseaux routiers, c'est-à-dire des charges sous essieu. Les résultats d'acquisition permettent d'obtenir le spectre de charges que subit la chaussée en temps réel, qui représente une donnée d'entrée importante au logiciel de dimensionnement et d'évaluation structurale des chaussées AASHTO 2002. Un prototype est conçu au laboratoire des enrobés de l'ETS et les essais réalisés afin de dégager la fonction qui relie les caractéristiques électriques et les charges. Ce module proposé est opérationnel.

Les capteurs sont principalement utilisés pour acquérir des informations sur la température, le positionnement, la topographie des lieux, la charge sur la route, le tassement, le WIM, le bruit, la compaction du sol et le nombre de passage de véhicules. Dans ce prototype, le lien entre les capteurs et le module cellulaire est filaire pour des raisons de simplification de conception. L'acquisition de données permet d'obtenir des informations sur le nombre d'essieux, la charge sur roue et le tassement de la chaussée. Ces informations permettent de créer un cadre de référence pour faire une validation avec les informations acquises précédemment avec des méthodes conventionnelles.

## 5.2 Prototype MIC

L'objectif du prototype est de créer un système pour acquérir de l'information sur les 3 axes (x, y, x) au niveau structural, sous la chaussée. Le prototype mesure le voltage, lequel est fortement corrélé à la charge appliquée. Cette corrélation marquée a été observée pendant les essais en laboratoire. À ce titre, l'approche utilisée a été de mesurer les voltages pour différents niveaux de chargement connus et de générer un modèle mathématique, à savoir un polynôme qui permet de prédire la charge selon le voltage mesuré pour une rigidité donnée.

Les principaux avantages du système proposé dans cette thèse sont : la réduction des coûts d'acquisition et de maintenance du mécanisme et l'implantation permettant une évaluation des charges qui s'applique sur la chaussée à faible coût. Par la suite, il est question de supporter le prototype avec une architecture réseau pour envoyer les données par réseau cellulaire sur une plate-forme cloud pour rassembler et interpréter les données avec une base de connaissances.

Cette base de connaissances est nécessaire pour valider que le voltage mesuré par le MIC pour une même charge et une même structure de chaussée demeure similaire, la charge se déplaçant sur une même route, par exemple. Lorsqu'on observe un changement significatif de voltage pour une même charge avec le MIC, ceci indique potentiellement une faiblesse de la structure de la chaussée, d'où l'intérêt de l'approche.



### 5.3 Conception mécanique

Au niveau de la conception mécanique, pour arriver à un dispositif qui soit pratique et concevable/manufacturable, il importe de mesurer le tassement de la chaussée sous une charge quelconque, nonobstant l'interférence causée par l'installation du capteur lui-même inséré dans le module mécanique. Considérant les trois axes comme point de départ, nous souhaitons idéalement intégrer une plaque dans la couche d'enrobé et mesurer sa position relative sur une période donnée. Lorsque les camions et les voitures franchissent ces plaques, un mouvement transitoire est subi par la charge sous le module d'élasticité de la chaussée.

La conception du module mécanique doit faire en sorte que le capteur soit stable au mouvement, de manière qu'il présente une résistance absolue au mouvement. Cela empêche l'enrobé de se déplacer ou de s'effondrer progressivement, mais le résultat de ce changement est que le capteur mesure maintenant la force au lieu du déplacement. Or, si l'enrobé environnant se comprime progressivement, il génère une force de compression sur le capteur et devrait pouvoir être calibré pour lire l'équivalent de la distance entre deux points de l'enrobé si une valeur de conversion est obtenue à partir d'essais en laboratoire.

Les capteurs sont installés sur chaque plan. Dans l'illustration de la Figure 5.1, ci-dessous, les capteurs sur le plan x et z sont sensibles aux déformations longitudinales. Les capteurs sont installés de façon symétrique, vis-à-vis l'axe y. Ceci permet de produire un résultat de contrainte dans le taux de déformation  $\Sigma x1 = -\Sigma x2$ .

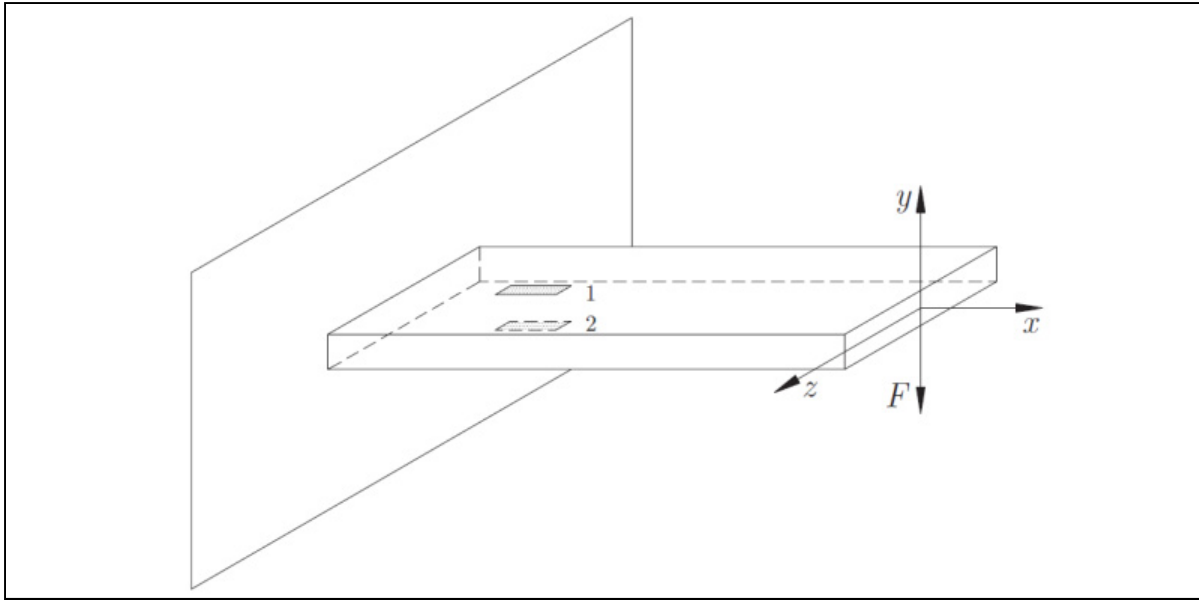


Figure 5.1 Trois axes dans le système d'acquisition

Les calculs de contraintes font intervenir la loi de Hooke :

$$\varepsilon_{\text{III}} = \frac{\nu(\varepsilon_{\text{I}} + \varepsilon_{\text{II}})}{\nu - 1} \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} \sigma_{\text{I}} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} ((1 - \nu)\varepsilon_{\text{I}} + \nu(\varepsilon_{\text{II}} + \varepsilon_{\text{III}})) \\ \sigma_{\text{II}} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} ((1 - \nu)\varepsilon_{\text{II}} + \nu(\varepsilon_{\text{I}} + \varepsilon_{\text{III}})) \\ \sigma_{\text{III}} = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Où :

E = Module de Young (aluminium =  $7.0 \cdot 10^{10}$ ) GPa

V = coefficient de Poisson (aluminium = 0.33)

D'où  $G = 3,004 * 10^{10}$  GPa

$G = E/(2(1+\nu))$  coefficient d'élasticité

On peut observer la vue isométrique du prototype mécanique dans les Figure 5.2, Figure 5.3 et Figure 5.4 ci-dessous.

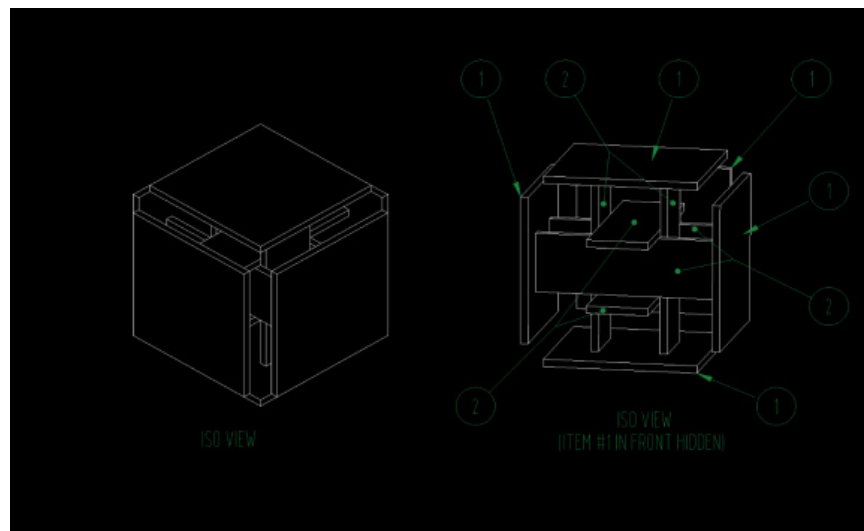


Figure 5.2 Vue isométrique de l'enveloppe mécanique

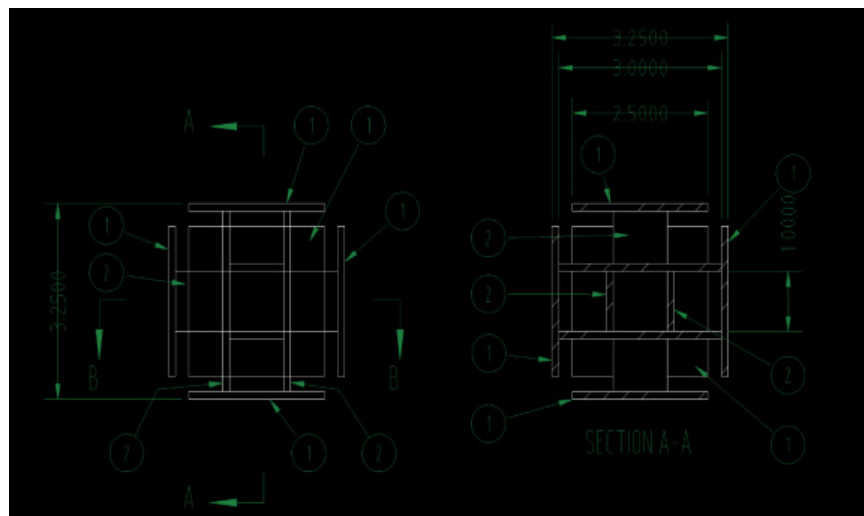


Figure 5.3 Dimensions intérieures du système

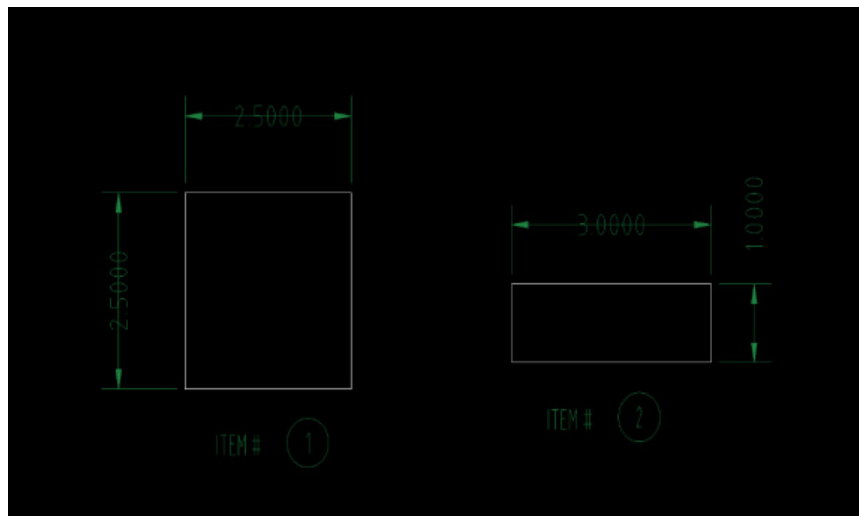


Figure 5.4 Dimensions extérieures du système

Cela nous conduit au concept de technique de mesure. Le poids à évaluer dans les différentes strates de la chaussée doit être mesuré à l'aide d'un capteur rigide capable de supporter la charge maximale (Figure 5.5).

- 13 000 lb (5900 kg) dans la couche supérieure.
- 1950 lb (885 kg) dans la couche intermédiaire.
- 175 kg (387 lb) dans la couche inférieure.

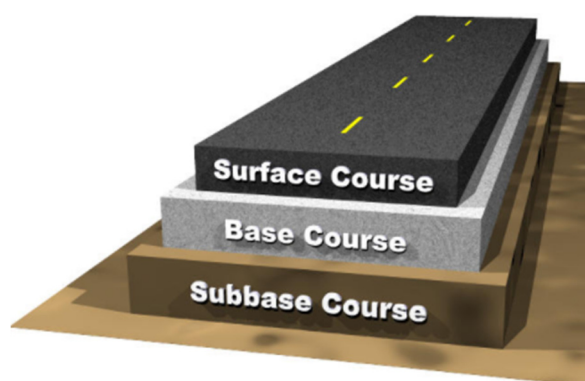


Figure 5.5 Structure de la route (FHWA, 2007)

Il est possible d'utiliser 3 capteurs différents pour ces applications. La forme cubique est la meilleure forme pour ce projet afin de conserver une mesure simple au niveau des 3 axes. Les

premiers tests ont été effectués avec de simples cellules de charge à colonnes situées entre deux plaques ; l'espace se doit d'être assez restreint, considérant la contrainte d'espace, tout en permettant aux 3 axes d'être assemblés dans une seule unité. Un capteur de force de colonne consiste en une barre d'acier qui mesure le tassement de l'axe sur lequel il se trouve, sur laquelle sont montés des extensomètres qui mesurent la contrainte/déformation dans cette colonne. Le tassement n'est que de quelques millièmes de centimètres ; le module de déformation est donné par le coefficient de Poisson pour le métal (Équation 5.3).

$$\nu = \frac{\text{rétrécissement transversal relatif}}{\text{allongement longitudinal relatif}} \quad (5.3)$$

La Figure 5.6 traduit, en image, le coefficient de Poisson.

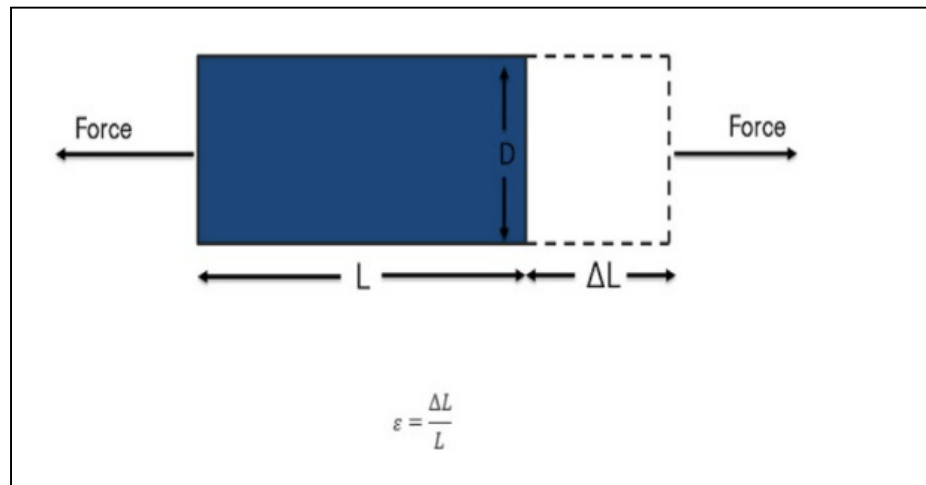


Figure 5.6 Les déformations physiques sont généralement évaluées avec un écart d'un milistrain.

La Figure 5.7, Figure 5.8 et la Figure 5.9 représentent plusieurs vues d'un même prototype physique.



Figure 5.7 Modèle préliminaire, vue de haut.



Figure 5.8 Modèle préliminaire, vue de côté.

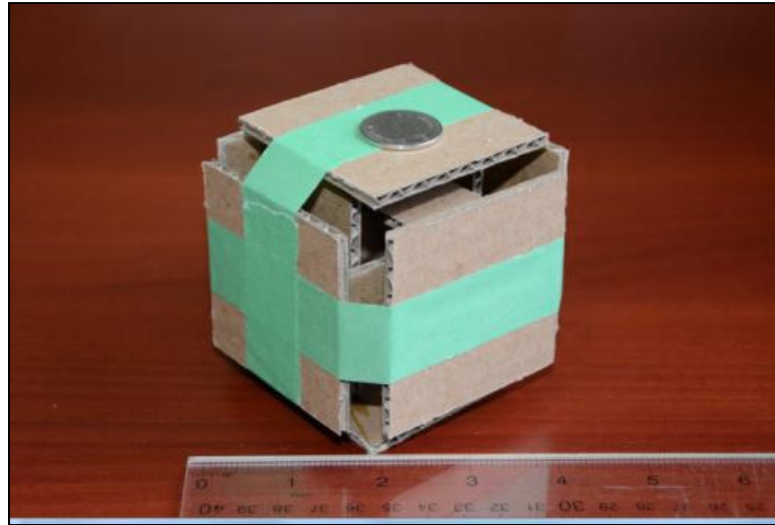


Figure 5.9 Modèle préliminaire, vue de profil.

### 5.3.1 Module d'élasticité

Les caractéristiques fondamentales des enrobés prises en compte pour cette recherche sont principalement le module d'élasticité, le coefficient de dilatation thermique et le coefficient de Poisson. Par ailleurs, un seul type d'enrobé a été retenu pour la preuve de concept dans cette expérimentation. Dans cet esprit, la rigidité d'un seul enrobé est prise en considération, dans un environnement contrôlé, avec une température d'environ 21°C.

Le module de rigidité de l'enrobé bitumineux varie en fonction de l'épaisseur de la couche de base et de la température. La méthode suédoise (Ullidtz, 1998) illustre l'effet de la température sur le module de rigidité. Cette équation s'appliquerait pour élargir le champ d'application des résultats obtenus dans le cadre de cette expérimentation à des températures différentes (Équation 5.4).

$$E(T) = E(0) \left( 1 - \alpha * \log \left( \frac{T + T_{ref}}{T_{ref}} \right) \right) \quad (5.4)$$

$E(T)$  = module à la température  $T$  (MPa)

$T_{ref}$  = température de référence (Celsius)

T = Température (Celsius)

a = constante

Le tableau ci-dessous (Tableau 5.1) présente l'ajustement suggéré par Ullidtz (1998) du module de rigidité de l'enrobé en fonction de l'épaisseur de la couche de base sur laquelle repose l'enrobé (couche du dessous).

Tableau 5.1 Modèle reliant la rigidité à l'épaisseur de la couche de base  
Tiré de Ullidtz, 1998

| Couche de base               | $E(0)$ (MPa) | $a$  | $T_{ref}$ (°C) |
|------------------------------|--------------|------|----------------|
| $h < 50$ mm                  | 13 300       | 3,67 | 32,9           |
| $50 \text{ mm} < h < 100$ mm | 12 500       | 2,73 | 21,2           |
| $h > 100$ mm                 | 10 200       | 2,97 | 22,4           |

Dans cette expérimentation, la couche de base a une épaisseur de l'ordre de 90 mm d'épaisseur. Par conséquent le module est estimé à 12 500 MPa lequel correspond au module d'un enrobé haute performance, modifié avec des fibres et/ou des polymères. L'ajustement du module pour la température donne de l'ordre de 12 300 MPa.

$$E(T) = 12500 (1 - 2.73 \text{ Log } ((21-21.2) / 21.2)) \quad (5.5)$$

La composition de l'enrobé bitumineux retenu dans le cadre de cette expérimentation essai est donc constitué d'un mélange EBHP (enrobé bitumineux haute performance) avec une granulométrie de 14 millimètres en verre et sable LG avec 4.5% de bitume (Figure 5.10).



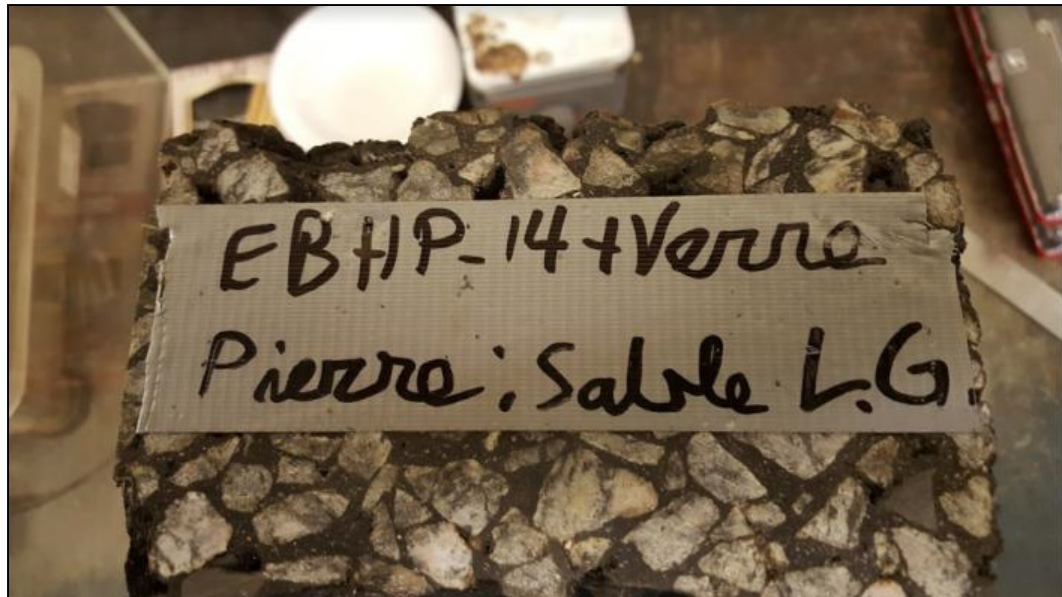


Figure 5.10 Enrobé bitumineux haute performance de l'expérimentation

La fondation est constituée de pierres concassées de 0-3/4 pouce sur une épaisseur de 3.5 pouces (88.9 mm). La dalle de l'expérimentation mesure 2.5 pouces (63 mm) d'épaisseur d'enrobé, sur 18 7/8 pouces en longueur par 6 5/8 pouces en largeur.



Figure 5.11 Masse à l'air

La densité brute de l'enrobé est établie à 2.44 selon l'équation suivante :

$$\frac{\text{air}}{\text{eau-SSC}} = \text{Densité brute} \quad (5.5)$$

Dans laquelle les paramètres mesurés sont :

A – masse de l'air                      12.347 kg  
 B – masse d'eau                         7320 g  
 C –masse Saturé superficiellement sec (SSC) 12.373 kg

La densité maximale est établie à 2.52 selon l'équation suivante :

$$\frac{\text{masse}}{\text{volume effectif}} = \text{Densité maximal} \quad (5.6)$$

Le pourcentage de vides est établi à 3.18% selon l'équation suivante :

$$100 * \left( 1 - \left( \frac{\text{Densité brute}}{\text{Densité maximale}} \right) \right) = \text{pourcentage de vide} \quad (5.7)$$

La pression applicable sur la surface supérieure de l'enrobé se situe entre 200 kN/m<sup>2</sup> et 750 kN/m<sup>2</sup> avec un module d'élasticité de 12 300 MPa tel qu'établi précédemment.

Par ailleurs, le tassement d'une chaussée sous charge s'établit généralement entre 0 et 1.2 millimètres et l'épaisseur d'une couche d'enrobé se situe généralement entre 60 et 240 millimètres. (Assaf, 2017).

Au niveau de l'interface, entre la couche d'enrobé bitumineux et la couche de base, la pression est de l'ordre de 40% de la valeur de la pression en surface au niveau de l'enrobé bitumineux selon la méthode d'analyse multicouches. (Haas, 1997).

L'épaisseur de cette couche de base se situe généralement entre 80 à 400 millimètres avec une granulométrie de 0-20 millimètres. L'épaisseur de la couche de sous-fondation est de 250 à 400 millimètres avec une granulométrie de 0-56 millimètres. (Assaf, 2017).

Entre le niveau de la couche de base et la fondation, la valeur de la pression est de 10%-15% de la valeur associée à la pression en surface au niveau de l'enrobé bitumineux avec un module d'élasticité.

Au niveau de la fondation (base), la pression se situe entre 0.500 MPa et 1.500 MPa si elle est stabilisée et entre 0.050 MPa et 0.300 MPa si elle n'est pas stabilisée. À titre indicatif, le logiciel du Ministère du transport du Québec prend un module réversible moyen de 2894 MPa. (Assaf, 2017).

Les contraintes de chargement sont en moyenne de 8200 kg (80.41 Kilo Newton) au niveau de l'essieu et de 0.587 MPa au niveau de la pression du pneu. L'une des méthodes les plus connues pour mesurer les dommages de la chaussée par la charge de la roue a été développée par l'AASHTO. Ce paramètre se nomme ESAL (*Equivalent Single Axle Load*) et la mesure équivalente la plus communément utilisée est une charge de 18 000 lb (80 kN). (Assaf, 2017).

La charge minimale et maximale ainsi que le module d'élasticité sont requises pour choisir les composantes électroniques.

#### **5.4 Conception électronique**

Le choix du capteur pour l'acquisition des mesures de déformations a été fait selon les avantages et inconvénients identifiés préalablement dans la littérature. Le choix du capteur a été basé sur certaines restrictions : coût faible, implémentation relativement simple et permet de calculer avec une précision relative la charge des essieux des véhicules qui circulent sur la chaussée avec la capacité de mesurer des charges de 1 Kilo Newtons à plus de 80 Kilos Newtons sous l'enrobé bitumineux pour représenter les valeurs mesurées dans la réalité. Le capteur le plus approprié pour le présent projet est un extensomètre. La contrainte de ce type de capteur est principalement l'alimentation électrique constante requise pour son fonctionnement. Dû à ce choix de capteur, la communication avec le module cellulaire est filaire pour partager l'alimentation électrique via le port de communication RS-232.

### 5.4.1 Principe de l'extensomètre

Un extensomètre est constitué d'un fil très fin (2 microns) conducteur collé sur un support. Les brins de fil constituant la jauge sont principalement alignés suivant la direction de la mesure; le fil subit donc les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée. La résistance d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet :

$$R = \frac{\rho L}{s} \quad (5.8)$$

où R est la résistance électrique

$\rho$  est la résistivité du matériau

L la longueur du fil

s la section du fil

En prenant le logarithme naturel et la différentielle de chaque élément et en considérant que les paramètres varient très peu lors de la mesure, on obtient la relation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta s}{s} \quad (5.9)$$

Qui peut se réécrire ainsi :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (5.10)$$

où K est appelé le facteur de jauge (le plus proche de 2 pour le constantan).

Les fabricants proposent des jauges de différentes tailles et de différentes formes en fonction des travaux d'analyse de contraintes. On aura donc des jauges simples pour l'analyse dans le

sens de la déformation connue, des rosettes à 2 jauges (l'une pour le sens principal, l'autre pour la mesure du coefficient de Poisson ou encore pour la mesure de torsion), des rosettes à 3 jauges ( $45^\circ$  ou  $120^\circ$ ) lorsqu'on ignore les directions principales.

Du fait de leur faible inertie, les jauges sont capables de suivre des déformations dynamiques, même à très hautes fréquences. Toutefois, comme les déformations sont des phénomènes qui se déroulent à grande vitesse, une onde frontale plus petite ou égale à la dimension de la jauge ne donnera aucune indication. En règle générale, la jauge doit avoir une dimension de 1/10 de la longueur d'onde.

L'objectif est d'obtenir les charges sur les 3 axes lorsqu'un véhicule se déplace sur le système de capteurs. En plus des avantages précédemment indiqués, l'extensomètre a été choisi également pour sa facilité de calibration et sa taille, qui permet de conserver une enveloppe mécanique restreinte, pouvant être insérée à l'intérieur d'un cube.

Le fonctionnement de ce capteur est identique à un capteur de force pour les connexions et l'électricité. Il est l'équivalent d'un circuit électrique dans un pont de Wheatstone équilibré.

Pour les faibles variations, la sortie  $V_s$  est proportionnelle aux variations relatives  $\Delta R/R$  de chacune des résistances.

$$V_s = \frac{V_e}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right). \quad (5.11)$$

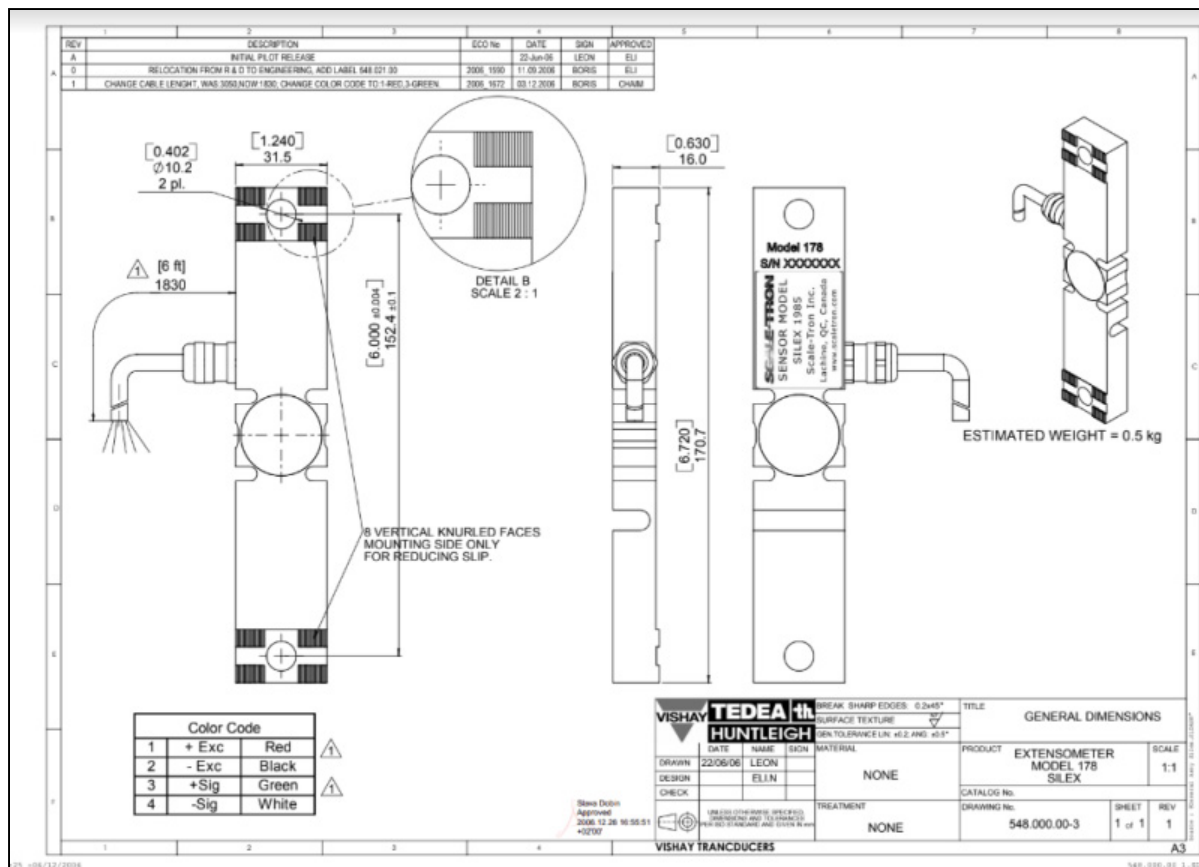


Figure 5.12 Extensomètre de Vishay  
(<http://www.vishay.com/search?query=extensometer&searchChoice=part>)

Pour mesurer les caractéristiques du capteur, on doit valider la résistance en ohm, la recommandation du voltage d'excitation ainsi que la sensibilité sous l'expression mV/V par unité de poids en livres ou millivolt par volt ainsi que la capacité maximum de capteur en livres.

Tableau 5.2 Fiche technique du capteur  
Tiré de <http://www.vishay.com/search?query=extensometer&searchChoice=part>

| SPECIFICATIONS                |               |                              |
|-------------------------------|---------------|------------------------------|
| PARAMETER                     | VALUE         | UNIT                         |
| Calibrated output             | 1.7           | mV/V at 500 $\mu\epsilon$    |
| Overload capability (zero)    | 300           | % of rated output            |
| Overload capability (max)     | 500           | % of rated output            |
| Input resistance              | 350 $\pm$ 10  | $\Omega$                     |
| Output resistance             | 350 $\pm$ 10  | $\Omega$                     |
| Insulation resistance         | >2000         | M $\Omega$                   |
| Excitation, recommended       | 10            | VDC                          |
| Excitations, range            | 5–20          | VDC                          |
| Thermal effect on zero        | 0.025         | $\pm$ % of FSO/ $^{\circ}$ C |
| Compensated temperature range | –30 to +80    | $^{\circ}$ C                 |
| Construction                  | Painted steel |                              |
| Environmental protection      | IP66          |                              |

Pour la calibration de notre capteur, on multiplie la charge maximale de ce dernier (500% de la sortie) ainsi que sa charge minimale (300% de la sortie) sur la sortie en millivolt. Dans notre cas, le  $V_{+in}$  de 12 Volts et  $V_{-in}$  0 Volt.

$$V_{out} = G \cdot (V_{+in} - V_{-in}) + V_{ref} \quad (5.12)$$

Une fois le capteur calibré, il est nécessaire d'utiliser un ADC car la sortie du capteur est analogique. Le choix du type de convertisseur est basé sur le nombre de bits de conversion pour obtenir une résolution. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser un échantillonnage avec des plages plus petites permettant de voir les changements des charges à faible poids, malgré le risque d'acquérir plus de bruit dans notre sortie numérique.

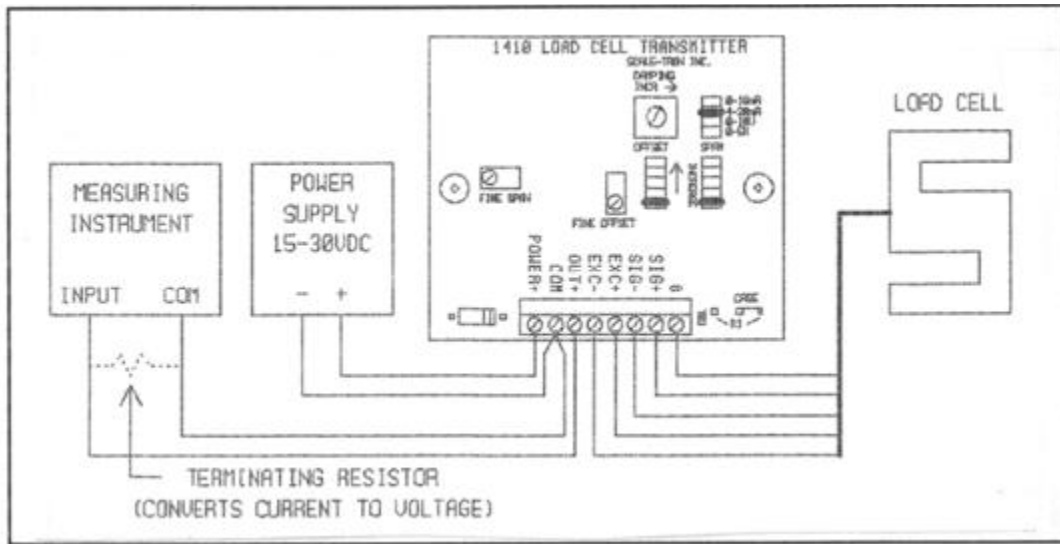


Figure 5.13 Diagramme de connexion pour un ADC et amplificateur  
(<http://www.vishaypg.com/load-cells/>)

On veut donc convertir un signal analogique en signal numérique afin de l'interpréter plus facilement et enrayer les bruits qui pourraient être transmis durant le processus.

Donc :

8 bits = 28 = permet d'encoder à 256 niveaux

12 bits = 212 = permet d'encoder à 4096 niveaux

...

24 bits = 224 = permet d'encoder à 16 777 216 niveaux

Pour observer les changements de voltage de notre capteur, on doit évaluer la largeur du niveau de l'échantillonnage.

$$\Delta = \text{range (Volt)} / \text{precision} \quad (5.13)$$

Dans notre cas, nous avons une alimentation de 12 Volts avec un test d'encodage à 24 bits (16 777 216).



Donc :

$$\Delta = \text{Voltage in (Vin)/12 bits} \quad (5.14)$$

$$12\text{V}/16\,777\,216 = 0,000\,715\text{ mV}$$

La sortie numérique :

$$\text{Dout} = 24 \text{ bits} * \text{Vin/Max voltage} \quad (5.15)$$

Nous utilisons un  $\text{Vin} = 0,000\,715\text{ mV}$  qui représente le niveau d'échantillonnage le plus petit atteignable avec le convertisseur 24 bits.

On obtient donc avec l'équation précédente :

$$\text{Dout} = 16\,777\,216 * 0.000715 \text{ Mv}/12\text{V} = 1 \quad (5.16)$$

Les spécifications techniques de notre extensomètre mentionnent que le signal de sortie peut être de 0.15 mV/V jusqu'à 4.0 mV/V, tel que mentionné dans la figure 5.14.

|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Excitation:       | 10V DC, 115mA max (4-350 ohm or 8-700 ohm load cells). Overload protected.                                                                                                                                                                                                                         |
| Signal range:     | 0.15 mV/V min to 4.0 mV/V max in 5 steps, plus fine trim.                                                                                                                                                                                                                                          |
| Dead load offset: | -0.03 to +3.3 mV/V in 5 steps, plus fine trim.                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Signal stability: | Max drift +0.05uV/°C at 0.2mV/V sensitivity (equals +0.05% worst case error).<br>Note: this applies with the OFFSET pot at either extreme of travel: temperature drift when pot is used for adjustment is affected by the ratio drift of the pot, which degrades the above specification slightly. |
| Damping filter:   | Adjustable risetime 0.05 to 2 sec, single pole.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Output:           | 4-20 mA, 0-16 mA, 0-5 volt or 0-10 volt full scale.                                                                                                                                                                                                                                                |
| Load impedance:   | 600 ohm max in 4-20mA mode.                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Source impedance: | 315 ohm (0-5v mode), 630 ohm (0-10v mode)                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Overall accuracy: | +0.01% of full scale at 25 °C.<br>+0.1% of full scale worst case error over +20 °C temperature range.                                                                                                                                                                                              |
| Power:            | 15-30V DC, at a current of (excitation current + 30)mA, 145 mA max.                                                                                                                                                                                                                                |
| Size:             | Board only - 87.5mm x 72mm (3.45" x 2.83")<br>Curtis mount version - 87.5mm x 70mm (3.45" x 2.75")<br>DIN mount version - 90mm x 77mm (3.54" x 3.03"), suits all standard DIN EL rails.                                                                                                            |
| Connections:      | 8-position pluggable terminal block.                                                                                                                                                                                                                                                               |

Figure 5.14 Spécifications de l'ADC et amplificateur (<http://www.vishaypg.com/load-cells.1410>)

Avec ce type de valeur qui représente un nombre très faible, nous ajoutons au circuit de l'ADC un amplificateur opérationnel. Celui-ci a comme rôle d'amplifier les signaux reçus afin d'augmenter leurs valeurs pour qu'ils soient interprétés puisque des valeurs de référence trop faibles ne peuvent être analysées correctement.

Pour insérer le module dans la chaussée, il suffit d'utiliser une carotteuse routière afin de percer un trou puis d'y placer le module et de refermer l'orifice avec l'enrobé. Les coûts de cette manœuvre sont relativement faibles si l'on possède déjà l'équipement approprié. Le coût du système prototype MIC est de moins de 500\$ et le travail de l'implémentation est évalué à moins de 500\$ en frais de main-d'œuvre et d'outillage. Il est important de mentionner qu'il est nécessaire d'ajouter à ces coûts les frais engendrés par l'enfouissement dans la chaussée du câble reliant le système de capteur au modem cellulaire. Ce travail est généralement fait avec une scie à béton ; une tranchée est creusée dans laquelle on insère les câbles.

Après l'acquisition des données des capteurs, qui sont numérisées avec l'ADC, elles sont directement envoyées via un port RS-232 à un modem cellulaire qui, lui, transmet les données par le réseau cellulaire, au *cloud*; nous utilisons dans ce cas-ci celui de Google (Figure 5.15). On peut observer dans la figure 5.15, le HQ office représente le cloud de Google.

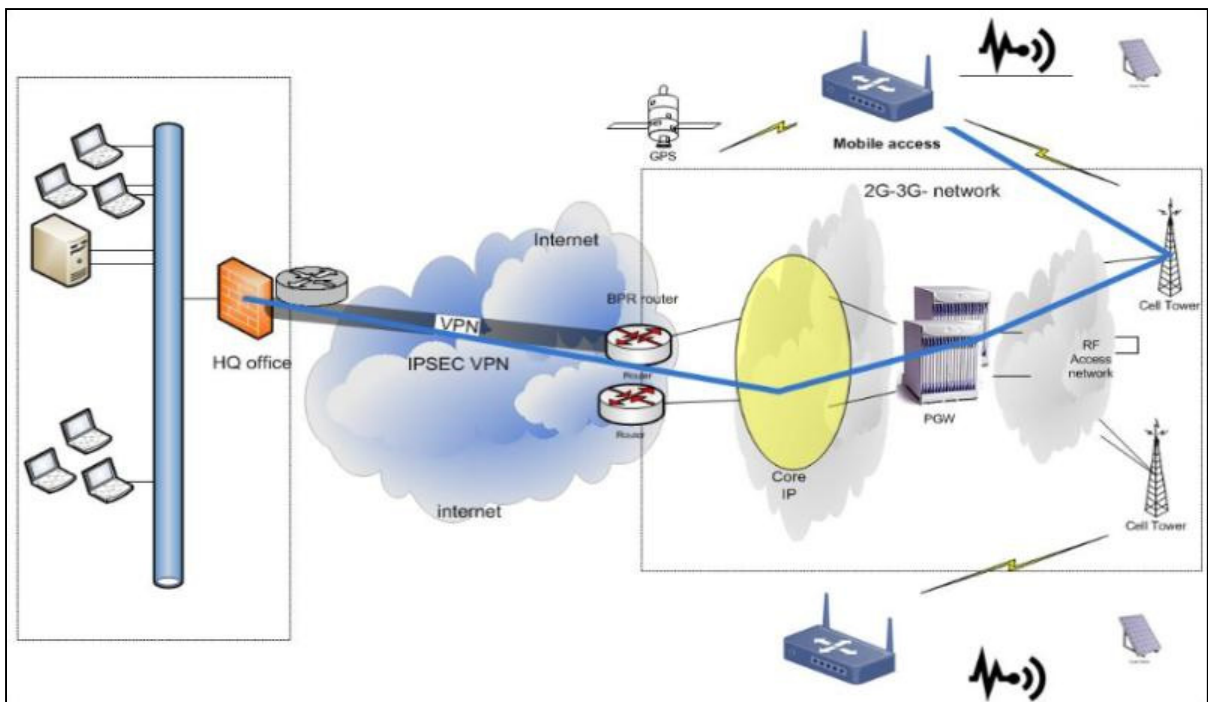


Figure 5.15 Architecture réseau cellulaire

L'objectif est simple : que les données soient accumulées dans une base de données pour être analysées et traitées par un programme d'intelligence artificielle qui les transformera alors en informations.

## 5.5 Banc d'essai

Pour la création de notre banc d'essai, un enrobé bitumineux a été utilisé, tel que mentionné précédemment. La composition de notre enrobé bitumineux pour notre essai est constitué d'un mélange EBHP avec une granulométrie de 14 millimètres en verre et sable LG avec 4,5 % d'eau et une fondation constituée de pierre boxin concassée de 0-3/4 pouce (Figure 5.16).



Figure 5.16 Moule avec système d'acquisition – axe des x

La Figure 5.16 présente le prototype du système MIC avec le capteur de l'axe des x sur le côté supérieur du système dans le moule servant aux simulations de charges.



Figure 5.17 Moule avec système d'acquisition – axe des z

On peut observer, dans la Figure 5.17, que deux moules ont été installés en superposition afin d'avoir davantage d'espace pour mesurer les déformations. Ceci représente la couche de base sur laquelle le module est inséré pour mesurer les déformations au niveau de la surface. On peut observer, toujours dans la Figure 5.17, que le capteur représentant l'axe des z est adjacent à l'axe des x.





Figure 5.18 Création de la base

La Figure 5.18 et la Figure 5.19 illustrent la pose de la base sur laquelle le prototype est inséré. La fondation est constituée de pierre boxin concassée de 0-3/4 pouce sur une épaisseur de 3.5 pouces (88.9 mm).



Figure 5.19 Création de la base – vue de haut

On peut observer, dans la Figure 5.19, que les câbles de connexions sont protégés par un tube à cause de la pression et autres impacts que risque de subir les câbles durant les tests.

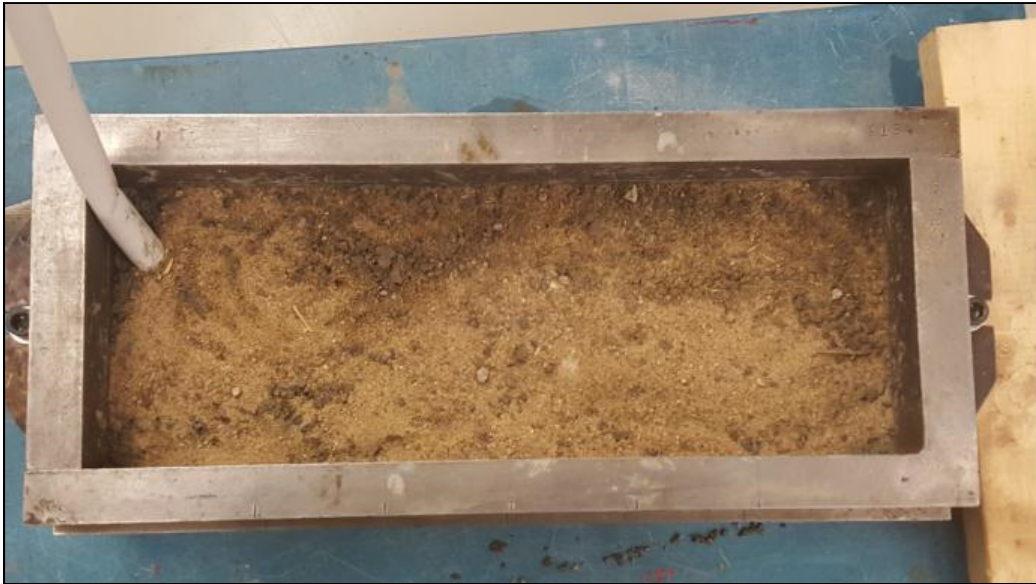


Figure 5.20 Ajout de sable à la base

Une mince couche de sable a été ajoutée pour uniformiser le contact entre la surface et la base puisque l'enrobé bitumineux n'a pas été coulé directement sur la base pour cette simulation (Figure 5.20). Le prototype terminé et complet peut être observé à la figure 5.21.



Figure 5.21 Le dépôt de la surface (enrobé bitumineux) sur le capteur





Figure 5.22 Joint de plâtre pour réduire les mouvements.

Un joint de plâtre de paris a été appliqué afin de réduire le mouvement longitudinal et transversal lors des tests en laboratoires (Figure 5.22).



Figure 5.23 Vue d'ensemble du module de test



Figure 5.24 Positionnement de la presse au-dessus du module

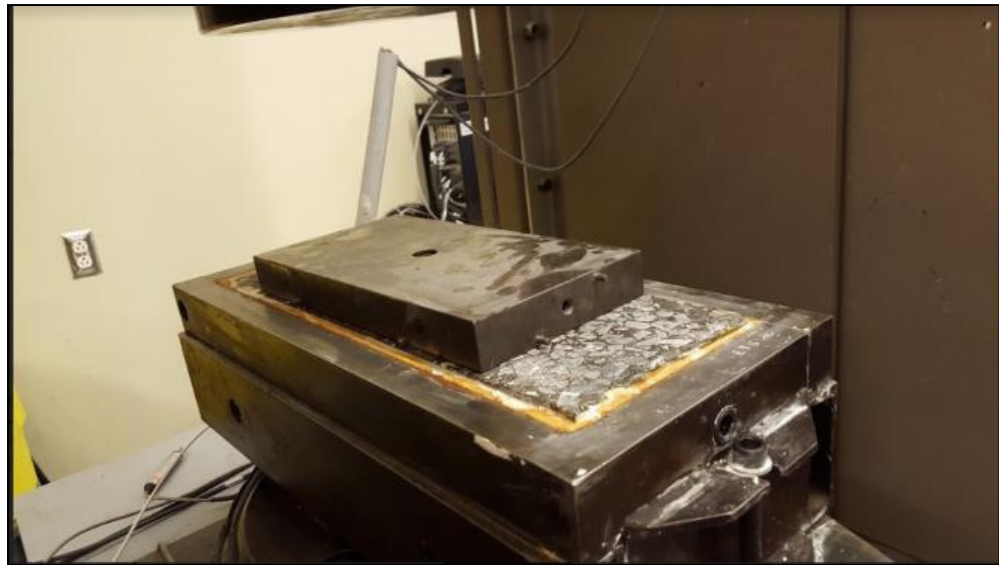


Figure 5.25 Premier essai du module avec une presse hydraulique



Figure 5.26 Premier test à 0.5 KN

Les résultats ont été acheminés à la base de données dans le cloud de Google par réseau cellulaire LTE avec un modem Sierra gs450 et port série RS-232. Le MIC est branché dans le module ADC avec l'amplificateur et ceux-ci sont connectés au modem directement via le port série. On peut voir les résultats complets à l'ANNEXE I.

Le but des tests effectués (représenté aux Figure 5.23, Figure 5.24, Figure 5.25 et Figure 5.26) est d'établir des charges de contrôle de 1 Kilo Newton à 80 Kilos Newton et de valider les déformations de la chaussée recueillies par le système. Voici les plages mesurées :

- 0.5 KN
- 1 KN à 25 KN avec une incrémentation de 1 KN par essai
- 25 KN-100 KN avec une incrémentation de 5 KN par essai

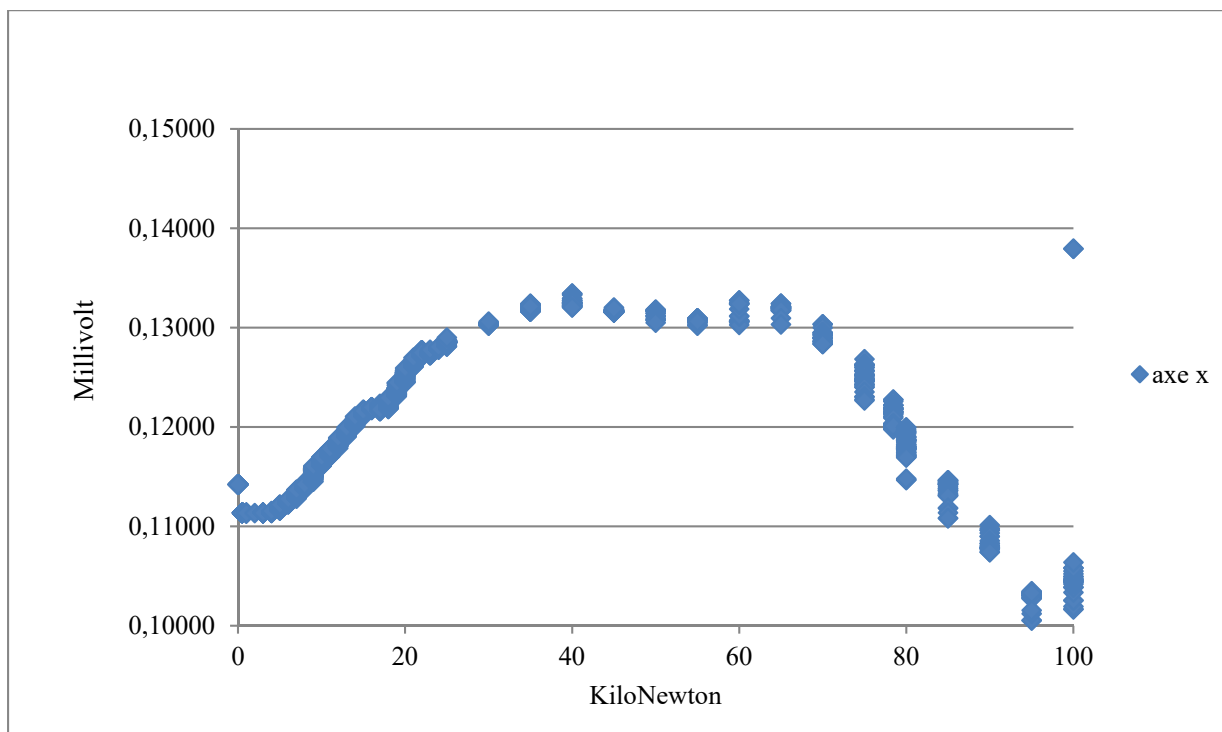


Figure 5.27 Acquisition statique des données sur le capteur nommé X (Les résultats sont mV sur l'axe des y et kN sur l'axe des x)

Dans la Figure 5.27, dès 40 kN, on observe un changement au niveau de la courbe. On évalue que le sol subit une compression qui a probablement créé un espace pour le capteur, lui faisant

perdre la croissance de sa courbe de déformation. On peut présumer que ceci est dû à une mauvaise compaction du sol. On peut observer, vers 70 kN, un tassement majeur du sol dû à la pression exercée par la presse hydraulique en charge statique. En augmentant la charge, on observe que le déplacement du MIC augmente en réduisant la pression ainsi que le mouvement sur l'extensomètre. À la fin des tests de charge, à 100 kN, on voit un changement de valeur pour l'axe des x qui est à plus de 0.15 mV. En réalité, cette valeur est non représentative ; les véritables valeurs sont à l'extérieur des points du graphique, ce qui signifie que le module d'acquisition s'est déplacé physiquement avec la compression, mais qu'il a finalement trouvé un endroit stable avec la fondation de test. La valeur à 100 kN doit être approximativement de 0.207605 mV comme on peut le voir en effectuant une moyenne des données (Tableau 5.3).

Tableau 5.3 Résultat de la charge a 100 kN lors du mouvement des capteurs

| X       | Y       | Z       | Temps  | Charge |
|---------|---------|---------|--------|--------|
| 0,10581 | 0,12783 | 0,43598 | 140309 | 100    |
| 0,10637 | 0,12784 | 0,43598 | 140310 | 100    |
| 0,13793 | 0,12784 | 0,4361  | 140311 | 100    |
| 0,13793 | 0,12784 | 0,43623 | 140312 | 100    |
| 0,17834 | 0,12785 | 0,43636 | 140313 | 100    |
| 0,1791  | 0,12785 | 0,43636 | 140314 | 100    |
| 0,1791  | 0,12785 | 0,43646 | 140315 | 100    |
| 0,17952 | 0,12785 | 0,43655 | 140317 | 100    |
| 0,17992 | 0,12786 | 0,43655 | 140318 | 100    |
| 0,18109 | 0,12786 | 0,43665 | 140319 | 100    |
| 0,18109 | 0,12283 | 0,39125 | 140320 | 100    |
| 0,21147 | 0,1192  | 0,39125 | 140321 | 100    |
| 0,20875 | 0,1192  | 0,38242 | 140322 | 100    |
| 0,20875 | 0,11888 | 0,381   | 140323 | 100    |
| 0,20774 | 0,1188  | 0,3805  | 140324 | 100    |
| 0,20721 | 0,11875 | 0,3805  | 140326 | 100    |
| 0,20721 | 0,11875 | 0,38024 | 140327 | 100    |
| 0,20685 | 0,11871 | 0,38007 | 140328 | 100    |
| 0,2066  | 0,1187  | 0,38007 | 140329 | 100    |
| 0,20641 | 0,1187  | 0,37998 | 140330 | 100    |
| 0,20641 | 0,11868 | 0,3799  | 140331 | 100    |
| 0,20626 | 0,11865 | 0,3799  | 140332 | 100    |
| 0,20613 | 0,11865 | 0,37985 | 140333 | 100    |
| 0,20613 | 0,11864 | 0,37981 | 140335 | 100    |
| 0,20603 | 0,11863 | 0,37978 | 140336 | 100    |

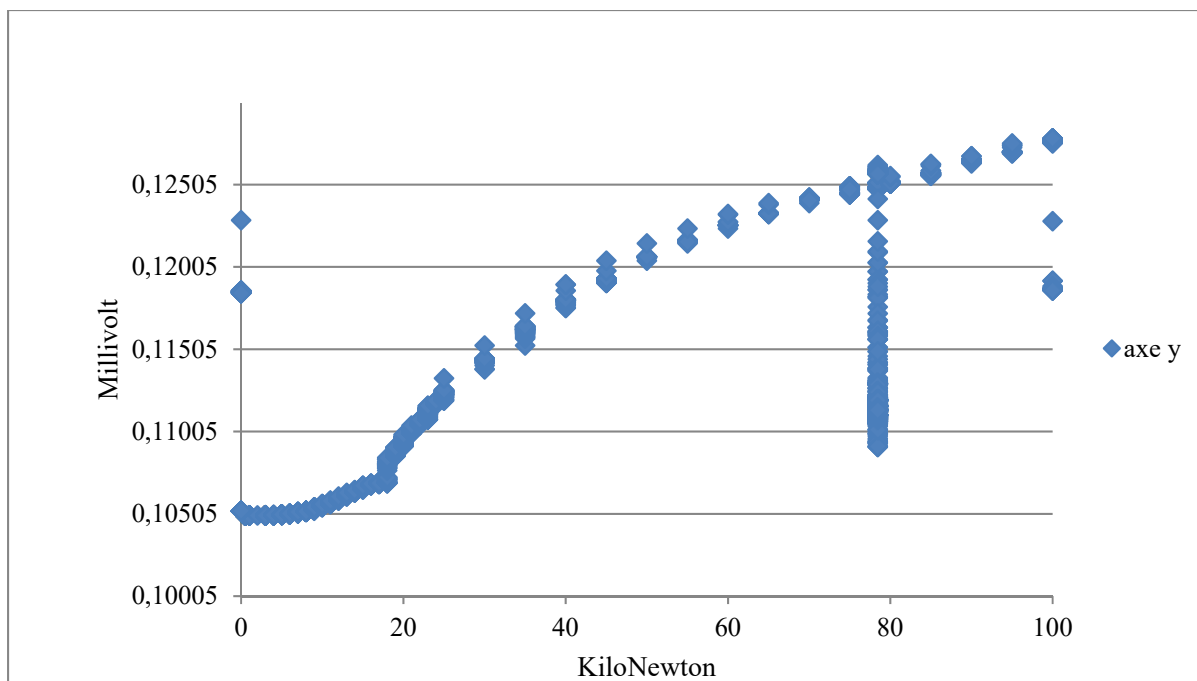


Figure 5.28 Acquisition statique des données sur le capteur nommé Y

La croissance de la pression sur l'axe y est constante avec la charge statique (Figure 5.28).

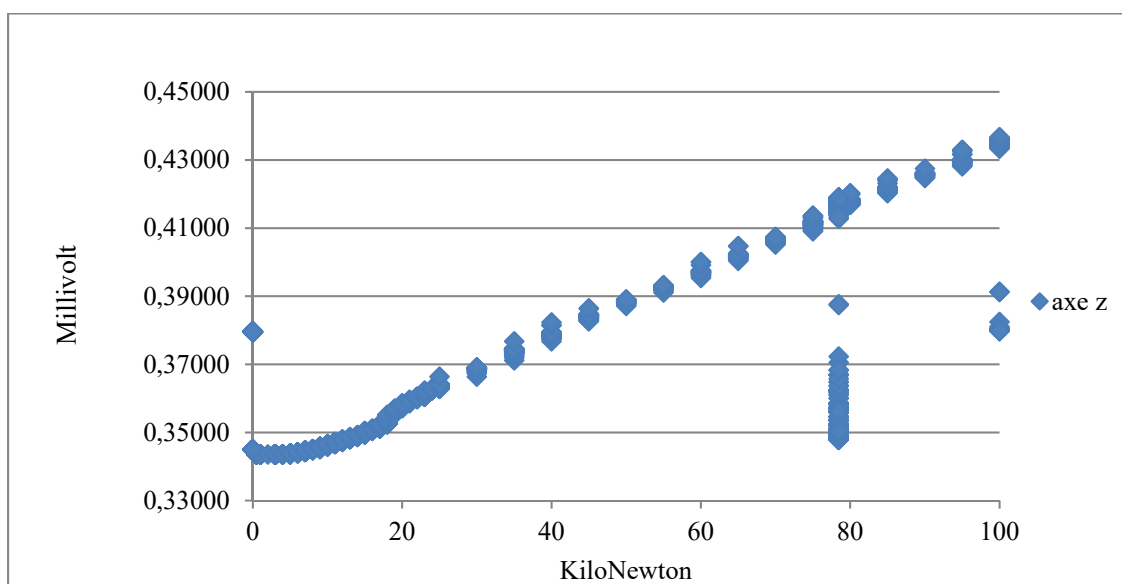


Figure 5.29 Acquisition statique des données sur le capteur nommé Z (Les résultats sont mV sur l'axe des y et kN sur l'axe des x)

La croissance de la pression sur l'axe z est constante avec la charge statique (Figure 5.29).

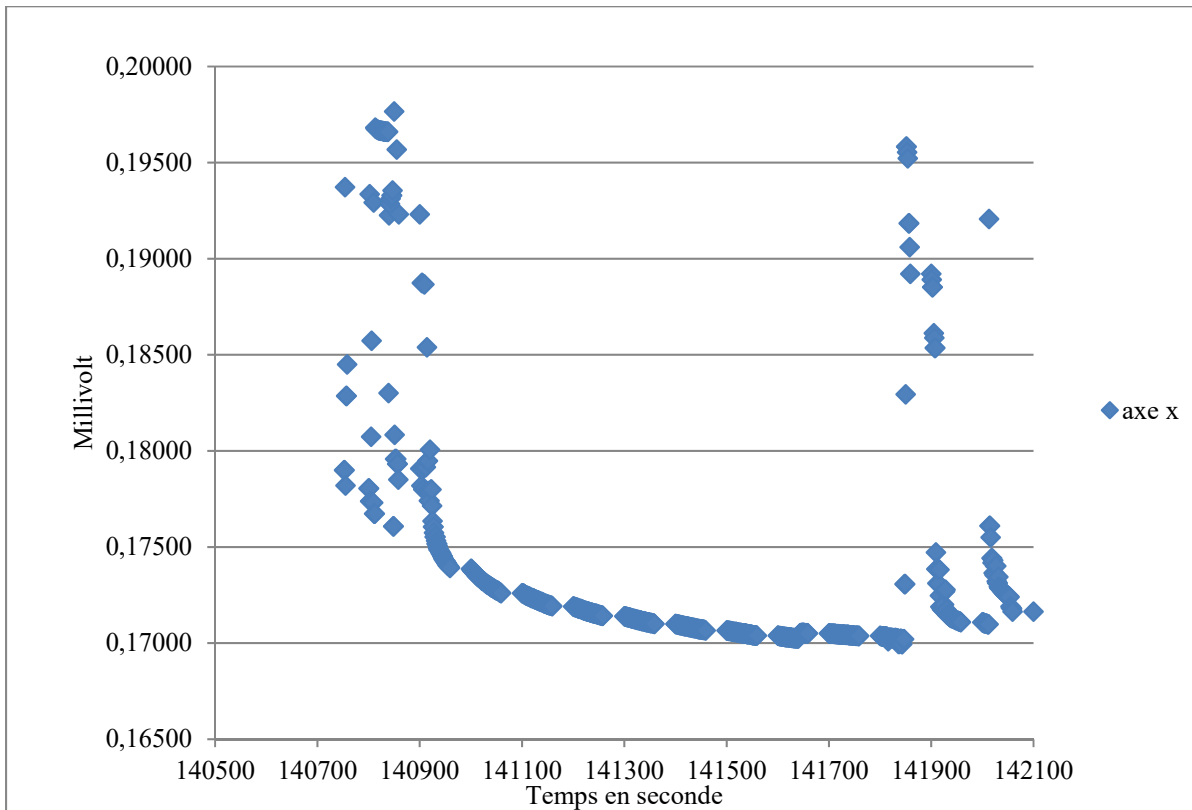


Figure 5.30 Acquisition des données dynamiques sur le capteur nommé x (Les résultats de la charge de 78.45 kN sont mV sur l'axe des y et le temps en seconde sur l'axe des x)

Le test de cet axe x est une pression de 0 kN à 78.45 kN avec un cycle dynamique d'une seconde entre chaque cycle. Le tassement est supérieur vis-à-vis le tassement statique (voir Annexe 1) car la presse hydraulique amène un impact lors de la pression. La mesure est constante au niveau de la répétition avec un cycle de 1 seconde. L'équation de notre droite linéaire corrigée (voir Figure 5.32) :

$$Y = 0.0009x + 0.1067 \quad (5.17)$$

On obtient une valeur de 0.177305 mV pour 78.45 kN.

La valeur moyenne mesurée en millivolt pour une charge de 78.45kN avec le sol compacté est 0.17731 millivolt. Ce qui donne une précision du polynôme d'environ 99.9999%



Lors de l'intervalle de 80 secondes, nous avons augmenté la fréquence de temps à 2.5 secondes et 5 secondes. On peut observer que le temps d'exposition à la charge change la mesure du tassement.

De ce fait, on peut établir une charge par essieu de façon dynamique avec l'aide de plusieurs systèmes d'acquisition. Le fait de calculer le temps par la distance et la pression acquise permet de savoir le poids estimé dynamique du véhicule par sa vitesse.

Voici, au Tableau 5.4, la corrélation entre les variables en charge statique :

Tableau 5.4 Coefficient de corrélation entre les variables en charge statique

|    | kN    | X      | Y     | Z |
|----|-------|--------|-------|---|
| kN | 1     |        |       |   |
| X  | 0,708 | 1      |       |   |
| Y  | 0,599 | 0,258  | 1     |   |
| Z  | 0,357 | -0,013 | 0,938 | 1 |

- La charge en kN et l'axe des X sont positivement corrélés et le coefficient de corrélation est de 0,708
- La charge en kN et l'axe des Y est positivement corrélée et le coefficient de corrélation est de 0,599
- La charge en kN et l'axe des Z sont positivement corrélés et le coefficient de corrélation est de 0,357
- L'axe des X et l'axe des Y sont positivement corrélés et le coefficient de corrélation est de 0,258
- L'axe des X et l'axe des Z sont négativement corrélés et le coefficient de corrélation est de -0,013.

L'impact de ce résultat vient du fait que les données acquises ont été de vrai négatif dû au fait du tassement du sol.

- L'axe des Y et l'axe des Z sont positivement corrélés et le coefficient de corrélation est de 0,938

La régression linéaire :

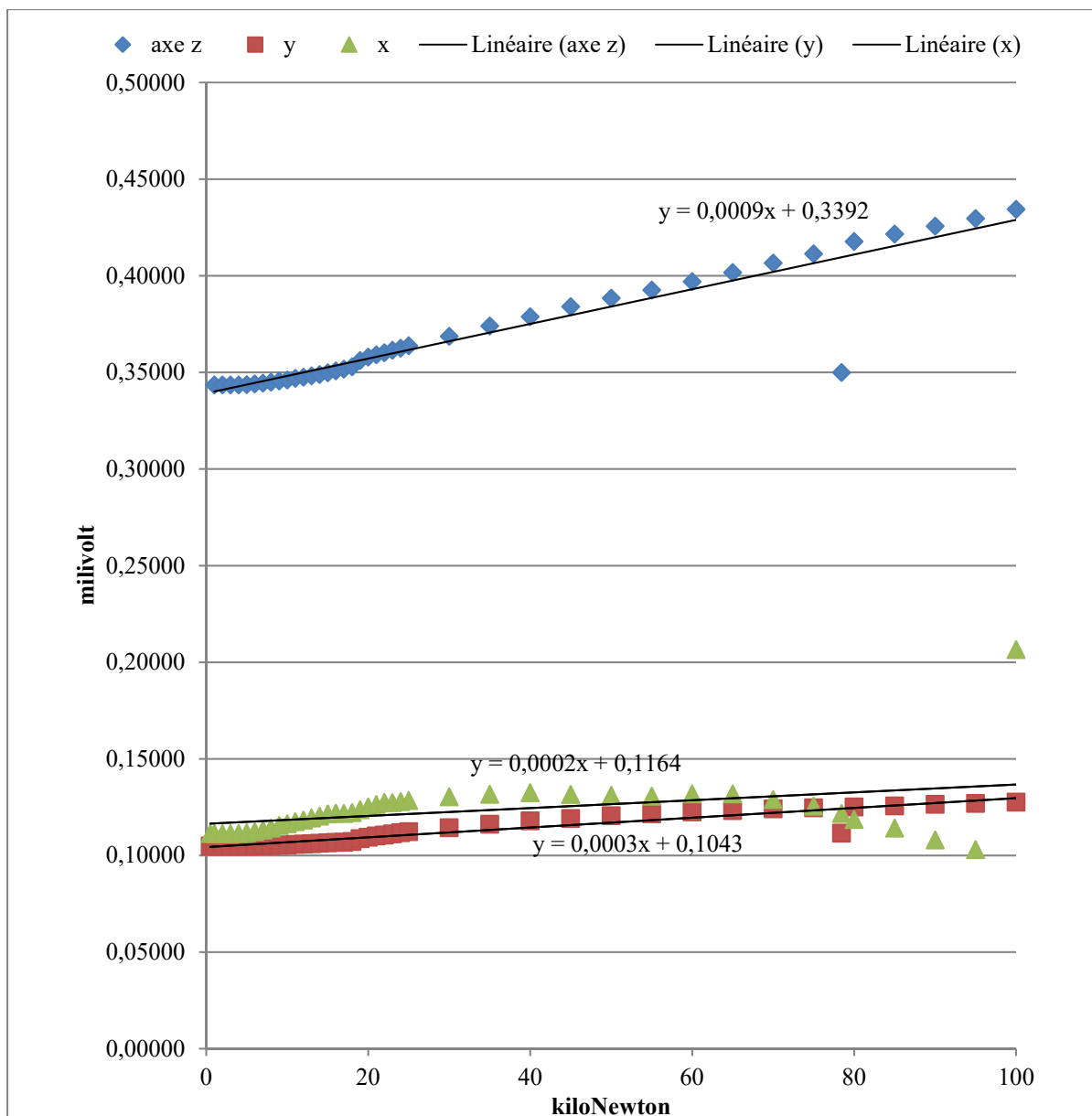


Figure 5.31 Régression linéaire avec données originales

On peut observer que la droite des x n'est pas croissante, à cause du tassement du sol, tel que mentionné précédemment. Or, en répétant l'expérience avec un sol mieux compacté, nous observons une nouvelle courbe constante avec la charge croissante.

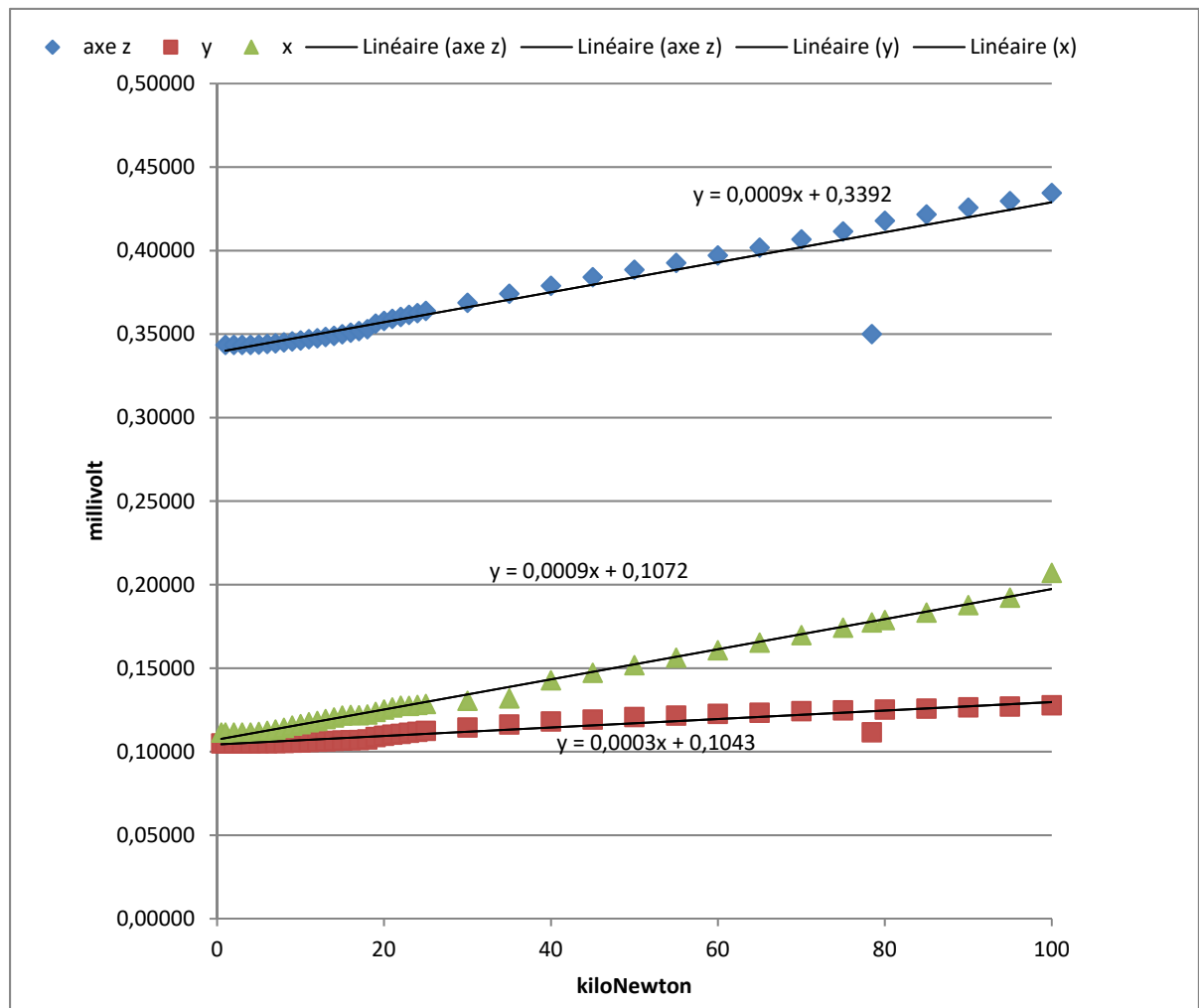


Figure 5.32 Régression linéaire avec valeur des x corrigée qui donne l'équation  $y = 0.0009x + 0.1072$

L'équation de l'axe des x est maintenant croissante avec ce nouveau test et nous pouvons calculer et estimer la charge des véhicules. On peut observer la relation entre la charge sur la chaussée et le tassement sur le système de capteurs, notamment que l'axe z, qui est dans le plan de déformation longitudinal du modèle, a un effet plus important que les autres axes.

Donc, avec les modules d'élasticité de différents types de chaussées, on peut estimer les charges statiques et dynamiques des véhicules avec le travail de plusieurs modules pour permettre d'agrégier les données de charges.

Il est important de calibrer chaque système de capteur avec une charge normalisée pour obtenir un cadre de référence. De plus, il est tout aussi important de mentionner que la rigidité doit être ajoutée pour la calibration des capteurs afin de permettre d'obtenir des résultats cohérents pour le cadre de référence des mesures.

## **CHAPITRE 6**

### **VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU SYSTÈME LIDAR – VIDÉO (LiVi)**

#### **6.1 Mise en contexte**

Les gouvernements et les autorités locales sont présentement confrontés à la problématique qui consiste à trouver un équilibre entre la nécessité de promouvoir le commerce et la croissance économique tout en augmentant la productivité du camionnage et la constante augmentation de l'utilisation des routes. Ce dernier élément implique en effet d'avoir un programme d'entretien de haute qualité afin de répondre aux besoins des usagers, tout en respectant des contraintes économiques souvent très élaborées. Toutefois, cette exigence est en opposition directe au comportement relativement complexe des chaussées : compte tenu du volume toujours en croissance du trafic routier ainsi que du poids des véhicules, une grande partie des structures en place subissent des détériorations importantes qui nécessitent des réparations rapides afin de demeurer sécuritaires pour les usagers.

Le présent projet de recherche consiste à développer des chaussées intelligentes. L'objectif principal est de créer des chaussées interconnectées avec une plateforme de gestion de l'infrastructure.

Pour établir une gestion efficace des routes, il est nécessaire d'implanter, à la fois, l'inspection et l'évaluation des routes. D'une part, l'inspection se concentre sur l'observation des routes pour les zones potentielles de détérioration et, à cet égard, un réseau de capteurs, avec et sans fil, constitue un outil privilégié pour soutenir ce processus. Elle permet également d'identifier des charges de véhicules trop lourds qui affecteraient la qualité de la chaussée. Ainsi, lorsqu'une zone de détérioration a été identifiée, les capteurs peuvent être installés afin de rendre compte de l'évolution de cette détérioration. Une option proactive peut être d'utiliser les réseaux de capteurs pour identifier les possibles détériorations sur les routes en temps réel afin d'intervenir et de corriger la situation avant qu'une faiblesse structurale ne subvienne.

Le transfert de ces informations peut être effectué grâce à des modems cellulaires (de catégorie robuste, *ruggedised*) ou via un modem satellite dans les régions où la couverture cellulaire n'est pas adéquate. Le débit nécessaire est relativement bas pour la transmission d'informations; quelques mégabits seulement sont nécessaires mensuellement et l'utilisation d'un réseau cellulaire de catégorie Cat-m1 est suffisant pour la télémétrie. L'information est consolidée dans une plateforme permettant de faire la corrélation des informations obtenues et, finalement, une analyse prédictive. Lorsque les capteurs fournissent une information corrélée qui pointe vers une détérioration des actifs, il est alors possible de faire une inspection visuelle grâce à des indicateurs via des images vidéo (LiVi) ou, encore, à l'aide de drones, ce qui permet d'obtenir des images en temps réel permettant une analyse plus précise de la situation.

## **6.2 Validation de l'hypothèse – premier objectif**

Le premier objectif de la recherche est la conception, le développement, l'apprentissage et la validation d'un outil autonome et bon marché permettant de qualifier un état de dégradation donné d'une route dans le but de diagnostiquer la cause de détérioration. L'outil est une combinaison LIDAR et vidéo, deux technologies existantes sur le marché et courantes sur les nouveaux véhicules.

L'acquisition des données fonctionnelles s'est faite via deux médiums : une première caméra ToF, et une seconde de type GoPro. Ce système, le LiVi, permet la gestion et l'interprétation des informations.

Avec le LiVi, il est possible d'avoir deux types d'acquisition d'information :

- Le premier est le ToF : il permet d'avoir une plus grande précision des déformations incluant la profondeur des déformations, mais à un coût plus dispendieux (500\$) et nécessite plus de travail au niveau traitement d'image.
- Le second est la Caméra standard, style GoPro, qui permet une qualification rapide et économique pour acquérir les données, mais est moins précise au niveau de la

qualification des images et ne permet pas d'obtenir facilement les profondeurs de déformations.

La validation du modèle a été effectuée en comparant les résultats établis par le modèle à ceux obtenus lors de l'analyse visuelle (ANNEXE II et ANNEXE III).

### **6.2.1 Validation des données – ToF**

Pour les résultats du ToF du système LiVi, un total de 287 images ont été utilisées, dont 169 présentaient des déformations. La qualification des déformations dans le système ToF a été établie à deux éléments : nid-de-poule et tout autre type de déformation. Ainsi, par exemple, sur l'image 110 (Figure 6.1), le modèle a détecté le nid-de-poule.

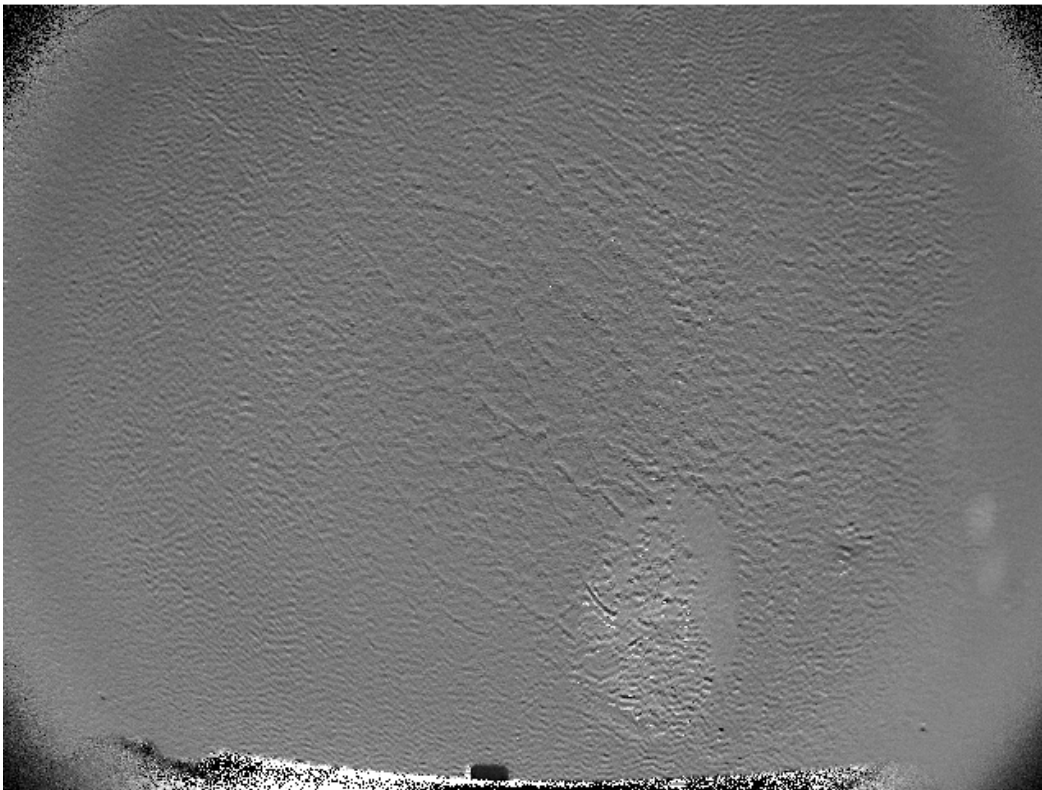


Figure 6.1 Image 110, nid-de-poule.

Or, il existe également des fissures en carrelage alligator, mais comme elles se trouvent à l’intérieur du nid-de-poule, un seul type de déformation a été soulevé par le modèle (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 Résultat de détection pour l’image 114 – ToF

| Fichier                            | Déformation     | Prédiction | Validation |
|------------------------------------|-----------------|------------|------------|
| C:\testML\images\tof\pic (114).png | nid_de_poule_01 | 0.541      | positif    |

Les résultats de la matrice de confusion au chapitre 4 (Tableau 4.3) démontre que le modèle pourrait être amélioré, en ajoutant des données notamment, ce qui permettrait d’identifier plus précisément les différents types de déformations.

Sur les 169 qualifications de déformation, 152 ont été identifiées par le modèle, soit un rendement de 90% (Figure 6.2).

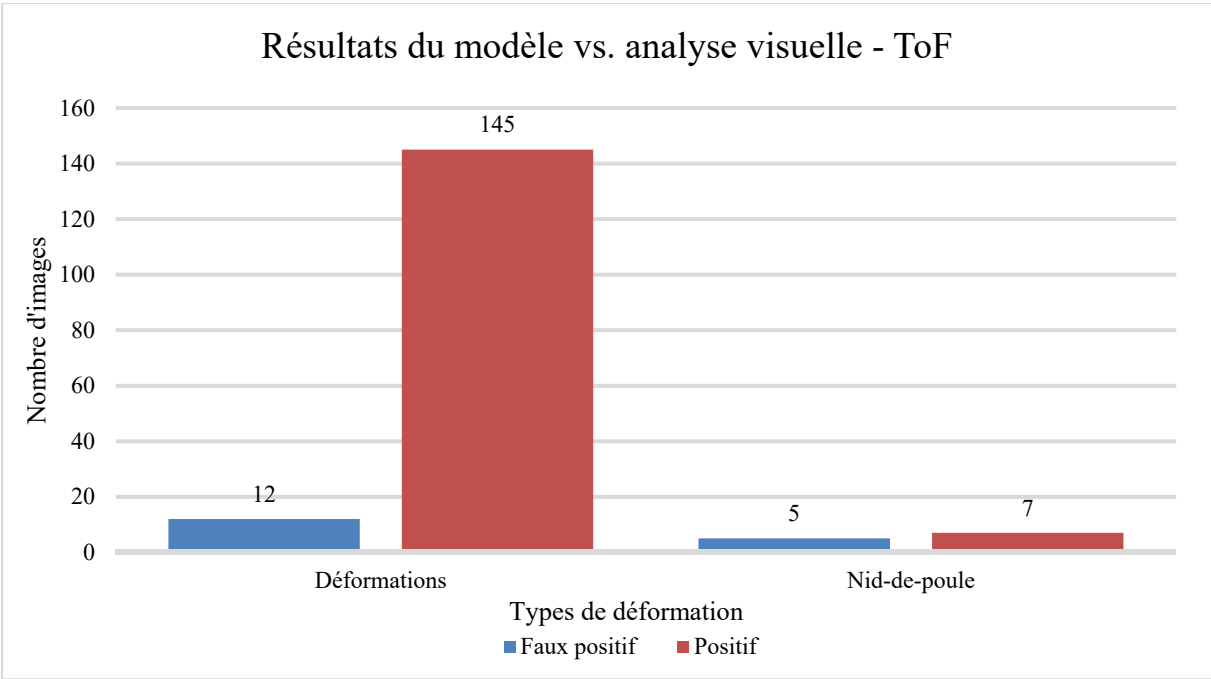


Figure 6.2 Résultats du modèle vs. analyse visuelle – TOF

Dans le cas du ToF, il est possible de changer les seuils des données retenues pour catégoriser automatiquement les images. Les données retenues sont automatiquement comptabilisées



lorsque le taux de prédiction est supérieur à 50%. Si l'on modifie les seuils minimums moyens pour atteindre le niveau des faux positifs, il sera alors possible d'augmenter le rendement. Par exemple, dans la déformation de type nid-de-poule, un seuil de plus de 54% sera privilégié pour retirer les faux positifs (Figure 6.3).

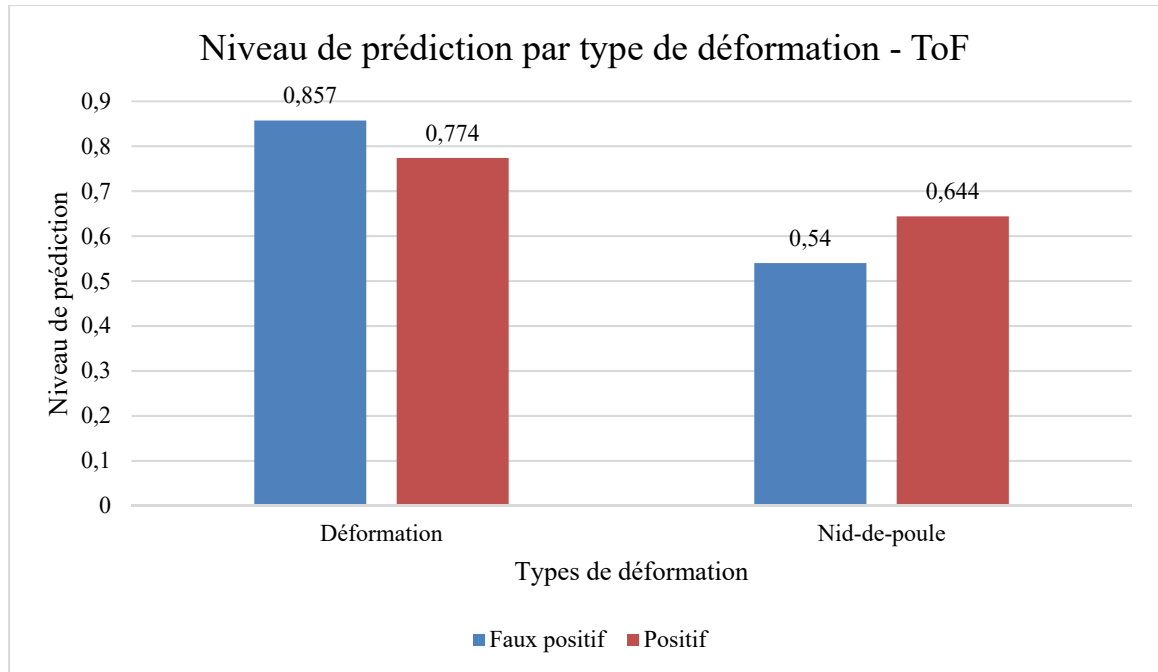


Figure 6.3 Niveau de prédiction par type de déformation - ToF

En retirant les 5 faux positifs correspondant aux nids-de-poule, la moyenne de rendement automatique passe à 92 %. Il est alors possible de croire qu'en augmentant la banque d'images disponibles pour qualifier le modèle (de 200 à 2000 images par exemple), le rendement sera beaucoup plus précis et l'impact sera automatiquement visible dans la nouvelle matrice de confusion.

### 6.2.2 Validation des données – GoPro

Pour la validation du système de caméra GoPro un total de 71 images a été utilisé pour catégoriser les différents types de déformations. Sur ces 71 images :

- 53 présentaient des fissures de types carrelage alligator ;
- 22 présentaient des fissures longitudinales ;
- 31 présentaient des fissures transversales ; et,
- 2 montraient des nids-de-poule.

Ainsi, sur l'image 54 (Figure 6.4), le système a détecté une fissure longitudinale, un nid-de-poule ainsi qu'une fissure en carrelage alligator.



Figure 6.4 Image 54 fissure longitudinale, nid-de-poule et fissure en carrelage alligator

Ces résultats concordent avec ce qui a été observés lors de l'analyse visuelle, tel que démontré dans le Tableau 6.2 ci-dessous :

Tableau 6.2 Résultats de détection pour l'image 114 – GoPro

| Nome de l'image                         | Type de déformation         | Prédiction | Validation |
|-----------------------------------------|-----------------------------|------------|------------|
| C:\testML\images\goPro<br>\pic (54).jpg | fissure_longitudinale       | 0.675      | positif    |
| C:\testML\images\goPro<br>\pic (54).jpg | nid_de_poule                | 0.501      | positif    |
| C:\testML\images\goPro<br>\pic (54).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0.502      | positif    |

Le Tableau 4.1 (au chapitre 4) présente la matrice de confusion utilisée pour mesurer la prédiction de l'identification des images. Avec les résultats obtenus avec cette matrice de confusion, on peut donc s'attendre à ce que le niveau de détection du carrelage d'alligator soit beaucoup plus précis que les fissures longitudinales.

Après l'évaluation et l'analyse visuelle de chacune des images, les résultats ont été confrontés à ceux obtenus par l'apprentissage machine. Ainsi, par exemple, pour les fissures en carrelage alligator, un total de 47 images présentaient cette déformation; le modèle en a détecté 53, donc 9 faux positifs, et n'a pas su reconnaître la déformation à trois occurrences (Figure 6.5).

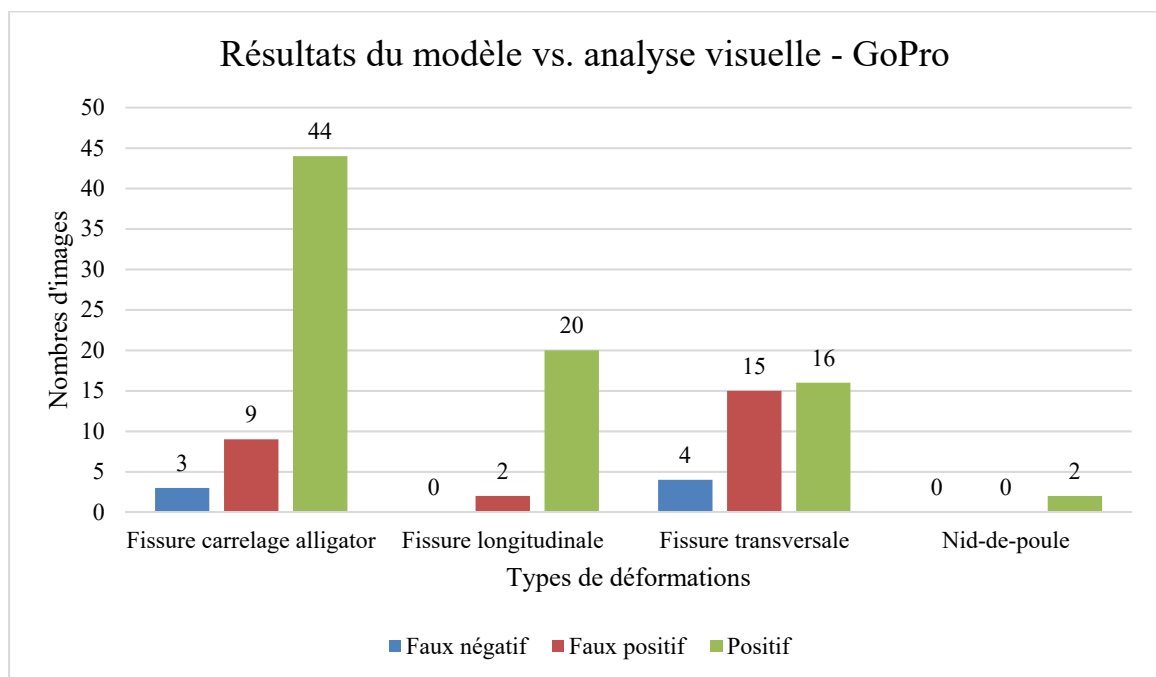


Figure 6.5 Résultats du modèle vs. analyse visuelle – GoPro

Ainsi, sur 115 qualifications de déformation, 82 présentaient une qualification positive automatique, soit un rendement de 71%.

En modifiant les données retenues pour catégoriser automatiquement les images avec comme seuils minimums les moyennes des faux positifs décrit dans le graphique ci-dessous par type de déformations, le rendement du modèle peut être amélioré (Figure 6.6).

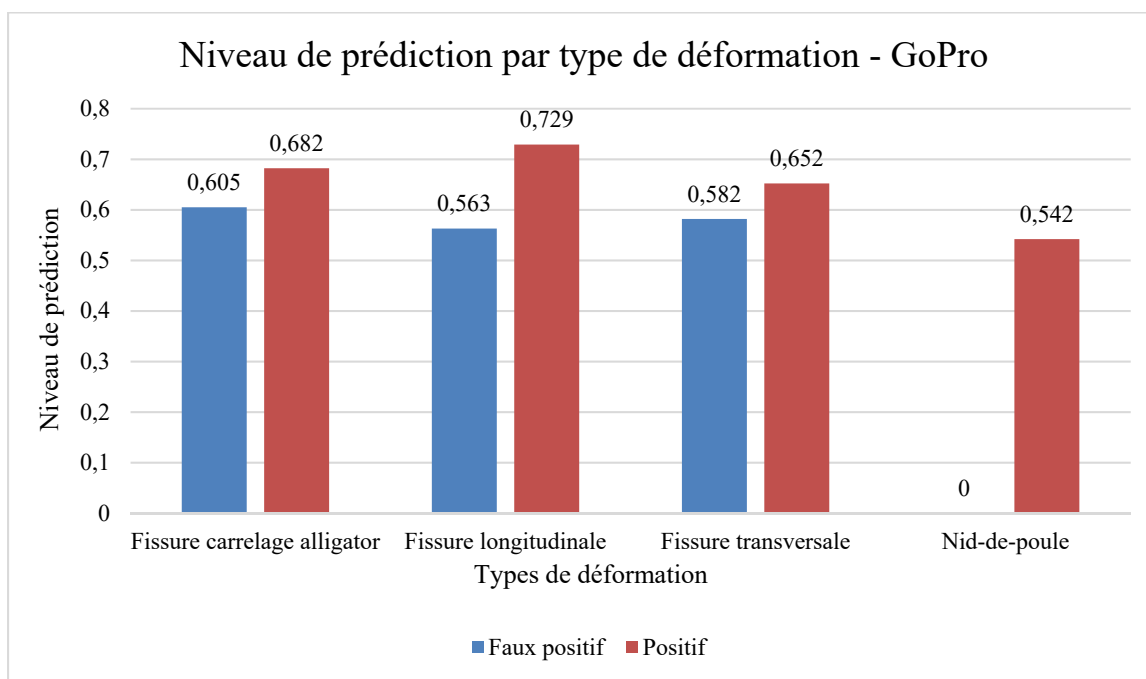


Figure 6.6 Niveau de prédiction par type de déformation - GoPro

Ainsi, 15 faux positifs sont retirés en modifiant les seuils d'acceptabilité du modèle par type de classification, ce qui résulte en une moyenne de rendement automatique de 82%. Il est alors possible de croire qu'en augmentant la banque d'images disponibles pour qualifier le modèle (de 200 à 2000 par exemple), le rendement sera beaucoup plus précis et l'impact sera automatiquement visible dans la nouvelle matrice de confusion.

Après avoir acquis les types de configurations possibles de la chaussée avec leurs modules d'élasticité, couplé aux différents types bases et fondations, il est possible de créer un modèle de déformation dans le temps et même de savoir en temps réel lorsque qu'un problème survient

au niveau structural, tel que démontré dans les résultats. Dans ce cas, le gestionnaire du système routier peut être avisé avant que la chaussée ne subisse une déformation au niveau fonctionnel.

De plus, si un gestionnaire de système routier préfère utiliser ponctuellement le système MIC, il peut, grâce au LiVi, identifier rapidement les détresses fonctionnelles et implanter un système MIC pour identifier les charges ainsi que la réaction structurale de la chaussée.



## **CHAPITRE 7**

### **VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU SYSTÈME DE MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHARGES (MIC)**

#### **7.1 Mise en contexte**

La pierre angulaire du projet est de créer un système MIC qui possède des caractéristiques bien précises :

- Suffisamment solide pour qu'une voiture puisse y circuler ;
- Transfert automatique de l'information ;
- Intelligent afin que les informations soient transmises en temps réel et que la gestion puisse être faite à distance ;
- Forme permettant un assemblage facile et illimité ; et,
- Faible coût d'acquisition et d'implémentation.

La structure de la chaussée peut alors être surveillée et le module permet le transfert d'informations en temps réel. Le système repose sur des capteurs qui mesurent la déformation et le tassement de la chaussée à différents niveaux  $z$  et espacements horizontaux pour apprécier le bassin de déflexion sous charge et déterminer :

- L'intensité des charges sur une chaussée donnée ; et,
- La durée de vie structurale et fonctionnelle de la chaussée et le moment opportun d'intervenir pour en prolonger la durée de vie au moindre coût possible.

La première orientation méthodologique consiste ainsi à développer un cadre de référence pour choisir les capteurs appropriés et les positionner à différents niveaux ( $z_i$ ) et coordonnées ( $x, y$ ) dans le but d'obtenir suffisamment d'informations pour déterminer les charges, les déformations à divers niveaux et, donc, les modules de rigidité des couches constitutives et la distorsion de la chaussée sous charge. La seconde orientation méthodologique est de développer des modèles statistiques fiables permettant de déterminer les propriétés et

caractéristiques précitées à partir des mesures de déformations et de tassements à différents endroits.

Finalement, créer un modèle pour un réseau de neurones convolutives pour permettre d'analyser les déformations structurales et fonctionnelles de la chaussée selon un modèle probabiliste.

## **7.2 Validation de l'hypothèse – second objectif**

Le second objectif de la recherche est de concevoir, développer et valider un système intégré dans la chaussée permettant de déterminer les charges du trafic. L'outil est composé d'un module mécanique composé de capteurs de charge et d'un module électronique pour acquérir l'information, encastré sous la couche d'enrobé d'usure afin de mesurer les tassements causés par le trafic lourd. Ce second objectif a ainsi été validé avec les résultats des tests positifs du premier sous-objectif.

Le premier sous-objectif est d'identifier les caractéristiques requises des capteurs pour mesurer les déplacements, afin de sélectionner le bon capteur à un coût d'acquisition et d'entretien raisonnable, le but étant d'implanter le système à grande échelle. Ceci requiert la quantification des couches de la chaussée pour l'étalonnage de la courbe stochastique tassement-charge. Pour ce qui est de la validation de ce sous-objectif, elle a été complétée avec les mesures de tassement évalués par le changement de voltage.

Le second sous-objectif est d'identifier la localisation la plus propice pour insérer le système d'acquisition intégré dans la route. Cette localisation propice prend en considération la distribution transversale des sillons de roues et la concentration de dégradations observées en surface. L'étalonnage de l'outil est basé sur les niveaux de tassements résultant de diverses charges et la corrélation entre les charges et les tassements. La validation de ce sous-objectif est liée aux résultats acquis lors du premier objectif, c'est-à-dire la classification des données de détresses avec leur géo-positionnement.



### 7.2.1 Détails de la validation du second sous-objectif

Pour valider la précision des polynômes, on compare la moyenne des résultats acquis par les différentes charges avec le voltage. (Voir Annexe IV Moyennes des voltages par charges sur les trois capteurs)

Avec les courbes acquises lors des bans d'essais, la précision des polynômes a été évaluée (Annexe V).

- L'équation pour l'axe x :  $y = 0.0009x + 0.1072$
- L'équation pour l'axe z :  $y = 0.0009x + 0.3392$
- L'équation pour l'axe y :  $y = 0.0003x + 0.1043$

En comparant les données des charges évaluées par les polynômes (Annexe V) aux données moyennes mesurées par les capteurs (Annexe IV), la différence de précision entre les mesures prises par ces mêmes capteurs et le polynôme attribué à l'axe x, y et z a été obtenue, laquelle est jugée acceptable.

De ce fait, les moyennes de précision du polynôme comparé aux données moyennes pour chaque capteur sont les suivantes (Annexe VI) :

- L'axe x : 0.847
- L'axe y : 1.016
- L'axe z : 1.015

En effet, on peut observer que la précision des polynômes provenant des données des capteurs des axes z et y sont respectivement de 98.5% et de 98.4%. Cependant, la précision moyenne du capteur x est de 84.7%. Or, lors des bans d'essais, un mouvement majeur au niveau du capteur a été observé. L'hypothèse est qu'une mauvaise compaction du sol a déplacé le système MIC dans l'axe des x, ce qui a probablement impacté la précision de ce capteur.

## CHAPITRE 8

### DISCUSSION

Les résultats obtenus à l'aide du système LiVi et du système MIC, doivent être intégrés dans un système d'information complet si l'on veut pouvoir les utiliser adéquatement. Les outils du MIC utilisés ont une certaine limite due au fait que les modules de rigidité n'ont pas été inclus pour mesurer le tassement. Ceci serait une avenue très intéressante pour la poursuite des recherches. Le modèle de classification du LiVi sera de plus en plus précis avec une plus grande banque d'image de référence. De ce fait, améliorer la précision du modèle permettrait d'améliorer le système en réduisant le nombre de faux positifs et faux négatifs.

La précision des modèles du système LiVi ont certaines limites. Le nombre restreint d'images de déformation fait en sorte que l'apprentissage automatique supervisé produit des résultats moins précis pour la classification d'images. Afin d'avoir une matrice de confusion plus performante, il est ainsi suggéré d'avoir à sa disposition au moins 2000 images par type de déformation (<https://cloud.google.com/vision/automl/docs/beginners-guide>). L'utilisation constante du système LiVi permettra d'augmenter graduellement la base de données de classification d'images de déformation pour obtenir un modèle de plus en plus intelligent. Il aurait été intéressant de prendre chacune des photos et de lui faire subir des translations, rotations et changements d'intensité (contraste) afin d'augmenter les jeux de données.

Quant au MIC, une disparité entre les résultats des polynômes et les données mesurées a été observée pour l'axe des x. Tel que mentionnée précédemment, cette disparité est due à une mauvaise compaction du sol ce qui, incidemment, permet d'identifier une défaillance potentielle dans la confection de la chaussée. Du même fait, on peut toujours mesurer les charges avec les trois axes et identifier les problèmes structuraux rapidement grâce à la disparité des résultats du polynôme. L'une des limites importantes du polynôme est la rigidité de la chaussée qui n'a pas été incluse dans le banc d'essai. Il serait important, pour des travaux futurs, de faire des recherches pour mesurer l'impact de la rigidité des différentes chaussées

afin d'y adapter le polynôme. Enfin, un étalonnage est nécessaire pour le système MIC afin d'obtenir un cadre de référence adapté aux différents types de chaussées.

La quantité d'informations à traiter pour la gestion routière est très importante (Figure 8.1). Les données proviennent de différents médias et leurs bases de références sont différentes. Les informations sont de natures diverses et, par conséquent, la structuration des bases de données doit être rigoureuse. La gestion des données et l'arrimage des différentes bases de données demeurent des opérations délicates au niveau de la classification des informations. Dans cette thèse, les informations se limitent aux charges du trafic, au niveau structural (charge appliquée sur la chaussée et déflexions associées) et fonctionnelle (dégradations de surface).

Voici quelques possibilités d'informations à catégoriser, valider et exploiter, à savoir les données qui concernent :

- La localisation et l'identification des sections de route ;
- L'historique de construction et d'entretien ;
- Le trafic ;
- L'état ;
- La géométrie ;
- L'environnement (climat) ;
- Les accidents ;
- Les paramètres économiques ; et,
- Les politiques d'intervention.

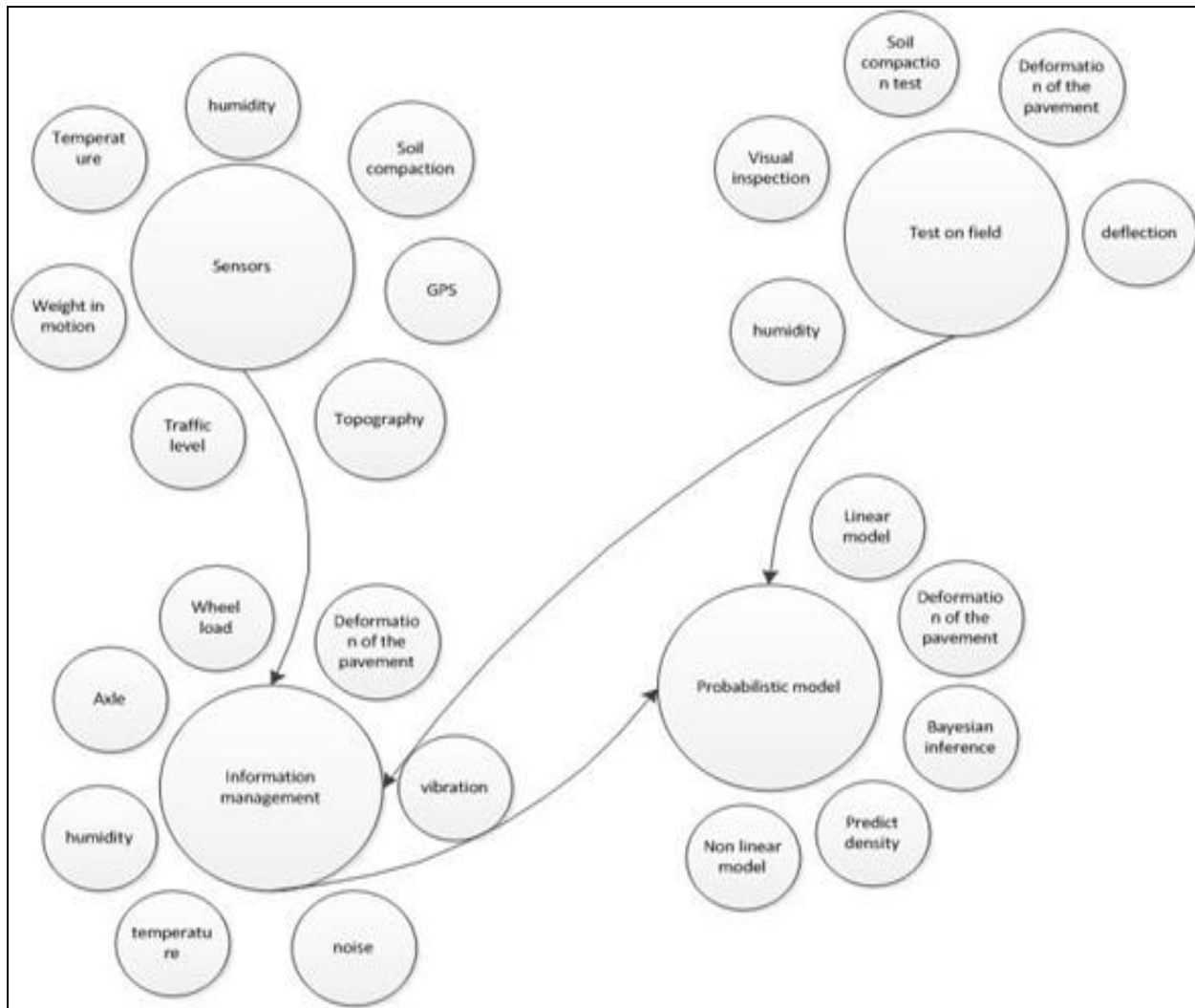


Figure 8.1 Gestion de l'information

Cette analyse des informations reliées à la structure et à son fonctionnement est directement influencée par les composantes de l'infrastructure. Il est important d'avoir une évaluation de la qualité de l'infrastructure qui soit faite en vue de définir les besoins en entretien, en réhabilitation, en reconstruction ou en développement. Ces besoins sont établis sur la base de seuils de qualité déterminés par l'administration routière. Dans le cas de la chaussée, l'évaluation consiste à répertorier les dégradations et les défauts en termes d'étendue et de sévérité.

Par la suite, il est nécessaire de diagnostiquer les causes des dommages en considérant la nature et l'environnement de l'infrastructure analysée. Les facteurs liés aux matériaux, aux sols, à la circulation, au climat et à la construction sont alors pris en compte. Ce diagnostic permet de formuler des solutions techniques pour corriger les défaillances et remédier aux problématiques identifiées. L'analyse de ces solutions nécessite la prévision de la performance sur la durée de vie de la chaussée. Un pronostic est ensuite effectué pour créer des modèles probabilistes du comportement de la chaussée au niveau de la performance de la structure sur la durée de vie.

Une analyse systémique doit également être faite pour avoir une idée des coûts-bénéfices de l'entretien pour les segments problématiques. Enfin, il est nécessaire de prévoir une espérance de vie pour la chaussée évaluée et préparer un programme d'entretien préventif pour l'ensemble des segments du réseau. Les données, une fois acquises, doivent être centralisées au même endroit afin de réduire les coûts computationnels, les coûts d'emmagasiner et de matériel. Cette étape est cruciale pour faire une corrélation des données acquises et ainsi arriver à un diagnostic. Le tout doit être supporté par une architecture réseau sans-fil pour transmettre les données et les traiter avec un système de télécommunication simple à implanter.



## CONCLUSION

La MIC et le système LiVi permettent d'obtenir des résultats beaucoup plus rapidement à un coût plus faible comparativement aux technologies et techniques dites traditionnelles. De plus, l'implémentation d'un système intégré à la route, tel que proposé dans cette thèse, représente une innovation scientifique pour la communauté routière. Par ailleurs, la valeur de l'information colligée sur les charges, par le système intégré à la chaussée dépasse de beaucoup les coûts d'acquisition des données car le trafic est un intrant primordial en matière de gestion routière, considérant que le maintien des routes de par le monde se chiffre en milliards de dollars annuellement. Grâce à l'utilisation d'un système d'acquisition à faible coût, il est possible d'obtenir une plus grande couverture du réseau routier, tout en obtenant davantage d'informations, non seulement sur les charges des véhicules mais également sur l'environnement de la chaussée, y compris les trois axes d'informations (horizontal, vertical et profondeur).

Après avoir informatisé et rassemblé sur une même plateforme, les différentes configurations possibles de chaussée incluant les modules d'élasticité de chaque couche constitutive ainsi que les différents types de couches de surface, de base et de fondation, il est possible de créer des modèles de déformation dans le temps et de savoir en temps réel, lorsque qu'un problème survient au niveau structural et/ou simplement de mesurer une charge ou un nombre de passage sur la chaussée. Comme démontré dans les résultats, lorsqu'un problème au niveau de la couche de base ou de la couche de fondation se fait sentir, il est identifiable grâce à la disparité de la corrélation entre les axes. Il devient alors possible de déceler les problématiques et, tel que mentionné plus haut, d'informer rapidement le gestionnaire de la route avant que celle-ci ne subisse une déformation fonctionnelle plus grave. Des interventions mineures et localisées et un l'entretien préventif peuvent alors être appliqués stratégiquement, réduisant ainsi les coûts et investissements nécessaires à long terme. Le module présenté dans ce document, permet en outre de déterminer si les charges des véhicules correspondent aux normes de la conception de la chaussée (poids par essieu).

Si l'on admet qu'il est plus pertinent d'utiliser le système d'acquisition des données pour obtenir des données précises concernant la structure de la route, alors la catégorisation de la chaussée avec le réseau de neurones permettra d'identifier rapidement la cause de détérioration. Ceci permet de faire une réhabilitation ou une évaluation des pressions sous la chaussée avec l'introduction du système d'acquisition sous la chaussée pour mesurer les déformations.

De plus, avec plusieurs systèmes installés à différents endroits géographiques, il est nécessaire d'ajouter certaines variables au modèle probabiliste pour mettre en contexte les différentes données brutes des capteurs. Il est important de mettre en relation les données environnementales (climat) avec les spécificités de la conception de la route et les modules d'élasticité.

Avec les résultats du réseau de neurone, on peut facilement observer où sont les déformations fonctionnelles sur une route avec plusieurs types de déformations de différentes ampleurs (mineur, majeur, critique) ainsi que leur géolocalisation. De ce fait, on peut avoir un cadre de référence global pour une catégorisation de l'ensemble de la chaussée afin d'obtenir une évaluation avec une classification de type IRI comportant des critères d'évaluation prédéfinis pour tous les utilisateurs de ces informations.

Pour des travaux futurs, il est recommandé de développer de nouveaux modèles de réseau de neurones pour avoir davantage de corrélation entre les données acquises sous différents modules d'élasticité de la chaussée et de faire des modèles prédictifs dans le temps avec les données pour corroborer le cycle de dégradation de la chaussée avec ses charges et nombre d'utilisateurs. De ce fait, avec une large quantité de capteur, il est primordial de concevoir un outil de visualisation des résultats pour obtenir une vision claire et rapide de la qualité de la chaussée. De plus, concevoir un module cellulaire intégré dans le module d'acquisition constitue la prochaine étape dans le but de faciliter l'implémentation dans la chaussée.



## ANNEXE I

### DONNÉES BRUTES DE LA ROUTE

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 133759     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133800     | 0,5                  | 0,11138                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133802     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133803     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133804     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133805     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133806     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133807     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133808     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133809     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133811     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133812     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133813     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133814     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133815     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133816     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133817     | 0,5                  | 0,11137                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133818     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133820     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133821     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133822     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133823     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133824     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133825     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133826     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133827     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133828     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133830     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133831     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133832     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133833     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 133834     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133835     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133836     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133837     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133839     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133840     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133841     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133842     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133843     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133844     | 0,5                  | 0,11136                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133845     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133846     | 0,5                  | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133848     | 1                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133849     | 1                    | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133850     | 1                    | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133851     | 1                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133852     | 1                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133853     | 1                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133854     | 1                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133855     | 1                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133857     | 1                    | 0,11134                      | 0,10496                      | 0,34353                      |
| 133858     | 1                    | 0,11134                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133859     | 1                    | 0,11134                      | 0,10496                      | 0,34353                      |
| 133900     | 1                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133901     | 1                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133902     | 1                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133903     | 1                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133904     | 1                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133906     | 2                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133907     | 3                    | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133908     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133909     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133910     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133911     | 3                    | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133912     | 3                    | 0,11134                      | 0,10496                      | 0,34353                      |
| 133913     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133915     | 3                    | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133916     | 3                    | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 133917     | 3                    | 0,11135                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133918     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133919     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133920     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133921     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34355                      |
| 133922     | 3                    | 0,11135                      | 0,10494                      | 0,34355                      |
| 133924     | 3                    | 0,11135                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133925     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133926     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133927     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133928     | 3                    | 0,11136                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133929     | 3                    | 0,11136                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133930     | 3                    | 0,11135                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133931     | 3                    | 0,11136                      | 0,10494                      | 0,34355                      |
| 133933     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34355                      |
| 133934     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34355                      |
| 133935     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133936     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133937     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133938     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133939     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133940     | 3                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133941     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133943     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133944     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133945     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133946     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133947     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133948     | 3                    | 0,11134                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133949     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34353                      |
| 133950     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133952     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133953     | 3                    | 0,11133                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 133954     | 3                    | 0,11134                      | 0,10496                      | 0,34353                      |
| 133955     | 3                    | 0,11134                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 133956     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 133957     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 133958     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 133959     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34352                      |
| 134001     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34352                      |
| 134002     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134003     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134004     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134005     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134006     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134007     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134008     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134010     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134011     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134012     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134013     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134014     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134015     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134016     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134017     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134019     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134020     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134021     | 3                    | 0,11134                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 134022     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134023     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134024     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134025     | 3                    | 0,11133                      | 0,10496                      | 0,34353                      |
| 134026     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134028     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134029     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34355                      |
| 134030     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34355                      |
| 134031     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134032     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134033     | 3                    | 0,11133                      | 0,10497                      | 0,34353                      |
| 134034     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134035     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134037     | 3                    | 0,11133                      | 0,10496                      | 0,34353                      |
| 134038     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34353                      |
| 134039     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134040     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134041     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134042     | 3                    | 0,11133                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134043     | 3                    | 0,11133                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134044     | 3                    | 0,11134                      | 0,10494                      | 0,34354                      |
| 134046     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134047     | 3                    | 0,11134                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134048     | 3                    | 0,11135                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134049     | 4                    | 0,11136                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 134050     | 4                    | 0,11136                      | 0,10496                      | 0,34355                      |
| 134051     | 4                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134052     | 4                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134053     | 4                    | 0,11136                      | 0,10495                      | 0,34354                      |
| 134055     | 4                    | 0,11136                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 134056     | 4                    | 0,11135                      | 0,10496                      | 0,34354                      |
| 134057     | 4                    | 0,11143                      | 0,10497                      | 0,34354                      |
| 134058     | 4                    | 0,11143                      | 0,10497                      | 0,34357                      |
| 134059     | 4                    | 0,1115                       | 0,10498                      | 0,34358                      |
| 134100     | 4                    | 0,11154                      | 0,10498                      | 0,34358                      |
| 134101     | 5                    | 0,11159                      | 0,10498                      | 0,34359                      |
| 134102     | 5                    | 0,11159                      | 0,10498                      | 0,3436                       |
| 134103     | 5                    | 0,11162                      | 0,10499                      | 0,3436                       |
| 134105     | 5                    | 0,11164                      | 0,10499                      | 0,34361                      |
| 134106     | 5                    | 0,11164                      | 0,10499                      | 0,34362                      |
| 134107     | 5                    | 0,11165                      | 0,10499                      | 0,34363                      |
| 134108     | 5                    | 0,11168                      | 0,10499                      | 0,34363                      |
| 134109     | 5                    | 0,11168                      | 0,10499                      | 0,34362                      |
| 134110     | 5                    | 0,11169                      | 0,10498                      | 0,34364                      |
| 134111     | 5                    | 0,11172                      | 0,10498                      | 0,34364                      |
| 134112     | 5                    | 0,11174                      | 0,10498                      | 0,34365                      |
| 134114     | 5                    | 0,11174                      | 0,105                        | 0,34366                      |
| 134115     | 5                    | 0,11175                      | 0,10499                      | 0,34366                      |
| 134116     | 5                    | 0,11177                      | 0,10499                      | 0,34366                      |
| 134117     | 5                    | 0,11177                      | 0,10499                      | 0,34367                      |
| 134118     | 5                    | 0,11178                      | 0,10498                      | 0,34368                      |
| 134119     | 5                    | 0,11179                      | 0,10499                      | 0,34368                      |
| 134120     | 5                    | 0,11179                      | 0,10499                      | 0,34367                      |
| 134121     | 5                    | 0,11179                      | 0,10498                      | 0,34368                      |
| 134123     | 5                    | 0,11181                      | 0,10499                      | 0,34368                      |
| 134124     | 5                    | 0,11181                      | 0,10499                      | 0,34368                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134125     | 5                    | 0,11181                      | 0,10498                      | 0,34369                      |
| 134126     | 5                    | 0,11182                      | 0,105                        | 0,34369                      |
| 134127     | 5                    | 0,11184                      | 0,105                        | 0,34369                      |
| 134128     | 5                    | 0,11184                      | 0,10499                      | 0,3437                       |
| 134129     | 5                    | 0,11183                      | 0,10499                      | 0,3437                       |
| 134130     | 5                    | 0,11185                      | 0,10499                      | 0,3437                       |
| 134132     | 5                    | 0,11185                      | 0,10499                      | 0,3437                       |
| 134133     | 5                    | 0,11186                      | 0,105                        | 0,34375                      |
| 134134     | 5                    | 0,11199                      | 0,10501                      | 0,34375                      |
| 134135     | 5                    | 0,11206                      | 0,10501                      | 0,3438                       |
| 134136     | 5                    | 0,11206                      | 0,10501                      | 0,34383                      |
| 134137     | 5                    | 0,11211                      | 0,10501                      | 0,34383                      |
| 134138     | 5                    | 0,11216                      | 0,10501                      | 0,34386                      |
| 134139     | 5                    | 0,11216                      | 0,10502                      | 0,34388                      |
| 134141     | 5                    | 0,11218                      | 0,10502                      | 0,3439                       |
| 134142     | 6                    | 0,11222                      | 0,10502                      | 0,3439                       |
| 134143     | 6                    | 0,11222                      | 0,10502                      | 0,34392                      |
| 134144     | 6                    | 0,11225                      | 0,10502                      | 0,34393                      |
| 134145     | 6                    | 0,11225                      | 0,10502                      | 0,34393                      |
| 134146     | 6                    | 0,11228                      | 0,10502                      | 0,34394                      |
| 134147     | 6                    | 0,11228                      | 0,10503                      | 0,34395                      |
| 134148     | 6                    | 0,11229                      | 0,10502                      | 0,34395                      |
| 134150     | 6                    | 0,11231                      | 0,10502                      | 0,34396                      |
| 134151     | 6                    | 0,11231                      | 0,10503                      | 0,34397                      |
| 134152     | 6                    | 0,11233                      | 0,10503                      | 0,34398                      |
| 134153     | 6                    | 0,11234                      | 0,10503                      | 0,34398                      |
| 134154     | 6                    | 0,11234                      | 0,10503                      | 0,34399                      |
| 134155     | 6                    | 0,11236                      | 0,10504                      | 0,344                        |
| 134156     | 6                    | 0,11236                      | 0,10504                      | 0,344                        |
| 134157     | 6                    | 0,11239                      | 0,10504                      | 0,34401                      |
| 134159     | 6                    | 0,11239                      | 0,10503                      | 0,34402                      |
| 134200     | 6                    | 0,11239                      | 0,10504                      | 0,34402                      |
| 134201     | 6                    | 0,11241                      | 0,10504                      | 0,34402                      |
| 134202     | 6                    | 0,11241                      | 0,10504                      | 0,34404                      |
| 134203     | 6                    | 0,11242                      | 0,10504                      | 0,34405                      |
| 134204     | 6                    | 0,11244                      | 0,10505                      | 0,34405                      |
| 134205     | 6                    | 0,11244                      | 0,10505                      | 0,34406                      |
| 134206     | 6                    | 0,11245                      | 0,10504                      | 0,34406                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134208     | 6                    | 0,11246                      | 0,10505                      | 0,34406                      |
| 134209     | 6                    | 0,11247                      | 0,10505                      | 0,34406                      |
| 134210     | 6                    | 0,11247                      | 0,10505                      | 0,34407                      |
| 134211     | 6                    | 0,11249                      | 0,10505                      | 0,34407                      |
| 134212     | 6                    | 0,1125                       | 0,10505                      | 0,34408                      |
| 134213     | 6                    | 0,1125                       | 0,10504                      | 0,34409                      |
| 134214     | 6                    | 0,11251                      | 0,10505                      | 0,34409                      |
| 134215     | 6                    | 0,11252                      | 0,10505                      | 0,34409                      |
| 134216     | 6                    | 0,11252                      | 0,10505                      | 0,34409                      |
| 134218     | 6                    | 0,11253                      | 0,10505                      | 0,3441                       |
| 134219     | 6                    | 0,11255                      | 0,10505                      | 0,3441                       |
| 134220     | 6                    | 0,11261                      | 0,10505                      | 0,34411                      |
| 134221     | 6                    | 0,11261                      | 0,10506                      | 0,34419                      |
| 134222     | 6                    | 0,11273                      | 0,10507                      | 0,34419                      |
| 134223     | 7                    | 0,1128                       | 0,10507                      | 0,34425                      |
| 134224     | 7                    | 0,1128                       | 0,10509                      | 0,34428                      |
| 134225     | 7                    | 0,11285                      | 0,10508                      | 0,34432                      |
| 134227     | 7                    | 0,1129                       | 0,1051                       | 0,34432                      |
| 134228     | 7                    | 0,1129                       | 0,1051                       | 0,34434                      |
| 134229     | 7                    | 0,11294                      | 0,1051                       | 0,34436                      |
| 134230     | 7                    | 0,11298                      | 0,10509                      | 0,34436                      |
| 134231     | 7                    | 0,11301                      | 0,10509                      | 0,34438                      |
| 134232     | 7                    | 0,11301                      | 0,1051                       | 0,34439                      |
| 134233     | 7                    | 0,11303                      | 0,1051                       | 0,34439                      |
| 134234     | 7                    | 0,11306                      | 0,1051                       | 0,34441                      |
| 134236     | 7                    | 0,11306                      | 0,1051                       | 0,34442                      |
| 134237     | 7                    | 0,11308                      | 0,1051                       | 0,34443                      |
| 134238     | 7                    | 0,1131                       | 0,1051                       | 0,34443                      |
| 134239     | 7                    | 0,1131                       | 0,1051                       | 0,34444                      |
| 134240     | 7                    | 0,11313                      | 0,1051                       | 0,34446                      |
| 134241     | 7                    | 0,11315                      | 0,1051                       | 0,34446                      |
| 134242     | 7                    | 0,11317                      | 0,1051                       | 0,34446                      |
| 134243     | 7                    | 0,11317                      | 0,10512                      | 0,34447                      |
| 134245     | 7                    | 0,11319                      | 0,10511                      | 0,34447                      |
| 134246     | 7                    | 0,1132                       | 0,10511                      | 0,34449                      |
| 134247     | 7                    | 0,1132                       | 0,10511                      | 0,34449                      |
| 134248     | 7                    | 0,11321                      | 0,10511                      | 0,3445                       |
| 134249     | 7                    | 0,11322                      | 0,10511                      | 0,3445                       |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134250     | 7                    | 0,11322                      | 0,10511                      | 0,34451                      |
| 134251     | 7                    | 0,11325                      | 0,10512                      | 0,34451                      |
| 134252     | 7                    | 0,11326                      | 0,10512                      | 0,34451                      |
| 134254     | 7                    | 0,11327                      | 0,10512                      | 0,34453                      |
| 134255     | 7                    | 0,11327                      | 0,10512                      | 0,34453                      |
| 134256     | 7                    | 0,11328                      | 0,10513                      | 0,34453                      |
| 134257     | 7                    | 0,1133                       | 0,10513                      | 0,34453                      |
| 134258     | 7                    | 0,1133                       | 0,10512                      | 0,34455                      |
| 134259     | 7                    | 0,11332                      | 0,10513                      | 0,34456                      |
| 134300     | 7                    | 0,11342                      | 0,10515                      | 0,34456                      |
| 134301     | 7                    | 0,11342                      | 0,10515                      | 0,34466                      |
| 134303     | 7                    | 0,11353                      | 0,10517                      | 0,34472                      |
| 134304     | 7                    | 0,11361                      | 0,10517                      | 0,34472                      |
| 134305     | 7                    | 0,11367                      | 0,10517                      | 0,34476                      |
| 134306     | 7                    | 0,11367                      | 0,10517                      | 0,34478                      |
| 134307     | 8                    | 0,11372                      | 0,10517                      | 0,34478                      |
| 134308     | 8                    | 0,11376                      | 0,10517                      | 0,3448                       |
| 134309     | 8                    | 0,11376                      | 0,10518                      | 0,34482                      |
| 134310     | 8                    | 0,1138                       | 0,10517                      | 0,34483                      |
| 134312     | 8                    | 0,11384                      | 0,10518                      | 0,34483                      |
| 134313     | 8                    | 0,11384                      | 0,10518                      | 0,34486                      |
| 134314     | 8                    | 0,11388                      | 0,10519                      | 0,34487                      |
| 134315     | 8                    | 0,1139                       | 0,10518                      | 0,34487                      |
| 134316     | 8                    | 0,11394                      | 0,10518                      | 0,34488                      |
| 134317     | 8                    | 0,11394                      | 0,10519                      | 0,34489                      |
| 134318     | 8                    | 0,11395                      | 0,10519                      | 0,34489                      |
| 134319     | 8                    | 0,11398                      | 0,10519                      | 0,3449                       |
| 134321     | 8                    | 0,11398                      | 0,1052                       | 0,34492                      |
| 134322     | 8                    | 0,114                        | 0,10519                      | 0,34493                      |
| 134323     | 8                    | 0,11403                      | 0,1052                       | 0,34493                      |
| 134324     | 8                    | 0,11403                      | 0,1052                       | 0,34494                      |
| 134325     | 8                    | 0,11405                      | 0,1052                       | 0,34494                      |
| 134326     | 8                    | 0,11407                      | 0,10521                      | 0,34494                      |
| 134327     | 8                    | 0,11408                      | 0,10521                      | 0,34495                      |
| 134328     | 8                    | 0,11408                      | 0,1052                       | 0,34496                      |
| 134330     | 8                    | 0,1141                       | 0,10521                      | 0,34496                      |
| 134331     | 8                    | 0,11413                      | 0,10521                      | 0,34497                      |
| 134332     | 8                    | 0,11413                      | 0,10521                      | 0,34497                      |



| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134333     | 8                    | 0,11414                      | 0,1052                       | 0,34498                      |
| 134334     | 8                    | 0,11416                      | 0,10521                      | 0,34498                      |
| 134335     | 8                    | 0,11416                      | 0,10521                      | 0,34499                      |
| 134336     | 8                    | 0,11417                      | 0,10521                      | 0,34499                      |
| 134337     | 8                    | 0,11418                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134338     | 8                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134340     | 8                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134341     | 8                    | 0,11422                      | 0,10521                      | 0,34501                      |
| 134342     | 8                    | 0,11422                      | 0,10521                      | 0,34501                      |
| 134343     | 8                    | 0,11422                      | 0,10521                      | 0,34501                      |
| 134344     | 8                    | 0,11425                      | 0,10521                      | 0,345                        |
| 134345     | 8                    | 0,11425                      | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134346     | 8                    | 0,11427                      | 0,10522                      | 0,34501                      |
| 134347     | 8                    | 0,11427                      | 0,10522                      | 0,34501                      |
| 134349     | 8                    | 0,11428                      | 0,10522                      | 0,34501                      |
| 134350     | 8                    | 0,11429                      | 0,10522                      | 0,34503                      |
| 134351     | 8                    | 0,11429                      | 0,10523                      | 0,34503                      |
| 134352     | 8                    | 0,11431                      | 0,10522                      | 0,34504                      |
| 134353     | 8                    | 0,11433                      | 0,10522                      | 0,34504                      |
| 134354     | 8                    | 0,11433                      | 0,10523                      | 0,34504                      |
| 134355     | 8                    | 0,11433                      | 0,10523                      | 0,34505                      |
| 134356     | 8                    | 0,11435                      | 0,10523                      | 0,34505                      |
| 134358     | 8                    | 0,11436                      | 0,10523                      | 0,34505                      |
| 134359     | 8                    | 0,11436                      | 0,10523                      | 0,34505                      |
| 134400     | 8                    | 0,11437                      | 0,10524                      | 0,34505                      |
| 134401     | 8                    | 0,11439                      | 0,10524                      | 0,34506                      |
| 134402     | 8                    | 0,11439                      | 0,10523                      | 0,34507                      |
| 134403     | 8                    | 0,1144                       | 0,10523                      | 0,34507                      |
| 134404     | 8                    | 0,11441                      | 0,10523                      | 0,34507                      |
| 134405     | 8                    | 0,11441                      | 0,10524                      | 0,34508                      |
| 134407     | 8                    | 0,11441                      | 0,10523                      | 0,34507                      |
| 134408     | 8                    | 0,11427                      | 0,10521                      | 0,34507                      |
| 134409     | 8                    | 0,11424                      | 0,10521                      | 0,34501                      |
| 134410     | 8                    | 0,11424                      | 0,10521                      | 0,345                        |
| 134411     | 8                    | 0,11423                      | 0,10521                      | 0,345                        |
| 134412     | 8                    | 0,11423                      | 0,10521                      | 0,345                        |
| 134413     | 8                    | 0,11423                      | 0,1052                       | 0,345                        |
| 134414     | 0                    | 0,11423                      | 0,10521                      | 0,345                        |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134416     | 0                    | 0,11423                      | 0,10521                      | 0,345                        |
| 134417     | 0                    | 0,11423                      | 0,10521                      | 0,34499                      |
| 134418     | 0                    | 0,11422                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134419     | 0                    | 0,11422                      | 0,10521                      | 0,34499                      |
| 134420     | 0                    | 0,11422                      | 0,10521                      | 0,34499                      |
| 134421     | 0                    | 0,11422                      | 0,10521                      | 0,34499                      |
| 134422     | 0                    | 0,11422                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134423     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134425     | 0                    | 0,11421                      | 0,10521                      | 0,34499                      |
| 134426     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134427     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134428     | 0                    | 0,11421                      | 0,10521                      | 0,345                        |
| 134429     | 0                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134430     | 0                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134431     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134432     | 0                    | 0,11421                      | 0,10523                      | 0,345                        |
| 134434     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134435     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134436     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134437     | 0                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134438     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134439     | 0                    | 0,11421                      | 0,10523                      | 0,34499                      |
| 134440     | 0                    | 0,11421                      | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134441     | 0                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134443     | 0                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,345                        |
| 134444     | 0                    | 0,1142                       | 0,10522                      | 0,34499                      |
| 134445     | 0                    | 0,1142                       | 0,10524                      | 0,34499                      |
| 134446     | 9                    | 0,1145                       | 0,10524                      | 0,34507                      |
| 134447     | 9                    | 0,1145                       | 0,10529                      | 0,34518                      |
| 134448     | 9                    | 0,11464                      | 0,10529                      | 0,34524                      |
| 134449     | 9                    | 0,11475                      | 0,10529                      | 0,34524                      |
| 134450     | 9                    | 0,11475                      | 0,10529                      | 0,34528                      |
| 134452     | 9                    | 0,11481                      | 0,1053                       | 0,34531                      |
| 134453     | 9                    | 0,11488                      | 0,10531                      | 0,34531                      |
| 134454     | 9                    | 0,11494                      | 0,10531                      | 0,34533                      |
| 134455     | 9                    | 0,11494                      | 0,10532                      | 0,34535                      |
| 134456     | 9                    | 0,11499                      | 0,10531                      | 0,34535                      |
| 134457     | 9                    | 0,11503                      | 0,10531                      | 0,34537                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134458     | 9                    | 0,11503                      | 0,10531                      | 0,34539                      |
| 134459     | 9                    | 0,11506                      | 0,10531                      | 0,3454                       |
| 134500     | 9                    | 0,11509                      | 0,10531                      | 0,3454                       |
| 134502     | 9                    | 0,11509                      | 0,10532                      | 0,34541                      |
| 134503     | 9                    | 0,11512                      | 0,10533                      | 0,34542                      |
| 134504     | 9                    | 0,11514                      | 0,10532                      | 0,34542                      |
| 134505     | 9                    | 0,11517                      | 0,10532                      | 0,34544                      |
| 134506     | 9                    | 0,11517                      | 0,10533                      | 0,34544                      |
| 134507     | 9                    | 0,11521                      | 0,10534                      | 0,34544                      |
| 134508     | 9                    | 0,11523                      | 0,10534                      | 0,34545                      |
| 134509     | 9                    | 0,11523                      | 0,10533                      | 0,34546                      |
| 134511     | 9                    | 0,11526                      | 0,10534                      | 0,34548                      |
| 134512     | 9                    | 0,11528                      | 0,10534                      | 0,34548                      |
| 134513     | 9                    | 0,11528                      | 0,10535                      | 0,34549                      |
| 134514     | 9                    | 0,1153                       | 0,10534                      | 0,34549                      |
| 134515     | 9                    | 0,11531                      | 0,10534                      | 0,34549                      |
| 134516     | 9                    | 0,11531                      | 0,10534                      | 0,3455                       |
| 134517     | 9                    | 0,11533                      | 0,10534                      | 0,3455                       |
| 134518     | 9                    | 0,11535                      | 0,10534                      | 0,3455                       |
| 134520     | 9                    | 0,11537                      | 0,10534                      | 0,34551                      |
| 134521     | 9                    | 0,11537                      | 0,10535                      | 0,34552                      |
| 134522     | 9                    | 0,11539                      | 0,10536                      | 0,34552                      |
| 134523     | 9                    | 0,11541                      | 0,10536                      | 0,34552                      |
| 134524     | 9                    | 0,11541                      | 0,10535                      | 0,34553                      |
| 134525     | 9                    | 0,11543                      | 0,10536                      | 0,34554                      |
| 134526     | 9                    | 0,11543                      | 0,10535                      | 0,34554                      |
| 134527     | 9                    | 0,11543                      | 0,10535                      | 0,34555                      |
| 134529     | 9                    | 0,11546                      | 0,10536                      | 0,34555                      |
| 134530     | 9                    | 0,11547                      | 0,10536                      | 0,34555                      |
| 134531     | 9                    | 0,11549                      | 0,10536                      | 0,34556                      |
| 134532     | 9                    | 0,11549                      | 0,10536                      | 0,34556                      |
| 134533     | 9                    | 0,11551                      | 0,10536                      | 0,34557                      |
| 134534     | 9                    | 0,11552                      | 0,10536                      | 0,34557                      |
| 134535     | 9                    | 0,11552                      | 0,10537                      | 0,34557                      |
| 134536     | 9                    | 0,11553                      | 0,10537                      | 0,34559                      |
| 134537     | 9                    | 0,11554                      | 0,10536                      | 0,34559                      |
| 134539     | 9                    | 0,11554                      | 0,10536                      | 0,3456                       |
| 134540     | 9                    | 0,11555                      | 0,10537                      | 0,3456                       |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134541     | 9                    | 0,11557                      | 0,10537                      | 0,3456                       |
| 134542     | 9                    | 0,11558                      | 0,10537                      | 0,34561                      |
| 134543     | 9                    | 0,11558                      | 0,10537                      | 0,34562                      |
| 134544     | 9                    | 0,11559                      | 0,10537                      | 0,34561                      |
| 134545     | 9                    | 0,11561                      | 0,10537                      | 0,34561                      |
| 134546     | 9                    | 0,11561                      | 0,10538                      | 0,34563                      |
| 134548     | 9                    | 0,11562                      | 0,10537                      | 0,34563                      |
| 134549     | 9                    | 0,11562                      | 0,10538                      | 0,34563                      |
| 134550     | 9                    | 0,11563                      | 0,10538                      | 0,34564                      |
| 134551     | 9                    | 0,11563                      | 0,10539                      | 0,34563                      |
| 134552     | 9                    | 0,11564                      | 0,10538                      | 0,34563                      |
| 134553     | 9                    | 0,11566                      | 0,10538                      | 0,34564                      |
| 134554     | 9                    | 0,11566                      | 0,10539                      | 0,34564                      |
| 134555     | 9                    | 0,11567                      | 0,10538                      | 0,34565                      |
| 134557     | 9                    | 0,11567                      | 0,10538                      | 0,34565                      |
| 134558     | 9                    | 0,11567                      | 0,10539                      | 0,34566                      |
| 134559     | 9                    | 0,11568                      | 0,10539                      | 0,34565                      |
| 134600     | 9                    | 0,11569                      | 0,10539                      | 0,34565                      |
| 134601     | 9                    | 0,1157                       | 0,10539                      | 0,34566                      |
| 134602     | 9                    | 0,1157                       | 0,10539                      | 0,34567                      |
| 134603     | 9                    | 0,11572                      | 0,10539                      | 0,34567                      |
| 134604     | 9                    | 0,11572                      | 0,10539                      | 0,34567                      |
| 134606     | 9                    | 0,11572                      | 0,1054                       | 0,34568                      |
| 134607     | 9                    | 0,11573                      | 0,1054                       | 0,34568                      |
| 134608     | 9                    | 0,11573                      | 0,1054                       | 0,34568                      |
| 134609     | 9                    | 0,11573                      | 0,1054                       | 0,34568                      |
| 134610     | 9                    | 0,11574                      | 0,1054                       | 0,34569                      |
| 134611     | 9                    | 0,11575                      | 0,1054                       | 0,34569                      |
| 134612     | 9                    | 0,11575                      | 0,1054                       | 0,34569                      |
| 134613     | 9                    | 0,11575                      | 0,10539                      | 0,3457                       |
| 134615     | 9                    | 0,11577                      | 0,1054                       | 0,3457                       |
| 134616     | 9                    | 0,11577                      | 0,1054                       | 0,3457                       |
| 134617     | 9                    | 0,11577                      | 0,1054                       | 0,34571                      |
| 134618     | 9                    | 0,11578                      | 0,10541                      | 0,34571                      |
| 134619     | 9                    | 0,11579                      | 0,10541                      | 0,34571                      |
| 134620     | 9                    | 0,11579                      | 0,1054                       | 0,34571                      |
| 134621     | 9                    | 0,1158                       | 0,1054                       | 0,34571                      |
| 134622     | 9                    | 0,1158                       | 0,10541                      | 0,34571                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134624     | 9                    | 0,11581                      | 0,10541                      | 0,34571                      |
| 134625     | 9                    | 0,11581                      | 0,10541                      | 0,34572                      |
| 134626     | 9                    | 0,11582                      | 0,10541                      | 0,34572                      |
| 134627     | 9                    | 0,11583                      | 0,10541                      | 0,34573                      |
| 134628     | 9                    | 0,11583                      | 0,10542                      | 0,34572                      |
| 134629     | 9                    | 0,11583                      | 0,10542                      | 0,34574                      |
| 134630     | 9                    | 0,11584                      | 0,10542                      | 0,34574                      |
| 134631     | 9                    | 0,11584                      | 0,10541                      | 0,34574                      |
| 134633     | 9                    | 0,11585                      | 0,10542                      | 0,34574                      |
| 134634     | 9                    | 0,11586                      | 0,10542                      | 0,34574                      |
| 134635     | 9                    | 0,11586                      | 0,10542                      | 0,34574                      |
| 134636     | 9                    | 0,11586                      | 0,10543                      | 0,34578                      |
| 134637     | 9                    | 0,11598                      | 0,10545                      | 0,34578                      |
| 134638     | 9                    | 0,11606                      | 0,10545                      | 0,34587                      |
| 134639     | 10                   | 0,11606                      | 0,10545                      | 0,34591                      |
| 134640     | 10                   | 0,1161                       | 0,10547                      | 0,34594                      |
| 134642     | 10                   | 0,11614                      | 0,10547                      | 0,34594                      |
| 134643     | 10                   | 0,11614                      | 0,10547                      | 0,34597                      |
| 134644     | 10                   | 0,11618                      | 0,10548                      | 0,34598                      |
| 134645     | 10                   | 0,11621                      | 0,10549                      | 0,34598                      |
| 134646     | 10                   | 0,11624                      | 0,10549                      | 0,346                        |
| 134647     | 10                   | 0,11624                      | 0,10549                      | 0,34601                      |
| 134648     | 10                   | 0,11627                      | 0,10549                      | 0,34601                      |
| 134649     | 10                   | 0,1163                       | 0,10549                      | 0,34602                      |
| 134651     | 10                   | 0,1163                       | 0,1055                       | 0,34604                      |
| 134652     | 10                   | 0,11631                      | 0,1055                       | 0,34605                      |
| 134653     | 10                   | 0,11634                      | 0,1055                       | 0,34605                      |
| 134654     | 10                   | 0,11634                      | 0,1055                       | 0,34607                      |
| 134655     | 10                   | 0,11636                      | 0,1055                       | 0,34608                      |
| 134656     | 10                   | 0,11638                      | 0,1055                       | 0,34608                      |
| 134657     | 10                   | 0,1164                       | 0,1055                       | 0,34609                      |
| 134658     | 10                   | 0,1164                       | 0,10551                      | 0,34611                      |
| 134700     | 10                   | 0,11641                      | 0,10552                      | 0,34611                      |
| 134701     | 10                   | 0,11643                      | 0,10552                      | 0,34612                      |
| 134702     | 10                   | 0,11643                      | 0,10552                      | 0,34613                      |
| 134703     | 10                   | 0,11644                      | 0,10552                      | 0,34614                      |
| 134704     | 10                   | 0,11646                      | 0,10552                      | 0,34614                      |
| 134705     | 10                   | 0,11646                      | 0,10553                      | 0,34615                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134706     | 10                   | 0,11647                      | 0,10553                      | 0,34616                      |
| 134707     | 10                   | 0,11649                      | 0,10553                      | 0,34616                      |
| 134708     | 10                   | 0,1165                       | 0,10553                      | 0,34617                      |
| 134710     | 10                   | 0,1165                       | 0,10553                      | 0,34619                      |
| 134711     | 10                   | 0,11651                      | 0,10553                      | 0,34619                      |
| 134712     | 10                   | 0,11652                      | 0,10553                      | 0,34619                      |
| 134713     | 10                   | 0,11652                      | 0,10554                      | 0,3462                       |
| 134714     | 10                   | 0,11654                      | 0,10554                      | 0,34621                      |
| 134715     | 10                   | 0,11659                      | 0,10554                      | 0,34621                      |
| 134716     | 10                   | 0,11659                      | 0,10556                      | 0,34632                      |
| 134717     | 10                   | 0,11673                      | 0,1056                       | 0,34639                      |
| 134719     | 10                   | 0,11683                      | 0,10561                      | 0,34639                      |
| 134720     | 10                   | 0,11687                      | 0,10561                      | 0,34645                      |
| 134721     | 10                   | 0,11687                      | 0,10562                      | 0,34649                      |
| 134722     | 10                   | 0,11692                      | 0,10563                      | 0,34649                      |
| 134723     | 10                   | 0,11695                      | 0,10563                      | 0,34652                      |
| 134724     | 10                   | 0,11695                      | 0,10564                      | 0,34656                      |
| 134725     | 10                   | 0,11699                      | 0,10564                      | 0,34659                      |
| 134726     | 11                   | 0,11702                      | 0,10564                      | 0,34659                      |
| 134728     | 11                   | 0,11702                      | 0,10565                      | 0,34662                      |
| 134729     | 11                   | 0,11706                      | 0,10566                      | 0,34664                      |
| 134730     | 11                   | 0,1171                       | 0,10567                      | 0,34664                      |
| 134731     | 11                   | 0,11713                      | 0,10567                      | 0,34667                      |
| 134732     | 11                   | 0,11713                      | 0,10567                      | 0,34668                      |
| 134733     | 11                   | 0,11716                      | 0,10568                      | 0,34668                      |
| 134734     | 11                   | 0,11718                      | 0,10568                      | 0,34671                      |
| 134735     | 11                   | 0,11718                      | 0,10569                      | 0,34673                      |
| 134737     | 11                   | 0,11721                      | 0,10569                      | 0,34675                      |
| 134738     | 11                   | 0,11724                      | 0,10569                      | 0,34675                      |
| 134739     | 11                   | 0,11724                      | 0,1057                       | 0,34677                      |
| 134740     | 11                   | 0,11727                      | 0,10571                      | 0,34679                      |
| 134741     | 11                   | 0,11729                      | 0,10571                      | 0,34679                      |
| 134742     | 11                   | 0,11732                      | 0,10571                      | 0,3468                       |
| 134743     | 11                   | 0,11732                      | 0,10573                      | 0,34683                      |
| 134744     | 11                   | 0,11735                      | 0,10573                      | 0,34683                      |
| 134746     | 11                   | 0,11737                      | 0,10573                      | 0,34684                      |
| 134747     | 11                   | 0,11737                      | 0,10574                      | 0,34686                      |
| 134748     | 11                   | 0,11739                      | 0,10574                      | 0,34688                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134749     | 11                   | 0,11742                      | 0,10574                      | 0,34688                      |
| 134750     | 11                   | 0,11742                      | 0,10575                      | 0,3469                       |
| 134751     | 11                   | 0,11744                      | 0,10575                      | 0,34691                      |
| 134752     | 11                   | 0,11746                      | 0,10576                      | 0,34691                      |
| 134753     | 11                   | 0,11748                      | 0,10576                      | 0,34693                      |
| 134755     | 11                   | 0,11748                      | 0,10576                      | 0,34694                      |
| 134756     | 11                   | 0,11751                      | 0,10576                      | 0,34694                      |
| 134757     | 11                   | 0,11753                      | 0,10576                      | 0,34695                      |
| 134758     | 11                   | 0,11753                      | 0,10577                      | 0,34696                      |
| 134759     | 11                   | 0,11755                      | 0,10577                      | 0,34698                      |
| 134800     | 11                   | 0,11758                      | 0,10578                      | 0,34698                      |
| 134801     | 11                   | 0,11758                      | 0,10578                      | 0,347                        |
| 134802     | 11                   | 0,11759                      | 0,10578                      | 0,34702                      |
| 134804     | 11                   | 0,11761                      | 0,10578                      | 0,34702                      |
| 134805     | 11                   | 0,11762                      | 0,10578                      | 0,34702                      |
| 134806     | 11                   | 0,11762                      | 0,1058                       | 0,34703                      |
| 134807     | 11                   | 0,11764                      | 0,10579                      | 0,34703                      |
| 134808     | 11                   | 0,11765                      | 0,10579                      | 0,34704                      |
| 134809     | 11                   | 0,11765                      | 0,10579                      | 0,34704                      |
| 134810     | 11                   | 0,11766                      | 0,1058                       | 0,34704                      |
| 134811     | 11                   | 0,11767                      | 0,1058                       | 0,34704                      |
| 134813     | 11                   | 0,11767                      | 0,1058                       | 0,34706                      |
| 134814     | 11                   | 0,11769                      | 0,1058                       | 0,34707                      |
| 134815     | 11                   | 0,11771                      | 0,10581                      | 0,34707                      |
| 134816     | 11                   | 0,11772                      | 0,10581                      | 0,34708                      |
| 134817     | 11                   | 0,11772                      | 0,10581                      | 0,34709                      |
| 134818     | 11                   | 0,11772                      | 0,10582                      | 0,34709                      |
| 134819     | 11                   | 0,11775                      | 0,10582                      | 0,3471                       |
| 134820     | 11                   | 0,11775                      | 0,10582                      | 0,34711                      |
| 134821     | 11                   | 0,11776                      | 0,10582                      | 0,34712                      |
| 134823     | 11                   | 0,11777                      | 0,10582                      | 0,34712                      |
| 134824     | 11                   | 0,11777                      | 0,10583                      | 0,34713                      |
| 134825     | 11                   | 0,11779                      | 0,10584                      | 0,34714                      |
| 134826     | 11                   | 0,11781                      | 0,10583                      | 0,34714                      |
| 134827     | 11                   | 0,11782                      | 0,10583                      | 0,34715                      |
| 134828     | 11                   | 0,11782                      | 0,10584                      | 0,34717                      |
| 134829     | 12                   | 0,11786                      | 0,10586                      | 0,34717                      |
| 134830     | 12                   | 0,11804                      | 0,10586                      | 0,34727                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134832     | 12                   | 0,11804                      | 0,10591                      | 0,34736                      |
| 134833     | 12                   | 0,11813                      | 0,1059                       | 0,34741                      |
| 134834     | 12                   | 0,1182                       | 0,1059                       | 0,34741                      |
| 134835     | 12                   | 0,1182                       | 0,10592                      | 0,34745                      |
| 134836     | 12                   | 0,11824                      | 0,10593                      | 0,34749                      |
| 134837     | 12                   | 0,11831                      | 0,10594                      | 0,34749                      |
| 134838     | 12                   | 0,11835                      | 0,10594                      | 0,34752                      |
| 134839     | 12                   | 0,11835                      | 0,10595                      | 0,34755                      |
| 134841     | 12                   | 0,1184                       | 0,10596                      | 0,34755                      |
| 134842     | 12                   | 0,11844                      | 0,10596                      | 0,34756                      |
| 134843     | 12                   | 0,11844                      | 0,10598                      | 0,3476                       |
| 134844     | 12                   | 0,11863                      | 0,10603                      | 0,3478                       |
| 134845     | 12                   | 0,11879                      | 0,10603                      | 0,3478                       |
| 134846     | 12                   | 0,11879                      | 0,10607                      | 0,3479                       |
| 134847     | 12                   | 0,11891                      | 0,1061                       | 0,34797                      |
| 134848     | 13                   | 0,119                        | 0,10611                      | 0,34797                      |
| 134850     | 13                   | 0,11908                      | 0,10611                      | 0,34803                      |
| 134851     | 13                   | 0,11908                      | 0,10613                      | 0,34808                      |
| 134852     | 13                   | 0,11916                      | 0,10616                      | 0,34808                      |
| 134853     | 13                   | 0,11923                      | 0,10616                      | 0,34812                      |
| 134854     | 13                   | 0,11923                      | 0,10617                      | 0,34814                      |
| 134855     | 13                   | 0,1193                       | 0,10617                      | 0,34818                      |
| 134856     | 13                   | 0,11933                      | 0,10617                      | 0,34818                      |
| 134857     | 13                   | 0,11933                      | 0,10618                      | 0,34821                      |
| 134859     | 13                   | 0,11939                      | 0,1062                       | 0,34824                      |
| 134900     | 13                   | 0,11943                      | 0,1062                       | 0,34824                      |
| 134901     | 13                   | 0,11946                      | 0,1062                       | 0,34827                      |
| 134902     | 13                   | 0,11946                      | 0,10622                      | 0,3483                       |
| 134903     | 13                   | 0,11949                      | 0,10623                      | 0,3483                       |
| 134904     | 13                   | 0,11953                      | 0,10623                      | 0,34832                      |
| 134905     | 13                   | 0,11953                      | 0,10622                      | 0,34835                      |
| 134906     | 13                   | 0,11956                      | 0,10623                      | 0,34837                      |
| 134907     | 13                   | 0,1196                       | 0,10623                      | 0,34837                      |
| 134909     | 13                   | 0,1196                       | 0,10626                      | 0,34839                      |
| 134910     | 13                   | 0,11963                      | 0,10624                      | 0,34841                      |
| 134911     | 13                   | 0,11971                      | 0,10628                      | 0,34841                      |
| 134912     | 13                   | 0,11993                      | 0,10628                      | 0,34855                      |
| 134913     | 13                   | 0,11993                      | 0,10632                      | 0,34865                      |



| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134914     | 14                   | 0,12006                      | 0,10634                      | 0,34865                      |
| 134915     | 14                   | 0,12016                      | 0,10634                      | 0,34872                      |
| 134916     | 14                   | 0,12016                      | 0,10636                      | 0,34877                      |
| 134918     | 14                   | 0,12024                      | 0,10637                      | 0,34881                      |
| 134919     | 14                   | 0,12031                      | 0,10637                      | 0,34881                      |
| 134920     | 14                   | 0,12031                      | 0,10639                      | 0,34885                      |
| 134921     | 14                   | 0,12037                      | 0,10639                      | 0,34889                      |
| 134922     | 14                   | 0,12044                      | 0,1064                       | 0,34889                      |
| 134923     | 14                   | 0,12049                      | 0,1064                       | 0,34891                      |
| 134924     | 14                   | 0,12049                      | 0,10641                      | 0,34895                      |
| 134925     | 14                   | 0,12053                      | 0,10642                      | 0,34895                      |
| 134927     | 14                   | 0,12058                      | 0,10642                      | 0,34898                      |
| 134928     | 14                   | 0,12058                      | 0,10643                      | 0,34905                      |
| 134929     | 14                   | 0,12086                      | 0,10649                      | 0,34923                      |
| 134930     | 14                   | 0,12106                      | 0,10649                      | 0,34923                      |
| 134931     | 15                   | 0,12106                      | 0,10652                      | 0,34934                      |
| 134932     | 15                   | 0,12119                      | 0,10655                      | 0,34942                      |
| 134933     | 15                   | 0,1213                       | 0,10658                      | 0,34942                      |
| 134934     | 15                   | 0,12139                      | 0,10658                      | 0,34951                      |
| 134936     | 15                   | 0,12139                      | 0,1066                       | 0,34957                      |
| 134937     | 15                   | 0,12149                      | 0,10661                      | 0,34957                      |
| 134938     | 15                   | 0,12156                      | 0,10661                      | 0,34963                      |
| 134939     | 15                   | 0,12156                      | 0,10662                      | 0,34969                      |
| 134940     | 15                   | 0,12162                      | 0,10663                      | 0,34972                      |
| 134941     | 15                   | 0,12168                      | 0,10663                      | 0,34972                      |
| 134942     | 15                   | 0,12168                      | 0,10664                      | 0,34977                      |
| 134943     | 15                   | 0,12172                      | 0,10663                      | 0,34982                      |
| 134945     | 15                   | 0,12173                      | 0,10665                      | 0,34982                      |
| 134946     | 15                   | 0,12159                      | 0,10665                      | 0,34986                      |
| 134947     | 15                   | 0,12159                      | 0,10665                      | 0,34989                      |
| 134948     | 15                   | 0,12152                      | 0,10665                      | 0,34989                      |
| 134949     | 15                   | 0,12148                      | 0,10665                      | 0,34992                      |
| 134950     | 15                   | 0,12148                      | 0,10667                      | 0,34994                      |
| 134951     | 15                   | 0,12127                      | 0,10665                      | 0,34997                      |
| 134952     | 15                   | 0,12125                      | 0,1067                       | 0,34997                      |
| 134954     | 15                   | 0,12125                      | 0,1067                       | 0,35013                      |
| 134955     | 15                   | 0,12145                      | 0,10673                      | 0,35029                      |
| 134956     | 15                   | 0,12154                      | 0,10674                      | 0,35029                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 134957     | 15                   | 0,12162                      | 0,10674                      | 0,35039                      |
| 134958     | 15                   | 0,12162                      | 0,10676                      | 0,35046                      |
| 134959     | 16                   | 0,12171                      | 0,10678                      | 0,35046                      |
| 135000     | 16                   | 0,12175                      | 0,10678                      | 0,35053                      |
| 135001     | 16                   | 0,12175                      | 0,10679                      | 0,35059                      |
| 135003     | 16                   | 0,12183                      | 0,1068                       | 0,35065                      |
| 135004     | 16                   | 0,12184                      | 0,10681                      | 0,35065                      |
| 135005     | 16                   | 0,12184                      | 0,10681                      | 0,3507                       |
| 135006     | 16                   | 0,12188                      | 0,10682                      | 0,35075                      |
| 135007     | 16                   | 0,12191                      | 0,10683                      | 0,35075                      |
| 135008     | 16                   | 0,12193                      | 0,10683                      | 0,35078                      |
| 135009     | 16                   | 0,12193                      | 0,10683                      | 0,35083                      |
| 135010     | 16                   | 0,12193                      | 0,10684                      | 0,35083                      |
| 135012     | 16                   | 0,12194                      | 0,10684                      | 0,35087                      |
| 135013     | 16                   | 0,12194                      | 0,10685                      | 0,35089                      |
| 135014     | 16                   | 0,12195                      | 0,10685                      | 0,35094                      |
| 135015     | 16                   | 0,12196                      | 0,10686                      | 0,35094                      |
| 135016     | 16                   | 0,12196                      | 0,10686                      | 0,35097                      |
| 135017     | 16                   | 0,12197                      | 0,10686                      | 0,35103                      |
| 135018     | 16                   | 0,12199                      | 0,10689                      | 0,35103                      |
| 135019     | 16                   | 0,122                        | 0,10689                      | 0,35105                      |
| 135021     | 17                   | 0,122                        | 0,10686                      | 0,35108                      |
| 135022     | 17                   | 0,12207                      | 0,10687                      | 0,35108                      |
| 135023     | 17                   | 0,12226                      | 0,10687                      | 0,35125                      |
| 135024     | 17                   | 0,12226                      | 0,10689                      | 0,3514                       |
| 135025     | 17                   | 0,12233                      | 0,10694                      | 0,35149                      |
| 135026     | 17                   | 0,12205                      | 0,10692                      | 0,35149                      |
| 135027     | 17                   | 0,12205                      | 0,10692                      | 0,35155                      |
| 135028     | 17                   | 0,12177                      | 0,10692                      | 0,3516                       |
| 135030     | 17                   | 0,12167                      | 0,10693                      | 0,3516                       |
| 135031     | 17                   | 0,12166                      | 0,10693                      | 0,35166                      |
| 135032     | 17                   | 0,12166                      | 0,107                        | 0,3517                       |
| 135033     | 17                   | 0,12164                      | 0,10695                      | 0,3517                       |
| 135034     | 17                   | 0,12166                      | 0,10695                      | 0,35174                      |
| 135035     | 17                   | 0,12166                      | 0,10699                      | 0,35178                      |
| 135036     | 17                   | 0,12165                      | 0,10697                      | 0,35181                      |
| 135037     | 17                   | 0,12163                      | 0,10698                      | 0,35181                      |
| 135038     | 17                   | 0,12163                      | 0,10698                      | 0,35185                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135040     | 17                   | 0,1216                       | 0,10698                      | 0,35187                      |
| 135041     | 17                   | 0,12159                      | 0,1069                       | 0,35187                      |
| 135042     | 17                   | 0,12176                      | 0,1069                       | 0,35194                      |
| 135043     | 17                   | 0,12176                      | 0,10689                      | 0,35215                      |
| 135044     | 17                   | 0,12179                      | 0,10689                      | 0,35215                      |
| 135045     | 17                   | 0,12178                      | 0,10689                      | 0,35225                      |
| 135046     | 17                   | 0,12178                      | 0,1069                       | 0,35231                      |
| 135047     | 17                   | 0,12177                      | 0,10691                      | 0,35237                      |
| 135049     | 18                   | 0,12181                      | 0,10691                      | 0,35237                      |
| 135050     | 18                   | 0,12181                      | 0,10691                      | 0,35243                      |
| 135051     | 18                   | 0,12186                      | 0,10693                      | 0,35246                      |
| 135052     | 18                   | 0,12191                      | 0,10694                      | 0,35246                      |
| 135053     | 18                   | 0,1219                       | 0,10694                      | 0,35251                      |
| 135054     | 18                   | 0,1219                       | 0,10694                      | 0,35255                      |
| 135055     | 18                   | 0,1219                       | 0,107                        | 0,35255                      |
| 135056     | 18                   | 0,12193                      | 0,107                        | 0,35259                      |
| 135058     | 18                   | 0,12193                      | 0,10706                      | 0,35265                      |
| 135059     | 18                   | 0,12199                      | 0,10712                      | 0,35271                      |
| 135100     | 18                   | 0,12202                      | 0,10716                      | 0,35271                      |
| 135101     | 18                   | 0,12202                      | 0,10716                      | 0,35277                      |
| 135102     | 18                   | 0,1221                       | 0,10721                      | 0,35285                      |
| 135103     | 18                   | 0,12216                      | 0,10727                      | 0,35285                      |
| 135104     | 18                   | 0,12224                      | 0,10727                      | 0,35294                      |
| 135105     | 18                   | 0,12224                      | 0,10769                      | 0,35346                      |
| 135107     | 18                   | 0,12241                      | 0,10783                      | 0,35346                      |
| 135108     | 18                   | 0,12252                      | 0,10783                      | 0,35369                      |
| 135109     | 18                   | 0,12252                      | 0,10792                      | 0,35384                      |
| 135110     | 18                   | 0,12257                      | 0,10798                      | 0,35399                      |
| 135111     | 18                   | 0,1226                       | 0,10804                      | 0,35399                      |
| 135112     | 18                   | 0,1226                       | 0,10804                      | 0,35412                      |
| 135113     | 18                   | 0,12257                      | 0,10809                      | 0,35421                      |
| 135114     | 18                   | 0,12259                      | 0,10813                      | 0,35421                      |
| 135116     | 18                   | 0,12268                      | 0,10813                      | 0,3543                       |
| 135117     | 18                   | 0,12268                      | 0,10823                      | 0,35464                      |
| 135118     | 18                   | 0,12288                      | 0,10837                      | 0,35464                      |
| 135119     | 18                   | 0,12295                      | 0,10837                      | 0,35491                      |
| 135120     | 18                   | 0,12295                      | 0,10846                      | 0,35519                      |
| 135121     | 19                   | 0,12307                      | 0,10854                      | 0,35538                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135122     | 19                   | 0,1232                       | 0,10858                      | 0,35538                      |
| 135123     | 19                   | 0,1232                       | 0,10858                      | 0,35553                      |
| 135125     | 19                   | 0,12328                      | 0,10858                      | 0,35565                      |
| 135126     | 19                   | 0,12329                      | 0,1086                       | 0,35565                      |
| 135127     | 19                   | 0,12339                      | 0,1086                       | 0,35576                      |
| 135128     | 19                   | 0,12339                      | 0,10862                      | 0,35585                      |
| 135129     | 19                   | 0,1235                       | 0,10865                      | 0,35585                      |
| 135130     | 19                   | 0,12357                      | 0,10865                      | 0,35593                      |
| 135131     | 19                   | 0,12357                      | 0,10867                      | 0,35602                      |
| 135132     | 19                   | 0,12365                      | 0,1087                       | 0,35611                      |
| 135134     | 19                   | 0,12372                      | 0,10872                      | 0,35611                      |
| 135135     | 19                   | 0,12372                      | 0,10872                      | 0,35618                      |
| 135136     | 19                   | 0,12369                      | 0,10875                      | 0,35624                      |
| 135137     | 19                   | 0,12372                      | 0,10878                      | 0,35624                      |
| 135138     | 19                   | 0,12376                      | 0,10878                      | 0,35631                      |
| 135139     | 19                   | 0,12376                      | 0,10881                      | 0,35636                      |
| 135140     | 19                   | 0,1238                       | 0,10883                      | 0,35636                      |
| 135141     | 19                   | 0,12385                      | 0,10883                      | 0,3564                       |
| 135143     | 19                   | 0,12385                      | 0,10885                      | 0,35644                      |
| 135144     | 19                   | 0,12389                      | 0,10887                      | 0,3565                       |
| 135145     | 19                   | 0,12394                      | 0,10887                      | 0,3565                       |
| 135146     | 19                   | 0,12394                      | 0,10887                      | 0,35655                      |
| 135147     | 19                   | 0,1242                       | 0,10898                      | 0,35684                      |
| 135148     | 19                   | 0,12439                      | 0,10909                      | 0,35684                      |
| 135149     | 19                   | 0,12446                      | 0,10909                      | 0,35702                      |
| 135150     | 20                   | 0,12446                      | 0,10914                      | 0,35715                      |
| 135151     | 20                   | 0,12445                      | 0,10918                      | 0,35715                      |
| 135153     | 20                   | 0,1245                       | 0,10918                      | 0,35724                      |
| 135154     | 20                   | 0,1245                       | 0,10923                      | 0,3573                       |
| 135155     | 20                   | 0,12453                      | 0,10928                      | 0,35735                      |
| 135156     | 20                   | 0,12456                      | 0,10929                      | 0,35735                      |
| 135157     | 20                   | 0,12456                      | 0,10929                      | 0,35742                      |
| 135158     | 20                   | 0,12459                      | 0,10931                      | 0,35748                      |
| 135159     | 20                   | 0,12462                      | 0,10933                      | 0,35748                      |
| 135200     | 20                   | 0,12469                      | 0,10933                      | 0,35754                      |
| 135202     | 20                   | 0,12469                      | 0,10937                      | 0,35759                      |
| 135203     | 20                   | 0,12477                      | 0,10938                      | 0,35759                      |
| 135204     | 20                   | 0,12482                      | 0,10938                      | 0,35764                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135205     | 20                   | 0,12482                      | 0,1094                       | 0,35767                      |
| 135206     | 20                   | 0,12486                      | 0,10943                      | 0,35772                      |
| 135207     | 20                   | 0,12492                      | 0,10944                      | 0,35772                      |
| 135208     | 20                   | 0,12492                      | 0,10944                      | 0,35776                      |
| 135209     | 20                   | 0,12497                      | 0,10949                      | 0,35779                      |
| 135211     | 20                   | 0,12501                      | 0,10949                      | 0,35779                      |
| 135212     | 20                   | 0,12506                      | 0,10949                      | 0,35783                      |
| 135213     | 20                   | 0,12506                      | 0,10951                      | 0,35787                      |
| 135214     | 20                   | 0,12511                      | 0,10952                      | 0,35787                      |
| 135215     | 20                   | 0,12514                      | 0,10952                      | 0,3579                       |
| 135216     | 20                   | 0,12514                      | 0,10955                      | 0,35793                      |
| 135217     | 20                   | 0,12517                      | 0,10955                      | 0,35797                      |
| 135218     | 20                   | 0,12519                      | 0,10956                      | 0,35797                      |
| 135220     | 20                   | 0,12519                      | 0,10956                      | 0,358                        |
| 135221     | 20                   | 0,12524                      | 0,10957                      | 0,35803                      |
| 135222     | 20                   | 0,12528                      | 0,10958                      | 0,35803                      |
| 135223     | 20                   | 0,12533                      | 0,10958                      | 0,35805                      |
| 135224     | 20                   | 0,12533                      | 0,10959                      | 0,35808                      |
| 135225     | 20                   | 0,12538                      | 0,10961                      | 0,35811                      |
| 135226     | 20                   | 0,12539                      | 0,10961                      | 0,35811                      |
| 135227     | 20                   | 0,12539                      | 0,10962                      | 0,35814                      |
| 135229     | 20                   | 0,12541                      | 0,10964                      | 0,35816                      |
| 135230     | 20                   | 0,12544                      | 0,10966                      | 0,35816                      |
| 135231     | 20                   | 0,12547                      | 0,10966                      | 0,35819                      |
| 135232     | 20                   | 0,12547                      | 0,10967                      | 0,35822                      |
| 135233     | 20                   | 0,1255                       | 0,10969                      | 0,35822                      |
| 135234     | 20                   | 0,12552                      | 0,10969                      | 0,35824                      |
| 135235     | 20                   | 0,12552                      | 0,10971                      | 0,35826                      |
| 135236     | 20                   | 0,12555                      | 0,10972                      | 0,35829                      |
| 135238     | 20                   | 0,12569                      | 0,10972                      | 0,35829                      |
| 135239     | 20                   | 0,12569                      | 0,10976                      | 0,35845                      |
| 135240     | 20                   | 0,12592                      | 0,10986                      | 0,35858                      |
| 135241     | 21                   | 0,12604                      | 0,10993                      | 0,35858                      |
| 135242     | 21                   | 0,12609                      | 0,10993                      | 0,35867                      |
| 135243     | 21                   | 0,12609                      | 0,10998                      | 0,35875                      |
| 135244     | 21                   | 0,12613                      | 0,11002                      | 0,35875                      |
| 135245     | 21                   | 0,12618                      | 0,11002                      | 0,35881                      |
| 135247     | 21                   | 0,12618                      | 0,11005                      | 0,35888                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135248     | 21                   | 0,12622                      | 0,11009                      | 0,35894                      |
| 135249     | 21                   | 0,12627                      | 0,11009                      | 0,35894                      |
| 135250     | 21                   | 0,12627                      | 0,11011                      | 0,35899                      |
| 135251     | 21                   | 0,12631                      | 0,11014                      | 0,35904                      |
| 135252     | 21                   | 0,12635                      | 0,11016                      | 0,35904                      |
| 135253     | 21                   | 0,12638                      | 0,11016                      | 0,35909                      |
| 135254     | 21                   | 0,12638                      | 0,11018                      | 0,35913                      |
| 135256     | 21                   | 0,12643                      | 0,11021                      | 0,35913                      |
| 135257     | 21                   | 0,12647                      | 0,11021                      | 0,35918                      |
| 135258     | 21                   | 0,12647                      | 0,11023                      | 0,35922                      |
| 135259     | 21                   | 0,1265                       | 0,11023                      | 0,35926                      |
| 135300     | 21                   | 0,12655                      | 0,11023                      | 0,35926                      |
| 135301     | 21                   | 0,12655                      | 0,11025                      | 0,3593                       |
| 135302     | 21                   | 0,12658                      | 0,11027                      | 0,35934                      |
| 135303     | 21                   | 0,12662                      | 0,11028                      | 0,35934                      |
| 135305     | 21                   | 0,12668                      | 0,11028                      | 0,35938                      |
| 135306     | 21                   | 0,12668                      | 0,11032                      | 0,35957                      |
| 135307     | 21                   | 0,12697                      | 0,11042                      | 0,35957                      |
| 135308     | 22                   | 0,12707                      | 0,11042                      | 0,35973                      |
| 135309     | 22                   | 0,12707                      | 0,1105                       | 0,35988                      |
| 135310     | 22                   | 0,12719                      | 0,11054                      | 0,35998                      |
| 135311     | 22                   | 0,12727                      | 0,11054                      | 0,35998                      |
| 135312     | 22                   | 0,12727                      | 0,11058                      | 0,36005                      |
| 135313     | 22                   | 0,12739                      | 0,11061                      | 0,36012                      |
| 135315     | 22                   | 0,12745                      | 0,11063                      | 0,36012                      |
| 135316     | 22                   | 0,12751                      | 0,11063                      | 0,36018                      |
| 135317     | 22                   | 0,12751                      | 0,11067                      | 0,36022                      |
| 135318     | 22                   | 0,12759                      | 0,11069                      | 0,36022                      |
| 135319     | 22                   | 0,12764                      | 0,11069                      | 0,36027                      |
| 135320     | 22                   | 0,12764                      | 0,11071                      | 0,36031                      |
| 135321     | 22                   | 0,12769                      | 0,11072                      | 0,36036                      |
| 135322     | 22                   | 0,12773                      | 0,11072                      | 0,36036                      |
| 135324     | 22                   | 0,12773                      | 0,11074                      | 0,36039                      |
| 135325     | 22                   | 0,12773                      | 0,11075                      | 0,36042                      |
| 135326     | 22                   | 0,12746                      | 0,11077                      | 0,36042                      |
| 135327     | 23                   | 0,12725                      | 0,11077                      | 0,36045                      |
| 135328     | 23                   | 0,12725                      | 0,11079                      | 0,36049                      |
| 135329     | 23                   | 0,1272                       | 0,1108                       | 0,36049                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135330     | 23                   | 0,12729                      | 0,1108                       | 0,36051                      |
| 135331     | 23                   | 0,12729                      | 0,11086                      | 0,36072                      |
| 135333     | 23                   | 0,12735                      | 0,11093                      | 0,36085                      |
| 135334     | 23                   | 0,12738                      | 0,11093                      | 0,36085                      |
| 135335     | 23                   | 0,12738                      | 0,11099                      | 0,36097                      |
| 135336     | 23                   | 0,12743                      | 0,11103                      | 0,36104                      |
| 135337     | 23                   | 0,12747                      | 0,11109                      | 0,36104                      |
| 135338     | 23                   | 0,12748                      | 0,11109                      | 0,36112                      |
| 135339     | 23                   | 0,12748                      | 0,11111                      | 0,36118                      |
| 135340     | 23                   | 0,12744                      | 0,11114                      | 0,36118                      |
| 135342     | 23                   | 0,12744                      | 0,11114                      | 0,36123                      |
| 135343     | 23                   | 0,12744                      | 0,11117                      | 0,36129                      |
| 135344     | 23                   | 0,12747                      | 0,11118                      | 0,36133                      |
| 135345     | 23                   | 0,12748                      | 0,11118                      | 0,36133                      |
| 135346     | 23                   | 0,12748                      | 0,1112                       | 0,36136                      |
| 135347     | 23                   | 0,12749                      | 0,11121                      | 0,36138                      |
| 135348     | 23                   | 0,12745                      | 0,11126                      | 0,36138                      |
| 135349     | 23                   | 0,12743                      | 0,11126                      | 0,36141                      |
| 135351     | 23                   | 0,12743                      | 0,11126                      | 0,36145                      |
| 135352     | 23                   | 0,12737                      | 0,11128                      | 0,36145                      |
| 135353     | 23                   | 0,12736                      | 0,11128                      | 0,36147                      |
| 135354     | 23                   | 0,12736                      | 0,11129                      | 0,36151                      |
| 135355     | 23                   | 0,12734                      | 0,11131                      | 0,36153                      |
| 135356     | 23                   | 0,12734                      | 0,11131                      | 0,36153                      |
| 135357     | 23                   | 0,12734                      | 0,11131                      | 0,36156                      |
| 135358     | 23                   | 0,12733                      | 0,11134                      | 0,36161                      |
| 135400     | 23                   | 0,12732                      | 0,11135                      | 0,36161                      |
| 135401     | 23                   | 0,1273                       | 0,11135                      | 0,36164                      |
| 135402     | 23                   | 0,1273                       | 0,11137                      | 0,36166                      |
| 135403     | 23                   | 0,1273                       | 0,11139                      | 0,36166                      |
| 135404     | 23                   | 0,12731                      | 0,11139                      | 0,36169                      |
| 135405     | 23                   | 0,12731                      | 0,1114                       | 0,36171                      |
| 135406     | 23                   | 0,1273                       | 0,11141                      | 0,36174                      |
| 135407     | 23                   | 0,12731                      | 0,11141                      | 0,36174                      |
| 135409     | 23                   | 0,12731                      | 0,11143                      | 0,36177                      |
| 135410     | 23                   | 0,12732                      | 0,11145                      | 0,3618                       |
| 135411     | 23                   | 0,12733                      | 0,11146                      | 0,3618                       |
| 135412     | 23                   | 0,12736                      | 0,11146                      | 0,36183                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135413     | 23                   | 0,12736                      | 0,11148                      | 0,36185                      |
| 135414     | 23                   | 0,12737                      | 0,11149                      | 0,36185                      |
| 135415     | 23                   | 0,12754                      | 0,11149                      | 0,36189                      |
| 135416     | 23                   | 0,12754                      | 0,11154                      | 0,3621                       |
| 135418     | 23                   | 0,12768                      | 0,11161                      | 0,36223                      |
| 135419     | 23                   | 0,12777                      | 0,11161                      | 0,36223                      |
| 135420     | 24                   | 0,12777                      | 0,11167                      | 0,36232                      |
| 135421     | 24                   | 0,12781                      | 0,11172                      | 0,3624                       |
| 135422     | 24                   | 0,12785                      | 0,11175                      | 0,3624                       |
| 135423     | 24                   | 0,12786                      | 0,11175                      | 0,36248                      |
| 135424     | 24                   | 0,12786                      | 0,11178                      | 0,36253                      |
| 135425     | 24                   | 0,1279                       | 0,11182                      | 0,36253                      |
| 135427     | 24                   | 0,12792                      | 0,11182                      | 0,36258                      |
| 135428     | 24                   | 0,12792                      | 0,11184                      | 0,36262                      |
| 135429     | 24                   | 0,12796                      | 0,11185                      | 0,36267                      |
| 135430     | 24                   | 0,12799                      | 0,11185                      | 0,36267                      |
| 135431     | 24                   | 0,12799                      | 0,11188                      | 0,36272                      |
| 135432     | 24                   | 0,12802                      | 0,1119                       | 0,36276                      |
| 135433     | 24                   | 0,12806                      | 0,11192                      | 0,36276                      |
| 135434     | 25                   | 0,1281                       | 0,11192                      | 0,36279                      |
| 135435     | 25                   | 0,1281                       | 0,11194                      | 0,36282                      |
| 135438     | 25                   | 0,12842                      | 0,112                        | 0,36305                      |
| 135439     | 25                   | 0,12842                      | 0,11209                      | 0,36322                      |
| 135440     | 25                   | 0,12848                      | 0,11214                      | 0,36334                      |
| 135441     | 25                   | 0,12852                      | 0,11214                      | 0,36334                      |
| 135442     | 25                   | 0,12852                      | 0,11218                      | 0,36344                      |
| 135443     | 25                   | 0,12858                      | 0,11222                      | 0,36352                      |
| 135444     | 25                   | 0,12864                      | 0,11226                      | 0,36352                      |
| 135446     | 25                   | 0,12867                      | 0,11226                      | 0,36359                      |
| 135447     | 25                   | 0,12867                      | 0,11228                      | 0,36364                      |
| 135448     | 25                   | 0,12872                      | 0,11229                      | 0,36364                      |
| 135449     | 25                   | 0,12872                      | 0,11229                      | 0,36369                      |
| 135450     | 25                   | 0,12872                      | 0,11231                      | 0,36373                      |
| 135451     | 25                   | 0,12859                      | 0,11233                      | 0,36377                      |
| 135452     | 25                   | 0,12853                      | 0,11233                      | 0,36377                      |
| 135453     | 25                   | 0,12853                      | 0,11234                      | 0,36381                      |
| 135455     | 25                   | 0,1285                       | 0,11237                      | 0,36385                      |
| 135456     | 25                   | 0,12848                      | 0,11239                      | 0,36385                      |



| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135457     | 25                   | 0,12848                      | 0,11239                      | 0,36388                      |
| 135458     | 25                   | 0,12848                      | 0,11241                      | 0,36391                      |
| 135459     | 25                   | 0,12849                      | 0,11243                      | 0,36391                      |
| 135500     | 25                   | 0,1285                       | 0,11243                      | 0,36395                      |
| 135501     | 25                   | 0,1285                       | 0,11245                      | 0,36397                      |
| 135502     | 25                   | 0,12852                      | 0,11247                      | 0,364                        |
| 135504     | 25                   | 0,12854                      | 0,11247                      | 0,364                        |
| 135505     | 25                   | 0,12854                      | 0,11248                      | 0,36404                      |
| 135506     | 25                   | 0,12857                      | 0,11249                      | 0,36406                      |
| 135507     | 25                   | 0,12858                      | 0,11251                      | 0,36406                      |
| 135508     | 25                   | 0,12858                      | 0,11251                      | 0,36408                      |
| 135509     | 25                   | 0,12858                      | 0,11254                      | 0,3641                       |
| 135510     | 25                   | 0,12861                      | 0,11254                      | 0,3641                       |
| 135511     | 25                   | 0,12861                      | 0,11254                      | 0,36411                      |
| 135513     | 25                   | 0,12861                      | 0,11255                      | 0,36413                      |
| 135514     | 25                   | 0,12861                      | 0,11257                      | 0,36416                      |
| 135515     | 25                   | 0,12863                      | 0,11258                      | 0,36416                      |
| 135516     | 25                   | 0,12863                      | 0,11258                      | 0,36418                      |
| 135517     | 25                   | 0,129                        | 0,11328                      | 0,36638                      |
| 135518     | 30                   | 0,13032                      | 0,11384                      | 0,36638                      |
| 135519     | 30                   | 0,13022                      | 0,11384                      | 0,36733                      |
| 135520     | 30                   | 0,13022                      | 0,11407                      | 0,36776                      |
| 135522     | 30                   | 0,13022                      | 0,11422                      | 0,36776                      |
| 135523     | 30                   | 0,13024                      | 0,11422                      | 0,36808                      |
| 135524     | 30                   | 0,13024                      | 0,11427                      | 0,36832                      |
| 135525     | 30                   | 0,13028                      | 0,11431                      | 0,36849                      |
| 135526     | 30                   | 0,13033                      | 0,11434                      | 0,36849                      |
| 135527     | 30                   | 0,13033                      | 0,11434                      | 0,36859                      |
| 135528     | 30                   | 0,13039                      | 0,11439                      | 0,36867                      |
| 135529     | 30                   | 0,13039                      | 0,11444                      | 0,36867                      |
| 135531     | 30                   | 0,13038                      | 0,11444                      | 0,36874                      |
| 135532     | 30                   | 0,13038                      | 0,11447                      | 0,36881                      |
| 135533     | 30                   | 0,1304                       | 0,11449                      | 0,36881                      |
| 135534     | 30                   | 0,13038                      | 0,11449                      | 0,36886                      |
| 135535     | 30                   | 0,13038                      | 0,11446                      | 0,36889                      |
| 135536     | 30                   | 0,13041                      | 0,11445                      | 0,36894                      |
| 135537     | 30                   | 0,13044                      | 0,11446                      | 0,36894                      |
| 135538     | 30                   | 0,13044                      | 0,11446                      | 0,36899                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135540     | 30                   | 0,13047                      | 0,1145                       | 0,36907                      |
| 135541     | 30                   | 0,13061                      | 0,11528                      | 0,36907                      |
| 135542     | 35                   | 0,13183                      | 0,11528                      | 0,37115                      |
| 135543     | 35                   | 0,13183                      | 0,1157                       | 0,37203                      |
| 135544     | 35                   | 0,13218                      | 0,11579                      | 0,37203                      |
| 135545     | 35                   | 0,13223                      | 0,11579                      | 0,37262                      |
| 135546     | 35                   | 0,13223                      | 0,11589                      | 0,37296                      |
| 135547     | 35                   | 0,13224                      | 0,11595                      | 0,37317                      |
| 135549     | 35                   | 0,13239                      | 0,11601                      | 0,37317                      |
| 135550     | 35                   | 0,13239                      | 0,11601                      | 0,37333                      |
| 135551     | 35                   | 0,13233                      | 0,11606                      | 0,37347                      |
| 135552     | 35                   | 0,1322                       | 0,11609                      | 0,37347                      |
| 135553     | 35                   | 0,13173                      | 0,11609                      | 0,37359                      |
| 135554     | 35                   | 0,13173                      | 0,11612                      | 0,37369                      |
| 135555     | 35                   | 0,13162                      | 0,11617                      | 0,37369                      |
| 135556     | 35                   | 0,13163                      | 0,11617                      | 0,37378                      |
| 135557     | 35                   | 0,13163                      | 0,11619                      | 0,37388                      |
| 135559     | 35                   | 0,13162                      | 0,11623                      | 0,37398                      |
| 135600     | 35                   | 0,13164                      | 0,11625                      | 0,37398                      |
| 135601     | 35                   | 0,13164                      | 0,11625                      | 0,37407                      |
| 135602     | 35                   | 0,13167                      | 0,11625                      | 0,37413                      |
| 135603     | 35                   | 0,13168                      | 0,11626                      | 0,37413                      |
| 135604     | 35                   | 0,13168                      | 0,11626                      | 0,37419                      |
| 135605     | 35                   | 0,13168                      | 0,11628                      | 0,37424                      |
| 135606     | 35                   | 0,13173                      | 0,11632                      | 0,37424                      |
| 135608     | 35                   | 0,13174                      | 0,11632                      | 0,3743                       |
| 135609     | 35                   | 0,13174                      | 0,11634                      | 0,37437                      |
| 135610     | 35                   | 0,1318                       | 0,11637                      | 0,3744                       |
| 135611     | 35                   | 0,13184                      | 0,11639                      | 0,3744                       |
| 135612     | 35                   | 0,13184                      | 0,11639                      | 0,37446                      |
| 135613     | 35                   | 0,13187                      | 0,11642                      | 0,37447                      |
| 135614     | 35                   | 0,1319                       | 0,11643                      | 0,37447                      |
| 135615     | 35                   | 0,13193                      | 0,11643                      | 0,37448                      |
| 135617     | 35                   | 0,13193                      | 0,11643                      | 0,37452                      |
| 135618     | 35                   | 0,13196                      | 0,11644                      | 0,37452                      |
| 135619     | 35                   | 0,13197                      | 0,11644                      | 0,37456                      |
| 135620     | 35                   | 0,13197                      | 0,11647                      | 0,3746                       |
| 135621     | 35                   | 0,13214                      | 0,11723                      | 0,37672                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135622     | 40                   | 0,13342                      | 0,11756                      | 0,37672                      |
| 135623     | 40                   | 0,13342                      | 0,11756                      | 0,3773                       |
| 135624     | 40                   | 0,13333                      | 0,1177                       | 0,37762                      |
| 135626     | 40                   | 0,13328                      | 0,11777                      | 0,37762                      |
| 135627     | 40                   | 0,13293                      | 0,11777                      | 0,37787                      |
| 135628     | 40                   | 0,13293                      | 0,11783                      | 0,37808                      |
| 135629     | 40                   | 0,13277                      | 0,11788                      | 0,37808                      |
| 135630     | 40                   | 0,13272                      | 0,11788                      | 0,37826                      |
| 135631     | 40                   | 0,13272                      | 0,11792                      | 0,37841                      |
| 135632     | 40                   | 0,13266                      | 0,11796                      | 0,37858                      |
| 135633     | 40                   | 0,1325                       | 0,118                        | 0,37858                      |
| 135635     | 40                   | 0,1325                       | 0,118                        | 0,37871                      |
| 135636     | 40                   | 0,13249                      | 0,11799                      | 0,37882                      |
| 135637     | 40                   | 0,13249                      | 0,11802                      | 0,37882                      |
| 135638     | 40                   | 0,13247                      | 0,11802                      | 0,37892                      |
| 135639     | 40                   | 0,13247                      | 0,11802                      | 0,37902                      |
| 135640     | 40                   | 0,13239                      | 0,11805                      | 0,37902                      |
| 135641     | 40                   | 0,1323                       | 0,11805                      | 0,3791                       |
| 135642     | 40                   | 0,1323                       | 0,11804                      | 0,37917                      |
| 135644     | 40                   | 0,13223                      | 0,11806                      | 0,37925                      |
| 135645     | 40                   | 0,13219                      | 0,11805                      | 0,37925                      |
| 135646     | 40                   | 0,13219                      | 0,11805                      | 0,37934                      |
| 135647     | 40                   | 0,13217                      | 0,11808                      | 0,37942                      |
| 135648     | 40                   | 0,13214                      | 0,11809                      | 0,37942                      |
| 135649     | 40                   | 0,13208                      | 0,11809                      | 0,37948                      |
| 135650     | 40                   | 0,13208                      | 0,11861                      | 0,38146                      |
| 135651     | 40                   | 0,13239                      | 0,11898                      | 0,38146                      |
| 135653     | 40                   | 0,13203                      | 0,11898                      | 0,38228                      |
| 135654     | 45                   | 0,13203                      | 0,11908                      | 0,38261                      |
| 135655     | 45                   | 0,13167                      | 0,11909                      | 0,3828                       |
| 135656     | 45                   | 0,13153                      | 0,11909                      | 0,3828                       |
| 135657     | 45                   | 0,13153                      | 0,11909                      | 0,38298                      |
| 135658     | 45                   | 0,13153                      | 0,11911                      | 0,38315                      |
| 135659     | 45                   | 0,13158                      | 0,11911                      | 0,38315                      |
| 135700     | 45                   | 0,13157                      | 0,11911                      | 0,38327                      |
| 135702     | 45                   | 0,13157                      | 0,11913                      | 0,38339                      |
| 135703     | 45                   | 0,13162                      | 0,11911                      | 0,38339                      |
| 135704     | 45                   | 0,1316                       | 0,11911                      | 0,38351                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135705     | 45                   | 0,1316                       | 0,11913                      | 0,38364                      |
| 135706     | 45                   | 0,13157                      | 0,11915                      | 0,38375                      |
| 135707     | 45                   | 0,1316                       | 0,11917                      | 0,38375                      |
| 135708     | 45                   | 0,1316                       | 0,11917                      | 0,38386                      |
| 135709     | 45                   | 0,13161                      | 0,11918                      | 0,38395                      |
| 135710     | 45                   | 0,13162                      | 0,11918                      | 0,38395                      |
| 135712     | 45                   | 0,13166                      | 0,11918                      | 0,38402                      |
| 135713     | 45                   | 0,13166                      | 0,11919                      | 0,38408                      |
| 135714     | 45                   | 0,13169                      | 0,1192                       | 0,38408                      |
| 135715     | 45                   | 0,13178                      | 0,1192                       | 0,38417                      |
| 135716     | 45                   | 0,13178                      | 0,11919                      | 0,38425                      |
| 135717     | 45                   | 0,1318                       | 0,11922                      | 0,38433                      |
| 135718     | 45                   | 0,13177                      | 0,11926                      | 0,38433                      |
| 135719     | 45                   | 0,13177                      | 0,11926                      | 0,38441                      |
| 135721     | 45                   | 0,13166                      | 0,1193                       | 0,38446                      |
| 135722     | 45                   | 0,13159                      | 0,11932                      | 0,38446                      |
| 135723     | 45                   | 0,13159                      | 0,11932                      | 0,38452                      |
| 135724     | 45                   | 0,13159                      | 0,11932                      | 0,38458                      |
| 135725     | 45                   | 0,13156                      | 0,11934                      | 0,38458                      |
| 135726     | 45                   | 0,13167                      | 0,11934                      | 0,38463                      |
| 135727     | 45                   | 0,13167                      | 0,11936                      | 0,38464                      |
| 135728     | 45                   | 0,13175                      | 0,11937                      | 0,38469                      |
| 135730     | 45                   | 0,13172                      | 0,11936                      | 0,38469                      |
| 135731     | 45                   | 0,13172                      | 0,11936                      | 0,38473                      |
| 135732     | 45                   | 0,13169                      | 0,11982                      | 0,38635                      |
| 135733     | 45                   | 0,13192                      | 0,12043                      | 0,38635                      |
| 135734     | 50                   | 0,1318                       | 0,12043                      | 0,38711                      |
| 135735     | 50                   | 0,1318                       | 0,12058                      | 0,38745                      |
| 135736     | 50                   | 0,13168                      | 0,12063                      | 0,38777                      |
| 135737     | 50                   | 0,13168                      | 0,12063                      | 0,38777                      |
| 135739     | 50                   | 0,13168                      | 0,12066                      | 0,38799                      |
| 135740     | 50                   | 0,13169                      | 0,12067                      | 0,38822                      |
| 135741     | 50                   | 0,13166                      | 0,12067                      | 0,38822                      |
| 135742     | 50                   | 0,13145                      | 0,12067                      | 0,38837                      |
| 135743     | 50                   | 0,13145                      | 0,12067                      | 0,38849                      |
| 135744     | 50                   | 0,1312                       | 0,12067                      | 0,38849                      |
| 135745     | 50                   | 0,13115                      | 0,12067                      | 0,38862                      |
| 135746     | 50                   | 0,13115                      | 0,12069                      | 0,38873                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135748     | 50                   | 0,13095                      | 0,12067                      | 0,38883                      |
| 135749     | 50                   | 0,13079                      | 0,12067                      | 0,38883                      |
| 135750     | 50                   | 0,13079                      | 0,12069                      | 0,38892                      |
| 135751     | 50                   | 0,13073                      | 0,12068                      | 0,38902                      |
| 135752     | 50                   | 0,13049                      | 0,12148                      | 0,38902                      |
| 135753     | 55                   | 0,13049                      | 0,12148                      | 0,39106                      |
| 135754     | 55                   | 0,13049                      | 0,1217                       | 0,39167                      |
| 135755     | 55                   | 0,13032                      | 0,12169                      | 0,39167                      |
| 135757     | 55                   | 0,13021                      | 0,12169                      | 0,392                        |
| 135758     | 55                   | 0,13021                      | 0,12161                      | 0,39221                      |
| 135759     | 55                   | 0,13061                      | 0,12159                      | 0,39221                      |
| 135800     | 55                   | 0,13092                      | 0,12159                      | 0,39239                      |
| 135801     | 55                   | 0,13092                      | 0,12158                      | 0,39257                      |
| 135802     | 55                   | 0,13095                      | 0,12159                      | 0,39271                      |
| 135803     | 55                   | 0,13092                      | 0,12157                      | 0,39271                      |
| 135804     | 55                   | 0,13092                      | 0,12157                      | 0,39284                      |
| 135805     | 55                   | 0,13088                      | 0,12156                      | 0,39295                      |
| 135807     | 55                   | 0,13074                      | 0,12157                      | 0,39295                      |
| 135808     | 55                   | 0,13075                      | 0,12157                      | 0,39308                      |
| 135809     | 55                   | 0,13075                      | 0,12158                      | 0,39318                      |
| 135810     | 55                   | 0,13063                      | 0,12238                      | 0,39318                      |
| 135811     | 60                   | 0,13062                      | 0,12238                      | 0,39533                      |
| 135812     | 60                   | 0,13062                      | 0,12256                      | 0,39582                      |
| 135813     | 60                   | 0,13074                      | 0,12259                      | 0,39617                      |
| 135814     | 60                   | 0,13064                      | 0,12259                      | 0,39617                      |
| 135816     | 60                   | 0,13064                      | 0,12259                      | 0,39645                      |
| 135817     | 60                   | 0,13051                      | 0,12257                      | 0,39668                      |
| 135818     | 60                   | 0,13027                      | 0,12258                      | 0,39668                      |
| 135819     | 60                   | 0,13116                      | 0,12258                      | 0,39688                      |
| 135820     | 60                   | 0,13116                      | 0,12258                      | 0,39705                      |
| 135821     | 60                   | 0,13187                      | 0,1226                       | 0,39705                      |
| 135822     | 60                   | 0,13236                      | 0,1226                       | 0,39721                      |
| 135823     | 60                   | 0,13236                      | 0,12259                      | 0,39737                      |
| 135825     | 60                   | 0,13246                      | 0,12257                      | 0,3975                       |
| 135826     | 60                   | 0,13273                      | 0,12278                      | 0,3975                       |
| 135827     | 60                   | 0,13273                      | 0,12278                      | 0,39908                      |
| 135828     | 60                   | 0,13248                      | 0,12323                      | 0,39999                      |
| 135829     | 60                   | 0,1324                       | 0,12327                      | 0,39999                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135830     | 65                   | 0,13241                      | 0,12327                      | 0,40038                      |
| 135831     | 65                   | 0,13241                      | 0,12327                      | 0,40071                      |
| 135832     | 65                   | 0,1321                       | 0,12328                      | 0,40071                      |
| 135834     | 65                   | 0,13193                      | 0,12328                      | 0,40093                      |
| 135835     | 65                   | 0,13193                      | 0,12328                      | 0,40115                      |
| 135836     | 65                   | 0,13201                      | 0,1233                       | 0,40133                      |
| 135837     | 65                   | 0,13207                      | 0,12331                      | 0,40133                      |
| 135838     | 65                   | 0,13207                      | 0,12331                      | 0,4015                       |
| 135839     | 65                   | 0,13216                      | 0,12332                      | 0,40164                      |
| 135840     | 65                   | 0,13209                      | 0,12333                      | 0,40164                      |
| 135841     | 65                   | 0,13197                      | 0,12333                      | 0,4018                       |
| 135843     | 65                   | 0,13197                      | 0,12334                      | 0,40197                      |
| 135844     | 65                   | 0,13185                      | 0,12333                      | 0,40197                      |
| 135845     | 65                   | 0,1317                       | 0,12333                      | 0,40213                      |
| 135846     | 65                   | 0,1317                       | 0,12331                      | 0,40226                      |
| 135847     | 65                   | 0,13186                      | 0,1233                       | 0,40238                      |
| 135848     | 65                   | 0,13176                      | 0,12329                      | 0,40238                      |
| 135849     | 65                   | 0,13176                      | 0,12329                      | 0,40256                      |
| 135850     | 65                   | 0,13094                      | 0,12384                      | 0,40469                      |
| 135852     | 65                   | 0,13031                      | 0,12393                      | 0,40469                      |
| 135853     | 70                   | 0,13034                      | 0,12393                      | 0,40517                      |
| 135854     | 70                   | 0,13034                      | 0,12407                      | 0,40545                      |
| 135855     | 70                   | 0,12999                      | 0,12416                      | 0,40545                      |
| 135856     | 70                   | 0,12946                      | 0,12416                      | 0,40568                      |
| 135857     | 70                   | 0,12946                      | 0,1242                       | 0,40589                      |
| 135858     | 70                   | 0,12951                      | 0,12425                      | 0,4061                       |
| 135859     | 70                   | 0,1293                       | 0,12426                      | 0,4061                       |
| 135901     | 70                   | 0,1293                       | 0,12426                      | 0,40628                      |
| 135902     | 70                   | 0,12921                      | 0,12424                      | 0,40641                      |
| 135903     | 70                   | 0,1289                       | 0,12422                      | 0,40641                      |
| 135904     | 70                   | 0,12898                      | 0,12422                      | 0,40657                      |
| 135905     | 70                   | 0,12898                      | 0,12421                      | 0,4067                       |
| 135906     | 70                   | 0,12902                      | 0,12419                      | 0,4067                       |
| 135907     | 70                   | 0,12893                      | 0,12419                      | 0,40677                      |
| 135908     | 70                   | 0,12893                      | 0,12419                      | 0,40691                      |
| 135910     | 70                   | 0,12867                      | 0,12418                      | 0,40702                      |
| 135911     | 70                   | 0,12857                      | 0,12416                      | 0,40702                      |
| 135912     | 70                   | 0,12857                      | 0,12416                      | 0,40712                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135913     | 70                   | 0,12861                      | 0,12414                      | 0,40723                      |
| 135914     | 70                   | 0,12837                      | 0,12411                      | 0,40723                      |
| 135915     | 70                   | 0,12836                      | 0,12411                      | 0,40733                      |
| 135916     | 70                   | 0,12836                      | 0,1241                       | 0,4074                       |
| 135917     | 75                   | 0,12682                      | 0,12474                      | 0,40913                      |
| 135918     | 75                   | 0,12629                      | 0,12474                      | 0,40913                      |
| 135920     | 75                   | 0,12629                      | 0,1248                       | 0,40955                      |
| 135921     | 75                   | 0,12599                      | 0,12487                      | 0,40984                      |
| 135922     | 75                   | 0,12617                      | 0,12492                      | 0,40984                      |
| 135923     | 75                   | 0,12624                      | 0,12492                      | 0,41011                      |
| 135924     | 75                   | 0,12624                      | 0,12495                      | 0,41033                      |
| 135925     | 75                   | 0,12599                      | 0,12495                      | 0,41033                      |
| 135926     | 75                   | 0,12568                      | 0,12495                      | 0,41053                      |
| 135927     | 75                   | 0,12568                      | 0,12494                      | 0,41071                      |
| 135929     | 75                   | 0,12559                      | 0,12485                      | 0,41088                      |
| 135930     | 75                   | 0,1253                       | 0,12485                      | 0,41088                      |
| 135931     | 75                   | 0,1253                       | 0,12473                      | 0,41101                      |
| 135932     | 75                   | 0,12496                      | 0,12461                      | 0,41111                      |
| 135933     | 75                   | 0,12465                      | 0,12457                      | 0,41111                      |
| 135934     | 75                   | 0,12461                      | 0,12457                      | 0,41126                      |
| 135935     | 75                   | 0,12461                      | 0,12454                      | 0,41139                      |
| 135936     | 75                   | 0,12475                      | 0,12455                      | 0,41139                      |
| 135938     | 75                   | 0,12517                      | 0,12455                      | 0,41152                      |
| 135939     | 75                   | 0,12517                      | 0,12453                      | 0,4116                       |
| 135940     | 75                   | 0,12516                      | 0,12454                      | 0,41168                      |
| 135941     | 75                   | 0,12482                      | 0,12454                      | 0,41168                      |
| 135942     | 75                   | 0,12482                      | 0,12453                      | 0,41176                      |
| 135943     | 75                   | 0,12471                      | 0,12449                      | 0,41182                      |
| 135944     | 75                   | 0,12456                      | 0,12447                      | 0,41182                      |
| 135945     | 75                   | 0,1243                       | 0,12447                      | 0,41191                      |
| 135947     | 75                   | 0,1243                       | 0,12446                      | 0,41199                      |
| 135948     | 75                   | 0,12418                      | 0,12446                      | 0,41199                      |
| 135949     | 75                   | 0,12401                      | 0,12446                      | 0,41207                      |
| 135950     | 75                   | 0,12401                      | 0,12446                      | 0,41213                      |
| 135951     | 75                   | 0,12352                      | 0,12472                      | 0,41301                      |
| 135952     | 75                   | 0,12304                      | 0,12472                      | 0,41301                      |
| 135953     | 75                   | 0,12304                      | 0,12477                      | 0,41342                      |
| 135954     | 75                   | 0,12277                      | 0,1248                       | 0,41363                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 135956     | 75                   | 0,12267                      | 0,12476                      | 0,41363                      |
| 135957     | 78,45                | 0,12275                      | 0,12476                      | 0,41381                      |
| 135958     | 78,45                | 0,12275                      | 0,12475                      | 0,41396                      |
| 135959     | 78,45                | 0,12257                      | 0,12477                      | 0,41396                      |
| 140000     | 78,45                | 0,12219                      | 0,12477                      | 0,41413                      |
| 140001     | 78,45                | 0,12219                      | 0,12478                      | 0,41427                      |
| 140002     | 78,45                | 0,12218                      | 0,12481                      | 0,41442                      |
| 140003     | 78,45                | 0,1219                       | 0,12481                      | 0,41442                      |
| 140005     | 78,45                | 0,1219                       | 0,12482                      | 0,41453                      |
| 140006     | 78,45                | 0,12176                      | 0,12482                      | 0,41463                      |
| 140007     | 78,45                | 0,12191                      | 0,12483                      | 0,41463                      |
| 140008     | 78,45                | 0,12176                      | 0,12483                      | 0,41476                      |
| 140009     | 78,45                | 0,12176                      | 0,12487                      | 0,41488                      |
| 140010     | 78,45                | 0,12154                      | 0,12488                      | 0,41488                      |
| 140011     | 78,45                | 0,12149                      | 0,12488                      | 0,41499                      |
| 140012     | 78,45                | 0,12149                      | 0,12489                      | 0,41509                      |
| 140014     | 78,45                | 0,12152                      | 0,1249                       | 0,41518                      |
| 140015     | 78,45                | 0,12132                      | 0,1249                       | 0,41518                      |
| 140016     | 78,45                | 0,12132                      | 0,12489                      | 0,41527                      |
| 140017     | 78,45                | 0,12108                      | 0,1249                       | 0,41534                      |
| 140018     | 78,45                | 0,12092                      | 0,12492                      | 0,41534                      |
| 140019     | 78,45                | 0,12024                      | 0,12492                      | 0,41563                      |
| 140020     | 78,45                | 0,12024                      | 0,12506                      | 0,41592                      |
| 140021     | 78,45                | 0,12003                      | 0,12513                      | 0,41592                      |
| 140023     | 78,45                | 0,11992                      | 0,12513                      | 0,41607                      |
| 140024     | 78,45                | 0,11992                      | 0,12512                      | 0,41619                      |
| 140025     | 78,45                | 0,11976                      | 0,12513                      | 0,41631                      |
| 140026     | 78,45                | 0,12018                      | 0,12513                      | 0,41631                      |
| 140027     | 78,45                | 0,12018                      | 0,12515                      | 0,41641                      |
| 140028     | 78,45                | 0,12033                      | 0,12515                      | 0,41652                      |
| 140029     | 78,45                | 0,12031                      | 0,12517                      | 0,41652                      |
| 140030     | 78,45                | 0,12025                      | 0,12517                      | 0,41661                      |
| 140032     | 78,45                | 0,12025                      | 0,12517                      | 0,41672                      |
| 140033     | 78,45                | 0,12012                      | 0,12518                      | 0,41672                      |
| 140034     | 80                   | 0,11994                      | 0,12518                      | 0,41682                      |
| 140035     | 80                   | 0,11994                      | 0,1252                       | 0,41691                      |
| 140036     | 80                   | 0,11969                      | 0,12521                      | 0,41697                      |
| 140037     | 80                   | 0,1195                       | 0,12521                      | 0,41697                      |



| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 140038     | 80                   | 0,1195                       | 0,12522                      | 0,41703                      |
| 140039     | 80                   | 0,11934                      | 0,12524                      | 0,41711                      |
| 140040     | 80                   | 0,11904                      | 0,12522                      | 0,41711                      |
| 140042     | 80                   | 0,11896                      | 0,12522                      | 0,41718                      |
| 140043     | 80                   | 0,11896                      | 0,12521                      | 0,41723                      |
| 140044     | 80                   | 0,11877                      | 0,12521                      | 0,41723                      |
| 140045     | 80                   | 0,11863                      | 0,12521                      | 0,4173                       |
| 140046     | 80                   | 0,11863                      | 0,12521                      | 0,41735                      |
| 140047     | 80                   | 0,11864                      | 0,12521                      | 0,4174                       |
| 140048     | 80                   | 0,1187                       | 0,12521                      | 0,4174                       |
| 140049     | 80                   | 0,1187                       | 0,12522                      | 0,41746                      |
| 140051     | 80                   | 0,11854                      | 0,12522                      | 0,41752                      |
| 140052     | 80                   | 0,11841                      | 0,1252                       | 0,41752                      |
| 140053     | 80                   | 0,11823                      | 0,1252                       | 0,41758                      |
| 140054     | 80                   | 0,11823                      | 0,1252                       | 0,41764                      |
| 140055     | 80                   | 0,11802                      | 0,12519                      | 0,41764                      |
| 140056     | 80                   | 0,11785                      | 0,12519                      | 0,41768                      |
| 140057     | 80                   | 0,11785                      | 0,12518                      | 0,41773                      |
| 140058     | 80                   | 0,11778                      | 0,12519                      | 0,41778                      |
| 140100     | 80                   | 0,1178                       | 0,12519                      | 0,41778                      |
| 140101     | 80                   | 0,1178                       | 0,12517                      | 0,41783                      |
| 140102     | 80                   | 0,11794                      | 0,12518                      | 0,41788                      |
| 140103     | 80                   | 0,11808                      | 0,12517                      | 0,41788                      |
| 140104     | 80                   | 0,11802                      | 0,12517                      | 0,41792                      |
| 140105     | 80                   | 0,11802                      | 0,12516                      | 0,41797                      |
| 140106     | 80                   | 0,11793                      | 0,12515                      | 0,41797                      |
| 140107     | 80                   | 0,11775                      | 0,12515                      | 0,41801                      |
| 140109     | 80                   | 0,11775                      | 0,12515                      | 0,41806                      |
| 140110     | 80                   | 0,1176                       | 0,12515                      | 0,4181                       |
| 140111     | 80                   | 0,11744                      | 0,12515                      | 0,4181                       |
| 140112     | 80                   | 0,11744                      | 0,12513                      | 0,41815                      |
| 140113     | 80                   | 0,11729                      | 0,12513                      | 0,41818                      |
| 140114     | 80                   | 0,11717                      | 0,12513                      | 0,41818                      |
| 140115     | 80                   | 0,11714                      | 0,12513                      | 0,41821                      |
| 140116     | 80                   | 0,11714                      | 0,12512                      | 0,41826                      |
| 140118     | 80                   | 0,11704                      | 0,12511                      | 0,41826                      |
| 140119     | 80                   | 0,11698                      | 0,12511                      | 0,41829                      |
| 140120     | 80                   | 0,11698                      | 0,12511                      | 0,41833                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 140121     | 80                   | 0,11692                      | 0,12512                      | 0,41856                      |
| 140122     | 80                   | 0,11466                      | 0,12512                      | 0,41856                      |
| 140123     | 80                   | 0,11466                      | 0,12552                      | 0,41986                      |
| 140124     | 80                   | 0,11479                      | 0,12557                      | 0,42022                      |
| 140125     | 85                   | 0,11446                      | 0,12559                      | 0,42022                      |
| 140127     | 85                   | 0,11425                      | 0,12559                      | 0,42041                      |
| 140128     | 85                   | 0,11425                      | 0,1256                       | 0,42061                      |
| 140129     | 85                   | 0,1142                       | 0,12563                      | 0,42061                      |
| 140130     | 85                   | 0,11434                      | 0,12563                      | 0,42078                      |
| 140131     | 85                   | 0,11434                      | 0,12564                      | 0,42093                      |
| 140132     | 85                   | 0,11457                      | 0,12566                      | 0,42109                      |
| 140133     | 85                   | 0,11464                      | 0,12566                      | 0,42109                      |
| 140134     | 85                   | 0,11464                      | 0,12567                      | 0,42123                      |
| 140136     | 85                   | 0,11463                      | 0,12568                      | 0,42133                      |
| 140137     | 85                   | 0,11447                      | 0,12568                      | 0,42133                      |
| 140138     | 85                   | 0,11423                      | 0,12568                      | 0,42144                      |
| 140139     | 85                   | 0,11423                      | 0,1257                       | 0,42152                      |
| 140140     | 85                   | 0,11404                      | 0,12573                      | 0,42152                      |
| 140141     | 85                   | 0,11383                      | 0,12573                      | 0,4216                       |
| 140142     | 85                   | 0,11383                      | 0,12577                      | 0,42169                      |
| 140143     | 85                   | 0,11368                      | 0,12576                      | 0,42176                      |
| 140145     | 85                   | 0,11359                      | 0,12576                      | 0,42176                      |
| 140146     | 85                   | 0,11359                      | 0,12577                      | 0,42183                      |
| 140147     | 85                   | 0,11333                      | 0,12576                      | 0,42191                      |
| 140148     | 85                   | 0,11316                      | 0,12578                      | 0,42191                      |
| 140149     | 85                   | 0,11313                      | 0,12578                      | 0,42197                      |
| 140150     | 85                   | 0,11313                      | 0,12578                      | 0,42204                      |
| 140151     | 85                   | 0,11304                      | 0,12589                      | 0,42204                      |
| 140152     | 85                   | 0,11183                      | 0,12589                      | 0,42312                      |
| 140153     | 85                   | 0,11183                      | 0,12619                      | 0,42393                      |
| 140155     | 85                   | 0,11137                      | 0,12627                      | 0,42428                      |
| 140156     | 85                   | 0,11081                      | 0,12627                      | 0,42428                      |
| 140157     | 85                   | 0,11081                      | 0,12631                      | 0,42455                      |
| 140158     | 90                   | 0,11012                      | 0,12634                      | 0,42474                      |
| 140159     | 90                   | 0,10979                      | 0,12639                      | 0,42474                      |
| 140200     | 90                   | 0,10961                      | 0,12639                      | 0,42494                      |
| 140201     | 90                   | 0,10961                      | 0,12641                      | 0,42509                      |
| 140202     | 90                   | 0,10932                      | 0,12644                      | 0,42509                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 140204     | 90                   | 0,10898                      | 0,12644                      | 0,42525                      |
| 140205     | 90                   | 0,10898                      | 0,12646                      | 0,42539                      |
| 140206     | 90                   | 0,10854                      | 0,1265                       | 0,42552                      |
| 140207     | 90                   | 0,10827                      | 0,1265                       | 0,42552                      |
| 140208     | 90                   | 0,10827                      | 0,12653                      | 0,42565                      |
| 140209     | 90                   | 0,10807                      | 0,12657                      | 0,42575                      |
| 140210     | 90                   | 0,10793                      | 0,12658                      | 0,42575                      |
| 140211     | 90                   | 0,10782                      | 0,12658                      | 0,42584                      |
| 140213     | 90                   | 0,10782                      | 0,12658                      | 0,42594                      |
| 140214     | 90                   | 0,10789                      | 0,1266                       | 0,42594                      |
| 140215     | 90                   | 0,10779                      | 0,1266                       | 0,42603                      |
| 140216     | 90                   | 0,10779                      | 0,1266                       | 0,42611                      |
| 140217     | 90                   | 0,10765                      | 0,1266                       | 0,42619                      |
| 140218     | 90                   | 0,1074                       | 0,12678                      | 0,42619                      |
| 140219     | 90                   | 0,1074                       | 0,12678                      | 0,42744                      |
| 140220     | 95                   | 0,10348                      | 0,12694                      | 0,42817                      |
| 140222     | 95                   | 0,10288                      | 0,12698                      | 0,42817                      |
| 140223     | 95                   | 0,10306                      | 0,12698                      | 0,42854                      |
| 140224     | 95                   | 0,10306                      | 0,12701                      | 0,42879                      |
| 140225     | 95                   | 0,10328                      | 0,12703                      | 0,42879                      |
| 140226     | 95                   | 0,10326                      | 0,12703                      | 0,42899                      |
| 140227     | 95                   | 0,10326                      | 0,12702                      | 0,42917                      |
| 140228     | 95                   | 0,10311                      | 0,12703                      | 0,42933                      |
| 140229     | 95                   | 0,10306                      | 0,12702                      | 0,42933                      |
| 140231     | 95                   | 0,10306                      | 0,12702                      | 0,42948                      |
| 140232     | 95                   | 0,10291                      | 0,12701                      | 0,42963                      |
| 140233     | 95                   | 0,10271                      | 0,12703                      | 0,42963                      |
| 140234     | 95                   | 0,10279                      | 0,12703                      | 0,42977                      |
| 140235     | 95                   | 0,10279                      | 0,12704                      | 0,42992                      |
| 140236     | 95                   | 0,10317                      | 0,12706                      | 0,42992                      |
| 140237     | 95                   | 0,10339                      | 0,12706                      | 0,43005                      |
| 140238     | 95                   | 0,10339                      | 0,12708                      | 0,43018                      |
| 140240     | 95                   | 0,1033                       | 0,12731                      | 0,43165                      |
| 140241     | 95                   | 0,10052                      | 0,12743                      | 0,43165                      |
| 140242     | 95                   | 0,10052                      | 0,12743                      | 0,43248                      |
| 140243     | 95                   | 0,10121                      | 0,12751                      | 0,43294                      |
| 140244     | 95                   | 0,10154                      | 0,12755                      | 0,43294                      |
| 140245     | 100                  | 0,10165                      | 0,12755                      | 0,43329                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 140246     | 100                  | 0,10165                      | 0,1276                       | 0,43359                      |
| 140247     | 100                  | 0,10193                      | 0,12759                      | 0,43359                      |
| 140249     | 100                  | 0,10254                      | 0,12759                      | 0,43387                      |
| 140250     | 100                  | 0,10254                      | 0,12762                      | 0,43412                      |
| 140251     | 100                  | 0,10334                      | 0,12768                      | 0,43434                      |
| 140252     | 100                  | 0,10386                      | 0,12771                      | 0,43434                      |
| 140253     | 100                  | 0,10386                      | 0,12771                      | 0,43453                      |
| 140254     | 100                  | 0,10419                      | 0,12773                      | 0,4347                       |
| 140255     | 100                  | 0,10434                      | 0,12776                      | 0,4347                       |
| 140256     | 100                  | 0,10443                      | 0,12776                      | 0,43485                      |
| 140258     | 100                  | 0,10443                      | 0,12779                      | 0,435                        |
| 140259     | 100                  | 0,1047                       | 0,12781                      | 0,435                        |
| 140300     | 100                  | 0,10455                      | 0,12781                      | 0,43513                      |
| 140301     | 100                  | 0,10455                      | 0,12779                      | 0,4353                       |
| 140302     | 100                  | 0,10469                      | 0,12777                      | 0,43547                      |
| 140303     | 100                  | 0,10494                      | 0,12778                      | 0,43547                      |
| 140304     | 100                  | 0,10494                      | 0,12778                      | 0,43559                      |
| 140305     | 100                  | 0,10522                      | 0,12778                      | 0,43572                      |
| 140306     | 100                  | 0,10549                      | 0,12781                      | 0,43572                      |
| 140308     | 100                  | 0,10581                      | 0,12781                      | 0,43585                      |
| 140309     | 100                  | 0,10581                      | 0,12783                      | 0,43598                      |
| 140310     | 100                  | 0,10637                      | 0,12784                      | 0,43598                      |
| 140311     | 100                  | 0,13793                      | 0,12784                      | 0,4361                       |
| 140312     | 100                  | 0,13793                      | 0,12784                      | 0,43623                      |
| 140313     | 100                  | 0,17834                      | 0,12785                      | 0,43636                      |
| 140314     | 100                  | 0,1791                       | 0,12785                      | 0,43636                      |
| 140315     | 100                  | 0,1791                       | 0,12785                      | 0,43646                      |
| 140317     | 100                  | 0,17952                      | 0,12785                      | 0,43655                      |
| 140318     | 100                  | 0,17992                      | 0,12786                      | 0,43655                      |
| 140319     | 100                  | 0,18109                      | 0,12786                      | 0,43665                      |
| 140320     | 100                  | 0,18109                      | 0,12283                      | 0,39125                      |
| 140321     | 100                  | 0,21147                      | 0,1192                       | 0,39125                      |
| 140322     | 100                  | 0,20875                      | 0,1192                       | 0,38242                      |
| 140323     | 100                  | 0,20875                      | 0,11888                      | 0,381                        |
| 140324     | 100                  | 0,20774                      | 0,1188                       | 0,3805                       |
| 140326     | 100                  | 0,20721                      | 0,11875                      | 0,3805                       |
| 140327     | 100                  | 0,20721                      | 0,11875                      | 0,38024                      |
| 140328     | 100                  | 0,20685                      | 0,11871                      | 0,38007                      |

| Horodatage | Charge en kiloNewton | Axe des x<br>en<br>millivolt | Axe des y<br>en<br>millivolt | Axe des z<br>en<br>millivolt |
|------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 140329     | 100                  | 0,2066                       | 0,1187                       | 0,38007                      |
| 140330     | 100                  | 0,20641                      | 0,1187                       | 0,37998                      |
| 140331     | 100                  | 0,20641                      | 0,11868                      | 0,3799                       |
| 140332     | 100                  | 0,20626                      | 0,11865                      | 0,3799                       |
| 140333     | 100                  | 0,20613                      | 0,11865                      | 0,37985                      |
| 140335     | 100                  | 0,20613                      | 0,11864                      | 0,37981                      |
| 140336     | 100                  | 0,20603                      | 0,11863                      | 0,37978                      |
| 140337     | 100                  | 0,20593                      | 0,11862                      | 0,37978                      |
| 140338     | 100                  | 0,20593                      | 0,11862                      | 0,37975                      |



## ANNEXE II

### RÉSULTATS DE CLASSIFICATION DES IMAGES TOF AVEC LE RÉSEAU DE NEURONES

| Image analysée                    | Type de dégradation | Prédiction  | Validation   |
|-----------------------------------|---------------------|-------------|--------------|
| C:\testML\images\tof\pic (1).png  | deformation         | 0.644523621 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (2).png  | deformation         | 0.964921176 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (3).png  | deformation         | 0.975348175 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (4).png  | deformation         | 0.929252028 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (5).png  | deformation         | 0.959946632 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (6).png  | deformation         | 0.968734801 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (7).png  | deformation         | 0.936214566 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (8).png  | deformation         | 0.944633603 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (9).png  | deformation         | 0.920865119 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (10).png | deformation         | 0.944942057 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (11).png | deformation         | 0.788083196 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (12).png | deformation         | 0.985765815 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (13).png | deformation         | 0.978541851 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (14).png | deformation         | 0.981397629 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (15).png | deformation         | 0.989094317 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (16).png | deformation         | 0.988512635 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (17).png | deformation         | 0.982475877 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (18).png | deformation         | 0.982529521 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (19).png | deformation         | 0.987534165 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (20).png | deformation         | 0.967813194 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (21).png | deformation         | 0.974555373 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (22).png | deformation         | 0.984966636 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (23).png | deformation         | 0.966475606 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (24).png | deformation         | 0.982159913 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (25).png | deformation         | 0.981222093 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (26).png | deformation         | 0.932369351 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (27).png | deformation         | 0.939020038 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (28).png | deformation         | 0.939220667 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (29).png | deformation         | 0.934060097 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (30).png | deformation         | 0.976528347 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (31).png | deformation         | 0.974090099 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (32).png | deformation         | 0.977935433 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (33).png | deformation         | 0.988521099 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (34).png | deformation         | 0.969988286 | positif      |

| Image analysée                    | Type de dégradation | Prédiction  | Validation   |
|-----------------------------------|---------------------|-------------|--------------|
| C:\testML\images\tof\pic (35).png | deformation         | 0.970826745 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (36).png | deformation         | 0.983183622 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (37).png | deformation         | 0.985476673 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (38).png | deformation         | 0.950175881 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (39).png | deformation         | 0.881408215 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (40).png | deformation         | 0.910748959 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (41).png | deformation         | 0.929778218 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (42).png | deformation         | 0.902843714 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (43).png | deformation         | 0.886291027 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (44).png | deformation         | 0.958283961 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (45).png | deformation         | 0.953772008 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (46).png | deformation         | 0.964055657 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (47).png | deformation         | 0.979780793 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (48).png | deformation         | 0.978774667 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (49).png | deformation         | 0.949218214 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (50).png | deformation         | 0.96732384  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (51).png | deformation         | 0.973968804 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (52).png | deformation         | 0.956522226 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (53).png | deformation         | 0.979876578 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (54).png | deformation         | 0.972793102 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (55).png | deformation         | 0.962039709 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (56).png | deformation         | 0.97223264  | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (57).png | deformation         | 0.971307516 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (58).png | deformation         | 0.979685962 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (59).png | deformation         | 0.918695927 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (60).png | deformation         | 0.967244744 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (61).png | deformation         | 0.975704074 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (62).png | deformation         | 0.969752789 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (63).png | deformation         | 0.883865297 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (64).png | deformation         | 0.813778102 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (65).png | deformation         | 0.885628819 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (66).png | deformation         | 0.788379371 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (67).png | deformation         | 0.843617141 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (68).png | deformation         | 0.745701313 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (69).png | deformation         | 0.760406077 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (70).png | deformation         | 0.621494412 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (71).png | deformation         | 0.663181186 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (72).png | deformation         | 0.773908973 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (73).png | deformation         | 0.551799357 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (74).png | deformation         | 0.658541501 | positif      |



| Image analysée                     | Type de dégradation | Prédiction  | Validation   |
|------------------------------------|---------------------|-------------|--------------|
| C:\testML\images\tof\pic (75).png  | deformation         | 0.623724639 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (76).png  | deformation         | 0.799384773 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (77).png  | deformation         | 0.712648332 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (78).png  | deformation         | 0.529602289 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (81).png  | deformation         | 0.789753377 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (82).png  | deformation         | 0.587715924 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (83).png  | deformation         | 0.557236016 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (84).png  | nid_de_poule_01     | 0.503482163 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (85).png  | deformation         | 0.565210402 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (86).png  | deformation         | 0.70334059  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (87).png  | deformation         | 0.587081254 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (88).png  | deformation         | 0.645703673 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (89).png  | deformation         | 0.808634281 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (90).png  | deformation         | 0.642832279 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (92).png  | nid_de_poule_01     | 0.677624404 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (93).png  | nid_de_poule_01     | 0.693981469 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (95).png  | nid_de_poule_01     | 0.626580536 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (96).png  | deformation         | 0.568927705 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (97).png  | nid_de_poule_01     | 0.667640507 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (98).png  | deformation         | 0.678594887 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (99).png  | deformation         | 0.643073499 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (101).png | deformation         | 0.622396529 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (102).png | deformation         | 0.646604896 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (103).png | deformation         | 0.850442827 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (104).png | deformation         | 0.607789278 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (105).png | deformation         | 0.762247741 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (106).png | deformation         | 0.55448997  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (109).png | deformation         | 0.542958856 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (111).png | deformation         | 0.526442647 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (112).png | nid_de_poule_01     | 0.747247756 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (113).png | nid_de_poule_01     | 0.554157257 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (114).png | nid_de_poule_01     | 0.541014135 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (115).png | deformation         | 0.709584951 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (118).png | deformation         | 0.509406209 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (119).png | deformation         | 0.578713715 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (120).png | deformation         | 0.521459639 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (123).png | deformation         | 0.763264894 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (125).png | deformation         | 0.827497303 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (126).png | deformation         | 0.59423691  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (127).png | deformation         | 0.657961667 | positif      |

| Image analysée                     | Type de dégradation | Prédiction  | Validation   |
|------------------------------------|---------------------|-------------|--------------|
| C:\testML\images\tof\pic (128).png | deformation         | 0.580589235 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (131).png | deformation         | 0.6183061   | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (132).png | deformation         | 0.513414502 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (133).png | deformation         | 0.625544667 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (134).png | deformation         | 0.651863754 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (135).png | nid_de_poule_01     | 0.524136186 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (136).png | nid_de_poule_01     | 0.551830709 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (139).png | nid_de_poule_01     | 0.575069666 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (142).png | deformation         | 0.657607973 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (144).png | deformation         | 0.751680732 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (146).png | deformation         | 0.548407435 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (147).png | deformation         | 0.767822981 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (148).png | deformation         | 0.563562214 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (149).png | deformation         | 0.73333478  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (150).png | deformation         | 0.741883934 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (151).png | deformation         | 0.550336719 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (152).png | deformation         | 0.57833004  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (153).png | deformation         | 0.517733574 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (154).png | deformation         | 0.57088691  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (155).png | deformation         | 0.600200117 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (156).png | deformation         | 0.596188188 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (157).png | deformation         | 0.709451735 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (158).png | deformation         | 0.62321943  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (159).png | deformation         | 0.613757312 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (160).png | deformation         | 0.762172818 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (162).png | deformation         | 0.705469787 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (164).png | deformation         | 0.693487406 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (165).png | deformation         | 0.625033677 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (166).png | deformation         | 0.617434442 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (167).png | deformation         | 0.76030618  | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (169).png | nid_de_poule_01     | 0.546936154 | faux positif |
| C:\testML\images\tof\pic (171).png | deformation         | 0.705966234 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (173).png | deformation         | 0.857354462 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (174).png | deformation         | 0.675205171 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (175).png | deformation         | 0.625427544 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (176).png | deformation         | 0.636748433 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (179).png | deformation         | 0.596168041 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (180).png | deformation         | 0.718746305 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (181).png | deformation         | 0.733213544 | positif      |
| C:\testML\images\tof\pic (182).png | deformation         | 0.563659191 | positif      |

| Image analysée                     | Type de dégradation | Prédiction  | Validation |
|------------------------------------|---------------------|-------------|------------|
| C:\testML\images\tof\pic (184).png | deformation         | 0.771458983 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (185).png | deformation         | 0.591651618 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (186).png | deformation         | 0.731371284 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (187).png | deformation         | 0.614603102 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (189).png | deformation         | 0.608768582 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (190).png | deformation         | 0.724879324 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (191).png | deformation         | 0.709850669 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (192).png | deformation         | 0.736668289 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (193).png | deformation         | 0.664652765 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (194).png | deformation         | 0.708285987 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (195).png | deformation         | 0.720746517 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (196).png | deformation         | 0.825870991 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (197).png | deformation         | 0.628420591 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (198).png | deformation         | 0.646326303 | positif    |
| C:\testML\images\tof\pic (200).png | deformation         | 0.682300866 | positif    |



### ANNEXE III

#### RÉSULTATS DE CLASSIFICATION DES IMAGES GOPRO AVEC LE RÉSEAU DE NEURONES

| Image analysée                      | Type de dégradation         | Prédiction de catégorisation |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| C:\testML\images\goPro\pic (1).jpg  | fissure_transversale        | 0,634914756                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,629364014                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (2).jpg  | fissure_transversale        | 0,557059109                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,646089256                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (3).jpg  | fissure_transversale        | 0,557973623                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,558504581                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (4).jpg  | fissure_transversale        | 0,659837484                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,568070233                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (5).jpg  | fissure_longitunal          | 0,534644783                  |
|                                     | fissure_transversale        | 0,53205663                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (6).jpg  | fissure_transversale        | 0,637695849                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,561016738                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (7).jpg  | fissure_transversale        | 0,510307193                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,639294207                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (8).jpg  | fissure_longitunal          | 0,593200743                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,649524927                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (9).jpg  | fissure_transversale        | 0,559536874                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,688481629                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (10).jpg | fissure_transversale        | 0,5865466                    |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,587979376                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (11).jpg | fissure_transversale        | 0,631775379                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (12).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,59626925                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (13).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,599606276                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (14).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,789520144                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (15).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,695104539                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (16).jpg | fissure_transversale        | 0,530587554                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (17).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,581241369                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (18).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,5580284                    |
| C:\testML\images\goPro\pic (19).jpg | fissure_longitunal          | 0,686885715                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (20).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,692993581                  |
|                                     | fissure_longitunal          | 0,840508342                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (21).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,757064104                  |
|                                     | fissure_longitunal          | 0,958153725                  |

| Image analysée                      | Type de dégradation         | Prédiction de catégorisation |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| C:\testML\images\goPro\pic (22).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,802458465                  |
|                                     | fissure_longitudinal        | 0,952276111                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (23).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,850826383                  |
|                                     | fissure_longitudinal        | 0,926793814                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (24).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,791357756                  |
|                                     | fissure_longitudinal        | 0,929997385                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (25).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,773051381                  |
|                                     | fissure_longitudinal        | 0,887592018                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (26).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,513902664                  |
|                                     | fissure_longitudinal        | 0,808843791                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,5344432                    |
| C:\testML\images\goPro\pic (27).jpg | fissure_longitudinal        | 0,744991779                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,651798427                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (28).jpg | fissure_transversale        | 0,630565047                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,502900064                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (29).jpg | fissure_transversale        | 0,514496446                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,615646482                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (30).jpg | fissure_transversale        | 0,619899273                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,581924379                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (31).jpg | fissure_transversale        | 0,552810907                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (32).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,503802717                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (34).jpg | fissure_transversale        | 0,51977843                   |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,563847601                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (35).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,528062999                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (36).jpg | fissure_transversale        | 0,609338582                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,73887974                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (37).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,644311368                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (38).jpg | fissure_transversale        | 0,514717937                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,722104132                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (39).jpg | fissure_longitudinal        | 0,623583436                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,794228017                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (40).jpg | fissure_longitudinal        | 0,672248423                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,799616873                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (41).jpg | fissure_longitudinal        | 0,730663061                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,838268816                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (42).jpg | fissure_longitudinal        | 0,800717711                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,859453499                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (43).jpg | fissure_longitudinal        | 0,565880597                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,795082808                  |

| Image analysée                      | Type de dégradation         | Prédiction de catégorisation |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| C:\testML\images\goPro\pic (44).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,816182375                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (45).jpg | fissure_longitunal          | 0,544084787                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,805633247                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (46).jpg | fissure_longitunal          | 0,575057149                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,821704268                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (47).jpg | fissure_longitunal          | 0,563245058                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,785940647                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (48).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,73384726                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (49).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,806151927                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (50).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,924065471                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (51).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,53319329                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (53).jpg | nid_de_poule                | 0,58420366                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (54).jpg | fissure_longitunal          | 0,675875425                  |
|                                     | nid_de_poule                | 0,501699328                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,502744913                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (55).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,569795907                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (56).jpg | fissure_transversale        | 0,533251107                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,557164907                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (57).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,582844436                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (58).jpg | fissure_longitunal          | 0,590553343                  |
|                                     | fissure_transversale        | 0,504502177                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,592327774                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (59).jpg | fissure_longitunal          | 0,514218152                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (60).jpg | Fissure_carrelage_alligator | 0,651769638                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (61).jpg | fissure_transversale        | 0,620399058                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (62).jpg | fissure_transversale        | 0,85119158                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (63).jpg | fissure_transversale        | 0,821149886                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (64).jpg | fissure_transversale        | 0,80083704                   |
| C:\testML\images\goPro\pic (65).jpg | fissure_transversale        | 0,783793747                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (66).jpg | fissure_transversale        | 0,794954062                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (67).jpg | fissure_transversale        | 0,757064879                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (68).jpg | fissure_transversale        | 0,581704736                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (69).jpg | fissure_transversale        | 0,695367396                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (70).jpg | fissure_transversale        | 0,524893045                  |
|                                     | Fissure_carrelage_alligator | 0,573559582                  |
| C:\testML\images\goPro\pic (71).jpg | fissure_transversale        | 0,558051348                  |





# ANNEXE IV

## MOYENNE DES DONNÉES ACQUISES PAR CHARGE

| Charges en kiloNewton | Moyenne de voltage de l'axe des x | Moyenne de voltage de l'axe des y | Moyenne de voltage de l'axe de z |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 0                     | 0.160552982                       | 0.112065965                       | 0.362575614                      |
| 0.5                   | 0.111360233                       | 0.104947209                       | 0.343536512                      |
| 1                     | 0.111344375                       | 0.104953125                       | 0.343534375                      |
| 2                     | 0.11134                           | 0.10495                           | 0.34354                          |
| 3                     | 0.111340549                       | 0.10494956                        | 0.343537802                      |
| 4                     | 0.111400909                       | 0.104962727                       | 0.343550909                      |
| 5                     | 0.111818333                       | 0.104993333                       | 0.343695                         |
| 6                     | 0.112414865                       | 0.105039459                       | 0.34403027                       |
| 7                     | 0.113180769                       | 0.105114615                       | 0.344481538                      |
| 8                     | 0.114155833                       | 0.105209167                       | 0.344975667                      |
| 9                     | 0.115485347                       | 0.10536703                        | 0.345572673                      |
| 10                    | 0.116468571                       | 0.105530238                       | 0.346166667                      |
| 11                    | 0.117487679                       | 0.105757857                       | 0.346929464                      |
| 12                    | 0.11836                           | 0.105955294                       | 0.347547059                      |
| 13                    | 0.119434348                       | 0.106204348                       | 0.348267826                      |
| 14                    | 0.120442667                       | 0.106401333                       | 0.348912667                      |
| 15                    | 0.1214812                         | 0.1066456                         | 0.34984                          |
| 16                    | 0.121895263                       | 0.106832632                       | 0.350802105                      |
| 17                    | 0.1218192                         | 0.1069252                         | 0.35174                          |
| 18                    | 0.122284138                       | 0.10754931                        | 0.353381034                      |
| 19                    | 0.123684615                       | 0.108754231                       | 0.356153846                      |
| 20                    | 0.125084889                       | 0.109501778                       | 0.357859556                      |
| 21                    | 0.12639125                        | 0.110157917                       | 0.35909                          |
| 22                    | 0.127467059                       | 0.110641765                       | 0.360177059                      |
| 23                    | 0.127388723                       | 0.111242553                       | 0.361415106                      |
| 24                    | 0.127916154                       | 0.111811538                       | 0.362572308                      |
| 25                    | 0.128543333                       | 0.112366667                       | 0.363804615                      |
| 30                    | 0.130355714                       | 0.114370476                       | 0.36846                          |
| 35                    | 0.131893333                       | 0.116208611                       | 0.373868333                      |
| 40                    | 0.132556786                       | 0.118036071                       | 0.378930714                      |
| 45                    | 0.131663056                       | 0.119259722                       | 0.384063889                      |
| 50                    | 0.131302353                       | 0.120695882                       | 0.388344118                      |
| 55                    | 0.130669375                       | 0.121645                          | 0.39246125                       |
| 60                    | 0.131514706                       | 0.122672941                       | 0.397230588                      |

|                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 65                 | 0.13185            | 0.123362           | 0.4019075          |
| 70                 | 0.129098182        | 0.124168636        | 0.406497273        |
| 75                 | 0.124897429        | 0.124679429        | 0.411348571        |
| 78.45              | 0.174129258        | 0.113452596        | 0.359145273        |
| 80                 | 0.117960652        | 0.125192174        | 0.417806957        |
| 85                 | 0.113525862        | 0.125787931        | 0.42182            |
| 90                 | 0.1084525          | 0.1265335          | 0.4256555          |
| 95                 | 0.102715909        | 0.127118182        | 0.429978182        |
| 100                | 0.150909583        | 0.124660625        | 0.416238333        |
| <b>Grand Total</b> | <b>0.148488403</b> | <b>0.112575416</b> | <b>0.362471875</b> |

# ANNEXE V

## RÉSULTATS DES POLYNÔMES PAR CHARGE

|        | $y = 0.0009x + 0.1072$ | $y = 0.0003x + 0.1043$ | $y = 0.0009x + 0.3392$ |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Charge | x                      | y                      | z                      |
| 0      | 0.1072                 | 0.1043                 | 0.3392                 |
| 0.5    | 0.10765                | 0.10445                | 0.33965                |
| 1      | 0.1081                 | 0.1046                 | 0.3401                 |
| 2      | 0.109                  | 0.1049                 | 0.341                  |
| 3      | 0.1099                 | 0.1052                 | 0.3419                 |
| 4      | 0.1108                 | 0.1055                 | 0.3428                 |
| 5      | 0.1117                 | 0.1058                 | 0.3437                 |
| 6      | 0.1126                 | 0.1061                 | 0.3446                 |
| 7      | 0.1135                 | 0.1064                 | 0.3455                 |
| 8      | 0.1144                 | 0.1067                 | 0.3464                 |
| 9      | 0.1153                 | 0.107                  | 0.3473                 |
| 10     | 0.1162                 | 0.1073                 | 0.3482                 |
| 11     | 0.1171                 | 0.1076                 | 0.3491                 |
| 12     | 0.118                  | 0.1079                 | 0.35                   |
| 13     | 0.1189                 | 0.1082                 | 0.3509                 |
| 14     | 0.1198                 | 0.1085                 | 0.3518                 |
| 15     | 0.1207                 | 0.1088                 | 0.3527                 |
| 16     | 0.1216                 | 0.1091                 | 0.3536                 |
| 17     | 0.1225                 | 0.1094                 | 0.3545                 |
| 18     | 0.1234                 | 0.1097                 | 0.3554                 |
| 19     | 0.1243                 | 0.11                   | 0.3563                 |
| 20     | 0.1252                 | 0.1103                 | 0.3572                 |
| 21     | 0.1261                 | 0.1106                 | 0.3581                 |
| 22     | 0.127                  | 0.1109                 | 0.359                  |
| 23     | 0.1279                 | 0.1112                 | 0.3599                 |
| 24     | 0.1288                 | 0.1115                 | 0.3608                 |
| 25     | 0.1297                 | 0.1118                 | 0.3617                 |
| 30     | 0.1342                 | 0.1133                 | 0.3662                 |
| 35     | 0.1387                 | 0.1148                 | 0.3707                 |
| 40     | 0.1432                 | 0.1163                 | 0.3752                 |
| 45     | 0.1477                 | 0.1178                 | 0.3797                 |
| 50     | 0.1522                 | 0.1193                 | 0.3842                 |

|       |          |          |          |
|-------|----------|----------|----------|
| 55    | 0.1567   | 0.1208   | 0.3887   |
| 60    | 0.1612   | 0.1223   | 0.3932   |
| 65    | 0.1657   | 0.1238   | 0.3977   |
| 70    | 0.1702   | 0.1253   | 0.4022   |
| 75    | 0.1747   | 0.1268   | 0.4067   |
| 78.45 | 0.177805 | 0.127835 | 0.409805 |
| 80    | 0.1792   | 0.1283   | 0.4112   |
| 85    | 0.1837   | 0.1298   | 0.4157   |
| 90    | 0.1882   | 0.1313   | 0.4202   |
| 95    | 0.1927   | 0.1328   | 0.4247   |
| 100   | 0.1972   | 0.1343   | 0.4292   |

## ANNEXE VI

### ÉCART DES RÉSULTATS ENTRE LES POLYNÔMES ET LES DONNÉES ACQUISES DES CAPTEURS

| Charge en kiloNewton | Écart des résultats<br>(%) entre les<br>polynômes et les<br>données acquises<br>sur l'axe des x | Écart des résultats<br>(%) entre les<br>polynômes et les<br>données acquises<br>sur l'axe des y | Écart des résultats<br>(%) entre les<br>polynômes et les<br>données acquises<br>sur l'axe des z |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0                    | 0.66769236                                                                                      | 0.93070184                                                                                      | 0.935529                                                                                        |
| 0.5                  | 0.67049518                                                                                      | 0.93204034                                                                                      | 0.93677012                                                                                      |
| 1                    | 0.67329799                                                                                      | 0.93337884                                                                                      | 0.93801124                                                                                      |
| 2                    | 0.67890361                                                                                      | 0.93605583                                                                                      | 0.94049348                                                                                      |
| 3                    | 0.68450924                                                                                      | 0.93873283                                                                                      | 0.94297572                                                                                      |
| 4                    | 0.69011487                                                                                      | 0.94140982                                                                                      | 0.94545796                                                                                      |
| 5                    | 0.69572049                                                                                      | 0.94408682                                                                                      | 0.9479402                                                                                       |
| 6                    | 0.70132612                                                                                      | 0.94676381                                                                                      | 0.95042244                                                                                      |
| 7                    | 0.70693175                                                                                      | 0.94944081                                                                                      | 0.95290468                                                                                      |
| 8                    | 0.71253737                                                                                      | 0.9521178                                                                                       | 0.95538692                                                                                      |
| 9                    | 0.718143                                                                                        | 0.9547948                                                                                       | 0.95786916                                                                                      |
| 10                   | 0.72374862                                                                                      | 0.95747179                                                                                      | 0.9603514                                                                                       |
| 11                   | 0.72935425                                                                                      | 0.96014879                                                                                      | 0.96283365                                                                                      |
| 12                   | 0.73495988                                                                                      | 0.96282578                                                                                      | 0.96531589                                                                                      |
| 13                   | 0.7405655                                                                                       | 0.96550277                                                                                      | 0.96779813                                                                                      |
| 14                   | 0.74617113                                                                                      | 0.96817977                                                                                      | 0.97028037                                                                                      |
| 15                   | 0.75177675                                                                                      | 0.97085676                                                                                      | 0.97276261                                                                                      |
| 16                   | 0.75738238                                                                                      | 0.97353376                                                                                      | 0.97524485                                                                                      |
| 17                   | 0.76298801                                                                                      | 0.97621075                                                                                      | 0.97772709                                                                                      |
| 18                   | 0.76859363                                                                                      | 0.97888775                                                                                      | 0.98020933                                                                                      |
| 19                   | 0.77419926                                                                                      | 0.98156474                                                                                      | 0.98269157                                                                                      |

|                |            |            |            |
|----------------|------------|------------|------------|
| 20             | 0.77980489 | 0.98424174 | 0.98517381 |
| 21             | 0.78541051 | 0.98691873 | 0.98765605 |
| 22             | 0.79101614 | 0.98959573 | 0.99013829 |
| 23             | 0.79662176 | 0.99227272 | 0.99262054 |
| 24             | 0.80222739 | 0.99494972 | 0.99510278 |
| 25             | 0.80783302 | 0.99762671 | 0.99758502 |
| 30             | 0.83586115 | 1.01101169 | 1.00999622 |
| 35             | 0.86388928 | 1.02439666 | 1.02240743 |
| 40             | 0.89191741 | 1.03778163 | 1.03481863 |
| 45             | 0.91994554 | 1.05116661 | 1.04722983 |
| 50             | 0.94797367 | 1.06455158 | 1.05964104 |
| 55             | 0.9760018  | 1.07793655 | 1.07205224 |
| 60             | 1.00402993 | 1.09132153 | 1.08446345 |
| 65             | 1.03205806 | 1.1047065  | 1.09687465 |
| 70             | 1.06008619 | 1.11809148 | 1.10928586 |
| 75             | 1.08811432 | 1.13147645 | 1.12169706 |
| 78.45          | 1.10745373 | 1.14071208 | 1.13026079 |
| 80             | 1.11614246 | 1.14486142 | 1.13410826 |
| 85             | 1.14417059 | 1.1582464  | 1.14651947 |
| 90             | 1.17219872 | 1.17163137 | 1.15893067 |
| 95             | 1.20022685 | 1.18501634 | 1.17134188 |
| 100            | 1.22825498 | 1.19840132 | 1.18375308 |
| <b>Moyenne</b> | 0.84745697 | 1.01654933 | 1.015131   |

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AASHTO and The Road Information Project (2009). *Rough Roads Ahead: Fix Them Now or Pay for It Later*. Repéré à <http://roughroads.transportation.org/>.
- Ahuja, R.K., T.L. Magnanti & Orlin, J.B. (1993) *Network flows: theory, algorithms, and applications*, Michigan: Prentice Hall.
- Akyildiz, I. F. & Vuran, M. C. (2010). *Wireless sensor networks*. Communication présentée à 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. DOI: 10.1109/WAINA.2009.192.
- Arturo, G. (2001). *The development of accurate methods for Weighing trucks in motion*. (Thèse de Doctorat, Trinity College, Dublin, Ireland).
- Assaf, G.J. (2017). MGC 840 : Conception et réhabilitation des chaussées. École de Technologie Supérieure.
- Assaf, G.J. (1993). *Sub-network level analysis in pavement management the CODE and MAREE systems*. (Thèse de Doctorat, University of Waterloo, Waterloo).
- ASTM D6433-11. (2011). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6433-18. (2018). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ATC. (1994). *Geometric Design Guide for Canadian Roads*. Transportation Association of Canada, Ottawa.
- Balageas, D. dans OWI application Lab. (2013). *State-of-the-art and new developments in the field of structural health monitoring*. Repéré au <http://www.owi-lab.be/content/state-art-and-new-developments-field-structural-health-monitoring>.
- Burtch, R.L. (2002). LiDAR principles and applications. Communication présentée à *IMAGIN Conference*. Traverse City, MI.
- Bushman, R. & Pratt. A.J. (1998). *Weigh-In-Motion Technology—Economics and Performance*. Communication présentée à North American Travel Monitoring Exhibition and Conference, Charlotte, NC.
- Carden, E. & Fanning P. (2004, 1er décembre). Vibration based condition monitoring: a review. *Structural Health Monitoring*. DOI: [10.1177/1475921704047500](https://doi.org/10.1177/1475921704047500).

- Casolla, G., Cuomo, S., Di Cola, V. S., & Piccialli, F. (2019). Exploring unsupervised learning techniques for the Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2621-2628.
- Caussignac, J-M. & Rougier, J.C. (1999). *Fiber Optic WIM Sensor and Optoelectronic System – Preliminary Tests*. Final Symposium of the Project WAVE. (pp.255–264). Paris: Hermes Science Publications.
- Cebon, D. (2001). *WAVE Report of WP1.1: Multiple Sensor WIM*. Répéré à [http://wim.zag.si/wave/download/wp11\\_final.pdf](http://wim.zag.si/wave/download/wp11_final.pdf).
- Chen, S., Rice, C., Boyle, C. & Hauser, E. (2011). Small-format aerial photography for highway-bridge monitoring. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(2), pp.105-112.
- Choi, K. N., Juarez, J. C. & Taylor, H. F. (2003). Distributed fiber optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters. *Unattended Ground Sensor Technologies and Applications V*, 5090, pp. 134-142. DOI: 10.1117/12.484911.
- Clark, M., McCann, D. & Forde, M. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT & E International* 36(4), pp.265-275.
- Clark, R. (1999), Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. Dans Rentz, A.N., Ryerson, R.A. (Éds), *Manual of Remote Sensing*, 3(3), pp.3-52. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Committee for the Truck Weight Study. (1990). *Truck Weight Limits: Issues and Options*. (Special Report 225). Washington, DC: Transportation Research Board.
- Diefenderfer, B., Mokarem, D. & Sharp, S. (2006). *Use of non-destructive evaluation to detect moisture in flexible pavements*. (Final Report VTRC-R37). Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council.
- El-Sheimy, N. (2005). *An overview of Mobile Mapping Systems*, Communication présentée à FIG Working Week 2005 and 8th International Conference on the Global Spatial Data Infrastructure (GSDI-8): From Pharaohs to Geoinformatics, Caire, Égypte.
- Ellum, C. & El-Sheimy, N. (2002). Land-based mobile mapping systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(1), pp.13–17.
- Fan, W. & Qiao, P.Z. (2010). Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 9(3). DOI:10.1177/1475921710365419.



- Farrar, C.R., Doebling, S.W. & Nix, D.A. (2001). Vibration-Based Structural Damage Identification. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778), pp.131-149.
- Feng, W., Yundong, W. & Qiang, Z. (2009). UAV borne real-time road mapping system. *2009 Joint Urban Remote Sensing Event*. (pp. 1-7). Shanghai.
- FHWA. (1997). *The 1997 Federal Highway Cost Allocation Study*. Washington, DC: Federal highway administration.
- FHWA. (1998). *Life-cycle cost analysis in Pavement Design*. Washington, DC: Federal highway administration.
- FHWA. (2005). *Highway Economic Requirement System – State version: Technical guide*. Washington, DC: Federal highway administration.
- FHWA. (2007). *Highway Economic Requirement System: User's guide, Software Version 4.X*. Washington, DC: Federal highway administration.
- Gong, J., Zhou, H., Gordon, C. & Jalayer, M. (2012, Juin). *Mobile Terrestrial Laser Scanning for Highway Inventory Data Collection*. Communication présentée à International Conference on Computing in Civil Engineering, Southern Illinois University.
- Gramling, W. (1994). *Current practices for determining pavement condition*. (Synthesis 203). Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board Publication.
- Greenwood, I.D., Dunn, R.C.M. & Raine, R. (2007). Estimating the Effect of Traffic Congestion on Fuel Consumption and Vehicle Emissions Based on Acceleration Noise. *Journal of Transportation engineering*, 133(2) pp. 96-104.
- Gu, J., Wang, Z., Kuen, J., Ma, L., Shahroudy, A., Shuai, B. & Chen, T. (2018). Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern Recognition*, 77(2018), pp.354-377.
- Guan, H., Li, J., Cao, S. & Yu, Y. (2016). Use of mobile LiDAR in road information inventory: a review. *International Journal of Image and Data Fusion*, 7(3), pp.219-242.
- Haas, R.C.G. (2001, août). *Reinventing the (Pavement Management) Wheel*. Communication présentée à Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, WA.
- Haas, R.C.G. & Transportation Association of Canada. (1997). *Pavement Design and Management Guide*. Ottawa: Transportation Association of Canada.

- Hallenbeck, M. & Weinblatt, H. (2004). *Equipment for Collecting Traffic Load Data*. (Report 509). Washington, DC: Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program.
- He, X., Zhao, K. & Chu, X. (2019). *AutoML: A Survey of the State-of-the-Art*. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/334963534\\_AutoML\\_A\\_Survey\\_of\\_the\\_State-of-the-Art](https://www.researchgate.net/publication/334963534_AutoML_A_Survey_of_the_State-of-the-Art).
- Hill, D. J., Nash, P. J. & Sanders, N. (2002, février). Vehicle weigh-in-motion using multiplexed interferometric sensors. Dans *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, Conference: Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H. & Zheng, Q. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, 454(1971), pp.903-995.
- Huber, R., Kingston, T., Laflamme, C. & Larouche, C. (2008, juin). *Automation and Mobile Mapping for Safe and Accurate Pavement Analysis*. Communication présentée à International Conference on Managing Pavement Assets, Calgary.
- IRD. (2001). *Installation manual, BL CLASS I PIEZO Installation. Part No. 69027501, Revision B*. Saskatoon: International Road Dynamics Inc.
- Jacob, B. & D. Stanczyk. (1999), Calibration of Highly Accurate WIM Systems for Legal Applications. Dans Jacob, B. (éd.), *Final Symposium of the Project WAVE* (pp.55–68). Paris, France: Hermes Science Publications.
- Jalayer, M., Hu, S., Zhou, H., & Turochy, R.E. (2015, janvier). *An Assessment of the Highway Inventory Data Collection Method Using Photo/Video Logging*. Communication présentée à 94th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC.
- Karamihas, S. M., Rada. R. G., Ostrom, B. K., Simpson, A. L. & Wiser, L. J. (2004). Pavement smoothness at weigh-in-motion sites: developing specifications for the Long-Term Pavement Performance Program. *Transportation research record*, 1870(2004), pp.116-123.
- Khan, A. W., Abdullah, A. H., Anisi, M. H. & Bangash, J. I. (2014). A comprehensive study of data collection schemes using mobile sinks in wireless sensor networks. *Sensors*, 14(2), pp. 2510-2548.
- Kraus, K. & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53(1998), pp.193-203.

- Lato, M., Hutchinson, J., Diederichs, M., Ball, D. & Harrap, R. (2009). Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2009), pp.935-946.
- Leming, S. K. & Stalford, H. L. (2002). Bridge weigh-in-motion system development using static truck/bridge models. Dans *Proceedings of the 2002 American Control Conference* (Volume 5, pp.3672-3677). Piscataway, NK: IEEE.
- Li, J. & Chapman, M. A. (2008). Terrestrial mobile mapping towards real time geospatial data collection. Dans Zlatanova, S. et Li, J. (Éds), *Geospatial Information Technology for Emergency Responses*. (pp. 103–119). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Lucas, K., Marsden, G., Brooks, M. & Lawler, M. (2007). Assessment of Capabilities for Examining Long-Term Social Sustainability of Transportation and Land Use Strategy, *Transportation Research record*, 2013(2013), pp. 30-37.
- Malla, R. & Garrick, N. (2000). *Dual Core FTDM Fiber optic Wim System 2000*. (Rapport NCHRP-IDEA Project 42). Washington, DC: University of Connecticut.
- Maser, K. (1996). Condition assessment of transportation infrastructure using ground-penetrating radar. *Journal of Infrastructure Systems*, 2(2), pp.94-101.
- McGhee, K.H. (2004). *Automated pavement distress collection techniques*. (NCHRP Synthesis 334). Washington, DC: Transportation Research Board Publication.
- Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., Kanonirs, G. & Selavo, L. (2011). *Real time pothole detection using android smartphones with accelerometers*. Communication présentée à 2011 7th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), Barcelone, Espagne.
- Mei, A., Manzo, C., Bassani, C., Salvatori, R. & Allegrini, A. (2014). Bitumen Removal Determination on Asphalt Pavement Using Digital Imaging Processing and Spectral Analysis. *Open Journal of Applied Science*, 4(06), pp.336-374.
- Miller J. & Bellinger W. (2003). *Distress identification manual for the long-term pavement performance program*. (Report 03-031). Washington, DC: FHWA.
- Mohapatra, S., & Laxmikant, L. (2014). Cloud computing and ROI. *Management for Professionals*.
- Noronha, S. & Nevatia, R. (2001). Detection and Modeling of Buildings from Multiple Aerial Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(5), pp.501-518.

- O'Brien, D. (1991) *Computer Assisted Feature Extraction (InterEx)*. Communication présentée à 14<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, pp.423-429.
- Oliveira, H., & Correia, P. L. (2009), Supervised crack detection and classification in images of road pavement flexible surfaces. Dans Zaher, A. (éd.), *Recent Advances in Signal Processing* (pp.159-184). Rijeka, Croatia: INTECH Open Access Publisher.
- Ouyang, W. & Xu, B. (2013). Pavement cracking measurements using 3D laser-scan images. *Measurement Science and Technology*, 24(10). DOI: 10.1088/0957-0233/24/10/105204.
- Park, J. (1992). *Buried fiber optic sensor*. (M. S. Thesis, Texas A&M University, USA).
- Parra, J., Hossain, M.A., Uribarren, A. & Jacob, E. (2009). Flexible Smart Home Architecture using Device Profile for Web Services: A Peer-to-Peer Approach. *International Journal of Smart Home*, 3(2), pp.39-55.
- Petrie, G. & Toth, C. K. (2008), Introduction to laser ranging, profiling and scanning. Dans J. Shan and C.K. Toth (eds), *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing* (pp. 1-28). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Quinley, R. (1996, mai). *Installation of Weigh-in-Motion Systems*. Communication présentée à The National Traffic Data Acquisition Conference, Albuquerque, NM.
- Rakha, H., Katz, B. & Al-Kaisy, A.F. (2003). *Field evaluation of weigh-in-motion screening on truck weigh station operations*. Communication présentée à IEEE Explore: Intelligent Vehicles Symposium, Columbus, OH.
- Roe, G.V. (2009). The 3D Digital Survey Revolution. *LiDAR Magazine*, 18 mai. Repéré à <https://lidarmag.com/2009/05/18/the-3d-digital-survey-revolution/>.
- Ross, K. & Kurose, J. (2010). *Computer Networking: A top down approach* (Fifth Edition). Londres, UK: Pearson.
- Rytter, T. (1993). *Vibration based inspection of civil engineering structure*. (PhD dissertation, Department of building technology and structure engineering, Aalborg University, Denmark).
- Saarenketo, T. & Scullion, T. (2000). Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2), pp.119-138.
- Sakaris, C., Sakellariou, J.S. & Spiliotis, D.F. (2015). Vibration-based damage precise localization in three-dimensional structures: Single versus multiple response measurements. *Structural Health Monitoring*, 14(3), pp.300-314.

- Santero, N., Nokes, W., & Harvey, J. (2005). *Virtual Weigh Stations: The business Case*. (Technical Memorandum TM-UCB-PRC-2005-3). Sacramento, CA: California Department of Transportation.
- Sayers, M.W., Gillespie, T.D. & Queiroz, A.V. (1986). *The International Road Roughness Experiment (IRRE): establishing correlation and a calibration standard for measurements*. (Rapport WTP45). Washington, DC: The World Bank.
- Schultz, P. T., & Sartini, R. A. (2017). *U.S. Patent No. 9,838,204*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Shahin, M.Y. (2007). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots* (Second Edition). NYC, NY: Springer-Verlag.
- Sharma, N. & Nayyar, A. (2014). A comprehensive review of distance and density-based cluster head selection schemes. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3(4), pp.204-211.
- Smith, R. & Chang-Albitres, C. (2007). *The impact of semiautomated pavement distribution collection methods on pavement management network-level analysis using the MTC Street saver*. (Report 476290). Texas: Metropolitan Transportation Commission.
- Sun, L. & Deng, X. (1998). Predicting vehicle dynamic loads caused by vehicle-pavement interaction. *Journal of Transportation Engineering*, 124(5). DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X (1998)124:5(470).
- Tao, C.V. & Li, J. (2007). *Advances in mobile mapping technology: ISPRS Series Volume 4*. Philadelphia, PA: Taylor & Francis Inc.
- Tatham P. (2009). An investigation into the suitability of the use of unmanned aerial vehicle systems (UAVS) to support the initial needs assessment process in rapid onset humanitarian disasters. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 13(1), pp.60-78.
- Taylor, B. & Klashinsky, R. (1995). New Applications for Weigh-in-Motion Technology. *Traffic Technology International, Annual Review*, pp.220–225.2.
- Taylor, I. J., & Harrison, A. (2006). From P2P to Web services and grids: peers in a client/server world. *Springer Science & Business Media*.
- Tiong, P.L.Y, Mustaffar, M., Rosli, M.B. (2012). Road surface assessment of pothole severity by close range digital photogrammetry method. *World Applied Sciences Journal*, 19(6), pp.867-873.

- Tsogas, M., Floudas, N., Lytrivis, P. & Amditis, A. (2011). Combined lane and road attributes extraction by fusing data from digital map, laser scanner and camera. *Information Fusion*, 12(1), pp.28-36.
- Udd, E. (1991). *Fiber Optic Sensors: An introduction for engineers and scientists*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, p.512.
- Uddin, W. (2011). Remote Sensing Laser and Imagery Data for Inventory and Condition Assessment of Road and Airport Infrastructure and GIS Visualization. *International Journal of Roads and Airports*, 1(1), pp.53-67.
- Ullidtz, P. (1998). *Modelling Flexible Pavement Response and Performance*. Lyngb, Danemark: Polyteknisk Forlag.
- U.S. Department of Transportation. (2000). *The U.S. Department of Transportation's Comprehensive Truck Size and Weight Study*. (Report No. FHWA-PL-00-029). Washington, DC: Federal Highway Administration.
- U.S. Department of Transportation. (2007). *2006 Status of the Nation's Highway, Bridges and Transit: Condition and Performance*. (Report to Congress). Washington, DC: U.S. DOT.
- WAPA. (2002). *Pavement Management*. Repéré à [http://www.asphaltwa.com/wapa\\_web/modules/08\\_evaluation/08\\_management.htm](http://www.asphaltwa.com/wapa_web/modules/08_evaluation/08_management.htm).
- Williams, K., Olsen, M.J., Roe, G.V. & Glennie, C. (2015). Consider the Benefits of Mobile LiDAR for Transportation Projects. *Earth Imaging Journal*, March/April, pp.28-35.
- Wu, S., Silván-Cárdenas, J. & Wang, L. (2007). Per-field urban land use classification based on tax parcel boundaries. *International Journal of Remote Sensing*, 28(12), pp.2777-2801.
- Xiao, H., Deng, J., Wang, Z., Huo, W., Zhang, P., Luo, M., Pickrell, G., May, R.G. & Wang, A. (2005). Fiber optic pressure sensor with self compensation capability for harsh environment application. *Optical Engineering*, 44(5), pp. 054403-1-054403-10.
- Yen, K.S., Ravani, B. & Lasky, T.A. (2011). *LiDAR for Data Efficiency*. (Rapport WA-RD 778.1). Washington, DC: Washington State Department of Transportation.
- Yi, S., Yunfeng, B. & Yuan, M. (2008). *Study on Weigh-in-Motion System Based on Chaos Immune Algorithm and RBF Network*. Communication présentée à 2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, Whuan, Chine.

- Zhang, C. (2008). An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5), pp. 627-631.
- Zhang, L. (2007). *An Evaluation of the Technical and Economic Performance of Weigh-in-Motion Sensing Technology*. (Master's Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada).
- Zhang, W., Li, W., Zhang, C., Hanink, D. M., Li, X. & Wang, W. (2017). Parcel-based urban land use classification in megacity using airborne LiDAR, high resolution orthoimagery, and Google Street View. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64(2017), pp.215-228.
- Zhang, Z., Cheng, M., Chen, X., Zhou, M., Chen, Y., Li, J., & Nie, H. (2015, July). *Turning mobile laser scanning points into 2D/3D on-road object models: Current status*. Communication présentée à Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International, Milan, Italie, pp. 3524-3527.
- Zhou, H., Jalayer, M., Gong, J., Hu, S. & Grinter, M. (2013). *Investigation of Methods and Approaches for Collecting and Recording Highway Inventory Data*. (Rapport FHWA-ICT-13-022). Illinois: Illinois Center for Transportation.





## BIBLIOGRAPHIE

- Archondo-Callao, R.S. (2000). Road user charges model (English). *Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP)* technical note; no. 28. Washington, DC: World Bank.
- Archondo-Callao, R.S. (2007). RNET Version 1.0 User Guide. *SSATP Working Paper* No. 85-A., Washington, DC: World Bank.
- AASHTO. (2003). *Virtual Weigh-in-Motion: A “WIM-win” for transportation agencies*. Répéré à [https://www.in.gov/indot/files/Virtual\\_Weigh\\_Station\\_Presentation\\_-\\_AASHTO.pdf](https://www.in.gov/indot/files/Virtual_Weigh_Station_Presentation_-_AASHTO.pdf).
- Babin, P. (2004). *Modèle d'émission des polluants et des GES et modèle de consommation des carburants pour MOTREM, utilisation de MOBILE 6.2c*. Service de la modélisation des systèmes de transports, Québec : Ministère des Transports Québec.
- Babin, P. (2006). *Modèle exploratoire sur l'utilisation du réseau du réseau routier à l'échelle du Québec*. Service de la modélisation des systèmes de transports, Québec : Ministère des Transports Québec.
- Barton, R. & Mohammadian, K. (2006). *Estimation of Cars and Light Trucks Use per Vehicle-Kilometer in Canada*. (Final Report). Ontario: Transports Canada.
- Beaulieu, J. (2008). HERS-ST version 4.0, Highway Economic Requirements System, State Version. [Présentation Power Point], Montréal.
- Bennett, C.R. (1994). *A Speed Prediction Model for Rural Two-lane Highways*. (School of Engineering Report, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, Nouvelle-Zélande).
- Bennett, C.R. (2002). The New Zealand Vehicle Operating Cost Model. *Transportation Research Record*, 1106(2002), pp.83-94.
- Bennett, C. R. & Greenwood, I. D. (2003). *Modelling road user and environmental effects in HDM-4*, The highway development and management series (volume 7) Paris: AIPCR.
- Cambridge Systematics (2009). *Concept of Operations for Virtual Weigh Station*. (Final Report). Cambridge, MA: Federal Highway Administration.

- Chambon, S. & Moliard, J.M. (2011). Automatic road pavement assessment with image processing: review and comparison. *International Journal Geophysics*, Volume 2011, 20 pages. DOI: 10.1155/2011/989354.
- Department for International Development. (1998). *ORN 15: Guidelines for the design and operation of road management systems*. (Technical Report) Berkshire, UK: Transportation Research Laboratory et Department for international Development.
- Duthie, J., Cervenka, K. & Waller, T. (2007, décembre). Environmental Justice Analysis: Challenges for Metropolitan Transportation Planning. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, (2013)2013, DOI: 10.3141/2013-02.
- Ecoplan/Infras (2006). *Les avantages des transports - Synthèse des projets partiels 2-4*. Zurich, Suisse, 51 p.
- Fan, S. & Chan-Kang, C. (2008). Regional road development, rural and urban poverty: Evidence from China. *Transport Policy*, 15(5), pp. 305-314.
- Haas, R.C.G., Hudson, W.R. & Zaniewski, J.P. (1994). *Modern Pavement Management*. Malabar, FL: Krieger Pub Co.
- Henning, T.F.P., Costello, S.B. & Watson, T.G. (2007). *A review of the HDM/dTIMS pavement models based on calibration site data* (Land Transport New Zealand research report). Nouvelle Zélande: Land Transport New Zealand.
- HLB Decision Economics Inc. (2005). *TransDEC: Transit Investment Decision Support Tool, User Manual, version 2.0*. (Rapport remis à Transports Canada). Ottawa: Transports Canada.
- Huyan, J., Tighe, S. L., Ren, Q. Q. & Sun, Z. Y. (2017). Three-Dimensional Pavement Crack Detection Algorithm Based on Two-Dimensional Empirical Mode Decomposition. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 143(2). Doi: 10.1061/JPEODX.0000006.
- IFRTD. (2005, décembre). *Transportation and Poverty Reduction Monitoring Framework Workshop*. Communication présentée à International Forum for Transport and Development, Nairobi.
- Ihs, A., Sjögren, L. (2003). *An overview of HDM-4 and the Swedish Pavement Management System (PMS)*. Linköping, Suède: VTI.
- Juncheng, X. & Pengmin, L. (2009, Mai). *Application of Wavelet Transform in Weigh-in-Motion*. Communication présentée à 2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications, Wuhan, Chine.

- Jiankun, W., Linpeng, H., Dejun, W. & Fei, S. (2008). R-OSGi-based, 2008 Architecture of Distributed Smart Home System. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(3), pp.1166-1172.
- Jones, J. & Nix, F. (1995). *Survey of the Use of Highway Cost Allocation in Road Pricing Decisions*. Ottawa: Association des transports du Canada.
- Kuppuswamy, H. (2006). *An experimental investigation of the sensitivity of a buried fiber optic intrusion sensor*. (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- Leming, S. K. & Stalford, H. L. (2003). Bridge weigh-in-motion system development using superposition of dynamic truck/static bridge interaction. Dans *Proceedings of the 2003 American Control Conference*. Piscataway, NK: IEEE.
- Li, J., Muench, S. T., Mahoney, J.P., White, G.C., Pierce, L.M. & Sivaneswaran, N. (2004). *Application of HDM-4 in the WSDOT highway system*. (Rapport WA-RD 588.1). Seattle, WA: Washington State Transportation Center.
- Machu, C., Barthe, C. & Association internationale permanente des congrès de la route (1992). *Dictionnaire technique des routes et de la circulation routière: français, anglais* (p.640) Paris, France : La Maison du dictionnaire.
- McCall, B. & Vodrazka Jr., W. (1997). *States' Successful Practices Weigh-in-Motion Handbook*. Ames, IA: Center for Transportation Research and Education.
- McCormack, B., Geraghty, D. & O'Mahony, M. (2005). *Design and Manufacture of Surface Acoustic Wave Sensors for Real-Time Weigh-in-Motion*. Communication présentée à Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada.
- Middleton D., White, R.P., Crawford, J.A., Parker, R.T., Song, J. & Haas, C. (2007). *Investigation for Traffic Monitoring Equipment Evaluation Facility*. (Report No. 0-4664-3). Washington, DC: FHWA.
- Nuno, L. & Venables, A.J. (2000). Infrastructure, Geographical Disadvantage, Transport Costs, and Trade. *The World Bank Economic Review*, 15(3), pp.451-479.
- Odoki, J.B. (2007, septembre). *HDM-4 usage on UK non-trunk routes for the Department for Transport*. Communication présentée au Congrès Mondial de la route, Paris, France.
- Office of Asset Management. (2002). *Life-Cycle Cost Analysis Primer*. Washington, DC: Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.
- Papagiannakis, T. & Senn. D.K. (1995, août). *WIM system calibration using AVI-equipped vehicles*. Communication présentée à 6th International VNIS 'A Ride into the Future', Seattle, WA.

- Robinson, R., Danielson, U. & Snaith, M. (1998). *Road Maintenance Management: Concept and Systems*. US: MacMillanIHE.
- Ronghui, Q. & Jianxin, G. (2008). *Optic fiber-based dynamic pressure sensor*. Communication présentée à Optical Fiber Sensors Conference, San Diego, CA.
- SABITA. (2004). *Advancing the Public Interest: Why you need to maintain surfaced roads*. Southern Africa Bitumen and Tar Association, Cape Town, Afrique du Sud. Répéré au <http://www.sabita.co.za/documents/InformationSeriesNo1.pdf>.
- Schutte, I. (2008). *A User Guide to Road Management Tools*. (Rapport 47921). Washington, DC: The World Bank.
- Seneviratne, P.N. & Date, S. (2009). Case for Increasing Efficiency of Road Development Aid. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2114(2114), pp.1-9.
- Suanpaga, W. & Kamiya, Y. (2010) Riding Quality Model for Asphalt Pavement Monitoring Using Phase Array Type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR). *Remote Sensing*, 2(11), pp.2531-2546.
- Tang, J. & Zakhor, A. (2011). *3D object detection from roadside data using laser scanners*. Communication présentée à Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2011, San Diego, CA.
- Transportation Research Board. (1990). *New Trucks for Greater Productivity and Less Road Wear: An Evaluation of the Turner Proposal*. (Report 227). Washington, DC: NRCTRB.
- Wang, K., Wei, Z., Zhang, H., Huang, X., Chen, B. & Cui, H. (2006). Fiber-Bragg-grating-based weigh-in-motion system using fiber-reinforced composites as the load-supporting material. *Optical Engineering*, 45(6). DOI: 10.1117/1.2209994.
- Wright, P.H. & Dixon, K.D. (2004). *Highway Engineering* (Seventh Edition), Wright, P.H. et Dixon (éds). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons Inc.
- Zang, L. & Levinson, D. (2008). Investing for Reliability and Security in Transportation Networks. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2041(200807). DOI: 10.3141/2041-01.