

OUTIL INNOVANT POUR LA GESTION DES ROUTES

Par

Nabil KHODERAGHA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 21 FÉVRIER 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Nabil KHODERAGHA, 2018



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Gabriel Assaf, directeur de mémoire
Département de la construction à l'École de Technologie Supérieure

M. Constantine Katsanis, président du jury
Département de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Sylvain Boudreau, membre du jury
Cordonnateur réseaux techniques urbains chez Ville de Gatineau

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

LE 11 JANVIER 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire, je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

En premier lieu, j'aimerais remercier M. Gabriel Assaf, professeur à l'École de Technologie Supérieure et directeur de recherche, pour ses conseils avisés, son précieux soutien, sa disponibilité, son sens de la pédagogie, le partage de ses compétences et sa générosité hors pair, ce fut un réel honneur pour moi de travailler avec lui.

J'exprime ma reconnaissance envers l'organisme MITACS et l'entreprise WSP pour leur confiance et leur soutien financier.

Je remercie également les membres du jury qui ont consacré leur temps pour analyser et juger mon travail à sa juste valeur.

Aussi, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille qui m'a épaulé et encouragé tout au long de ma maîtrise, particulièrement ma mère à qui je voue la plus grande admiration.

Finalement, je remercie infiniment ma chère épouse, Fida, pour sa patience, son dévouement ainsi que son soutien sans failles, sans oublier que l'on s'apprête à accueillir notre premier bébé qui apportera du bonheur à notre foyer.

Outil innovant pour la gestion des routes

Nabil KHODERAGHA

RÉSUMÉ

Ce mémoire consiste à proposer un outil graphique dans les systèmes de la gestion moderne des chaussées afin d'aider les décisionnaires dans l'élaboration d'une meilleure stratégie d'entretien et de réhabilitation au moment opportun dont les caractéristiques seront : des décisions fiables et efficaces qui permettent de répondre au problème au moindre coût.

Les systèmes de gestion de chaussées reposent sur la collecte de données, prérequis essentiel pour la détermination des causes de détérioration et pour l'analyse des performances des chaussées. Cette approche tient une place importante dans ce mémoire puisque l'objectif est de développer un outil graphique d'optimisation pour une prise de décisions rationnelle, c'est-à-dire basée sur des données objectives et stratégiques, car elle repose sur une approche de compilation de toutes les données.

L'outil proposé s'appuie sur la cueillette et l'analyse des données suivant un plan de qualité exposé, ainsi que la visualisation graphique de ces données sur la plateforme Google Earth, ceci permet d'intégrer, de visualiser et de stocker une abondante quantité d'informations pour différents niveaux de décisions.

L'outil utilise du matériel technologique très répandu et peu coûteux dont des caméras vidéo géoréférencées pour la cueillette des données, des applications téléphoniques pour relever la géométrie en x, y et z des routes étudiées, puis le dispositif OBD (*On-Board Diagnostic*) employé dans le calcul des émissions polluantes, et finalement l'ordinateur outil de traitement et d'analyse. Cet outil graphique a été appliqué et a permis de valider l'approche en études de réhabilitation de routes urbaines et rurales.

L'adoption de l'outil graphique contribuera à l'amélioration et l'optimisation de la qualité du processus de prise de décisions.

Mots-clés : système de gestion des chaussées, entretien préventif, gestion de la qualité, système d'information géo-référencé, collecte des données.

Outil innovant pour la gestion des routes

Nabil KHODERAGHA

ABSTRACT

This study consists of developing a graphical tool which is integrated in the systems of the modern pavement management to assist decision-makers in developing suitable action plans characterized in effective and reliable decisions at a lower cost.

The pavement management systems are based on data collection, which is essential for modeling and analyzing pavement performance. This approach plays an important role in this study since the objective is to develop a protocol for optimizing the rational and strategic decision-making process.

The suggested tool is based on the collection and the analysis of data according to a quality plan exposed, as well as the graphical visualization of these data on the platform Google Earth which could integrate, visualize and store an abundant amount of information by any type of users.

Our tool collects data using available and inexpensive technological equipment including georeferenced video cameras, mobile applications to record the x, y and z geometry of the studied routes, in addition to the On-Board Diagnostic (OBD) device used in the calculation of polluting emissions, and finally, the computer, processing and analysis tool. This graphic tool has been tested in urban and rural roads, which allowed to put these road rehabilitation studies to test.

The adoption of our graphic tool will contribute to the improvement and optimization of the decision-making process quality.

Keywords: pavement management system, preventive maintenance, quality management, georeferenced information system, data collection.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS SUR LES STRUCTURES ROUTIÈRES	5
1.1 Infrastructures civiles.....	6
1.2 Constitution et détériorations des chaussées.....	7
1.2.1 Composantes d'une chaussée.....	7
1.2.2 Types de chaussées	9
1.2.3 Fonctions d'une chaussée	12
1.2.4 Causes de détérioration.....	13
1.2.4.1 Les conditions climatiques.....	13
1.2.4.2 Le trafic	14
1.2.4.3 Les malfaçons et accidents.....	15
1.2.4.4 Les dégradations structurelles.....	16
1.3 Système de gestion des chaussées.....	16
1.3.1 Définition et caractéristiques du système de gestion des chaussées	16
1.3.2 Niveaux du système de gestion de la chaussée	18
1.4 Indices de l'état de la chaussée	19
1.4.1 Indice de Rugosité International	19
1.4.2 Déflexion de la chaussée.....	21
1.4.3 Indicateurs de condition des chaussées.....	22
1.5 Entretien préventif	23
1.5.1 Moment optimal du traitement.....	24
1.5.2 Avantages de la maintenance préventive des chaussées.....	24
CHAPITRE 2 PROCESSUS DE GESTION DE CHAUSSÉE	27
2.1 Définir le réseau routier et collecter les données d'inventaire.....	28
2.1.1 Système de localisation.....	29
2.1.1.1 Caractéristiques du système.....	29
2.1.1.2 Types de méthodes de référencement de localisation	30
2.1.2 Système d'information géographique	32
2.1.2.1 Historique des SIG	33
2.1.2.2 Définition des SIG	34
2.1.2.3 Fonctions des SIG	35
2.1.2.4 Produits des SIG	35
2.1.2.5 Formats	36

2.1.2.6	Logiciels SIG	38
2.1.2.7	SIG, Outil de gestion des chaussées	42
2.1.2.8	Limites de cette intégration.....	43
2.2	Collecte des données de condition.....	43
2.2.1	Quantité de données.....	44
2.2.2	Qualité des données	44
2.2.3	Collecte de données niveau réseau et projet	45
2.2.4	Relevés manuels ou semi-automatiques	46
2.2.5	Comparaison entre les méthodes automatiques et manuelles	47
2.2.6	Dispositifs automatisés en détection de dégradation	49
2.2.6.1	Captations par caméra.....	49
2.2.6.2	Captations par caméra infrarouge	53
2.2.6.3	Captations par vidéo caméra	54
2.2.6.4	Captations par laser (3D sensor).....	55
2.2.6.5	Captations par accéléromètre et autres méthodes basées sur les vibrations	56
2.2.6.6	Captations acoustiques.....	57
2.2.6.7	Captations par Radar.....	58
2.2.6.8	Sommaire	59
2.3	Prévoir l'état des chaussées	60
2.3.1	Taux moyens de détérioration.....	61
2.3.2	Modèles de prédiction utilisant l'analyse statistique	61
2.3.3	Sélection d'une méthodologie appropriée	63
2.4	Choix des traitements.....	63
2.4.1	Sélection de traitement cyclique	63
2.4.2	Règles de traitement.....	64
2.4.3	Classement	64
2.4.4	Analyse avantages/coûts	65
2.4.5	Sélection d'une méthodologie appropriée	65
2.5	Présentation des résultats	66
2.5.1	Aides visuelles pour la communication d'informations	66
2.6	Sélection d'un outil de gestion des chaussées.....	68
2.6.1	Logiciels publics	68
2.6.2	Logiciels privés.....	68
2.7	Reproduire le processus de manière cyclique	68
2.8	Conclusion	70
	CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL	71
3.1	Oignon de la recherche	72
3.2	Étapes de développement de l'outil	73
3.2.1	Relevé par vidéo caméra.....	73
3.2.2	Notions de base	74
3.2.3	Classification et quantification des dégradations.....	75

3.2.4	Indice de condition visuel	78
3.2.4.1	Calcule de ICV.....	79
3.2.5	Système de diagnostic embarqué.....	80
3.3	Système de collecte de données.....	81
3.3.1	Avant d'entamer la procédure.....	81
3.3.2	Durant la procédure.....	82
3.3.3	Post-procédure	84
3.4	Système d'analyse et de visualisation.....	84
3.4.1	Outil graphique	85
3.4.1.1	Résolution de Google Earth.....	86
3.4.1.2	Format de Google Earth.....	86
3.4.1.3	Exporter au KML.....	87
3.4.1.4	Visualisation	87
3.4.2	Avantages de Google Earth dans la gestion des chaussées.....	89
3.4.3	Critiques et limites de Google Earth.....	89
CHAPITRE 4 GESTION DE LA QUALITÉ DE LA COLLECTE DES DONNÉES SUR L'ÉTAT DES CHAUSSÉES.....		91
4.1	La qualité	92
4.1.1	Définition	92
4.1.2	Évolution de la qualité	93
4.1.2.1	La première partie du 20 ^{ème} siècle	93
4.1.2.2	La 2 ^{ème} moitié du 20 ^{ème} siècle	94
4.1.3	L'organisation internationale de normalisation (ISO)	96
4.1.4	Tendance future de la qualité	97
4.1.5	Tendance contractuelles futures.....	97
4.2	La non qualité	97
4.2.1	Coût de la non qualité	97
4.2.2	Les composants de coût de non qualité.....	97
4.3	Gestion de la qualité de la collecte des données	99
4.3.1	Avantages de l'implantation d'un plan de gestion de la qualité	100
4.3.2	Utilisations des données collectées.....	100
4.4	Protocoles d'évaluation de la collecte de données	101
4.4.1	Critères d'acceptation	101
4.4.2	Identification des responsabilités.....	101
4.4.3	Contrôle de la qualité	102
4.4.4	Acceptation	103
4.4.5	Action corrective.....	103
4.4.6	Élaboration de rapports	104

CHAPITRE 5	VALIDATION DE L'OUTIL POUR UN SUPPORT DE DÉCISIONS D'ENTRETIEN.....	105
5.1	Études de cas n°1	106
5.1.1	Évaluation de l'état de chaussée	107
5.1.2	Évaluation environnementales	108
5.2	Études de cas n°2	109
5.2.1	Détermination de la (les) cause (s) de détiorioration	109
5.3	Validation de la méthode OBD.....	111
5.3.1	Identification des itinéraires.....	111
5.3.2	Méthode de calcule	113
5.3.3	Validation des résultats	113
5.4	Conclusion	114
CONCLUSION		115
ANNEXE I	CONCEPT MÉTHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE	117
ANNEXE II	NOTE DE CALCUL DE LA METHODE PROPOSEE.....	121
BIBLIOGRAPHIE		125

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1	Les éléments d'infrastructures englobés par le système de gestion des infrastructures civiles.....
	7
Tableau 1-2	Comparaison entre les chaussées souple et rigide.....
	11
Tableau 1-3	Valeur d'IRI au-delà desquelles la chaussée est considérée déficiente par le MTQ
	20
Tableau 2-1	Aspects de la méthode de référencement de localisation
	30
Tableau 2-2	Historique et évolution des SIG
	33
Tableau 2-3	Collecte de données niveau réseau et projet.....
	46
Tableau 2-4	Comparaison entre les méthodes automatiques et manuelles pour la collecte de données
	48
Tableau 2-5	Rapport entre la résolution d'image et largeur de fissure (Voie de 4m)
	52
Tableau 2-6	Niveau de méthode de détection de la dégradation des chaussées
	60
Tableau 2-7	Aides visuelles pour la transmission d'information aux utilisateurs de données de gestion de la chaussée (Brotén, 1997)
	67
Tableau 3-1	Niveau d'ampleur des dégradations
	76
Tableau 4-1	L'évolution de la norme ISO
	96
Tableau 4-2	Le rapport entre les coûts de chaque catégorie et les coûts totaux varie considérablement (Institute, 2016).
	98
Tableau 5-1	Tronçons de route du projet de transport à Sri Lanka.....
	106
Tableau 5-2	Différence de consommation en pourcentage
	114

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1-1	Constitution théorique des chaussées	8
Figure 1-2	Distribution de charge dans les chaussées	9
Figure 1-3	Soulèvement différentiel transversal	14
Figure 1-4	Les équivalents d'un camion surchargé	15
Figure 1-5	Les principaux objectifs du système AGIR	17
Figure 1-6	Les principaux objectifs du système PAVER	18
Figure 1-7	Échelle de l'indice IRI en fonction de différents types de route	20
Figure 1-8	Schéma de fonctionnement de la poutre de Benkelman	21
Figure 1-9	Effet du traitement de maintenance préventif	25
Figure 2-1	Point Route	31
Figure 2-2	Poste de référence de la route	31
Figure 2-3	Nœud de liaison	32
Figure 2-4	Référence de la route	32
Figure 2-5	Une version modélisée du monde réel et la superposition	34
Figure 2-6	Cycle de la donnée en géomatique	35
Figure 2-7	Exemple des cartes thématiques, de référence et topographiques	36
Figure 2-8	Constitution des données au format Raster	37
Figure 2-9	Concept des données au format Vecteur	37
Figure 2-10	Méthode de collecte des données de condition	45
Figure 2-11	Image numérisée d'un film 35mm, 2.048 pixels/ligne	50
Figure 2-12	Numérisation par zone (a) et Numérisation linéale (b)	50

Figure 2-13	Numérisation par linéale vs Numérisation par zone.....	51
Figure 2-14	Image de résolution 2,048 pixels, par appareil photo digital à balayage par zone (K. C. Wang & Smadi, 2011)	52
Figure 2-15	Image de résolution 4,096 pixels, par appareil photo digital à balayage par ligne (K. C. Wang & Smadi, 2011).....	52
Figure 2-16	La visualisation des différentes données du système de collecte de données développée par (Miah et al., 2015).....	53
Figure 2-17	Diagramme schématique de la méthode de captation par vidéo caméra.....	54
Figure 2-18	Système LCMS (Laser crack measurement system) source INO	55
Figure 2-19	Diagramme schématique du système d'accéléromètre.....	56
Figure 2-20	Diagramme schématique du Roughometer.....	57
Figure 2-21	Diagramme schématique du principe de LiDAR	58
Figure 2-22	Prévision d'une section de chaussée.....	62
Figure 2-23	Les sept étapes du processus de gestion de la chaussée.....	69
Figure 3-1	Oignon de la recherche, adapté par Saunders et al. (2009)	72
Figure 3-2	Humidité résiduelle sur le site d'une fissure	74
Figure 3-3	Photo illustrant l'effet de l'éclairage sur la visibilité des fissures.....	75
Figure 3-4	Schéma illustrant la directive de calcul du pourcentage de l'ampleur	76
Figure 3-5	Schéma illustrant la directive de calcul d'ampleur.....	77
Figure 3-6	Échelle et code couleur de l'indice de condition visuel	79
Figure 3-7	Connection de l'unité de contrôle électronique.....	80
Figure 3-8	Support conçu pour fixer la caméra au capot	83
Figure 3-9	Interface de l'application OBD.....	83
Figure 3-10	Feuille de calcul conçu pour calculer l'indice de condition visuel.....	85
Figure 3-11	Intégration des photos sattelitaires sur la plateforme GE	86
Figure 3-12	Visualisation des données importées sur GE.....	88

Figure 4-1	L'évolution de la qualité.....	95
Figure 4-2	Les composants de coût de non qualité	98
Figure 4-3	Exemples de précision et exactitude.....	99
Figure 5-1	Dégradations décelées pour le tronçon de la route Avissawella-Ratnapura.....	106
Figure 5-2	Découpage du tronçon de route en sections homogènes.	107
Figure 5-3	Photo prise par la caméra virb fixé sur le capot du véhicule.....	108
Figure 5-4	Valeur IRI en 2017 par le dispositif ARRAB Roughmeter.....	109
Figure 5-5	Classification de dégradation par des sections de 1km	110
Figure 5-6	Carte de l'itinéraire 1	111
Figure 5-7	Carte de l'itinéraire 2	112
Figure 5-8	Carte de l'itinéraire 3	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AGIR	Auscultation et Gestion des Infrastructures Routières
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
DOD	Department of Defense
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FHWA	Federal HighWay Administration
GE	Google Earth
GIE	Global Information Environment
GIS	Geographical Information System
GPS	Système de Positionnement Globale
HDM	Highway Development Management
ICC	Indice de la Condition de Chaussée
ID	Indice de Déformation
IF	Indice de Fissuration
IRC	Institut de Recherche en Construction
IRI	Indice de Rugosité International
KML	Keyhole Markup Language
MTQ	Ministère de Transports du Québec
OBD	On-Board Diagnostic
PCI	Pavement Condition Index
PIB	Produit Intérieur Brut
PMP	Pavement Management System

QC	Contrôle de Qualité
SGC	Système de Gestion des Chaussées
SIG	Système d'Information Géographique
TI	Technologies de l'Information
WASHO	Western Association of State Highway Organization

INTRODUCTION

Le réseau routier est un élément essentiel au développement d'un pays, celui-ci assure l'accès aux besoins élémentaires comme les soins, l'alimentation, l'éducation ou encore le travail. Il constitue le fondement de toute économie et est un moteur de développement : « *la route du développement passe par le développement de la route* » disait Rémy Prud'homme.

La chaussée fait partie des infrastructures civiles qui regroupent toutes sortes d'utilités publiques, notamment : les réseaux d'égouts pluviaux et sanitaires, les réseaux d'aqueducs, les réseaux de distribution d'énergie, de gaz et d'électricité mais aussi les réseaux de communication (téléphonie et câblodistribution).

La chaussée, telle que définie par Delort (1982) « *la partie d'une voie de communication affectée à la circulation des véhicules* » représente une infrastructure vitale à toute société sur les plans économique et social, (Grataloup, 2015) « *la route naît de l'idée qu'il existe un autre, avec qui on peut échanger* ».

L'étendue, l'importance et l'interaction avec de multiples paramètres des structures routières, tel que détaillé dans le chapitre 1, impose une prise de décisions rationnelles et stratégiques. La collecte de données et la visualisation sont dès lors une condition sine qua non à cette prise de décisions.

Le niveau de mise en œuvre des systèmes de gestion des chaussées varie selon les pays, mais tous sont confrontés à des problèmes similaires. L'un des plus importants est la présentation et l'interprétation des données.

La collecte des données pertinentes sur l'état de la chaussée est cruciale pour tout processus de prise de décisions dans le domaine de la gestion des chaussées. Le but de chaque système de gestion des chaussées consiste à surveiller les routes et leur état, à prévoir leurs conditions futures et à hiérarchiser les scénarios d'entretien, de réhabilitation et de maintenance.

La collecte de données se révèle d'une grande importance d'alimentation du système de gestion des chaussées car ces données constituent une base pour la modélisation et l'analyse des performances des chaussées.

Cependant, les données routières sont si abondantes qu'elles représentent un inconvénient majeur dans la démarche de prise de décisions. Aujourd'hui avec les techniques de collecte de données, il est facile de mettre la main sur d'énormément quantité d'informations, par exemple, pour le fort débit de circulation, des systèmes collectent et saisissent la distribution de tout type de véhicules à chaque instant, sur chaque tronçon de route avec les coordonnées GPS, produisant un flux d'informations colossal. Toutes ces données sont stockées sur des Meta bases regorgeant d'informations que les ingénieurs doivent trier, analyser et partager entre tous les intervenants afin de prendre des décisions.

Il existe actuellement des méthodes de gestion de données et de visualisation, par contre, celles-ci posent beaucoup de limites et des problèmes aux ingénieurs et aux décisionnaires dans la prise de décision efficace, comme indiqué ci-dessous :

- Utilisation de logiciels professionnels dédiés et payants, difficiles d'accès aux décideurs dans les projets routiers (politiciens, fonctionnaires et conseillers) ;
- Partage de données complexe et fichiers volumineux difficiles à transmettre par courriel;
- Indisponibilité d'une plateforme regroupant toutes les informations nécessaires aux études; et
- Frais importants déboursés pour l'étude des chaussées.

La problématique soulevée est : Comment collecter et visualiser les données des chaussées d'une manière continue et non coûteuse, afin de permettre aux ingénieurs en un coup d'œil de comprendre l'état de la chaussée ?

L'objectif principal de ce mémoire est de mettre en œuvre un outil graphique pour améliorer le processus de prise de décisions et de gestion des chaussées aboutissant à une optimisation du choix de technique d'intervention. Le développement d'un tel outil d'aide à la prise de décisions permettra une visualisation des données techniques, accessible et peu coûteuse. La réalisation de cet objectif comprend deux volets :

- 1- Élaborer un système de collecte de données continues simple, non coûteux et établi selon un plan de gestion de la qualité normalisé qui permet aux ingénieurs de découper la chaussée en sections homogènes pour créer un historique de référence, servant dans la planification périodique d'intervention sur les chaussées; et
- 2- Développer une plateforme accessible, gratuite et compréhensible afin de visualiser les données de façon synoptique pour faciliter la prise de décisions par les ingénieurs.

Dans cette démarche, les publications scientifiques traitant de la cueillette de données et de la visualisation sur les supports technologiques les plus accessibles et bon marché seront mises à profit dans le but d'introduire l'outil développé et l'intérêt qu'il apporte dans la prise de décisions fiables. Cet outil sera appliqué sur deux volets :

- 1- Collecter les données selon un plan de gestion de qualité personnalisé et peu coûteux. Cette méthode révèlera tous ses intérêts en tant que support dans la prise de décisions relatives à l'entretien préventif; et
- 2- Développer un outil de visualisation des données associées à un emplacement géographique précis, qui fournit une information exacte et offre la possibilité de superposer divers ensembles de données, pour permettre aux décisionnaires de comparer les données et de découvrir les tendances et liens. Les caractéristiques de cet outil sont : un moindre coût (pour assurer sa pérennité), un accès facile à distance en tout temps et lieu, et une utilisation facile par l'opérateur.

La revue de littérature est développée dans le premier et le deuxième chapitre, l'accent sera mis sur deux aspects cruciaux de la gestion des chaussées, la collecte de données d'état des chaussées et les systèmes de référenciations géographiques.

Le chapitre 3 énonce la méthodologie suivie dans l'élaboration de cette recherche, le tout basé sur la logique d'enchaînement de la structure d'oignon développée par Saunders et Thornhill (2009).

Le chapitre 4 expose les notions de gestion de qualité, retrace son évolution et son progrès, ainsi que l'intérêt qu'elle apporte à la collecte de données relatives aux chaussées.

Le chapitre 5 a pour vocation de présenter l'outil développé lors de ce projet, puis portera sur les résultats obtenus et leur validation.

Enfin, la conclusion établira le degré de satisfaction de l'objectif fixé et les recommandations préconisées pour l'amélioration du processus.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES STRUCTURES ROUTIÈRES

Dans ce chapitre, il sera question dans un premier temps de définir les composantes, les types et les indices de performance des chaussées. Puis d'expliquer les causes de détériorations, les méthodes et les outils utilisés en gestion de maintenance des chaussées et enfin l'importance d'une maintenance préventive régulière dans l'entretien des routes.

L'indice d'état de la chaussée est un moyen simple, pratique et peu coûteux pour contrôler l'état de la surface des routes, et pour identifier les besoins en maintenance et réhabilitation.

La première méthode, passive, pour faire le point sur l'état d'une route consiste à laisser la route dans son état et attendre d'éventuelles plaintes, plus il y en a, plus l'état des routes est mauvais. La deuxième est d'utiliser une approche proactive pour analyser l'état de l'ensemble du réseau routier (Hicks, Moulthrop, & Daleiden, 1999).

Au Québec, le mauvais état des routes engendre des frais faramineux aux usagers. En effet les dégradations causent une hausse de la consommation des combustibles, l'usure prématurée des pneus et ainsi des dépenses additionnelles sur la mécanique des véhicules affectant la compétitivité des prix des exportations québécoises face à la concurrence mondiale.

Les détériorations de la chaussée sont classées en deux catégories différentes :

- 1- Détérioration fonctionnelle: le revêtement ne convient pas à sa fonction sans cependant causer d'inconfort aux utilisateurs ni de dégâts sur les véhicules. Il dépend principalement du degré de rugosité de la surface. Cette détérioration est due à une défaillance de la structure du revêtement qui résulte de la fatigue, développé dans les sous-bas ou surface (Yoder & Witczak, 1975).
- 2- Détérioration de la structure: comprend un effondrement de la structure de la chaussée ou le manque d'une ou plusieurs composantes fragilisant la chaussée.

Dans certains cas, l'une des deux types de défaillances entraîne l'autre, mais elles sont généralement indépendantes. En plus du désagrément et des coûts qu'entraînent ces détériorations, par exemple, la qualité et l'état de la surface de la chaussée influent sur la puissance requise par le véhicule pour se déplacer augmentant ainsi la consommation de carburant et par conséquent les émissions polluantes (Gillespie & McGhee, 2007).

Ce chapitre a pour objectif de démontrer l'importance de l'entretien préventif du réseau afin de pérenniser l'investissement sur les routes, de maintenir une bonne qualité de service, d'augmenter la durée de vie des véhicules et ainsi de permettre une économie aux usagers.

1.1 **Infrastructures civiles**

« Les infrastructures civiles concernées sont, de prime abord, les chaussées, les réseaux d'égouts pluvial et sanitaire, le réseau d'aqueduc et les ouvrages d'art, mais également les services d'utilités publiques tels que les réseaux de distribution d'énergie, de gaz et d'électricité, et les réseaux de communication, de téléphonie et de câblodistribution » (Bruxelle, 2005).

Hudson, Haas, et Uddin (1997) divisent les infrastructures en sept catégories :

1. Réseaux de transport;
2. Réseaux d'eaux et d'eaux usées;
3. Gestion des déchets;
4. Production et distribution de l'énergie;
5. Constructions;
6. Installations récréatives; et
7. Communication.

Selon Hudson (1994) le concept de gestion des chaussées a été élargi pour englober plusieurs domaines. Les infrastructures concernées sont les réseaux de transport et les infrastructures municipales. Les éléments de ces infrastructures sont présentés dans le tableau 1-1 :

Tableau 1-1 Les éléments d'infrastructures englobés par le système de gestion des infrastructures civiles
Adapté par Bruxelle (2005) et Hudson (1994)

Les réseaux de transport	Les infrastructures municipales
<ul style="list-style-type: none"> - Chaussées - Ponts et viaducs - Sécurité - Congestion et circulation - Transport public - Transport intermodal 	<ul style="list-style-type: none"> - Les éléments des réseaux de transport - Égouts et aqueduc - Signalisation routière - Service d'urgence - Électricité - Collecte des déchets et recyclage - Drainage

Le présent travail se concentre sur les infrastructures de transport et les chaussées elles seront d'ailleurs le principal sujet de ce mémoire.

1.2 Constitution et détériorations des chaussées

Les routes sont généralement conçues pour durer de 15 à 20 ans, bien qu'avec un entretien fréquent et correct, la durée de vie du projet puisse être considérablement allongée (Fernandes Jr, Paez, & Lopes, 2012). Cette partie, présente les composants de la chaussée, puis les différents types des chaussées.

1.2.1 Composantes d'une chaussée

Les chaussées comprennent plusieurs couches de matériaux soigneusement sélectionnés pour répartir progressivement les charges de la surface de la chaussée sur les couches inférieures. La figure 1-1 présente les différentes constitutions des chaussées.

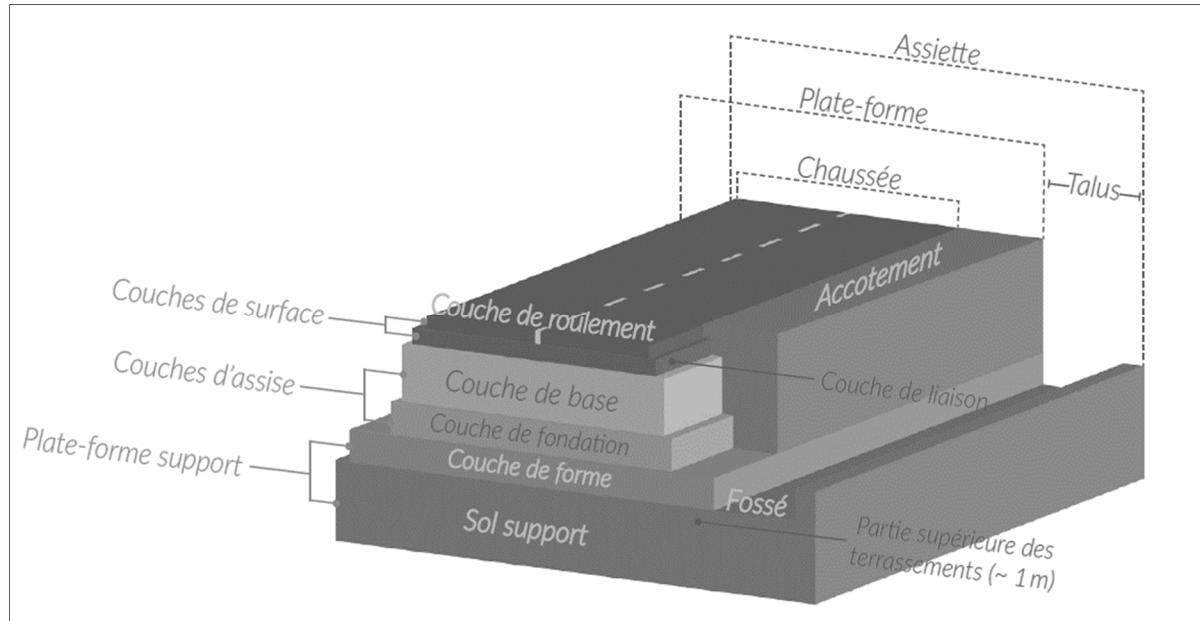


Figure 1-1 Constitution théorique des chaussées
Tirée de (Bertrand & Chasseray, 2016)

Les différentes couches composant une chaussée souple et leurs fonctions sont décrites ci-dessous (Bertrand & Chasseray, 2016) :

- 1- La plate-forme servant de support de chaussée est constituée de deux couches :
 - Le sol support, qui est la base de la structure de la chaussée, composé généralement des matériaux naturels du sol en place, définis en fonction de leur taille (graviers, cailloux, sable, argile ou limons); et
 - La couche de forme, qui repose sur la surface du sol support, elle sert à niveler le sol sur lequel la chaussée sera construite (Bertrand & Chasseray, 2016).
- 2- La couche d'assise, diminue les contraintes sur le support de chaussée et repartissent les charges verticales sur la surface du support de chaussée (Voir figure 1-2).
- 3- Couches de surface constituées de la couche de liaison et la couche de roulement :
 - La couche de liaison est optionnelle, elle existe pour les routes qui supportent la charge de nombreux véhicules lourds ou d'un fort trafic. Elles diminuent les risques de formations de dégradations; et
 - La couche de roulement est en contact direct avec les pneus des véhicules, elle est exposée en première ligne au trafic et au climat.

Les fonctions et exigences de la couche de surface sont (Bertrand & Chasseray, 2016) :

- Le confort et la sécurité des usagers;
- L'étanchéité de l'ouvrage afin de protéger toute la base de l'infiltration de l'eau; et
- La réduction des bruits de roulement causés par le contact entre les pneus et la chaussé par l'utilisation de matériaux aux propriétés acoustiques.

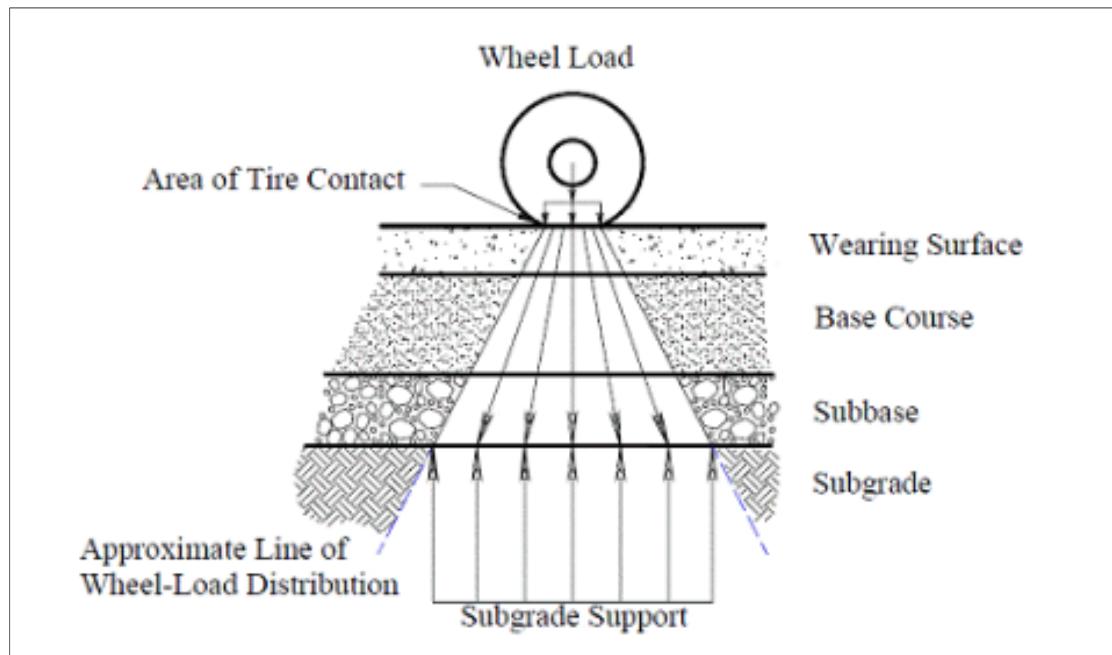


Figure 1-2 Distribution de charge dans les chaussées
Tirée de (Bertrand, 2016)

1.2.2 Types de chaussées

La chaussée en bitume et en béton est la méthode de revêtement la plus répandue au monde et est utilisée pour diverses applications, notamment pour la constitution des routes et les chaussées d'aéroport (Bang, Lee, & Kim, 2017).

Une brève description, de trois des types des chaussées les plus connues, est présentée dans cette partie (Bezabih & Chandra, 2009).

1. Chaussée souple: Le bitume est largement utilisé dans la construction de chaussées souples depuis longtemps. La chaussée souple est constituée d'un mélange de matériaux bitumineux et d'agrégats placés sur un lit de matériaux granuleux compactés en couches sur la plate-forme. C'est le type de construction le plus pratique et le plus simple. Dans certaines applications, toutefois, les performances du bitume conventionnel peuvent ne pas être considérées comme satisfaisantes pour les raisons suivantes (Leamon, 2015) :

- En été, puisque la température est élevée, le bitume devient mou, ce qui entraîne l'orniérage, et des cassures menant à la rupture de la chaussée;
- En hiver, puisque la température est basse, des fissures et des décollements apparaissent sur la chaussée rendant le revêtement impropre à l'utilisation;
- En saison des pluies, l'eau pénètre dans la chaussée, ce qui cause des nids-de-poule et parfois le décollement de la couche bitumineuse; et
- À des températures inférieures à zéro, l'infiltration de l'eau dans la chaussée se fait, en raison du gel dans les vides bitumineux, la dilatation et la contraction du volume se produisent. Cela conduit à une défaillance des chaussées.

2. Chaussée semi-Rigide: La chaussée semi-rigide est un type de structure de chaussée dans laquelle une couche de base semi-rigide, généralement constituée d'une base de ciment ou d'une base stabilisée au ciment, est recouverte d'une couche supérieure flexible de mélange de bitume (Zheng, 2012).

3. Chaussée Rigide: La surface de la chaussée rigide est beaucoup plus rigide que la surface de la chaussée en bitume. Elle est habituellement construite directement sur la couche de base. Bien que le béton des chaussées rigides soit construit de plusieurs manières différentes, ces types de systèmes de chaussées contiennent des éléments de renforcement tels que des treillis métalliques ou des barres déformées dans le béton.

Une comparaison, entre les chaussées souple et les chaussées rigide, est présentée dans le tableau 1-2.

Tableau 1-2 Comparaison entre les chaussées souple et rigide
Adapté par (Coenen, 2017)

Chaussée souple	Chaussée rigide
Se compose d'une série de couches de matériaux de haute qualité	Se compose d'une dalle de béton ou de ciment, et possède une résistance à la flexion relativement élevée.
Reflète les déformations de la couche de fondation et des couches subséquentes sur la surface.	Tolère les déformations localisées.
Stabilité liée au frottement et cohésion des particules.	Sa résistance structurelle est assurée par la dalle de chaussée elle-même par son action de faisceau.
Conception fortement influencée par la résistance de la plate-forme.	La résistance à la flexion du béton est un facteur majeur de conception.
Répartition de la charge à travers les couches de composants.	Répartition de la charge sur une large zone de fondation en raison de sa rigidité et de son coefficient d'élasticité
Les variations de température dues au changement des conditions atmosphériques induisent de faibles contraintes dans les chaussées flexibles.	Les changements de température induisent de fortes contraintes dans les chaussées rigides.
Les déformations causées par les charges de roues lourdes sont récupérables dans une certaine mesure.	Toute déformation excessive due à des charges de roues plus lourdes que prévu est définitive, c'est-à-dire que les tassements sont permanents.

1.2.3 Fonctions d'une chaussée

La chaussée c'est la structure qui va d'une rive à l'autre, les fonctions principales d'une chaussée sont présentées ci-dessous :

- Fournir une surface de roulement lisse: Une surface de roulement lisse est essentielle pour le confort de conduite. La rugosité peut provenir d'un certain nombre de causes, mais le plus souvent, elle est provoquée par la déformation de la chaussée causant à son tour la déformation de la structure;
- Fournir une friction de surface adéquate: Outre le confort de conduite, l'autre exigence est la sécurité. La sécurité, en particulier dans des conditions pluvieuses, lorsque la chaussée est humide, peut être liée à une perte de friction superficielle entre le pneu et la surface de la chaussée. Une chaussée doit donc fournir un frottement et une texture de surface suffisants pour assurer la sécurité des usagers de la route dans toutes les conditions;
- Protéger les fondations: Le sol support sous la chaussée est communément appelé sous-sol. S'il est trop sollicité par les charges d'essieu appliquées, il se déformerait et perdrait sa capacité à supporter correctement ces charges par essieu. Par conséquent, le revêtement doit avoir une capacité structurelle (résistance et épaisseur) suffisante pour réduire de manière adéquate les contraintes réelles, de sorte qu'elles ne dépassent pas la résistance du support. Les exigences de résistance et d'épaisseur d'une chaussée peuvent varier considérablement en fonction de la combinaison du type de plate-forme et des charges; et
- Assurer une étanchéité: Le revêtement de la chaussée agit comme une surface d'étanchéité qui empêche la pénétration de l'eau aux couches de support sous-jacentes, y compris la couche de fondation, car une fois infiltré, le sol perd sa capacité à supporter adéquatement les charges, ce qui entraînera une défaillance prématuée de la chaussée.

1.2.4 Causes de détérioration

Avant d'aborder les stratégies d'entretien, il faut examiner les causes de détériorations des chaussées. Parallèlement aux techniques de maintenance, il existe diverses méthodes de préservation de la chaussée qui contribueront à améliorer la durée de vie de la chaussée et à en retarder la défaillance. Afin de comprendre tous les problèmes relatifs à l'état des routes et avant d'introduire de potentielles solutions, il convient de présenter les éléments de dégradation.

Il existe deux principaux facteurs de dégradation des routes, le trafic routier et les conditions climatiques, les facteurs secondaires sont : les malfaçons (Qualité de construction), les accidents de la route, les endommagements de surface et les dégradations structurelles.

«Au Québec, pour une route très peu fréquentée, 80 % de l'usure peut être due au climat alors que, pour une route très fréquentée, 50 % de l'usure est imputable aux conditions climatiques », selon une enquête réalisée en 2003 (Les Conseillers, 2009).

1.2.4.1 Les conditions climatiques

Dans les zones froides, le plus redoutable ennemi de la route est l'eau, plus particulièrement le gel. L'infiltration de l'eau dans la chaussée se fait par-dessus, par la pénétration de la pluie à travers les couches de surface et par-dessous par l'absorption (imprégnation) de l'eau des nappes phréatiques, toute cette eau une fois gelée constitue un surplus de masse sous la chaussée créant des tensions et des gonflements menant inévitablement à des fissurations de la route et création de faussés rendant la route difficilement praticable. Le phénomène du gel de la chaussée est montré dans la figure 1-3.

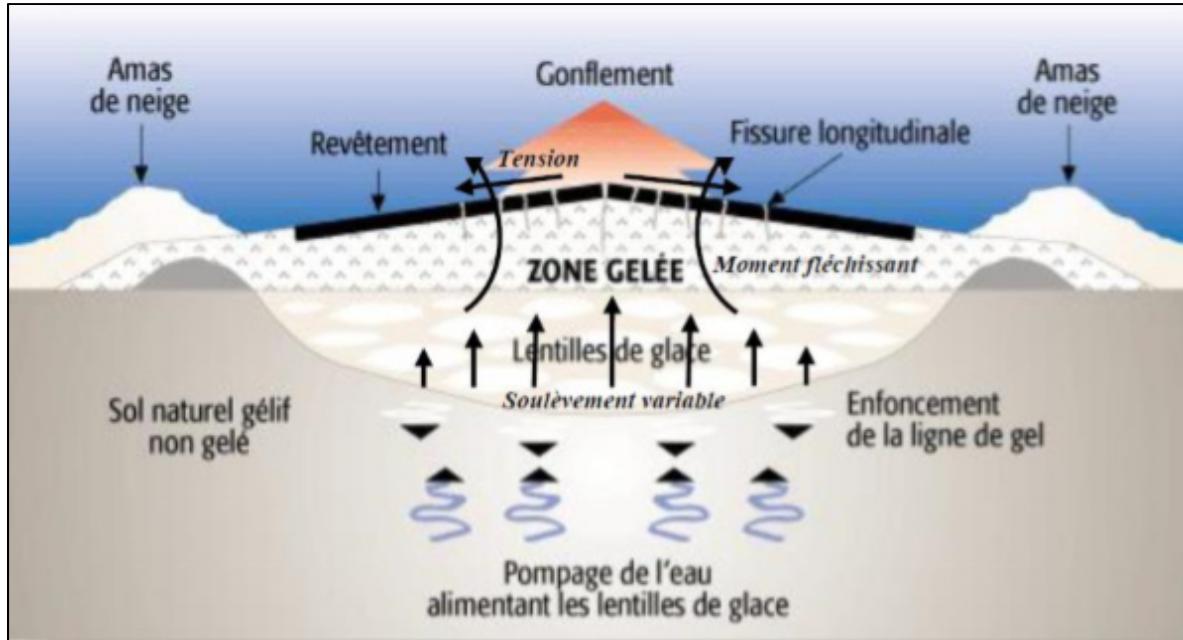


Figure 1-3 Soulèvement différentiel transversal
www.mtq.gouv.qc.ca

1.2.4.2 Le trafic

Le trafic est la deuxième cause de détérioration des routes au Canada (Adlinge & Gupta, 2013). Ainsi, les facteurs influents sont la capacité de la route et les caractéristiques du trafic. Les poids lourds seraient, à cet égard, les plus agressifs. Par exemple le passage d'un camion de 13 tonnes a plus d'effet sur la structure de la chaussée qu'un million de véhicules de tourisme (Bertrand & Chasseray, 2016).

La rigidité élevée de la couche de fondation assure la protection de son support contre les contraintes verticales engendrées par le trafic, cette couche de fondation sera sujette à la fissuration transversale sous l'effet des retraits de prise et thermique.

Par conséquent, si la taille et la masse d'un véhicule ne sont pas contrôlées, de lourdes charges peuvent causer des dommages excessifs à l'infrastructure routière. La figure 1-4, présente les équivalents d'un camion surchargé.

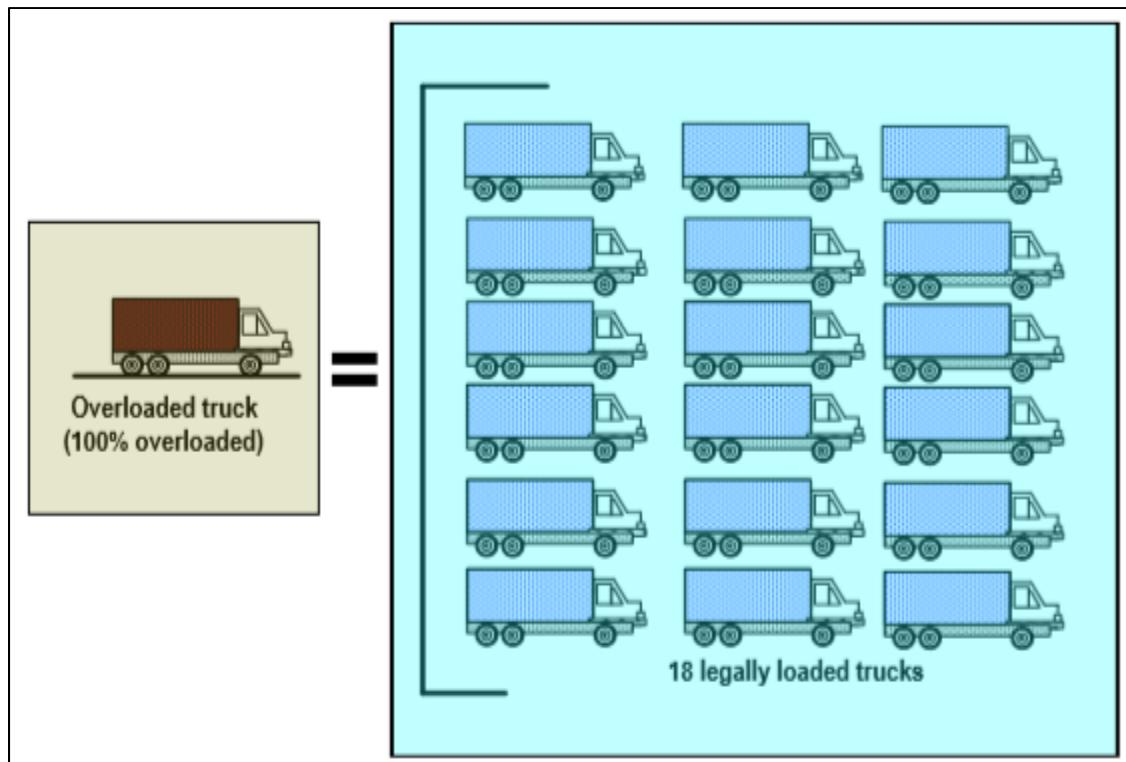


Figure 1-4 Les équivalents d'un camion surchargé
(Adlinge & Gupta, 2013)

L'utilisation des routes Québécoises connaît des croissances annuelles très significatives, accélérant la détérioration des routes, à titre d'exemple, durant l'année 2004, plus de 5 millions de voitures ont emprunté les voies routières Québécoises, un accroissement dépassant 3,7 % par rapport à l'année précédente. Durant la même année, plus de 115.000 camions lourds ont circulé sur ces routes du Québec, un accroissement de 2,8 % comparé à l'an 2003 (Les Conseillers, 2009).

1.2.4.3 Les malfaçons et accidents

Les défauts de conception, de construction ou d'entretien des routes tels que ; les épaisseurs inadaptées et matériaux défectueux.

Les accidents de la circulation, suivant leurs natures et la gravité de l'impact sur la chaussée, peuvent causer la dégradation des routes.

1.2.4.4 Les dégradations structurelles

Lorsque les dégradations sont irrémédiées, c'est la structure même de la route qui est détériorée. En général, cela se produit lorsque les dégradations ponctuelles ne sont pas prises en charge sur le moment et en absence d'une maintenance régulière des routes.

1.3 Système de gestion des chaussées

1.3.1 Définition et caractéristiques du système de gestion des chaussées

L'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) définit les systèmes de gestion des chaussées comme « la prise de décisions et la direction d'un ensemble d'opérations visant à fournir et maintenir le réseau routier dans les conditions praticables pour le public, tout au long de la vie de la chaussée » (AASHTO, 1985).

Les objectifs fondamentaux d'un système sont d'arriver aux solutions qui permettent d'optimiser des fonds engagés dans la réhabilitation des chaussées et de fournir un transport sécuritaire, confortable et économique aux usagers.

Ceci s'accomplit en comparant les alternatives d'investissement aux niveaux du réseau et du projet, en coordonnant les activités de conception, de construction, de maintenance et d'évaluation, et en utilisant efficacement les techniques et les connaissances disponibles. Ce système englobe donc un large éventail d'activités, y compris la planification ou la programmation des investissements, durant toutes les phases du projet (Hardy, Lefebvre, & Koliopoulos, 1977).

Alors que les réseaux de chaussées se développaient lentement dans la première moitié du XXe siècle, ils ont connu une large expansion durant les années 1950 et 1960. Les procédures simplistes alors en vigueur n'étaient plus en mesure de gérer ces réseaux. Une approche systémique plus complète était nécessaire. L'expression « système de gestion des chaussées » a été largement utilisée entre les années 1960 et 1970, pour décrire les outils d'aide à la

décision, à la fin d'année 1987 OCDE et Peterson décrivent un « système de gestion de la chaussée totale ».

Les systèmes des chaussées utilisés par les administrations routières au Québec diffèrent, les plus employés sont AGIR et PAVER (Bruxelle, 2005) :

- Auscultation et Gestion des infrastructures routières (AGIR), créée par GIE technologies à Montréal en 2004, la figure 1-5 décrit les principaux objectifs de ce système.

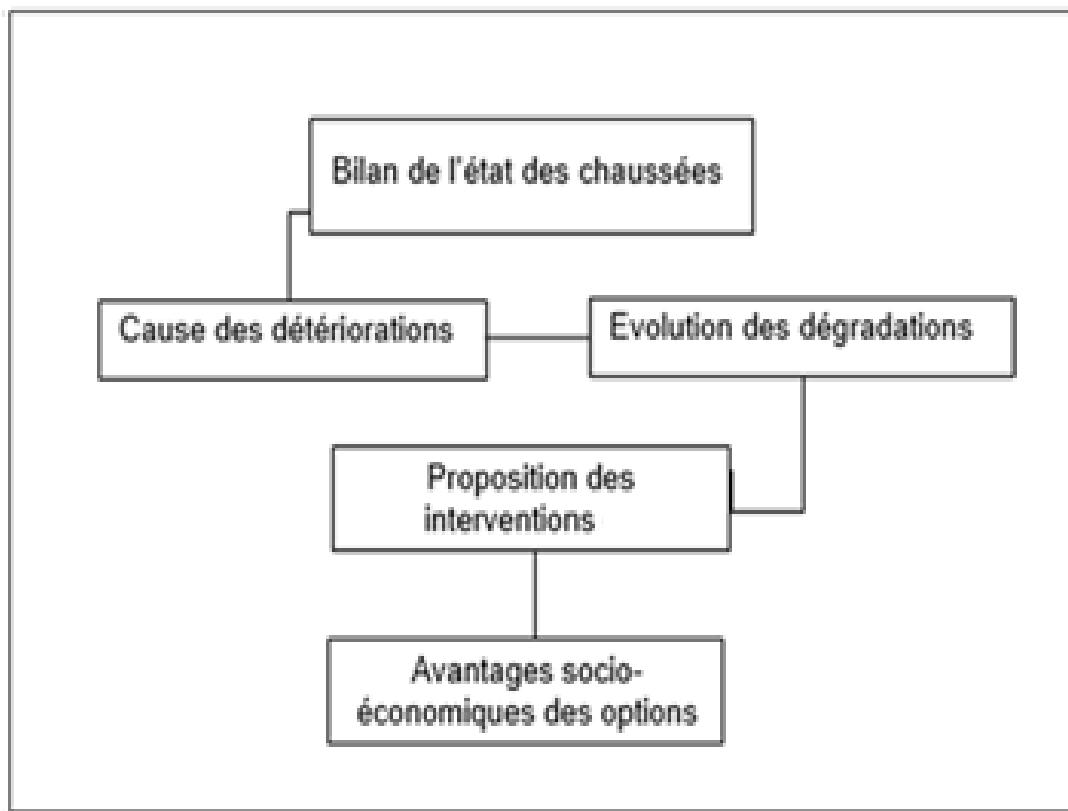


Figure 1-5 Les principaux objectifs du système AGIR
Adaptée de (Bruxelle, 2005)

- Le système PAVER, développé en 1960 par le département de la défense de l'armée américaine (DOD), permet de prendre des décisions sur l'entretien et de la réhabilitation des routes, des chaussées, des aéroports et des aires de stationnement pour les organisations militaires et civiles, en optimisant l'utilisation des fonds disponibles.

Les principaux objectifs du système PAVER, selon Boucher (2001) sont présentées dans la figure 1-6.

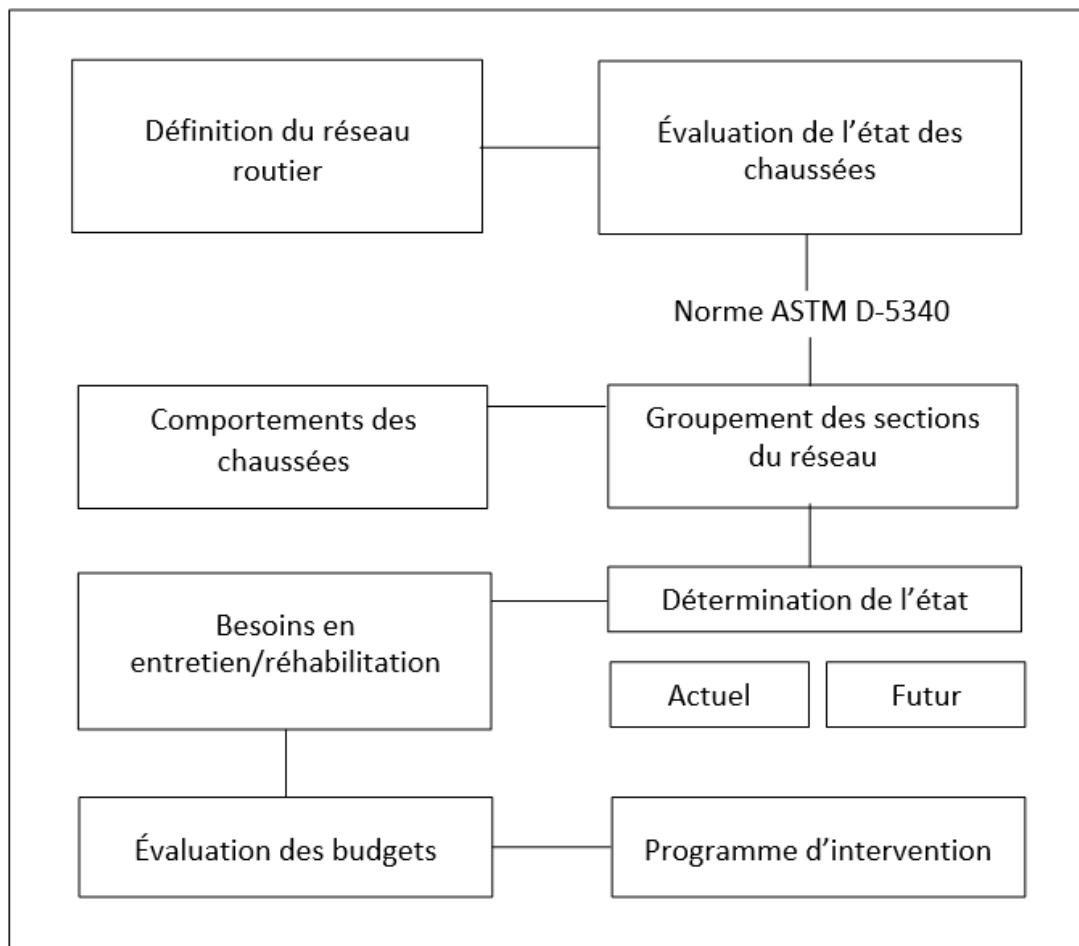


Figure 1-6 Les principaux objectifs du système PAVER
tirée de (Boucher, 2001)

1.3.2 Niveaux du système de gestion de la chaussée

La gestion des chaussées est un processus qui comprend une série d'étapes qui aideront les décideurs à analyser les alternatives possibles. Ces recommandations seront ensuite combinées pour prendre des décisions d'investissement finales.

Le système peut prendre en charge des décisions à différents niveaux (stratégique, réseau et projet) au sein de l'organisation. Les décisions prises à chaque niveau comprennent les points suivants :

- **Stratégique:** Les décisions prises influencent les enjeux stratégiques à long terme au sein de l'organisation. Ces décisions peuvent inclure l'établissement d'objectifs de rendement, d'affection de fonds et de stratégie de préservation.
- **Réseau:** Des informations telles que les conditions de réseau actuelles et futures sont utilisées pour prendre des décisions sur les effets de divers budgets à court et long terme, les conséquences de diverses stratégies d'investissement et les options de travail pour le réseau routier sur une période typique de cinq (5) ans.
- **Projet:** Les décisions sont prises sur de courts termes, et peuvent inclure la sélection des activités de maintenance, les matériaux et l'épaisseur des chaussées.

1.4 Indices de l'état de la chaussée

1.4.1 Indice de Rugosité International

L'indice de Rugosité International (IRI) a été développé par la Banque mondiale dans les années 1980 (UMTRI, 1998), il permet de mesurer le niveau de confort de roulement de la chaussée. Le principal but de cet indice est d'aider les décisionnaires à prendre des décisions concernant une route.

L'IRI est basé sur la suspension accumulée d'un véhicule (pouces ou mm) divisée par la distance parcourue par le véhicule pendant la mesure (miles ou kilomètres). Les unités couramment utilisées sont le mètre par kilomètre (m / km) ou millimètre par mètre (mm / m). L'échelle de cet indice présentée dans la figure 1-7 est obtenue à la suite de plusieurs mesures réalisées sur différentes routes et conditions.

Les mesures de rugosité peuvent être effectuées de diverses manières dont l'utilisation d'instruments d'arpentage, ou par Profilomètre qui est la mesure des profils de la chaussée (l'élévation) dans chaque sentier de roue. Il existe deux types de profilomètres; Profilomètre haute vitesse et Profilomètre manuel.

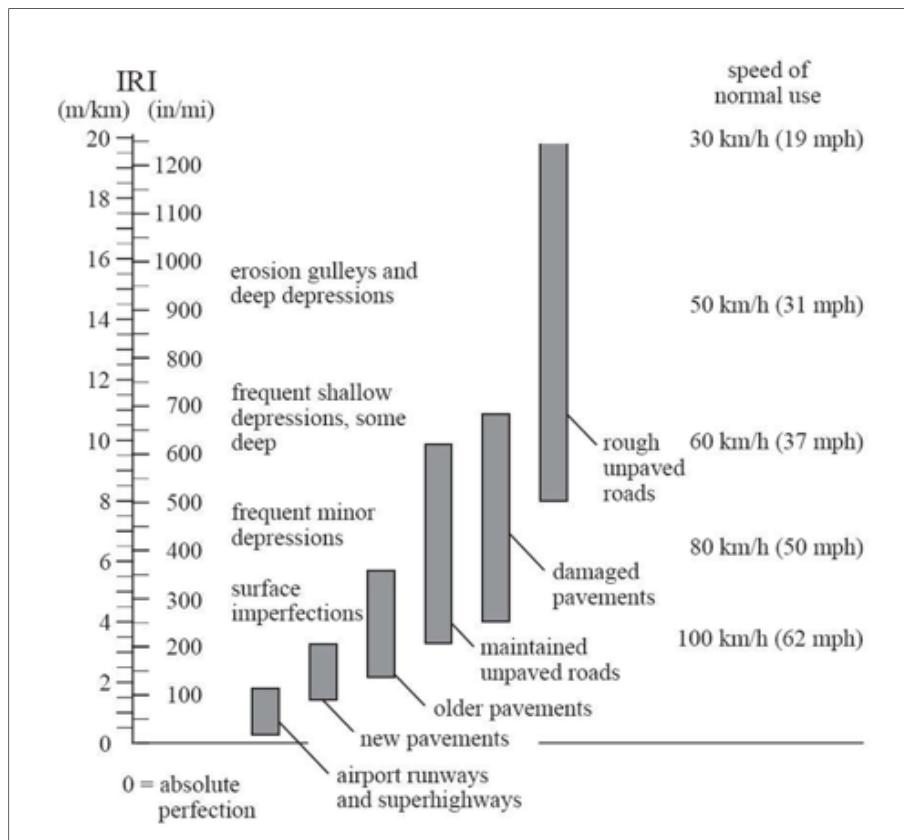


Figure 1-7 Échelle de l'indice IRI en fonction de différents types de route
(Sayers, Gillespie, & Queiroz, 1986)

Au Québec, l'IRI varie généralement entre 1 m/km et 8 m/km, représentant une chaussée presque parfaite et une chaussée complètement détériorée, sur laquelle les véhicules ne circulent qu'à basse vitesse (Richard, 2003). Le tableau 1-3 présent les seuils de déficience par classe de route établi par le ministère de transports du Québec en 1990.

Tableau 1-3 Valeur d'IRI au-delà desquelles la chaussée est considérée déficiente par le MTQ

CLASSE FONCTIONNELLE	SEUIL DE DEFICIENCE
Autoroute	IRI > 2.2 m/km
Nationale	IRI > 2.5 m/km
Régionale	IRI > 3.0 m/km
Collective	IRI > 3.5 m/km

1.4.2 Déflexion de la chaussée

La déflexion d'une chaussée est la déviation verticale apparaissant à la suite de l'application d'une charge (statique ou dynamique).

L'amplitude et la forme de la déflexion de la chaussée sont des fonctions de la circulation (type et volume), de la section structurale de la chaussée, de la température et humidité affectant la structure de la chaussée. Ainsi, de nombreuses caractéristiques d'un revêtement bitumineux à mélange chaud peuvent être déterminées en mesurant sa déflexion en réponse à la charge.

Grâce à une technologie avancée, les dispositifs de mesure enregistrent cette déviation verticale à plusieurs endroits, permettant une caractérisation plus complète de la déflexion de la chaussée.

La poutre de Benkelman est utilisée pour mesurer la déflexion et pour estimer la déformation statique et ponctuelle d'une structure de chaussée par un axe de véhicule (voir figure 1-8).

Développé en 1952 par Western Association of state Highway Organizations (WASHO), la poutre de Benkelman est placée sur un camion dont la charge est (chargé-typiquement) 80 kN (18 000 lb) sur un seul axe doté de pneus doubles gonflés entre 480 et 550 kPa (70 à 80 psi).

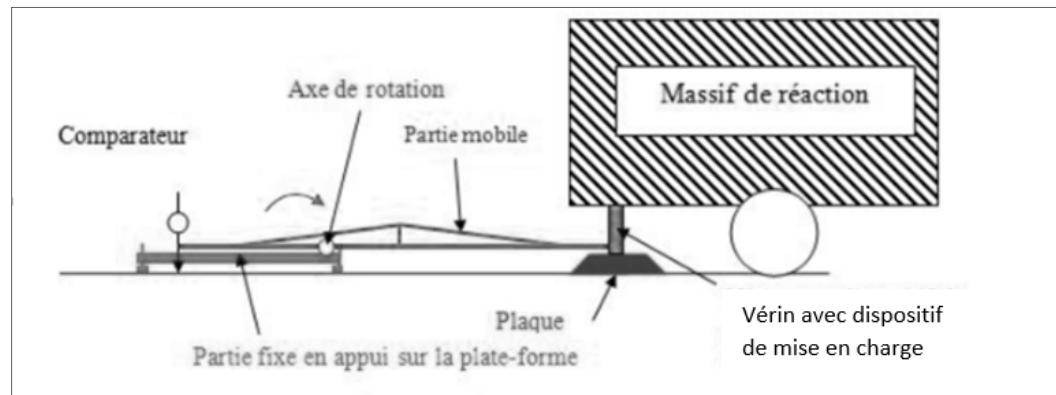


Figure 1-8 Schéma de fonctionnement de la poutre de Benkelman
(Centre TP Associés, 2015)

1.4.3 Indicateurs de condition des chaussées

Ces indicateurs sont un moyen simple, pratique et peu coûteux de surveiller l'état de la surface des routes, d'identifier les besoins d'entretien et de réhabilitation et de s'assurer que les budgets d'entretien routier sont dépensés à bon escient.

Le PCI, pour *Pavement Condition Index*, fournit une évaluation numérique pour l'état des segments de route dans le réseau routier sur une échelle de 0 à 100, 0 est la pire note possible et 100 la meilleure.

Le PCI mesure deux conditions, (1) le type de dégradation à la surface de la chaussée (fissures et ornières), (2) le confort de roulement de la route.

C'est une méthode subjective d'évaluation basée sur l'inspection et l'observation.

Des agents des travaux publics spécialisé dans le domaine roulent sur le réseau routier et évaluent son état de manière systématique. Les observations sont entrées dans une base de données pour évaluation puis utilisation.

L'étude du PCI devrait être effectué chaque année afin que les dégradations de l'état des routes puissent être évaluées et que les responsables soient informés du taux de détérioration du réseau routier assidûment et continuellement. Il doit être basé sur :

1. Sections de route gérables : Sections avec des structures de chaussée relativement uniformes, des conceptions, des volumes de circulation aux caractéristiques similaires. Généralement des sections de 150 m de longueurs dans les milieux urbains jusqu'au 10 kilomètres dans les milieux ruraux.
2. Inventaire des routes : Identification des sections à l'aide de références standardisées (Classe, géométrique, trafic, nature de la chaussée, date de construction, histoire de maintenance et réhabilitation).
3. Système de classification et d'évaluation des défauts de la route : Les inspecteurs doivent connaître le type de défauts de surface à rechercher et compléter leurs constats sur une liste de contrôle afin de suivre leurs observations.

1.5 Entretien préventif

L'entretien préventif est un concept relativement récent pour la plupart des agences routières (Peshkin, Hoerner, & Zimmerman, 2004). Il n'est donc pas surprenant qu'il y ait eu un malentendu et une confusion généralisés dans la communauté des transports concernant l'entretien préventif. Cela a entraîné, dans certains cas, un manque de soutien des agences et du public pour la maintenance préventive. Au fur et à mesure que les praticiens se familiarisent avec les concepts et les outils de la maintenance préventive, la définition proposée par le Comité permanent des autoroutes d'AASHTO est de plus en plus acceptée et utilisée (T. AASHTO, 2009) .L'entretien préventif selon L. AASHTO (2007), répond aux exigences suivantes :

- Stratégies planifiée;
- Préserve le système;
- Retarde la détérioration future;
- Maintien ou améliore l'état fonctionnel; et
- N'augmente pas la capacité structurelle.

“Applying the right treatment to the right pavement at the right time”

Selon l’Institut de recherche en construction (IRC), « l'entretien préventif est le meilleur moyen de prévenir la détérioration des chaussées et de prolonger leur durée de vie à un moment où les fonds publics qui se font de plus en plus rares.»

L'entretien préventif des chaussées se limite à l'application d'un ou de plusieurs traitements, généralement à la surface d'une chaussée structurellement saine.

Traditionnellement, les agences de voirie autorisaient la détérioration de la qualité de roulement et de l'état de la structure d'une chaussée avant de prendre des mesures pour réhabiliter la chaussée (Peshkin et al., 2004). Dans ce cas, le but de la réhabilitation est de réparer les dommages structurels et de restaurer les conditions mesurables de la chaussée telles que le roulement et la fissuration. Cette activité est coûteuse et prend du temps. Elle engendre

également des perturbations de la circulation et des inconvénients pour les entreprises et les résidences adjacentes. Ce mauvais scénario est apparu pour de nombreuses raisons, notamment les exigences relatives au financement, la maximisation de la croissance du capital et une philosophie de longue date: "Si ce n'est pas cassé, ne le réparez pas. "(Peshkin et al., 2004)

1.5.1 Moment optimal du traitement

C'est le moment où, la réalisation du traitement apporte la meilleure amélioration sur la chaussée au coût le plus bas (Peshkin et al., 2004).

La première étape du développement d'une méthodologie permettant de déterminer le moment optimal de la maintenance préventive consistait à examiner et à évaluer l'état de la chaussée d'une manière continue. Dans le cadre de cette démarche, une recherche documentaire a été effectuée et différentes méthodes spécifiques de la collecte de donnée ont été identifiées. Le deuxième chapitre élabore les différentes étapes de processus de gestion de chaussée, et met en évidence les résultats de la recherche documentaire en ce qui concerne la collecte de données.

1.5.2 Avantages de la maintenance préventive des chaussées

Les avantages les plus souvent associés aux programmes efficaces de gestion préventive des chaussées sont énumérés ci-dessous. Bien que tous ces avantages ne soient pas mesurés, ce sont ceux qui apparaissent à le plus souvent dans la littérature et les discussions entre praticiens (T. AASHTO, 2009; Labi & Sinha, 2005; Peshkin et al., 2004):

- Satisfaction des usagers;
- Meilleures décisions;
- Stratégies et techniques améliorées;
- Amélioration de l'état de la chaussée;
- Économies des coûts; et
- Sécurité accrue.

Le guide national pour des infrastructures durables (2002a) présente dans la figure 1-9 l'incidence d'un traitement d'entretien préventif en utilisant les courbes de comportement.

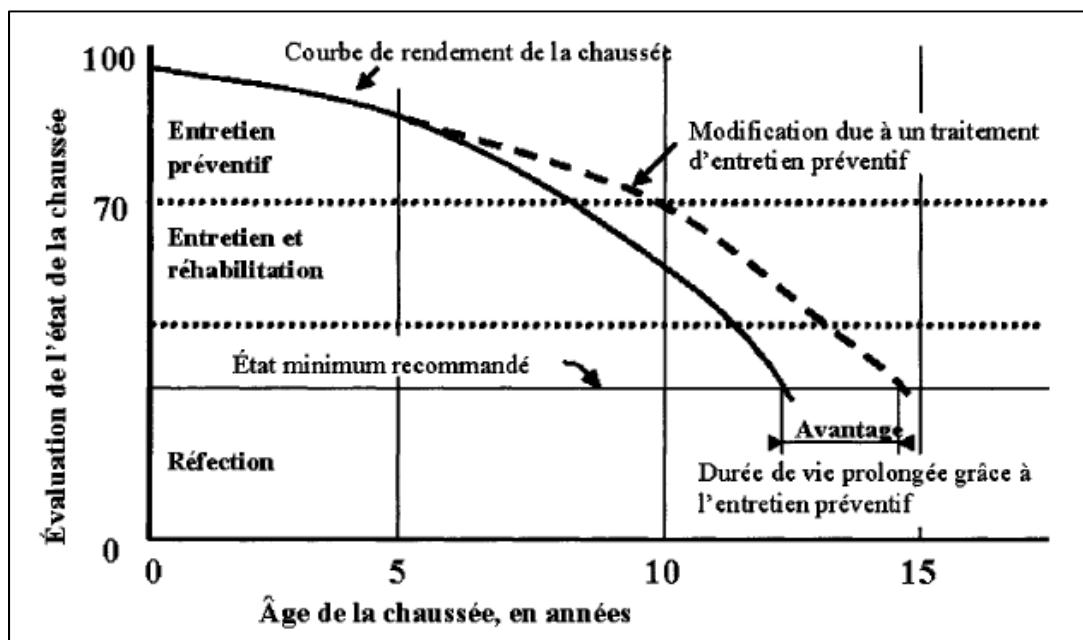


Figure 1-9 Effet du traitement de maintenance préventif
(Tirée du Guide national pour des infrastructures durables, 2002a)

La courbe indiquant l'évolution de l'état de la chaussée avec le temps est appelée courbe de performance de la chaussée. En règle générale, les traitements préventifs d'entretien des chaussées sont appliqués alors que la chaussée est relativement en bon état. Généralement, sur l'échelle de 0 à 100, où 100 représente une nouvelle chaussée, le premier traitement d'entretien préventif est appliqué avant que la chaussée passe sous le seuil de 70. La figure 1-9 montre également l'effet d'un traitement préventif sur la durée de vie de la chaussée.

Les bénéfices des traitements d'entretien préventifs dépendent des caractéristiques de la structure de la chaussée, du type et sévérité de détérioration. Pour un entretien préventif économique, il est nécessaire d'appliquer le bon traitement au bon moment. Étant donné que les municipalités sont responsables de la préservation de nombreuses sections de la chaussée à divers stades de détérioration, des procédures doivent être élaborées pour identifier les sections qui bénéficieraient le plus de la maintenance préventive et de choisir le traitement le plus approprié (Hein & Croteau, 2004).

CHAPITRE 2

PROCESSUS DE GESTION DE CHAUSSÉE

Le premier chapitre décrit les généralités relatives aux structures des chaussées, à savoir, les infrastructures et principalement les chaussées sous plusieurs aspects dont composants, types et causes des détériorations puis nous avons abordé brièvement les systèmes de gestion des chaussées et finalement les indices relevant de l'état des chaussées et l'importance de l'entretien préventif.

La gestion des chaussées, consiste à gérer toutes les activités liées au réseau de chaussées. Ces activités comprennent, notamment, la planification, la programmation, la conception, la construction, la maintenance et la réhabilitation. Un système de gestion des chaussées fournit des outils et des méthodes efficaces qui peuvent aider les décideurs à formuler des stratégies optimales pour fournir et entretenir un réseau de chaussées sur une période donnée (l'horizon de planification).

Un bon système de gestion des chaussées nécessite une approche organisée et systématique afin d'aider les intervenants (étatiques ou locales, publiques ou privées) à mener des activités de maintenances et de réhabilitations.

Le développement d'un processus de gestion des chaussées systématique et reproductible est un élément clé dans la planification et la gestion efficace d'un réseau de chaussées.

Dans ce chapitre il est question des différentes étapes de processus de gestion de la chaussée. On présente une revue de la littérature qui permet de dresser le bilan des connaissances acquises en matière de collecte et visualisation des données.

2.1 Définir le réseau routier et collecter les données d'inventaire

La première étape de la conception d'un processus de gestion de la chaussée consiste à définir le réseau routier (Wolters et al., 2011a). Un inventaire des caractéristiques physiques des routes est attribué à la chaussée. Les inventaires sont généralement établis en divisant les routes du réseau en segments définis. Ces segments sont divisés selon des caractéristiques similaires. Cette caractérisation est d'une importance particulière puisqu'elle servira à la planification de futurs projets de maintenance et de réhabilitation. Les facteurs pouvant définir la limite entre les segments de la route sont :

- Nom de la route;
- Type de surface de chaussée (Enrobé bitumineux à chaud ou à froid, etc.);
- Structure de chaussée (Matériaux, épaisseur, etc.);
- Historique de la construction (Différentes périodes de construction, différents entrepreneurs ou différents matériaux et techniques);
- Géométrie de la chaussée (nombre de voies de circulation, largeur, etc.);
- Trafic (Volume, trafic lourd, etc.);
- Inspection visuelle qui révèle l'état de la chaussée; et
- Les limites géographiques (Intersections, pont, etc.).

Une fois que les segments sont définis de la manière suivant les besoins de l'étude, les informations d'inventaire pour chaque segment sont collectées. Ces données comprennent :

- Nom du tronçon: Une description écrite du nom de la chaussée et des références numériques correspondantes;
- Emplacement du tronçon: Référence à l'emplacement, y compris les désignations « Point de départ » et « Point d'arrivée »;
- Dimensions de chaussée (de chaque tronçon): Longueur, largeur et/ou Surface;
- Type de chaussée: Le matériau dont est constituée, la surface de la chaussée;
- Historique de la construction: Détails des derniers entretiens et réhabilitation, date de construction, et idéalement, date de construction d'origine et de réhabilitation.

Les données décrites sur la page précédente constituent le minimum de données nécessaires pour établir l'inventaire du segment, les données supplémentaires peuvent être utiles à l'organisme pour améliorer les processus de gestion de la chaussée comprennent, sans toutefois s'y limiter : classifications fonctionnelles, épaisseurs des couches, informations sur le sous-sol, caractéristiques de drainage, informations sur l'accotement, détails sur le trafic annuel des véhicules légers et lourds. Les données d'inventaire sont récoltées pour chaque tronçon de chaussée et stockées par écrit, à l'aide de logiciels de gestion de chaussée, ou sur des systèmes d'informations géographiques.

2.1.1 Système de localisation

Les systèmes de référencement de localisation permettent l'intégration et la visualisation de multiples sources d'informations et de données dans un emplacement spécifique, et d'afficher ces informations dans son contexte. Ils fourniront un moyen de relier les données de la condition des chaussées et leur emplacement géographiques. D'où, l'importance de l'intégration du système de référencement de localisation dans le programme de gestion de la qualité afin de garantir que ces informations sont correctement prises en compte dans l'analyse (Flintsch & McGhee, 2009).

2.1.1.1 Caractéristiques du système

Adams, Koncz, et Vonderohe (2001), décrivent les exigences de base du système de référencement de localisation :

- Localiser, placer et positionner les objets et les événements sur quatre dimensions (longueur, largeur, profondeur et le temps) par rapport à ses contextes;
- Prendre en compte une référence temporelle pour associer la base de données au monde réel;
- Autoriser la transformation des données entre les méthodes de référencement linéaire, non linéaire et temporel sans perte d'exactitude, de précision et de résolution;

- Permet la navigation des objets, en fonction de divers critères;
- Permettre la régénération des objets et des états du réseau au fil du temps et le stockage d'un historique des événements du réseau; et
- Stocker et exprimer les métadonnées pour guider l'utilisation des données générales.

2.1.1.2 Types de méthodes de référencement de localisation

Les méthodes de référencement de localisation comprennent (1) le point de route, (2) le repère de référence d'itinéraire, (3) le nœud de liaison et (4) la référence de route, tous appropriés pour la gestion de données liées à des entités linéaires tel qu'un réseau routier.

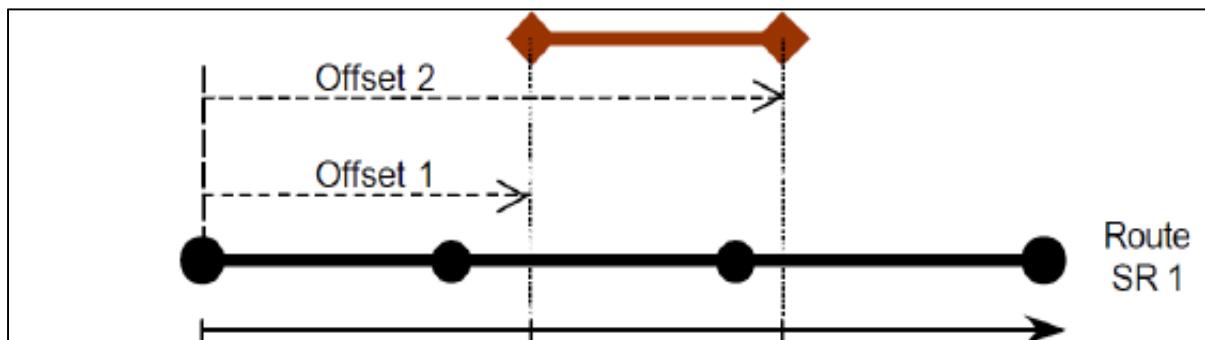
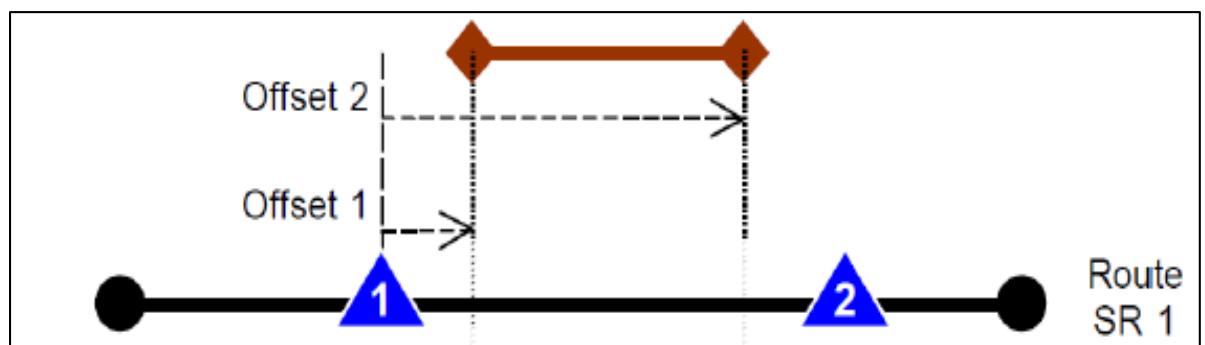
Les méthodes de base et les principaux aspects des référencements de localisation utilisés pour les réseaux routiers sont présentés dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 Aspects de la méthode de référencement de localisation
(Haas & Canada, 1997; Smith, Harkey, & Harris, 2001)

Référencement de localisation	Aspects
Point Route (Voir figure 2-1)	<ul style="list-style-type: none"> - Un nom ou une valeur unique est attribué à chaque route. - Le début de la route est défini. - La distance est mesurée d'un point donné ou connu à l'emplacement référencé. - Les poteaux de kilométrage (km) ne sont pas physiquement identifiés sur le terrain.
Poste de référence de la route (Voir figure 2-2)	<ul style="list-style-type: none"> - Les panneaux sont utilisés pour indiquer les emplacements connus. - L'avantage d'un poste à un kilomètre (km) est l'élimination des problèmes liés au changement de longueur de la route (par exemple, en raison d'un réalignement).

Tableau 2-1 (suite)

Référencement de localisation	Aspects
Nœud de liaison (Voir figure 2-3)	<ul style="list-style-type: none"> - Les intersections sont identifiées comme des nœuds. - Un identifiant ou un numéro unique est attribué à chaque nœud. - Les liens sont définis comme la longueur entre les nœuds.
Référence de la route (Voir figure 2-4)	<ul style="list-style-type: none"> - Les routes sont utilisées pour identifier les références.

Figure 2-1 Point Route
(Smith et al., 2001)Figure 2-2 Poste de référence de la route
(Smith et al., 2001)

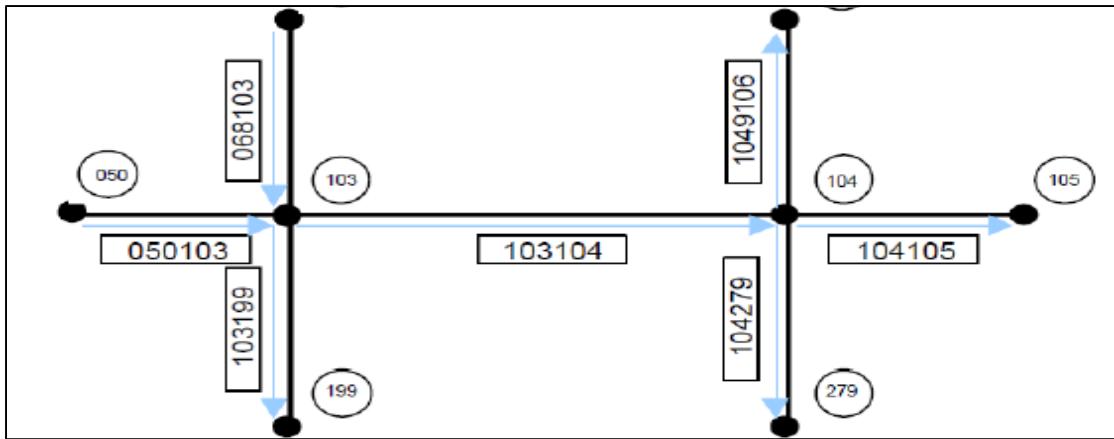


Figure 2-3 Nœud de liaison
(Smith et al., 2001)

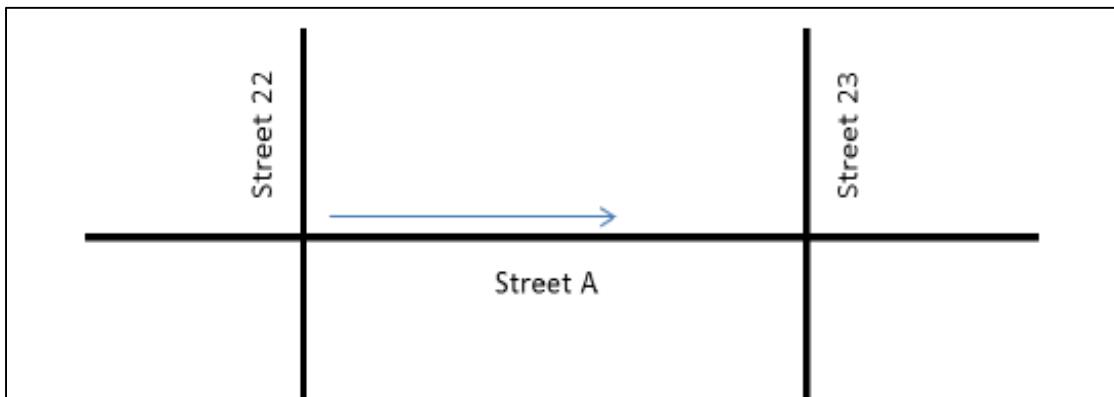


Figure 2-4 Référence de la route
(Smith et al., 2001)

2.1.2 Système d'information géographique

Un système d'information géographique (SIG) est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. Les systèmes coordonnés utilisent plusieurs références spatiales (par exemple, x, y et z; latitude, longitude et altitude). Les méthodes de référencement spatial sont utilisées dans un système d'information géographique. Les renseignements peuvent être fournis par une carte géographique. La superposition d'un ensemble de données facilite l'analyse et permet de les comparer et de découvrir les tendances et liens.

2.1.2.1 Historique des SIG

L'historique des systèmes d'informations géographique est présenté dans le tableau 2-2.

Tableau 2-2 Historique et évolution des SIG

Début du XXe siècle	Développement de la Photozincographie
Milieu du XXe siècle	Développement du matériel informatique
1960	Premier véritable SIG opérationnel dans le monde (Au Canada par Roger Tomlinson)
1964	Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis-Harvard USA
1980	M&S Computing (qui deviendra plus tard Intégraphe) plateforme CAD, ESRI, CARIS
1986	Premier logiciel SIG pour ordinateur personnel a été développé Système MIDAS (Mapping Display and Analysis System)
1990	A partir de ce moment, SIG passe du monde de la recherche pour devenir une industrie à part entière. Crédit du Logiciel MapInfo
Fin du XXe siècle	La croissance exponentielle des différents systèmes d'information a permis au S.I.G de se démocratiser et de devenir accessible à tous les utilisateurs disposant d'un ordinateur et d'un accès à Internet.

2.1.2.2 Définition des SIG

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatisé de gestion de données permettant de recueillir, de maintenir, d'emmagasiner et de visualiser des données spatiales, physique ou d'autres natures, reliées à un endroit précis sur la planète, voir figure 2-5, (Elhadi, 2009). Ce sont des outils combinant les logiciels commerciaux ou libres et l'équipement informatique, qui utilisent des techniques empruntées à la science de l'information géographique et à la géomatique (Zahab, 2016).

Zahab (2016) disait, « Un SIG peut modéliser un phénomène du monde réel au moyen de points, de lignes et de zones, on peut explorer les relations spatiales grâce aux couches de données géographiques. » Au cours des dernières années, des recherches considérables ont porté sur le sujet de la gestion des chaussées, afin d'exploiter le rôle du SIG dans la gestion de la planification, de la conception et de l'évolution des stratégies efficaces de maintenance et de réhabilitation (Ritchie, 1990). La figure 2-5 montre comment les couches de point, de lignes et de zones (Polygone) dans un SIG peuvent servir à modéliser un phénomène du monde réel.

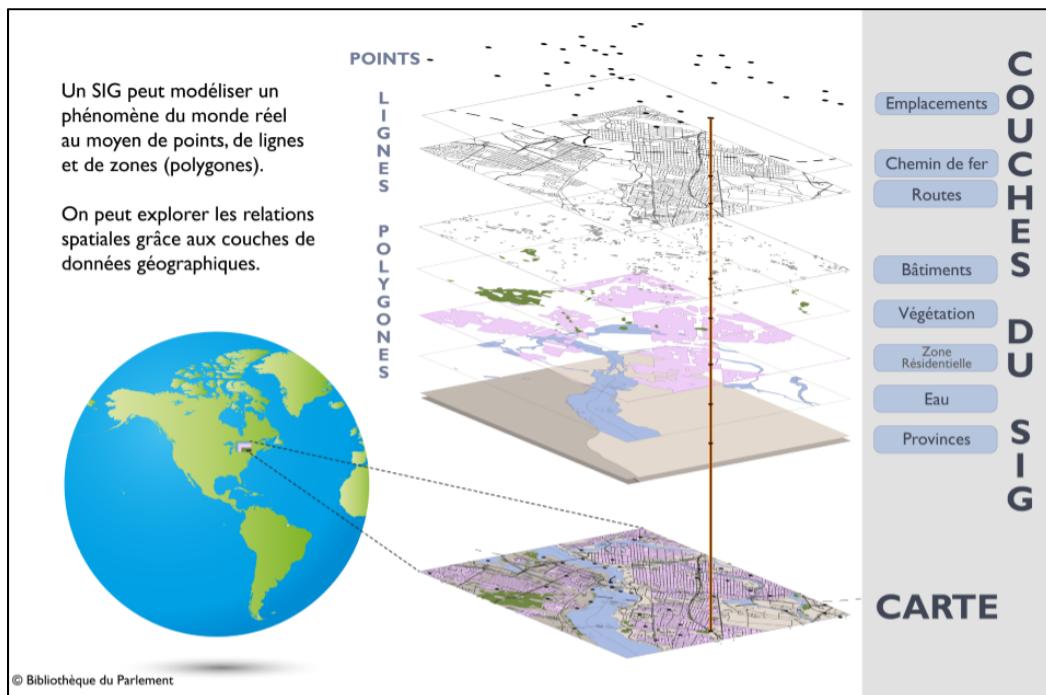


Figure 2-5 Une version modélisée du monde réel et la superposition d'ensembles de données à des fins d'analyse (Zahab, 2016)

2.1.2.3 Fonctions des SIG

Le SIG repose sur quatre fonctions majeures (Voir figure 2-6) :

1. L'acquisition des données ;
2. La gestion des données ;
3. L'analyse des données ; et
4. La restitution des résultats.

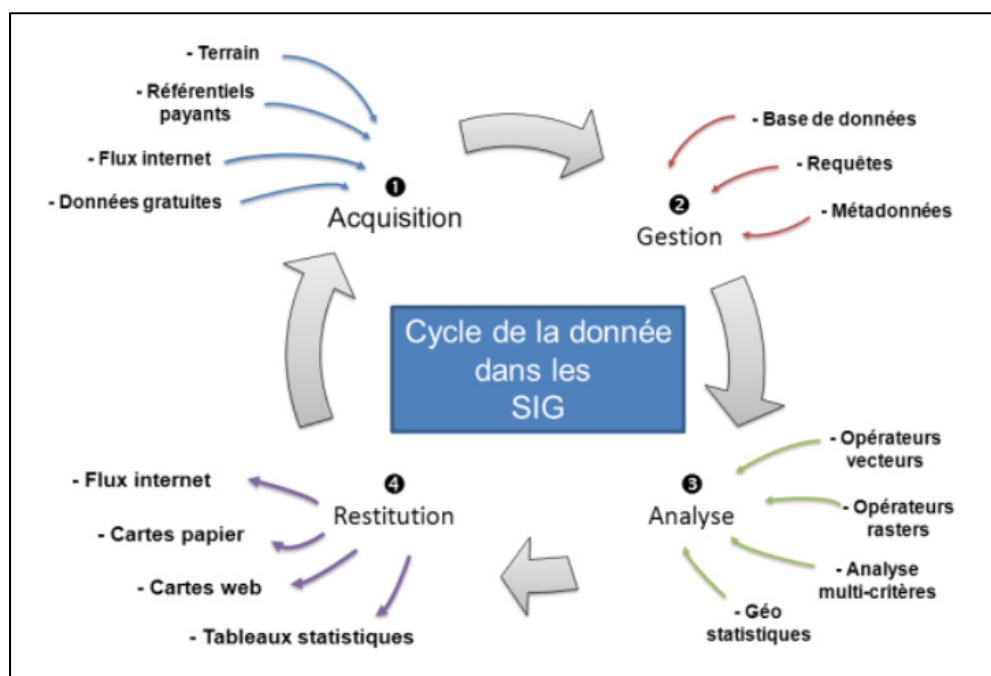


Figure 2-6 Cycle de la donnée en géomatique
(Devaux, 2015)

2.1.2.4 Produits des SIG

Les applications des SIG peuvent fournir une vaste gamme de résultats. Selon Zahab (2016), les produits des SIG se regroupent généralement en trois types de produits cartographiques et de services de carte Web (Voir figure 2-7) :

1. Cartes de référence: Des cartes internationales, nationales et provinciales qui s'ajoutent aux cartes de base sommaire en noir et blanc indiquant les lieux et les normes des capitales (RCN, 2017).

2. Cartes thématiques: Des cartes qui illustrent la répartition de données thématiques, économiques, démographiques et relatives aux ressources naturelles (Zahab, 2016).
3. Cartes topographiques: Des cartes précises des éléments naturels et anthropiques.

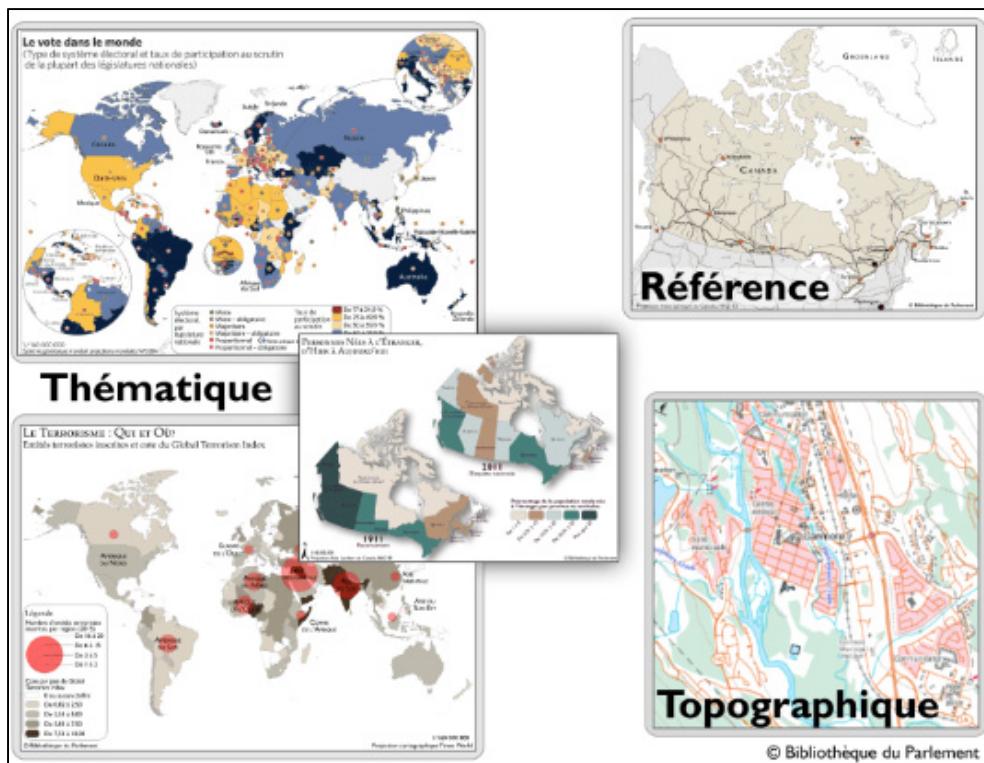


Figure 2-7 Exemple des cartes thématiques, de référence et topographiques (Cartes tirés des notes de la colline publiées par la bibliothèque du parlement)

2.1.2.5 Formats

Il existe deux modes fondamentaux de représentations numériques des données géographiques : (1) Le mode matriciel (Rasters) et (2) le mode vectoriel (Vecteurs). La plupart des logiciels SIG peuvent gérer ces deux formats de données.

1. Les Raster sont des images (photographies aériennes, plan scannés, images satellitaires) repérées dans l'espace. La figure 2-8 schématise la constitution d'une donnée au format Raster. Une matrice divise le territoire avec une grille de cellules (Pixels = Élément de la photo) (Nationale, 2014).

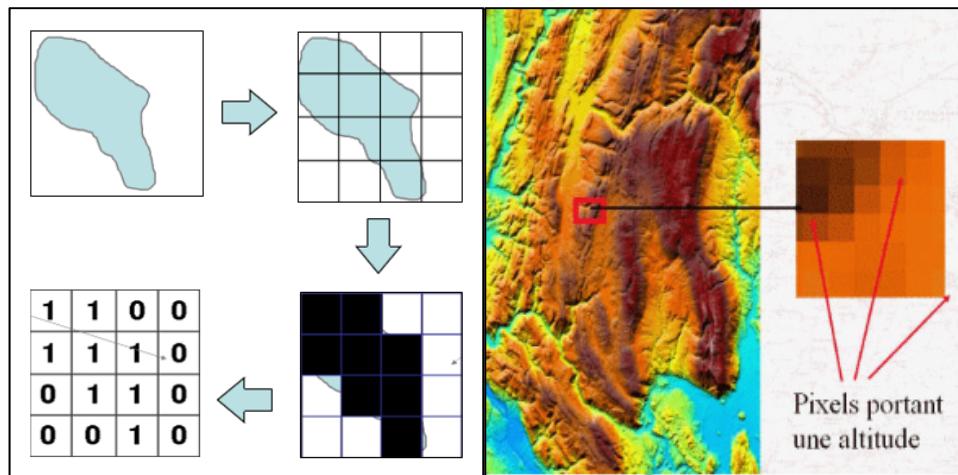


Figure 2-8 Constitution des données au format Raster
(Nationale, 2014)

2. Les formats vectoriels utilisent le concept d'objets géométriques (points, lignes, polygones) pour représenter les entités géographiques (voir figure 2-9). Ces objets sont définis par leurs coordonnées en x, y et z.

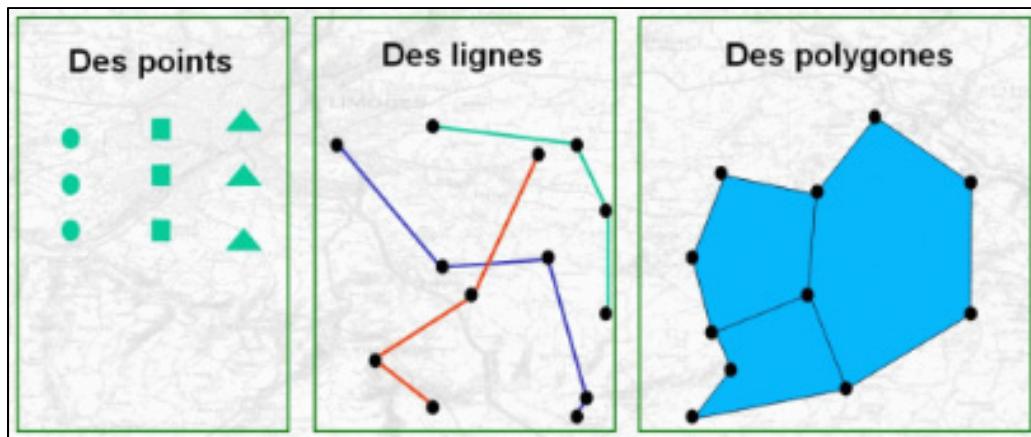


Figure 2-9 Concept des données au format Vecteur
(Nationale, 2014)

Les autres informations décrivant la donnée géographique sont déterminées par leurs attributs (données attributaires). A chaque objet géométrique des données vectorielles il est possible d'affecter des données attributaires.

Le traitement des données rasters est complexe, et nécessite des outils spécialisés, tandis que pour les données vectorielles, la manipulation est plus simple. Généralement, les données rasters servent de fond aux couches vectorielles.

2.1.2.6 Logiciels SIG

Les systèmes d'informations géographiques sont de plus en plus connus et utilisés dans différents domaines. Diverses entreprises et organisations ont créé des logiciels offrant des fonctionnalités complètes de cartographie et d'analyse spatiale.

Dans cette partie, les logiciels SIG commerciaux et libres sont cités et décrits.

Logiciels commerciaux (Dempsey, 2016) :

- (1) AGISMap: Est un logiciel de cartographie simple, particulièrement connu pour être facile à utiliser et distribuer.
- (2) Autodesk: Autodesk dispose d'une série des logiciels qui répondent aux besoins des SIG dans de nombreux domaines qui s'interfacent avec leurs logiciels de CAO.
- (3) Bentley Systems, Inc. : Bentley fournit des logiciels pour la "Conception, construction et exploitation de l'infrastructure mondiale". Bentley fournit une large gamme de produits pour l'arpentage, le GPS, la photogrammétrie, l'imagerie, la conversion, la cartographie, et d'autres applications géo spatiales basées sur les produits MicroStation:
 - Bentley Map: Desktop GIS.
 - Bentley Cadastre: Desktop land management GIS.
 - Bentley Descartes: Desktop image editing, analysis, and processing.
 - Bentley Geo Web Publisher: GIS web publishing and viewing.
- (4) Cartographia: Prise en charge d'un grand nombre de formats d'importation, notamment les formats Raster les plus courants, l'édition et le géo référencement manuels, le géocodage automatique, l'intégration avec le mappage en ligne et la sortie vers des imprimantes grand format.
- (5) Esri: *Environmental Systems Research Institute* crée des logiciels SIG depuis plus de 30 ans. Reconnu comme le leader des logiciels SIG, Dempsey (2016) estime qu'environ 70% des utilisateurs de SIG utilisent les produits Esri. Esri a révisé ses logiciels en un modèle interopérable appelé ArcGIS (ArcMap version ordinateur). De plus, Esri a développé des plug-ins appelés extensions qui complètent les fonctionnalités d'ArcGIS. Des versions de

démonstration légères du logiciel Esri sont disponibles en téléchargement. Vous pouvez également trouver des données gratuites à utiliser avec les produits Esri.

- (6) Intergraph: Intergraph réalise plusieurs applications SIG, et a développé des produits qui permettent de fusionner des SIG avec des outils informatiques et d'amélioration des processus métier.

Elle propose la famille de solutions GeoMedia. GeoMedia est un outil de visualisation et d'analyse et une plate-forme ouverte pour le développement de solutions SIG personnalisées. C'est un produit spécifiquement conçu pour collecter et gérer des données spatiales à l'aide de bases de données standard.

- (7) Manifold: Est un logiciel SIG complet de qualité professionnelle pour 245\$, comprenant un très large éventail de fonctionnalités. Il permet d'importer des données de plus de 80 formats SIG différents.

- (8) Ortelius: C'est un logiciel d'illustration cartographique. Un téléchargement d'essai gratuit est disponible.

- (9) Mapinfo: Il propose des plug-ins pour améliorer les fonctionnalités. Les développeurs peuvent intégrer des applications de mappage dans d'autres applications telles qu'Excel. Des versions de démonstration sont disponibles en téléchargement pour certains produits de Mapinfo.

- (10) Maptitude: Conçu pour faciliter d'utilisation, la visualisation des données et l'analyse géographique, Maptitude est fourni avec des cartes complètes à l'échelle nationale et mondiale, y compris des cartes routières américaines complètes, des limites et des données démographiques.

- (11) Map Maker Pro: Map Maker Pro est un système de création de cartes et d'information géographique à la fois économique, facile à utiliser et puissant. Il est conçu pour permettre aux utilisateurs non experts de commencer à produire des cartes utiles après seulement quelques heures de manipulation.

Une variété d'outils vous permet de naviguer sur une carte, de mesurer des distances et des zones, de dessiner des polygones, des lignes et des symboles, ainsi que d'afficher et de modifier des données.

- (12) My World GIS: Conçu pour un usage éducatif. My World peut importer des données à partir du format shapefile standard, ainsi que des fichiers texte séparés par des tabulations et des virgules.
- (13) Supergeo Technologies: Il permet aux utilisateurs de modifier, de visualiser, de gérer et d'analyser des données géospatiales à la fois vectorielles et raster. Les fonctionnalités peuvent être activées via des extensions telles que Network Analyst, 3D Analyst, Spatial Analyst, analyste de la biodiversité, etc., ce qui permet aux utilisateurs de réaliser des analyses complexes et de prendre des décisions plus avisées. En combinant Mobile GIS et Server GIS également à partir de Supergeo, vous pouvez disposer d'une solution géospatiale totale allant de la collecte de données sur le terrain à la publication de données en ligne à un prix raisonnable. L'essai gratuit est disponible sur le site Web de Supergeo. L'équipe de Supergeo fournit également diverses ressources et un support technique.
- (14) TatukGIS Editor: Application professionnelle de mappage et d'édition de données SIG. Prend en charge la plupart des formats de données de vecteurs / SQL SIG / CAD, y compris les géodatabases spatiales d'entreprise (telles qu'Oracle Spatial, PostGIS ...).
- (15) Terrain Tools: Produit par Softree, est un logiciel d'arpentage et de cartographie. Il est idéal pour les forestiers, les géologues, les géomètres ou les spécialistes des ressources qui ne sont pas des spécialistes des SIG, mais qui doivent produire rapidement des cartes de travail et des plans de site.

Logiciels libres :

Les applications « *open source* » par définition, sont des logiciels auxquels l'accès est gratuit et les modifications possibles. Ces applications sont généralement développées par des programmeurs bénévoles. Ci-dessous les applications GIS gratuites les plus connues (GISGeography, 2018) :

- (1) Google Earth: Google Earth est un programme informatique qui affiche une représentation 3D de la Terre à partir d'images satellitaires. Le programme cartographie la Terre en superposant des images satellites, des photographies aériennes et des données SIG sur un globe 3D, permettant aux utilisateurs de voir les villes et les paysages sous différents

angles. Avec Google Earth les fonds sont des données raster, il aussi permet d'ajouter des couches vectorielles. Dans cette recherche, Google Earth a été choisi comme outil de référenciation graphique pour visualiser, manipuler et stocker les données reliées aux chaussées, autrement dit, c'est un outil d'aide à la décision. Dans le prochain chapitre, le choix fait sera justifié ainsi que les avantages d'une telle intégration pour l'approche de gestion de chaussée.

Google Earth est effectivement un logiciel open source, cependant il n'est pas compté parmi les logiciels SIG, il fait partie de cette liste vu son habileté à recueillir les données à la façon d'une plateforme graphique.

- (2) FlowMap: FlowMap est une application gratuite conçue pour analyser et afficher les données de flux. Cette application a été développée à la faculté des sciences géographiques de l'université d'Utrecht aux Pays-Bas.
- (3) GMT Mapping Tools: GMT est une collection gratuite, d'environ 60 outils UNIX permettant aux utilisateurs de manipuler des ensembles de données en deux dimensions (x, y) ou trois dimensions (x, y, z).
- (4) GRASS: Développée à l'origine par le gouvernement américain. GRASS est probablement l'application logicielle SIG et open source la plus connue (Neteler & Mitasova, 2013). GRASS est un SIG basé sur des images matricielles, un SIG vectoriel, un système de traitement d'image, un système de production graphique, un système de gestion de données et un système de modélisation spatiale. GRASS peut être téléchargé gratuitement.
- (5) GvSIG: GvGIS est une *open source* application développée en utilisant Java.
- (6) MapWindow GIS: Elle rassemble à l'application GvGIS, la seule différence est que cette application peut être étendue grâce à des plugins.
- (7) OpenJUMP GIS: C'est un SIG *open source* écrit en Java. Anciennement appelé JUMP GIS, l'application peut lire les fichiers de type Shape, et les fichiers format GML.
- (8) SPRING: C'est un système de traitement d'image SIG qui permet d'intégrer des représentations de données vectorielles (vecteur) et matricielles (raster).

- (9) TNTLite: Encore disponible en version commerciale, le produit gratuit possède toutes les fonctionnalités de la version professionnelle, sauf que les fichiers TNTLite de la version gratuite sont de taille limitée.
- (10) UDig GIS: Il a été conçu pour utiliser les normes OpenGIS d'OGC telles que WMS, WFS et autres. L'installation en un clic vous permet d'afficher des fichiers de formes WMS et de modifier directement vos propres géométries de base de données spatiales.

2.1.2.7 SIG, Outil de gestion des chaussées

La technologie SIG est de plus en plus envisagée pour la mise en œuvre de nombreux systèmes de planification et de gestion d'infrastructure, en raison de ses capacités supérieures de traitement des données spatiales. Les bases de données textuelles sont combinées à des cartes numérisées pour permettre l'affichage visuel de diverses données (Elhadi, 2009).

La technologie SIG joue un rôle croissant dans le développement de nouvelles applications de gestion des chaussées pour toutes les agences de transport concernées. La base de données sophistiquée d'un SIG permet d'associer et de manipuler divers ensembles de données à références spatiales qui ont été géocodées dans un système de référence commun. Le SIG peut étendre la prise de décisions sur les stratégies de planification des projets en intégrant des données aussi diverses que les antécédents d'accidents et les volumes de véhicules. Un SIG peut effectuer des requêtes géographiques de manière simple et intuitive, plutôt que de se limiter à des requêtes textuelles (Jain et al., 2003).

De nos jours, le SIG étant de plus en plus utilisé par les autorités publiques, il existe une tendance croissante à intégrer les données de gestion des chaussées dans le SIG. Avec les avancées technologiques du matériel informatique et des logiciels, cette intégration devient plus réaliste. Les avantages d'une telle intégration comprennent la modification flexible de la base de données et la possibilité d'afficher visuellement les résultats des requêtes, statistiques et graphiques de la base de données sur le réseau routier, les codes de couleur dynamiques données via l'interface graphique (Parida, Aggarwal, & Jain, 2005).

Les avantages de l'intégration du SIG dans la gestion des chaussées :

- Modification flexible de la base de données;
- Possibilité d'afficher visuellement les résultats des requêtes, statistiques et graphique;
- Les codes de couleurs dynamiques des données via l'interface graphique de carte (Ibraheem, 2012) ; et
- Permet la régénération des objets et des états du réseau au fil de temps et maintenir l'histoire des événements du réseau (Adams et al., 2001).

2.1.2.8 Limites de cette intégration

Les SIG peuvent contenir, en plus des applications citées, de nombreuses autres applications. Il est préconisé de faire appel à une entreprise spécialisée dans l'élaboration de bases de données et plates formes de visualisation requises pour la bonne gestion des routes, cela en raison de l'absence d'outils complets et indépendants pour répondre aux besoins exigés, cependant les SIG représentent sans doute des dispositifs très bénéfiques dans le développement d'un outil. Il convient de dire que les SIG ne peuvent être comptés parmi les systèmes spécifiques dans la gestion des chaussées.

2.2 Collecte des données de condition

Les données sur l'état des chaussées, *un facteur critique pour la prise de décisions*, sont la deuxième étape du processus de gestion de la chaussée. Ces données sont utilisées dans l'identification des besoins actuels en maintenance et réhabilitation, pour prévoir les besoins futurs et pour évaluer l'impact global sur le réseau. Par conséquent, le type de données et les détails requis dépendent du processus de gestion de la chaussée utilisé.

Cependant, indépendamment du fait que de telles stratégies, et les décisions d'investissement associées, soient dérivées par des approches de systèmes experts (Kaseko & Ritchie, 1993) ou par des experts humains, les mêmes données de condition de surface de chaussée sont requises comme « intrant » de base. Dans le cas des chaussées bitumineuses, cela comprend la sévérité d'une dégradation telles que; la fissuration par fatigue (ou alligator), la fissuration

longitudinale, la fissuration transversale, l'effilochage et le rapiéçage. Ces données de dégradation sont des indicateurs de performance structurelle et fonctionnelle.

La collecte de données sur l'état de la chaussée peut être un processus complexe. La sélection d'une méthode appropriée est donc une étape importante.

Lors de la sélection d'une méthode de collecte de données, deux considérations principales, *cité ci-dessous*, sont prises en compte (Flintsch & McGhee, 2009):

2.2.1 Quantité de données

Nombre de paramètres suivis et nombre de mesures collectées. Ce paramètre est directement lié au coût et temps passé sur la collecte, en effet plus le volume de données collectées est grand et détaillé plus la collecte est longue et coûteuse.

2.2.2 Qualité des données

Bien que le coût associé à la récolte de données précises augmente, des données plus détaillées pour l'analyse peuvent aboutir à de meilleures décisions d'analyse.

Des efforts initiaux limités mais fructueux ont été déployés par les ingénieurs du transport dans plusieurs pays pour appliquer les techniques de traitement d'image numérique qui forment la base de tout système de vision par ordinateur. Ces applications ont principalement porté sur l'ingénierie du trafic, notamment la détection et la dérivation des paramètres de débit associés, ainsi que la classification et l'identification des véhicules (Ouyang, Luo, & Zhou, 2010).

On procède dans ce mémoire au développement d'un plan de gestion de la qualité, à un budget approprié, qui repose sur la définition des méthodes, des normes et des protocoles à utiliser pour collecter les données sur l'état des chaussées. Le chapitre 3 décrit les différentes étapes de ce plan et présente des applications sur des projets réalisées.

La principale source d'informations de l'état des chaussées est les données de dégradations, telles que les fissures, les nids de poule et l'orniérage. Ces données peuvent être collectées en

utilisant une méthode manuelle ou automatisée. La figure 2-10 décrit la différence entre les deux méthodes de collecte des données.

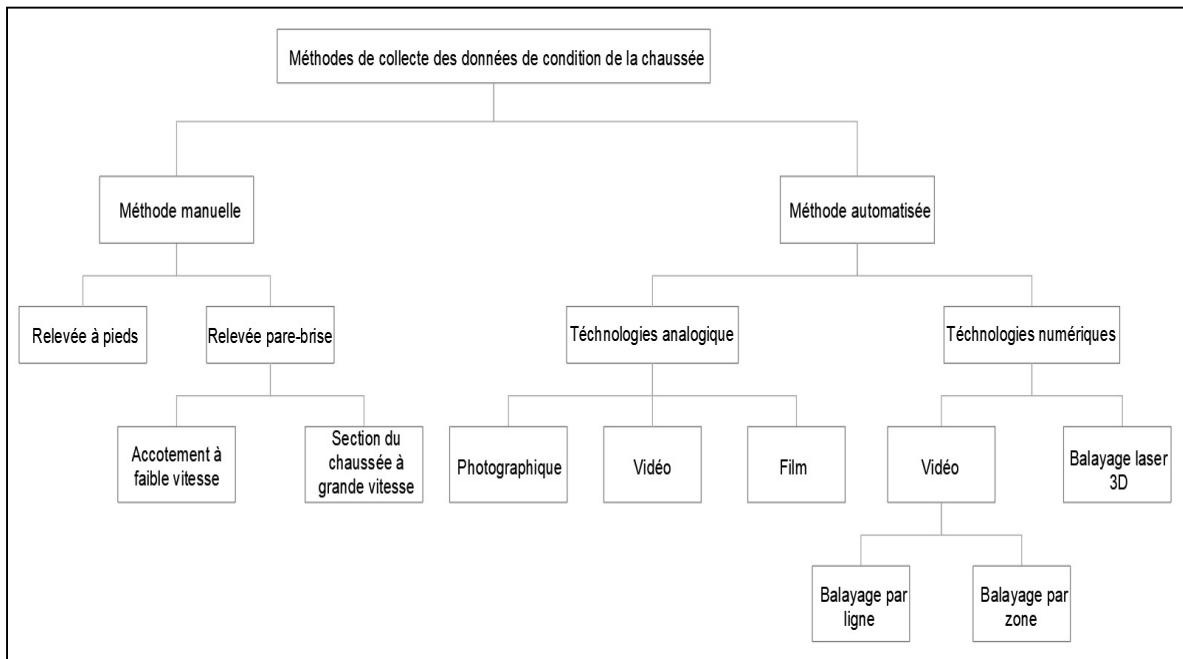


Figure 2-10 Méthode de collecte des données de condition
Adaptée par McGhee (2004)

Les méthodes utilisées en Europe et Amérique du Nord, sont les méthodes semi-autonomes, elles dépendent d'intervention humaine pour l'analyse des résultats.

2.2.3 Collecte de données niveau réseau et projet

La collecte de données est une partie très importante du processus de conception de gestion des chaussées. Les éléments de données collectés pour les décisions au niveau du réseau sont différents de ceux utilisés pour les décisions au niveau du projet.

Par exemple, l'indice de rugosité international (IRI), la profondeur de l'ornière et la détresse de surface sont collectés au niveau du réseau, mais la capacité structurelle, *qui n'est actuellement pas collectée à grande vitesse*, est collectée principalement au niveau du projet (Flintsch &

McGhee, 2009). Le tableau 2-3 illustre les détails des données collectées au niveau du réseau et du projet.

Tableau 2-3 Collecte de données niveau réseau et projet
(Flintsch & McGhee, 2009)

Aspect	Niveau réseau	Niveau projet
Usages	<ul style="list-style-type: none"> - Planification - Programmation - Budgétisation - Rapport de condition au niveau du réseau - Guide de conception de mécaniste-empirique des chaussées 	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre du projet - Affiner les recommandations de traitement du système de gestion des chaussées
Éléments de données	<ul style="list-style-type: none"> - IRI - Profondeur d'ornière - Fissurations - Rapiéçage - Conditions des joints - Étanchéité - Texture de surface 	<ul style="list-style-type: none"> - Cartographie détaillée des fissures et autres détériorations - Capacité structurale - Transfert de charge - Caractérisation des couches d'assise
Autres éléments collectés simultanément	<ul style="list-style-type: none"> - Vidéo - Coordonnées GPS - Géométrique (pente, courbe, élévation) - Événements (ex zones de construction) 	<ul style="list-style-type: none"> - Condition de drainage - Accessoires (ex. Panneaux) - Transfert de charge
Vitesse	<ul style="list-style-type: none"> - Grande vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - A pieds

2.2.4 Relevés manuels ou semi-automatiques

Les relevés manuels détaillés du projet se font à pieds sur des sections courtes de chaussées. Et les relevés plus globaux de fissuration, de niveau réseau, se font à bord d'un véhicule roulant

à basse vitesse, mais peut être aussi effectué au bureau, en visionnant des vidéos ou des images de la chaussée.

L'avantage de cette technique est qu'elle est plus sécuritaire, offre aux utilisateurs un environnement qui favorise une exécution optimale, et qu'elle favorise la qualité de collecte de donnée (Bergeron et al., 2012).

La qualité des images ou vidéos enregistrées assure la qualité de l'analyse effectuée sur des logiciels informatiques spécialisés. Ces logiciels permettent de détecter les fissures visibles et d'estimer l'étendue et la sévérité des dégradations. Bien que cette méthode soit simple, elle est soumise à la subjectivité des évaluateurs.

Un programme d'assurance qualité peut aider à assurer la reproductibilité et la répétitivité de l'analyse des vidéos et des images. Plusieurs technologies autonomes sont toujours en évolution pour des systèmes de relevé et d'analyse de fissuration basées sur l'analyse de l'image ou sur l'analyse de faisceaux lasers projetés.

L'utilisation des relevés automatisés offrent certains avantages comparativement aux relevés manuels. Ils permettent d'obtenir des données plus rapidement et de manière sécuritaire, objective, uniforme et répétable.

2.2.5 Comparaison entre les méthodes automatiques et manuelles

Les méthodes manuelles ou semi-automatiques (semi-autonome), peuvent impliquer l'utilisation de technologies. Cependant une grande partie est effectuée manuellement (Behman & Miraland, 2016) .

Dans certains cas, la collecte des données est automatisée, tandis que l'analyse d'identification et de classement des différentes dégradations requièrent un travail manuel. Pour les méthodes automatiques (autonomes), l'intervention d'opérateur est minime, et la collecte des données et l'analyse sont faites par la machine. Une comparaison des deux méthodes est présentée dans le tableau 2-4.

Tableau 2-4 Comparaison entre les méthodes automatiques et manuelles pour la collecte de données

Caractéristique	Méthode	
	Manuelle (Semi-autonome)	Automatique (Autonome)
Intervention humaine	Participation humaine nécessaire pour collecter et analyser	Le processus de collecte et d'analyse ne nécessitent aucune participation humaine
Collecte des données	Visuelle, ou par des équipements automatisées	Toujours par des équipements automatisés
Analyse d'information	Manuellement par des opérateurs bien formés	Automatisée sur des logiciels qui reconnaissent et quantifient les fissures
Type d'information	Images, vidéos et base de données	Images, vidéos, couvrant la voie de sondage (environ 4m)
Type d'équipement	Caméra, des ordinateurs avec plusieurs moniteurs et logiciels	Des équipements calibrés, et adaptés au type de chaussée, la lumière, la saison, etc. Des ordinateurs pour analyser les données
Qualité des résultats	La qualité dépend des opérateurs. Les mesures sont subjectives	La qualité dépend des équipements et de processus. Les mesures sont objectives
Identification des différents types, sévérités et extensions de détresse	L'analyse dépend de la qualité d'opérateur	L'analyse dépend de la qualité et la résolution des images

2.2.6 Dispositifs automatisés en détection de dégradation

Pour déterminer l'état de la chaussée, l'emplacement et la répartition des dégradations, une solution intégrale est recherchée au moyen d'un véhicule d'inspection unique, composée de différentes méthodes de détection et de mesure et d'équipements auxiliaires. Autre que les équipements de détection, les données doivent également être synchronisées et analysées, ce qui nécessite des équipements supplémentaires tels que le système de positionnement global (GPS), la saisie d'images et le stockage de données. Parce que ces outils n'ont aucun rapport avec les dégradations, la partie qui suit se limite aux équipements de détection plutôt qu'à la configuration complète du véhicule.

2.2.6.1 Captations par caméra

La technologie d'images a beaucoup évolué. Tout d'abord à l'aide d'images analogiques, puis avec le développement de la technologie numérique. Les caméras numériques ont été d'utilisées sur les véhicules pour effectuer l'inspection. Il existe deux types des caméras numériques pour effectuer l'inspection : les caméras à balayage (1) par zone et (2) par ligne. Il est possible avec la technologie d'aujourd'hui d'utiliser des capteurs tridimensionnels 3D (McGhee, 2004).

1. Captations des images analogiques

La méthode analogique pour l'acquisition d'images est basée sur un film de 35mm. Les informations contenues dans les films sont en format analogique. Même si ces informations peuvent être de grande qualité, les données analogiques, n'étant pas numériques, leur exploitation n'est pas optimale pour la manipulation et le stockage informatique. La méthode analogique est donc moins utilisée ces dernières années en raison de l'évolution de la technologie numérique (K. C. Wang & Smadi, 2011).

Pour convertir une image analogique en format numérique, il faut les numériser, puis il est possible de manipuler et de stocker l'image informatisé. La qualité de la photo numérique est de moins bonne qualité que l'originale, mais il serait possible d'analyser les photos et

d'intégrer d'autres types de données, tels que le texte et les graphismes. La figure 2-11 présente la qualité de l'image numérisée.

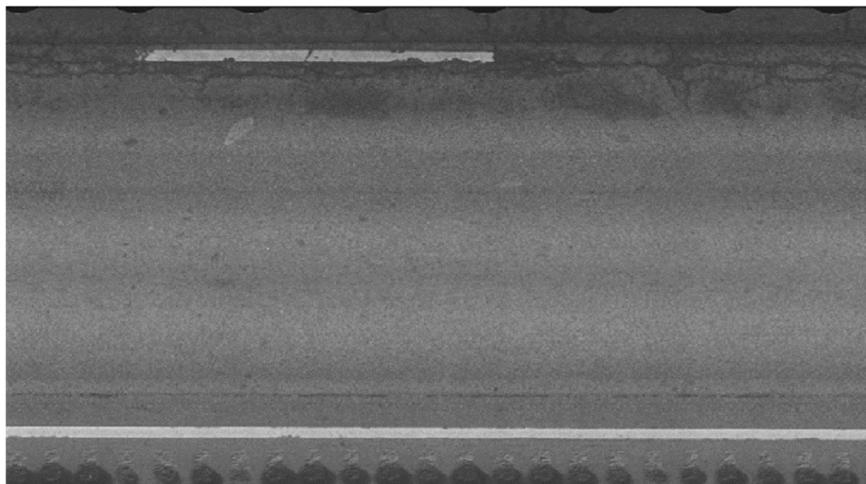


Figure 2-11 Image numérisée d'un film 35mm, 2.048 pixels/ligne
(Courtesy of CGH-Pavement Engineering, Inc.)

2. Captations des images digitales

Les images sont capturées en flux électronique « bits » et stockées. Les images digitales ou numériques peuvent être unidimensionnelles pour la collecte de balayage ligne, ou de deux dimensions pour le balayage en zone (Nguyen, Vrignat, & Avila, 2007).

La figure 2-12 montre la différence entre la numérisation par zone (a) et linéale (b).

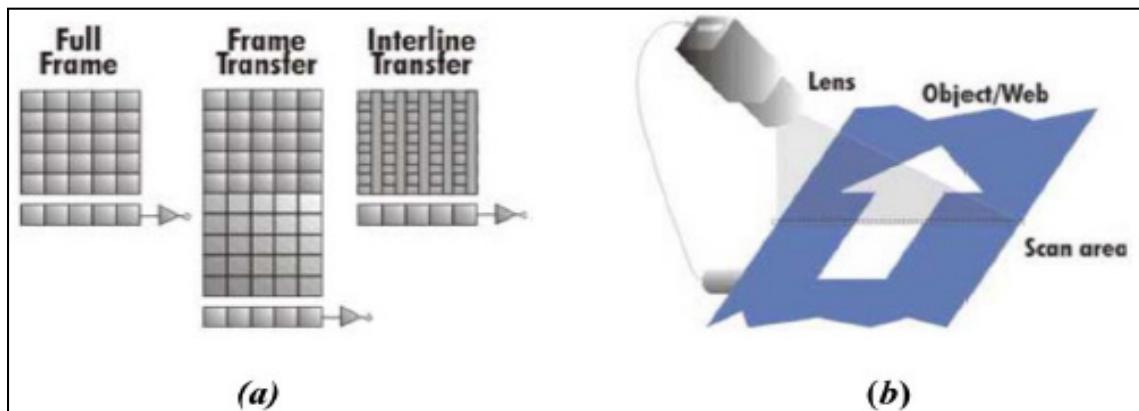


Figure 2-12 Numérisation par zone (a) et Numérisation linéale (b)
(Source : DALSA)

L'éclairage est un élément essentiel pour capturer les images de haute qualité. Le niveau d'éclairage doit être ajusté avec l'augmentation de la résolution de la caméra. Particulièrement, lorsqu'une caméra à haute résolution est utilisée pour la collecte de données, une lentille à angle ultra-large est nécessaire pour couvrir la largeur de la section de la chaussée, car il existe une limitation de la hauteur.

L'utilisation de ce type de lentille peut entraîner l'apparition de zones sombres sur l'image. Ce problème peut être résolu en utilisant un logiciel pour la correction de niveau d'éclairage sur les bords de la voie. De plus, 8 bits sont généralement suffisants pour représenter l'information visuelle de la chaussée (K. C. Wang & Smadi, 2011).

Les caméras à balayage linéaire présentent certains inconvénients, tels que la différence relative causée par l'angle de la prise l'éclairage, pris à l'aide d'une caméra linéaire, présenté dans la figure 2-13.

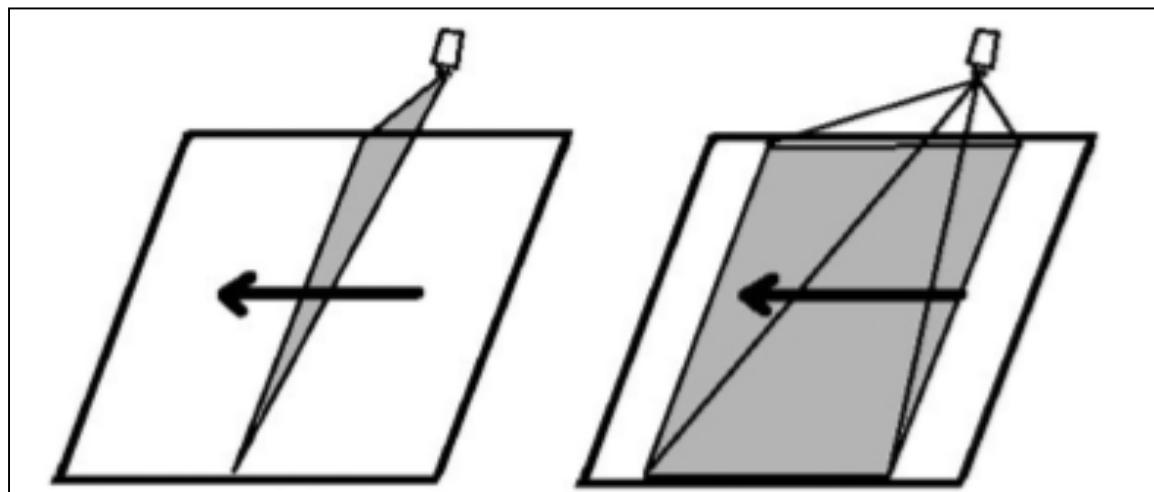


Figure 2-13 Numérisation par linéale vs Numérisation par zone
(Zalama, Gómez-García-Bermejo, Medina, & Llamas, 2014)

La résolution de l'image de la chaussée et la largeur de la fissure sont directement liées. Cependant, une fissure de la surface de la chaussée ne se présente pas comme une ligne uniforme à largeur fixe. Une fissure varie considérablement en largeur et est rarement en ligne droite.

Le tableau 2-5 montre les largeurs théoriques correspondant à la résolution de la caméra dans le domaine numérique. Les données s'appliquent aux caméras à balayage par ligne et zone.

Tableau 2-5 Rapport entre la résolution d'image et largeur de fissure (Voie de 4m)
(K. C. Wang & Smadi, 2011)

Résolution transversale (pixel)	1,300	2,048	4,096
Largeur de fissure visible (mm)	3	2	1

Les deux figures suivantes montrent la différence entre la photo digitale par zone (figure 2-14) et la photo digitale par line (figure 2-15).

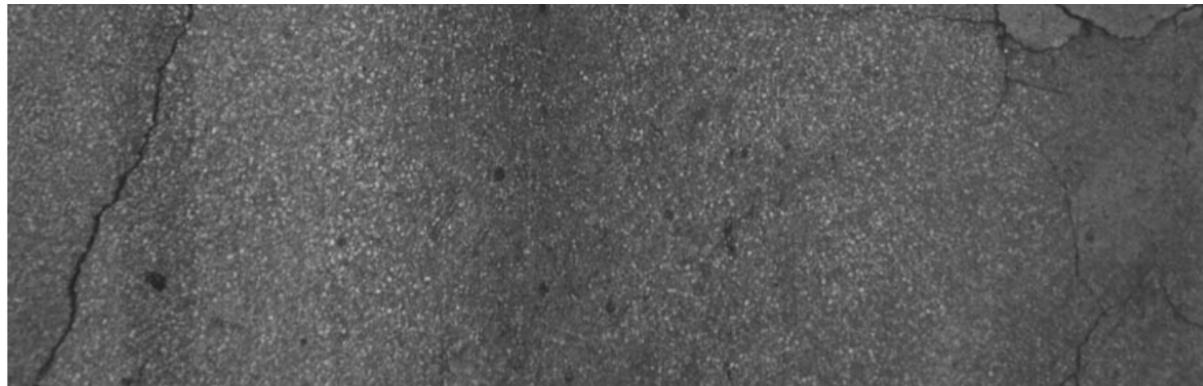


Figure 2-14 Image de résolution 2,048 pixels, par appareil photo digital à balayage par zone
(K. C. Wang & Smadi, 2011)

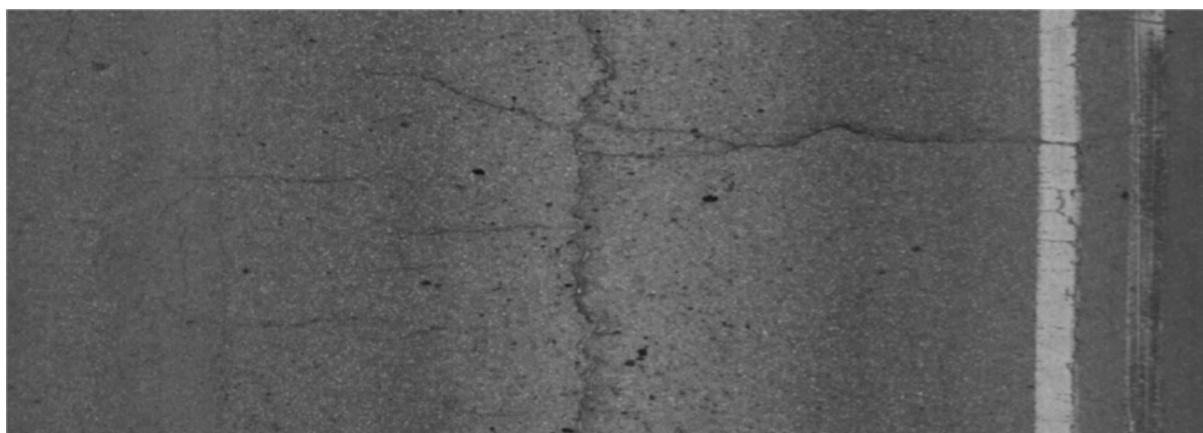


Figure 2-15 Image de résolution 4,096 pixels, par appareil photo digital à balayage par ligne
(K. C. Wang & Smadi, 2011)

2.2.6.2 Captations par caméra infrarouge

Les caméras infrarouges permettent une meilleure capture qu'à l'œil nu. Le spectre infrarouge détecte les fissures en calculant la différence de température locale sur la chaussée.

Solla, Lagüela et al, ont travaillé sur la combinaison du GPR (Géo radar ou radar à pénétration du sol) et l'imagerie thermique (infrarouge) pour obtenir des informations sur la surface et la sous-couche et détecter la fissuration dans les chaussées en bitume.

La combinaison des deux techniques lors de l'inspection des fissures se révèle utile, étant donné que les deux permettent d'estimer la profondeur de la fissure, de détecter la présence de matériaux de remplissage et d'identifier les origines et la sévérité de la fissure.

Miah et al. (2015), ont combiné la technique infrarouge avec le GPR, des caméras haute résolution (HD) et des ultrasons pour un système complet de détection de dégradations, la figure 2-16 présente la visualisation des différentes données de capteur de cette technique. Les images de caméras infrarouges ont ensuite été fusionnées avec les images de caméra HD afin de détecter facilement les fissures, les nids de poule, etc.

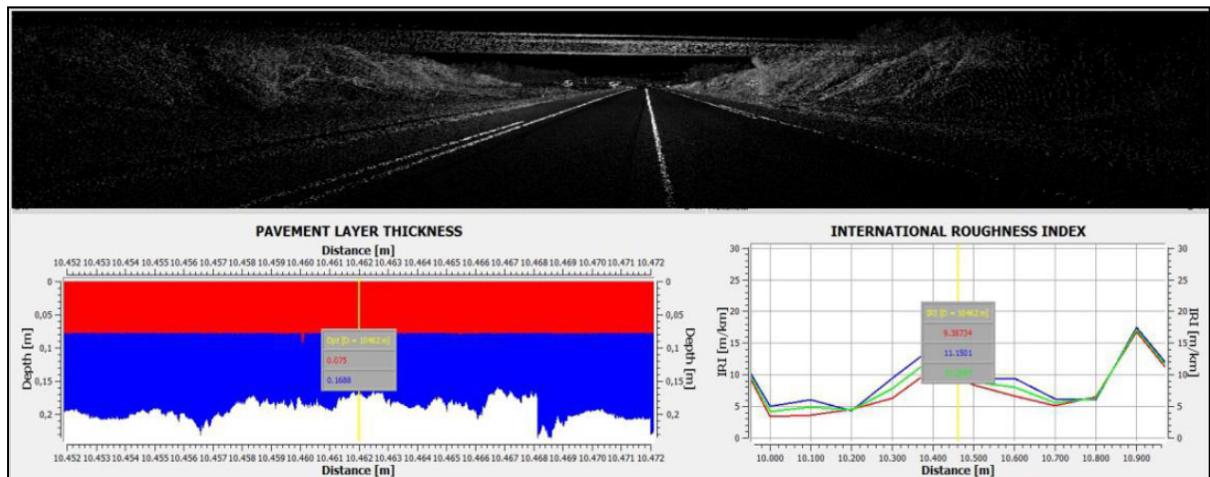


Figure 2-16 La visualisation des différentes données du système de collecte de données développée par (Miah et al., 2015).

2.2.6.3 Captations par vidéo caméra

Hiudrom (2013) a proposé de collecter des données avec des caméras vidéo à partir desquelles les images sont extraites. À cet égard, l'application était comparable aux caméras à balayage de surface et à balayage linéaire. Celles-ci doivent être utilisées pour identifier les tâches, les fissures et les nids de poule, car ces trois types de dégradation ont des caractéristiques à deux dimensions claires. Prasanna, Dana, Gucunski, et Basily (2012) ont réalisé une imagerie vidéo pour identifier les fissures. Une méthode comparable a été développée par Radopoulou et Brilakis (2015), qui ont utilisé les images vidéo de caméras de stationnement déjà installées sur des modèles de voiture spécifique. De plus, Koch et Brilakis (2011) ont utilisé les caméras de stationnement de vue arrière intégrées dans les voitures pour la collecte de données. Les *Dash cameras*, ont été étudiées par Hadjidemetriou, Christodoulou, et Vela (2016) pour la détection de dégradations. La figure 2-17 présente le diagramme de la méthode de captations par vidéo caméra.

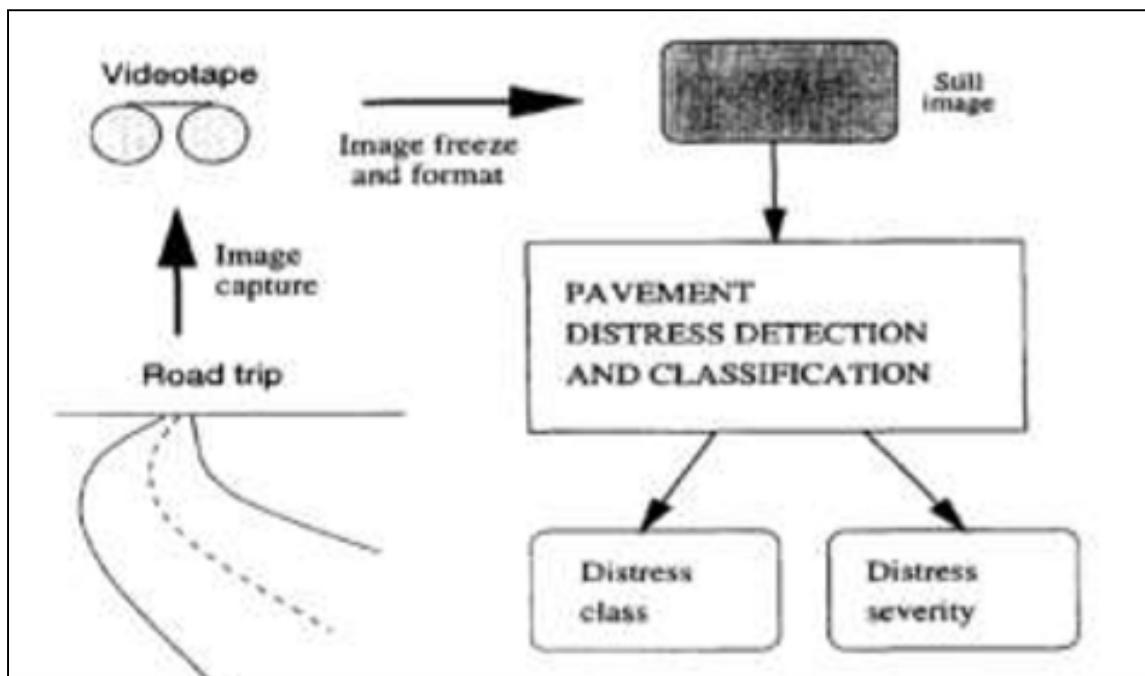


Figure 2-17 Diagramme schématique de la méthode de captation par vidéo caméra (Miah et al., 2015)

2.2.6.4 Captations par laser (3D sensor)

Généralement, les défauts de la surface de la chaussée présentent des caractéristiques tridimensionnelles, les chercheurs ont pour cette raison accordé une attention particulière au développement des systèmes qui permettent de reconstruire les chaussées .

Les capteurs lasers tridimensionnels (3D sensor) permettent de capter les fissurations, nids de poule, le rapiéçage, orniérage, et les failles qu'ils détectent sur les trois axes x, y et z. Ces capteurs 3D comprennent plusieurs techniques parmi lesquelles les profileurs laser sont les plus courants. En outre, plusieurs capteurs 3D offrent une approche de détection intégrale en utilisant des mesures de profondeur en combinaison avec l'imagerie et permettent l'acquisition d'images sans l'influence d'éclairage. Ceux-ci peuvent fonctionner jour et nuit, cependant, ils nécessitent que la surface soit sèche. Le gros inconvénient est que cet équipement est très coûteux, cependant les résultats, en pratique, sont irréprochables.

La technique mentionnée ci-dessus fournit un profil transversal, cependant, pour plusieurs déteriorations, comme par exemple l'IRI, le profil longitudinal est beaucoup plus utile.

La figure 2-18 présente un exemple des systèmes tridimensionnels, le système LCMS (Laser crack measurement system).

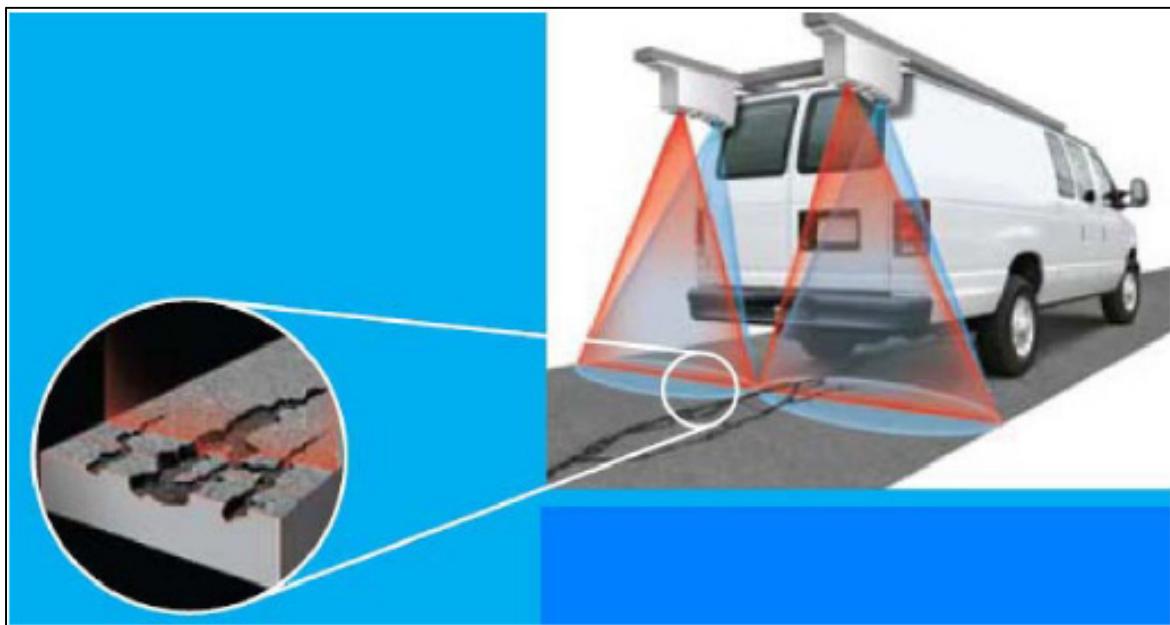


Figure 2-18 Système LCMS (Laser crack measurement system) source INO

2.2.6.5 Captations par accéléromètre et autres méthodes basées sur les vibrations

Les dégradations du profil longitudinal, cause une diminution du confort de roulement en augmentant les vibrations.

L'indice IRI, présenté dans le chapitre 1, évalue subjectivement le confort de roulement des chaussées. Cette vibration peut être mesurée en fonction des variations du bruit des pneus, de la pression des pneus et des vibrations des pneus et de la voiture dans son ensemble. Les accéléromètres et les capteurs de pression des pneus sont utilisés pour identifier ces occurrences (Coenen & Golroo, 2017). Les accéléromètres mesurent le mouvement de la voiture en trois dimensions.

Un diagramme schématique du système basé sur l'accéléromètre est présenté dans la figure 2-19. Les principaux composants du système sont le ou les capteurs de hauteur, le ou les accéléromètres, un système de mesure de distance et un logiciel pour recevoir et analyser les données.

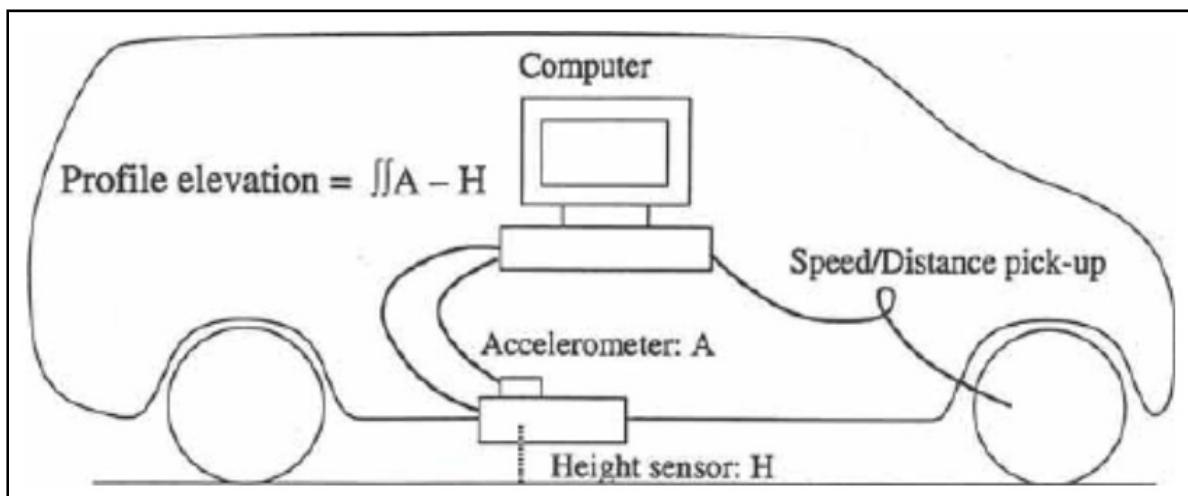


Figure 2-19 Diagramme schématique du système d'accéléromètre
(fhwa, 2016)

Casas-Avellaneda et López-Parra (2016) ont proposé l'utilisation d'accéléromètres intégrés dans les smartphones modernes en combinaison avec le GPS intégré pour détecter les nids de poule.

Il existe des systèmes plus précis, mais encore limités; les accéléromètres installés sur les roues de voitures. Ces systèmes intégrés sont utilisés dans presque tous les systèmes commerciaux, tels qu'ARRB Hawkeye (Roughometer présenté dans la figure 2-20), Pathway Services Inc., PaveTesting, etc. Ces entreprises l'utilisent comme outil pour calculer l'IRI.

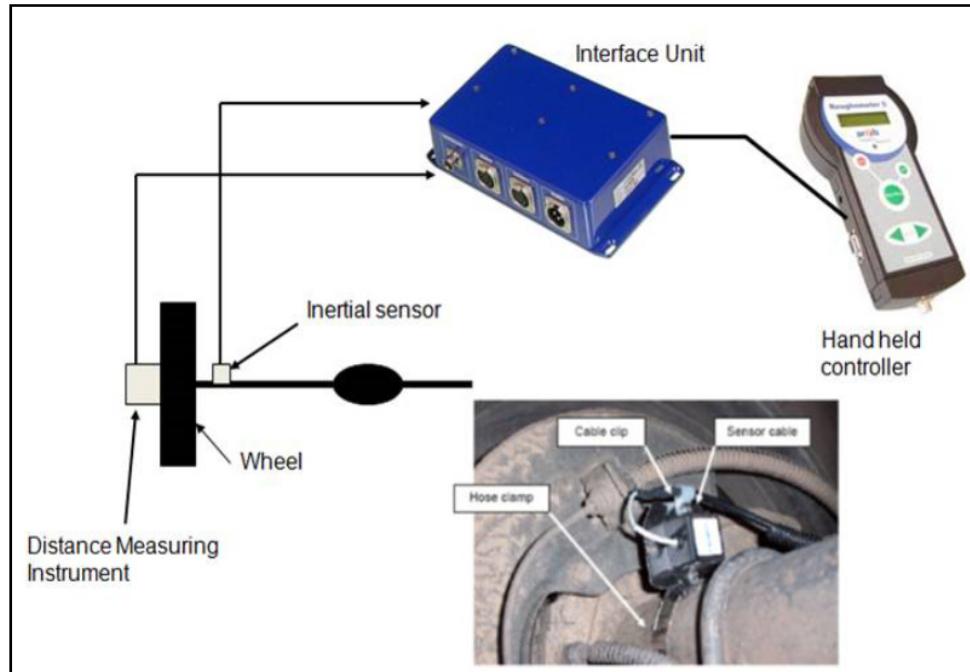


Figure 2-20 Diagramme schématique du Roughometer
(CSIR, 2015)

2.2.6.6 Captations acoustiques

Les vibrations à l'échelle microscopique ont un effet sur le bruit des pneus, la variation de la pression des pneus et la déformation des pneus. Plusieurs chercheurs tels que Y. Zhang, McDaniel, et Wang (2013), M. Wang, Birken, et Shamsabadi (2015) et Abdić et al. (2016), ont utilisés des systèmes basés sur des capteurs acoustiques pour détecter la détérioration. Ces techniques manquent de précision, mais peuvent être utilisées pour valider d'autres équipements.

2.2.6.7 Captations par Radar

Une autre façon est utilisée pour mesurer la profondeur, coordonnées et surface de dégradations par d'images 3D capté par le radar. La technologie radar utilise des ondes radio pour déterminer la distance et l'angle des objets et de courtes impulsions électromagnétiques. En utilisant différentes fréquences, la structure de la surface, les matériaux et la sous-structure de la chaussée peuvent être déterminées par un radar à pénétration de sol (Busuioc et al., 2011). Cette technique devient de plus en plus courante dans la détection de dégradation, elle est même utilisée pour calculer l'IRI et pour déterminer la structure de la route transversale.

Similaire à la technologie RADAR, le LiDAR (Light Detection And Ranging) capture des détails en éclairant une zone à l'aide de la lumière infrarouge (environ 1,0 μm) et mesure le temps écoulé entre la transmission du signal et sa réflexion ou sa diffusion (Schnebele, Tanyu, Cervone, & Waters, 2015). Le principe de LiDAR est présenté dans la figure 2-21.

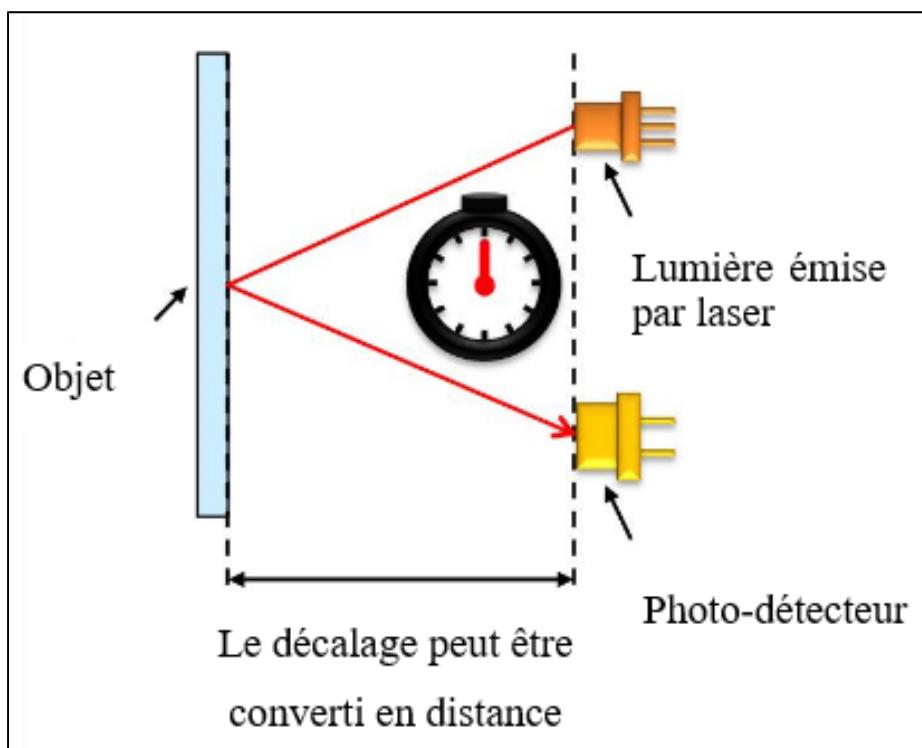


Figure 2-21 Diagramme schématique du principe de LiDAR
(Piatek et Li, 2017)

La lumière infrarouge est généralement émise à 5000 impulsions par seconde (Chang, Chang, & Liu, 2005). Cela se traduit par un nuage de points précis à trois dimensions x, y et z.

En raison de la grande vitesse de la lumière, cet équipement est très sensible (Mathavan, Rahman, & Kamal, 2012). Cette méthode est parfaitement adaptée lorsque non seulement la route doit être analysée et qu'un programme de gestion des infrastructures plus complet est envisagé, comprenant par exemple l'analyse de l'état des écrans antibruit, des panneaux de signalisation et des barrières (Landa & Prochazka, 2014).

Le LiDAR est souvent utilisé en topographie et dans la création de modèles d'élévation numériques. Lorsqu'il est monté sur un véhicule en mouvement, les surfaces routières peuvent être cartographiées à l'aide du nuage de points 3D. Contrairement à d'autres techniques, le LiDAR n'est pas limité par l'angle la lumière et peut être utilisé de jour ou de nuit.

Selon Chang, le LiDAR peut être utilisé pour évaluer la condition de la chaussée, et permet d'estimer le volume de dégradations afin de calculer la quantité de matériaux de remplissage nécessaire. Les modèles LiDAR 3D peuvent être utilisés pour identifier les zones sensibles aux problèmes de drainage et d'inondation avec une précision de 2 cm (Uddin, 2011).

2.2.6.8 Sommaire

Les dispositifs de collecte de données décrits ci-dessus ont été appliqués pour évaluer l'état de la chaussée, soit automatiquement ou manuellement. Il est important d'évaluer la précision de chaque dispositif dans la collecte des données. Afin d'évaluer les dispositifs, certains critères tels que la capacité à capturer des données en mode dynamique, l'implantation dans des véhicules de collecte de données automatisée, l'intégrabilité et la précision dans la détection des dégradations ont été évalués. Le tableau 2-6, adapté par Coenen et Golroo (2017) montre plusieurs appareils de collecte de données. Chaque appareil a été classé en appliquant cinq appréciations : Très bon, bon, modéré, pauvre et très pauvre pour chacun des termes des critères mentionnés ci-dessus.

Tableau 2-6 Niveau de méthode de détection de la dégradation des chaussées
(Coenen & Golroo, 2017) .

Type	Dispositifs	Implantation	Intégrabilité	Dégradation	Précision	Coût
Caméra	Digitale	++	++	+	+/-	++
	Infrarouge	++	++	+	+	++
	Vidéo	++	++	+	+/-	++
Laser	GPR	+	+	+	+	-
Accéléromètre	Roughometer	-	-	+	+	-
Acoustique	Sur la roue	--	-	+	+	++
Radar	Lidar	--	-	++	++	++
++ : Très bon		+ : Bon	+/- : Modéré	- : Pauvre	-- : Très pauvre	

2.3 Prévoir l'état des chaussées

La prévision de l'état de chaussée est la troisième étape de processus de gestion de chaussée. Lorsque l'état de la chaussée est évalué, il est important de disposer des informations nécessaires pour prévoir l'état futur de la chaussée. Dans la gestion des chaussées, les modèles de performance sont établis grâce aux prédictions des conditions de détérioration qui estiment les taux moyen de détérioration de la chaussée chaque année.

En plus de prévoir les conditions futures, les modèles de performance facilitent les activités suivantes (Brotén, 1997) :

- Identifier le moment approprié pour l'entretien ou réhabilitation de la chaussée;
- Identifier la stratégie de traitement la plus rentable pour des segments de chaussée donnés dans le réseau;
- Estimer les besoins en revêtement et les budgets associés nécessaires pour répondre aux buts et objectifs; et
- Démontrer les conséquences de différentes stratégies d'investissements dans les chaussées.

Une courbe de performance est calculée en évaluant les données stockées dans l'historique en termes d'âge et d'état de la chaussée. Les modèles peuvent être produits pour toute mesure de condition en fonction des besoins.

2.3.1 Taux moyens de détérioration

En utilisant les informations d'état collectées, les taux de détérioration peuvent être estimés pour les sections de chaussée en utilisant l'équation suivante (Broten, 1997) :

$$\text{Taux de détérioration} = \frac{\text{Évaluation passé} - \text{Évaluation courant}}{\text{Nombre d'années entre les évaluations}} \quad (2.1)$$

2.3.2 Modèles de prédition utilisant l'analyse statistique

L'élaboration de modèles de prévisions à l'aide de l'analyse statistique est une activité plus complexe que le calcul des taux moyens de détériorations.

Des logiciels dédiés sont utilisés pour créer ce modèle. MicroPAVER développé par le US Army Cops of Engineers, généralement utilisé en Amérique de Nord, permet de développer des modèles de prédition de performance en utilisant une procédure générale aussi appelée ; la méthode de classification par famille. La méthode comprend les étapes suivantes (Shahin, Stock, & Beckberger, 1994) :

- Définir la famille de chaussées (section homogène) : Un groupe de sections de chaussée présentant des courbes de détérioration similaires est défini comme de la même famille. Le logiciel MicroPAVER permet à l'utilisateur de définir la famille en fonction des données d'inventaire (par exemple, type de chaussée, classification fonctionnelle, informations sur le trafic, etc.). Une fois qu'une famille est créée, les données de condition, en termes de PCI, et les informations sur l'âge de la chaussée pour tous les segments de chaussée de la famille sont compilées dans un fichier utilisé pour créer le modèle de performance.
- Filtrer les données: Le logiciel MicroPAVER signale les chaussées vieillit faisant partie sections qui montrent une condition de détérioration élevée. En outre, le logiciel élimine les données superflues, non nécessaire au processus de gestion des chaussés.

- Effectuer une analyse des données: Le logiciel permet également de supprimer statistiquement des données inhabituelles, susceptibles d'avoir un impact négatif sur la modélisation des performances d'une famille de chaussées.
- Développer le modèle de famille: Avec le filtrage des données et l'élimination des valeurs superflues, le logiciel MicroPAVER permet la création d'un modèle de prédiction. Le modèle est forcément de pente décroissante puisque la condition ne peut s'améliorer avec le temps. Le modèle développé définit la condition actuelle des sections de chaussée et les conditions futures sont prédites en extrapolant la courbe.
- Prédire l'état de la section de la chaussée: Dans MicroPAVER, la prévision de l'état des segments de la chaussée est défini par la position de la section de la chaussée (état actuel) par rapport à la courbe de prédiction de la famille. Une courbe de prévision modifiée pour chaque segment de chaussée est créée en «déplaçant» la courbe vers le dernier point / âge du segment et en utilisant le modèle de performance décalé pour prédire les conditions futures de la section de chaussée. Des exemples de courbes de prédiction de performance de famille et de segment sont présentés dans figure 2-22 .

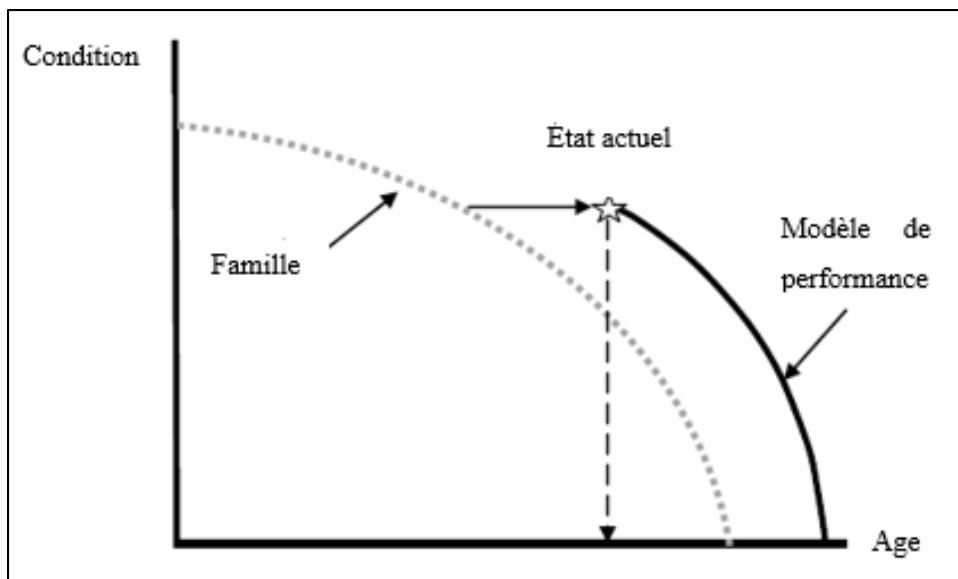


Figure 2-22 Prévision d'une section de chaussée
(Shahin et al., 1994)

2.3.3 Sélection d'une méthodologie appropriée

La plupart des logiciels de gestion des chaussées peuvent être utilisés pour générer des modèles de prévision de performance spécifiques à l'aide des données réelles sur l'état de la chaussée. Les modèles développés sont utilisés pour illustrer les tendances de performance et élaborer des scénarios budgétaires (Wolters et al., 2011a).

2.4 Choix des traitements

La quatrième étape de la conception du processus de gestion de la chaussée consiste à sélectionner les traitements appropriés pour le réseau routier. La sélection des traitements est basée sur la stratégie de maintenance et de réhabilitation définie par les agences. Elle est créée en sélectionnant des valeurs de déclenchement pour identifier les segments à réparer en priorité.

Les valeurs de déclenchement sont des seuils qui sont utilisés pour indiquer la nécessité d'appliquer divers traitements aux segments de chaussée. Par exemple; l'âge de la chaussée, l'état de la surface de la chaussée et la circulation sont des paramètres utilisés pour déterminer l'admissibilité d'une chaussée à la réparation. La sélection d'un traitement peut être basée sur une sélection cyclique ou la création de règles de traitement.

2.4.1 Sélection de traitement cyclique

Une méthode de sélection d'un traitement pour un segment de chaussée consiste à appliquer un traitement cyclique à des sections de revêtement données. D'où la nécessité de sélectionner des stratégies d'entretien basées sur l'âge de la chaussée. Ces traitements sont ensuite répétés à des intervalles de temps spécifiques.

La mise en place du traitement augmente la durée de vie de la chaussée et, si elle est appliquée au bon moment, peut prolonger la durée de vie de la chaussée. Cependant, le timing d'un tel traitement est essentiel à sa performance et à son rapport coût-efficacité.

Par conséquent, il est difficile d'obtenir un traitement optimal en utilisant la sélection cyclique car cette sélection est réglementée et ne permet pas de régler l'application du traitement au bon moment pour chaque segment de chaussée (Haas & Canada, 1997).

2.4.2 Règles de traitement

En plus des traitements cycliques, une autre méthode de sélection de traitement consiste à utiliser des règles de traitement développées en matrice ou en arbre de décisions. Pour élaborer les règles de traitement, il faut définir la stratégie de traitement. C'est-à-dire sélectionner des traitements qui seront appliqués à des niveaux de conditions spécifiques pour les chaussées avec des inventaires spécifiques (Wolters et al., 2011a).

D'autres formes de règles de traitement peuvent être développées, y compris des arbres de décisions pour sélectionner les traitements adéquats aux segments de la route. Un arbre de décisions dispose d'une stratégie pour chaque branche de l'arbre, générant des options de traitement spécifiques pour différentes catégories définies par l'agence.

2.4.3 Classement

La priorité d'opérations de maintenance et réhabilitation est donnée en utilisant un classement des projets basé sur un mode de priorité établi par les ingénieurs, tel que l'état de la chaussée, la classification et/ou les niveaux de trafic décrits dans cette section ou en utilisant l'analyse avantages/coûts décrite dans la section suivante.

Le classement est la méthode la plus simple de sélection des projets et aboutit normalement à une évaluation annuelle des projets sélectionnés. Une méthode pour utiliser l'approche de classement consiste à réparer les chaussées dans les pires conditions.

Cependant, cette approche du « pire en premier » ne permet pas de maintenir les chaussées en bon état et peut mener à un cycle coûteux qui ne prévoit aucun financement pour la préservation

des chaussées. Si les ingénieurs décident d'utiliser une technique de classement, elle suit généralement les étapes ci-dessous :

- Évaluer les besoins pour une année donnée en identifiant toutes les sections de la chaussée qui ne sont pas en excellent état;
- Calculer les coûts de traitement en définissant le coût du traitement approprié pour chaque niveau de réparation par la zone du projet;
- Triez les besoins par ordre de priorité en utilisant la méthodologie de classement établie. Dans une mauvaise stratégie, les tronçons les plus détériorés seraient la priorité absolue;
- Sélectionner les projets conformément à la liste prioritaire jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de financement pour cette année; et
- Considérez tous les besoins non financés au cours de la prochaine année et répétez le processus.

2.4.4 Analyse avantages/coûts

Une analyse avantages/coûts permet aux ingénieurs de hiérarchiser, le choix des traitements sur une période de plusieurs années.

Cette approche est préférable à une approche de classement car de multiples traitements sont envisagés. Les conséquences d'un retard ou d'une accélération d'un traitement sont évaluées et la rentabilité d'un traitement est prise en compte dans l'élaboration des recommandations du programme (Brotén, 1997).

2.4.5 Sélection d'une méthodologie appropriée

Pour aider à identifier le traitement le plus approprié pour chaque projet, les ingénieurs peuvent choisir d'utiliser un calendrier cyclique ou des règles de traitement. Le cyclique périodique se révèle plus efficace lors de l'utilisation un tableur pour gérer le réseau de chaussées, tandis que la création de règles de traitement, bien que possible dans un tableur, peut-être plus complexe. Les règles de traitement sont facilement créées dans les logiciels de gestion des chaussées.

Une fois les traitements déterminés, ils doivent ensuite déterminer la priorité des projets, car la plupart des organismes ont plus de besoins que le financement disponible. Les ingénieurs peuvent choisir de hiérarchiser les projets en fonction de leur classement ou de leur analyse des avantages / coûts. L'analyse des avantages / coûts est mieux menée dans un système de gestion de chaussée, tandis que le classement peut être facilement réalisé dans un tableur. Les résultats de l'étape de sélection du traitement fournissent des recommandations de plan de travail.

2.5 Présentation des résultats

La présentation des résultats du projet constitue la cinquième étape du processus de mise en œuvre, au cours duquel les résultats de l'analyse des données sont présentés. Les résultats peuvent être rapportés en utilisant différentes méthodes pour mettre en évidence des facteurs importants, ce qui aidera les décideurs à prendre les décisions.

La communication de données est une méthode efficace pour communiquer non seulement les recommandations du processus de gestion des chaussées, mais aussi pour transférer les informations aux décideurs de stratégies. Les données peuvent être utilisées pour générer des rapports d'informations pertinents au segments considérés. En général, les résultats sont présentés en utilisant des rapports standards ou des résumés personnalisés.

Un des avantages de la mise en œuvre d'un logiciel de gestion des chaussées est la possibilité d'utiliser les données disponibles pour générer des rapports définis par l'utilisateur pouvant être modifiés pour répondre aux exigences des gestionnaires. Certains logiciels de gestion des chaussées facilitent également la génération de rapports liés au composant SIG de la base de données ou au logiciel SIG géré séparément.

2.5.1 Aides visuelles pour la communication d'informations

Les aides visuelles générées dépendent des besoins d'une agence et du type d'informations à représenter. Comme le montre cette section, il existe une variété de façon pour créer des aides

visuelles permettant d'identifier les données de gestion de la chaussée. Le tableau 2-7 résume les directives générales sur les types d'aides visuelles les mieux adaptées au partage des données avec divers utilisateurs d'informations sur la gestion des chaussées et des exemples de chacun d'eux.

Tableau 2-7 Aides visuelles pour la transmission d'information aux utilisateurs de données de gestion de la chaussée (Broten, 1997)

Aides visuelles	Utilisation	Exemples
Tableaux	<ul style="list-style-type: none"> - Intégrer dans un rapport ou un document pour l'utilisateur spécialisé - Afficher une grande quantité d'informations détaillées - Soutenir l'analyse détaillée et fournir des informations techniques 	<ul style="list-style-type: none"> - Liste d'inventaire (par exemple, emplacement du segment et nom, type de surface, trafic) - Liste des conditions (indice de condition) - Liste de maintenance (année d'activité de maintenance, type de maintenance et coût) - Budget
Graphiques	<ul style="list-style-type: none"> - Présenter les informations au public - Souligner les points à faire 	<ul style="list-style-type: none"> - Diagramme en camembert - Diagramme à colonnes - Diagramme à barres
Carte	<ul style="list-style-type: none"> - Afficher un type d'information unique sur une base géographique - Présenter des informations au public 	<ul style="list-style-type: none"> - Type de surface - État actuel codé par couleur - Projets codés par couleur par année - Condition future

Comme déjà vu dans la partie précédente, un système d'information géographique (SIG) est un système informatisé de gestion de données permettant de visualiser des données spatiales, physique ou d'autres natures, reliées à un endroit précis sur la planète. Il est avantageux d'intégrer les systèmes de gestion des chaussées aux systèmes d'information géographique.

2.6 Sélection d'un outil de gestion des chaussées

Le choix d'un outil de gestion de la chaussée est influencé par les exigences des gestionnaires et les besoins des utilisateurs. L'outil fournit une plate-forme permettant de stocker les informations de gestion de la chaussée et d'effectuer différents types d'analyses tels que les feuilles de calcul, un outil SIG et / ou un système de gestion des chaussées (Wolters et al., 2011a).

2.6.1 Logiciels publics

- MicroPaver;
- RoadSoft GIS;
- Ultah LTAP TAMS; et
- SteelSaver.

2.6.2 Logiciels privés

- RoadCare;
- PAVEMENTview Plus;
- PubWorks; et
- PavePro Manager.

En fonction des besoins, le choix peut être une combinaison de logiciels de gestion des chaussées et de feuilles de calcul personnalisées et / ou de logiciels SIG pour répondre aux besoins. La majorité des agences utilisent une combinaison de feuilles de calcul, de logiciels de gestion des chaussées et d'outils SIG pour gérer leurs réseaux routiers.

2.7 Reproduire le processus de manière cyclique

La gestion des chaussées est un processus dynamique qui nécessite des mises à jour régulières, il ne s'agit pas d'une activité ponctuelle. Les agences doivent donc s'efforcer de mettre à jour les informations incorporées dans le processus de gestion des chaussées. La gestion de la

chaussée est un élément clé de la maintenance de la base de données et du maintien des informations à jour. La figure 2-23 présente un sommaire des sept étapes.

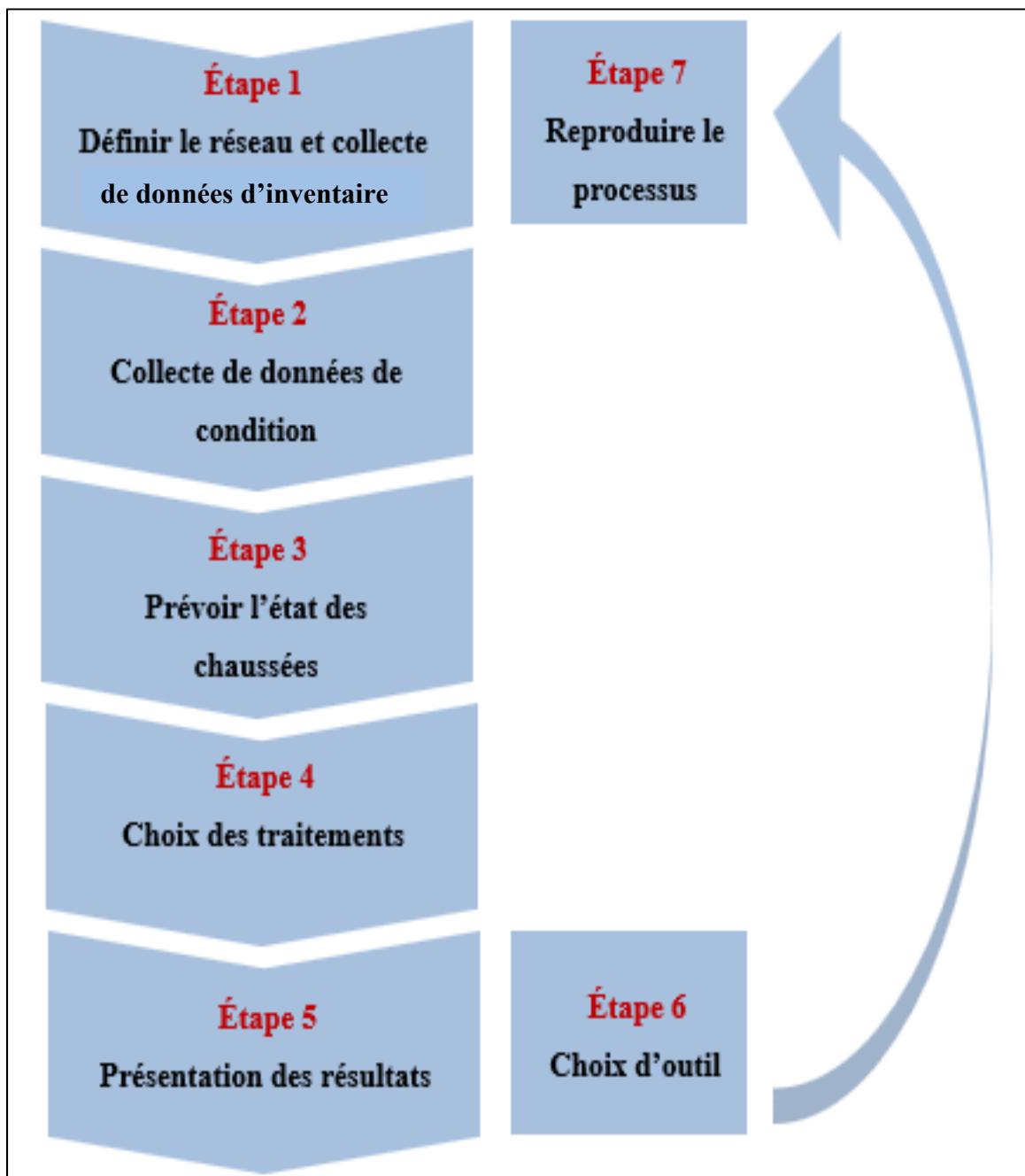


Figure 2-23 Les sept étapes du processus de gestion de la chaussée
(Wolters et al., 2011a)

2.8 Conclusion

Les différentes étapes de processus de gestion de chaussée sont présentées dans ce chapitre, l'accent est mis sur les avantages des nouvelles technologies de collecte et visualisation des données. L'outil proposé s'appuie sur la cueillette, visualisation et l'analyse des données pour un support de décision d'entretien, inspirée des SIG et d'une base de données collaborative rassemblant les données techniques et environnementales. Cet outil utilise du matériel technologique très répandu et peu coûteux dont des caméras vidéo géoréférencées dans la cueillette des données, et le logiciel Google Earth pour la visualisation.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL

Ce chapitre explore d'abord une partie de la littérature traitant la méthodologie de la structure de recherche avant d'arrêter une conception et des méthodologies spécifique à la présente recherche. La méthodologie choisie pour ce mémoire comprendra donc les composantes de recherche suivantes :

- Littérature générale sur les pratiques des systèmes de gestion des chaussées existants;
- Cueillette des données sur les facteurs les plus importants ayant une incidence sur l'évaluation des priorités d'entretien des chaussées;
- Méthodes d'analyse et de visualisations des données;
- Développement d'un modèle de collecte et visualisation des données; et
- Analyse des résultats, évaluation et validation.

La méthodologie retenue pour cette recherche consiste en une revue de la littérature, ainsi que le développement d'un outil pour la récolte et la visualisation des données de condition des chaussées.

La revue de littérature doit permettre de dresser le bilan des connaissances acquises en matière de gestion des chaussées, l'accent est mis sur les publications scientifiques traitant des systèmes de collecte et de visualisation de données.

Cette démarche met en évidence la différence entre les façons de faire actuelles et l'approche proposée. Cet outil graphique a été appliqué et a permis de valider l'approche en études de réhabilitation de routes urbaines et rurales.

Le concept méthodologique de la recherche est présentée en suivant le fameux « oignon » de recherche de Saunders et al. (2009). Les choix méthodologiques sont présentés couche par couche. Les méthodes de collecte de données et d'analyse des données sont présentées ultérieurement dans la partie empirique de cette étude.

3.1 Oignon de la recherche

Saunders et al. (2009) ont présenté des méthodologies de recherche sous la forme d'un oignon (Figure 3-1). La métaphore d'oignon convient bien dans ce contexte, car les méthodologies de recherche et leurs choix peuvent être abordés d'une perspective de plus en plus réduite. L'approche philosophique de la recherche est la plus vaste et touche à tous les autres choix méthodologiques. Le cercle le plus externe de l'oignon de recherche concerne les philosophies de recherche, que Saunders et al. (2009) ont divisés en : positivisme, réalisme, interprétativisme et pragmatisme.

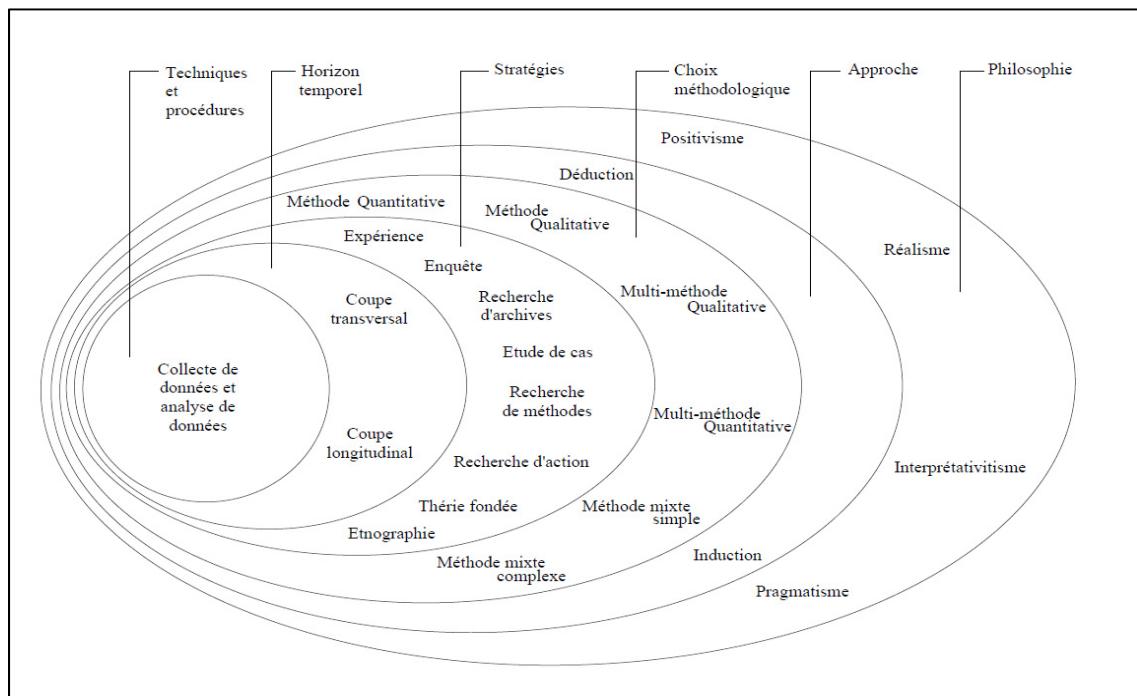


Figure 3-1 Oignon de la recherche, adapté par Saunders et al. (2009)

La perspective philosophique est suivie par deux approches différentes de la recherche: déductive et inductive (Saunders et al., 2009). Le fondement de la recherche repose sur ces deux principes : la philosophie de la recherche et son approche. Ceux-ci sont suivis par le plan de recherche proprement dit. Selon Saunders et al. (2009), en ce qui concerne la conception de la recherche, il existe différentes stratégies de recherche comme par exemple : des expériences, des enquêtes, des études de cas, de la recherche-action, de la théorie de base, de l'ethnographie et de la recherche archivistique.

Après avoir choisi une stratégie de recherche, il est temps de choisir les méthodes de recherche de l'étude. Des choix doivent être faits pour utiliser des données quantitatives et/ou qualitatives, ou les deux. Les sources de données doivent également être choisies, de même que l'utilisation d'une ou plusieurs sources de données. Ces choix de méthodes de recherche sont suivis par la décision de l'horizon temporel de l'étude: est-il transversal ou longitudinal ? Enfin, au centre de l'oignon de recherche se trouvent les choix liés à la collecte des données et à l'analyse des données. Les différentes perspectives et approches méthodologique utilisée dans ce mémoire sont présentées dans l'Annexe 1.

3.2 Étapes de développement de l'outil

La revue de littérature sur les méthodes de collecte de données de conditions des chaussées a permis de révéler les avantages d'utiliser des caméras vidéo à partir desquelles les images seront extraites, l'application était comparable aux caméras à balayage de surface et à balayage linéaire (Voir section 2.2). Cette méthode permet d'identifier les défauts de surface.

3.2.1 Relevé par vidéo caméra

Le système est conçu pour collecter les données de condition des chaussées à l'aide des caméras vidéo. Il est possible d'obtenir différents relevés, notamment : la rugosité, le temps de parcours, le trafic, les caractéristiques de la chaussée et les informations d'inventaire, tels que le type de chaussée, le nombre de voies, le type et la largeur de l'accotement, et les caractéristiques environnementaux avoisinants tels que sites naturels, habitations, cours d'eau. Relevé plus global de la fissuration de niveau réseau, fait à bord d'un véhicule roulant à vitesse constante, et peut être effectué au bureau, en visionnant des vidéos ou des images de la chaussée. L'avantage de cette technique est qu'elle est sécuritaire, et offre à l'utilisateur un environnement qui favorise une exécution optimale (Bergeron et al., 2012). La qualité des images ou vidéos enregistrées assure la qualité de l'analyse effectuée. Bien que cette méthode soit simple, elle est soumise à la subjectivité des évaluateurs. D'où l'importance d'un programme d'assurance qualité pour assurer la reproductibilité et la répétitivité de l'analyse

des vidéos et d'images de la chaussée. Cette méthode permet de dresser une évaluation préliminaire de la dégradation.

3.2.2 Notions de base

Il est conseillé que le relevé soit réalisé pendant la saison estivale (début du printemps jusqu'à l'automne). En plus, la surface de la chaussée doit être complètement sèche. Dans le cas contraire, l'eau se concentre sur les sites des fissures et forme une zone humide tel que le montre la figure 3-2, les niveaux de sévérité des fissures risquent d'être surévalués par les analyses (Bergeron et al., 2012).



Figure 3-2 Humidité résiduelle sur le site d'une fissure
(Bergeron et al., 2012)

L'éclairage joue un rôle très important dans l'identification et l'évaluation du niveau de sévérité des fissures. Le phénomène de la différence de visibilité d'une fissure selon l'angle de vision et l'ensoleillement est présenté dans la figure 3-3.

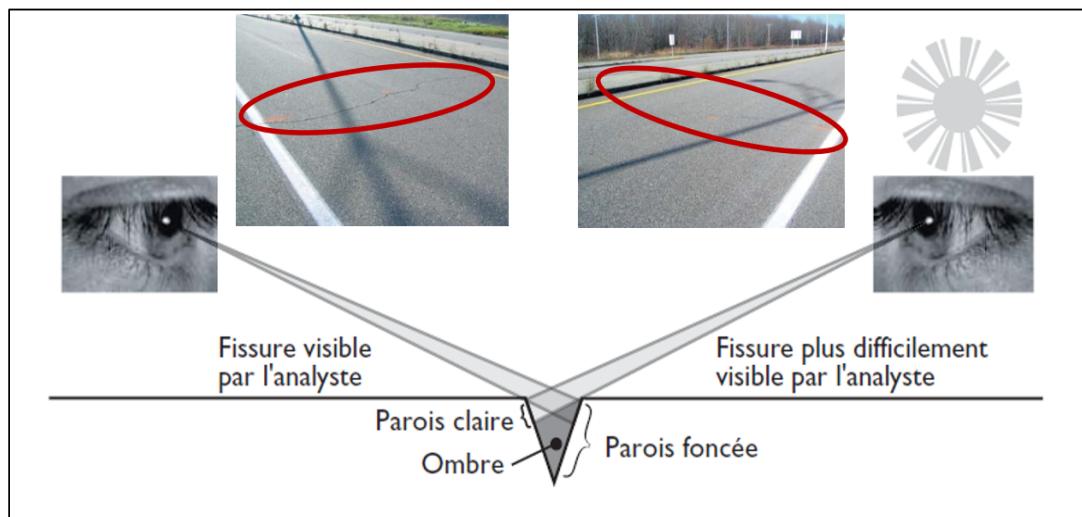


Figure 3-3 Photo illustrant l'effet de l'éclairage sur la visibilité des fissures
Adaptée de Bergeron et al. (2012)

3.2.3 Classification et quantification des dégradations

La classification des dégradations est basée sur la méthode VIZIR. Il s'agit d'une méthode d'évaluation, de classification et de hiérarchisation d'un réseau routier de chaussées souples par système informatique. Elle est destinée à fournir une image de l'état de surface d'une route à un moment donné et à identifier des zones définies, afin de déterminer la nature et le type de travail requis; dans certains cas, l'identification même du dommage détermine la solution (Fernandes Jr et al., 2012). Les dommages classés selon la méthode VIZIR concernent exclusivement les chaussées souples à revêtements bitumineux. Ces dommages sont divisés en deux grandes catégories (Autret, 1991) :

- **Type A** : Les dégradations de type A concentrent aux défauts structurels de la chaussée, affectant soit tous l'ensemble des couches et du sol ou la couche de surface uniquement. Proviennent normalement d'une insuffisance de capacité structurelle de la chaussée. Le type de dommage A comprend :
 1. Déformation;
 2. Orniérage;
 3. Fissuration de fatigue; et
 4. Faïençage

- Type B : Les dégradations de type B proviennent d'un défaut de qualité d'un produit, de mise en œuvre, ou bien d'une condition locale particulière causé par le trafic. Le type de dommage B comprend :

1. Fissuration hors fatigue : fissures longitudinales de joint, fissures transversales de retrait thermique et fissures longitudinales et transversales de retrait d'argile;
2. Nids de poule; et
3. Mouvement des matériaux : pelage, peignage, arrachements, ressuage et désenrobage.

La quantification des dégradations est calculée par rapports à leur ampleur et leur gravité suivant la méthode VIZIR.

L'ampleur indique simplement à quel point le défaut se présente sur la superficie. Il comporte cinq niveaux, présenté dans le tableau 3-2. Les directives à suivre sont décrites ci-dessous, en fonction du pourcentage de la surface affectée et de son impact. Pour assurer la répétitivité et la qualité des données il est important d'avoir une description de tous les paramètres intervenants dans l'analyse.

Tableau 3-1 Niveau d'ampleur des dégradations

Ampleur	1	2	3	4	5
	< 10 %	10 à 20 %	20 à 50 %	50 à 80 %	> 80 %

La figure 3-4 représente la méthode de calcul du pourcentage de l'ampleur des dommages. Lorsqu'un seul dommage est présent sur une section transversale définie, le pourcentage de l'ampleur est 4%, si deux dommages sont relevés le pourcentage s'élève à 10%, 15% pour trois dommages, et 25% pour plus de trois dommages.

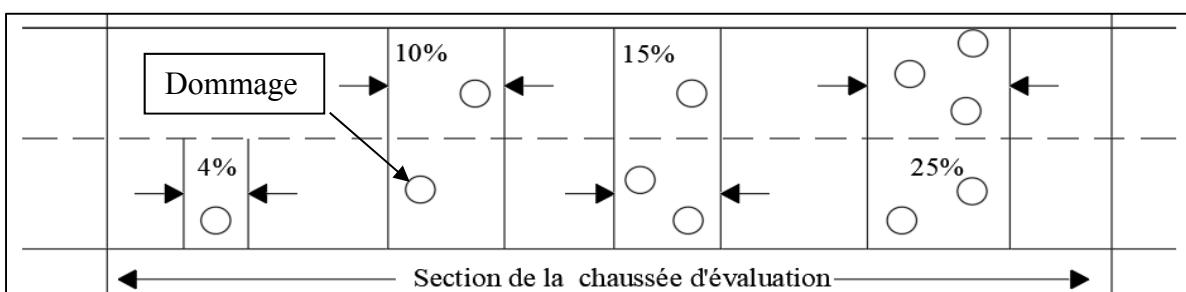


Figure 3-4 Schéma illustrant le directive de calcul du pourcentage de l'ampleur

À titre d'exemple, dans la figure 3-5, le calcul d'ampleur est $4 + 4 + 15 = 22\%$ ce qui correspond à la valeur d'ampleur:

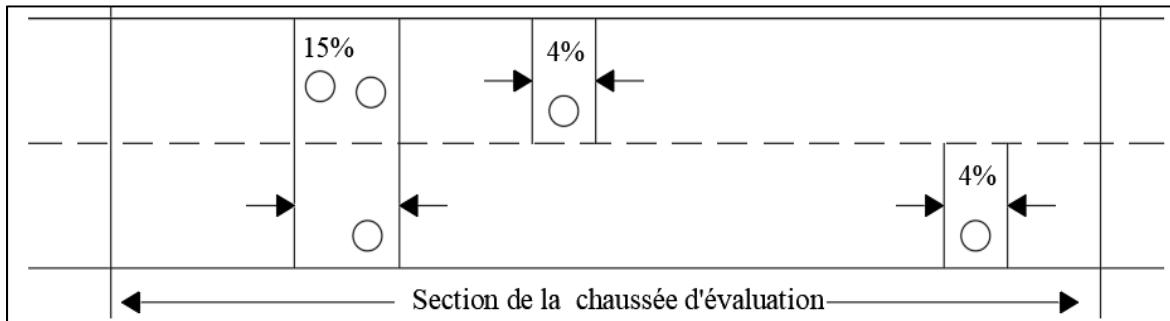


Figure 3-5 Schéma illustrant la directive de calcul d'ampleur

Tandis que pour la gravité, elle indique simplement à quel point le dommage est grave, et elle comprend trois niveaux de gravités. Une description de chaque niveau de gravité par type de dégradation selon le système VIZIR, est présentée dans le tableau 3-3.

Tableau 3-3 Niveau de gravité de dégradation (Autret, 1991)

Gravité Type		1 Légère	2 Modérée	3 Sévère
Type A	Déformation et Orniéage	Rayon < 2cm	2 ≤ Rayon ≤ 4 cm	Rayon ≥ 4 cm
	Faïençage	Faïençage fin Maillage large > 50cm	Faïençage plus serré Maillage < 50cm	Faïençage très ouvert Maillage < 20cm
	Fissuration	Fissures fines	Fissures ouvertes ou ramifiées	Fissures très ouvertes ou ramifiées

Suite tableau 3-3

Gravité		1	2	3
Type	Légère	Modérée	Sévère	
Type B	Fissuration Longitudinale	Fine et unique	Fine, ramifiée >1cm	Large, ramifiée >3 m
	Nid de poule	Moin que 5 par 100 m	Entre 5 et 10 par 100 m	Plus que 10 par 100 m
	Mouvement des matériaux Arrachements	Ponctuel	Continu sans apparition de la couche de base	Continu avec apparition de la couche de base

3.2.4 Indice de condition visuel

L'indice de condition visuel (ICV) de la surface de la chaussée est un moyen simple, pratique, rapide et peu coûteux de surveiller l'état de la surface des chaussées, et de créer un historique de référence.

L'ICV mesure le type, l'étendue et la gravité de la surface des chaussées, c'est une méthode subjective d'évaluation basée sur l'inspection et l'observation. Ce n'est pas un exercice complexe. ICV fournit une évaluation numérique de la détérioration des segments de la chaussée, il permet de diviser la route en section homogène selon leur niveau de détérioration, et assure le suivie de son état au cours du temps. La figure 3-6 présente l'échelle proposée de ICV, et les codes couleurs pour la présentation des résultats. L'échelle proposée, codifie les besoins en entretien relatifs aux tronçons étudiés, elle comprend 20 degrés ou notes, de 1 à 20 suivant la formule ci-dessous.

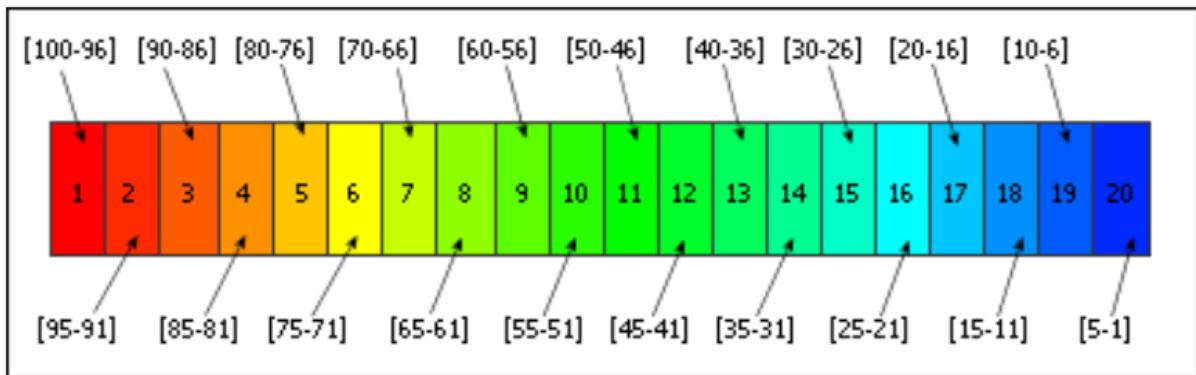


Figure 3-6 Échelle et code couleur de l'indice de condition visuel

3.2.4.1 Calcul de ICV

Pour Calculer le ICV, l'opérateur, à partir de son ordinateur, procède comme suit :

- 1- Identification du tronçon pour lequel on désire calculer l'ICV;
- 2- Découpage de la vidéo prise à l'aide des caméras en photos selon un pas donné;
- 3- Étude des images en se référant aux directives pour assurer la répétitivité des résultats;
- 4- Introduction des données dans le tableau préparé sur le fichier Excel (figure 3-10);
- 5- Calcul de l'indice selon la formule suivante :

$$ICV = \frac{\sum_{i=1}^n (Gr_i \times Am_i) + \sum_{j=1}^m (Gr_j \times Am_j)}{(Gr_{max} \times Am_{max}) \times (n+m)} \times 100 \quad (3.1)$$

Où :

Gr, Gravité de la dégradation

Am, Amplitude de la dégradation

Gr_{max} , Gravité maximale de la dégradation

Am_{max} , Amplitude maximale de la dégradation

n, Le nombre de dégradation du type A

m, Le nombre de dégradation du type B

L'intérêt majeur de cette méthode, en plus de sa simplicité et sa rapidité, et qu'elle permet d'estimer l'état d'un tronçon par types de dégradations A et B discutées ci-dessus ce qui facilite aux décisionnaires la compréhension des causes de dégradations et ainsi d'entrevoir les opérations d'entretien nécessaires ou pas.

Les formules de calcul des ICV partiels, selon les catégories de dégradations A et B, sont les suivantes :

$$ICV_A = \frac{\sum_{i=1}^n (Gr_i \times Am_i)}{(Gr_{max} \times Am_{max}) \times n} \times 100 \quad (3.2)$$

$$ICV_B = \frac{\sum_{j=1}^m (Gr_j \times Am_j)}{(Gr_{max} \times Am_{max}) \times m} \times 100 \quad (3.3)$$

3.2.5 Système de diagnostic embarqué

Conçu pour surveiller les performances des moteurs de véhicules, le diagnostic embarqué (appelé communément OBD pour On-Board Diagnostic) consiste en une unité de contrôle électronique (UCE), qui utilise les entrées de divers capteurs présents dans le véhicule, comme illustré dans la figure 3-7.

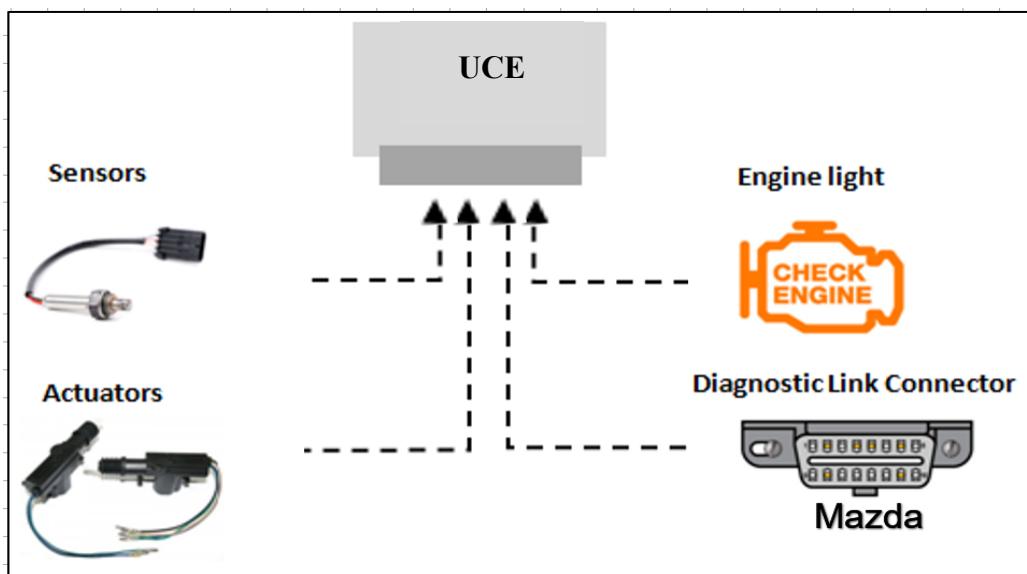


Figure 3-7 Connection de l'unité de contrôle électronique

Ce dispositif est utilisé pour tirer les informations du véhicule, tels que la vitesse, la distance (liée à l'odomètre) et notamment le débit d'air volumique (DAV) qui alimente le moteur. Le rapport air-carburant stoechiométrique démontre que chaque gramme d'essence consommé nécessite 14.7 grammes d'air (Normand, 2010).

Le calcul d'essence consommé permet d'estimer le taux d'émissions polluantes, et aussi de calculer la variation de consommation d'essence du même véhicule selon l'état de la chaussée, ce qui prouve l'effet de la détérioration sur la consommation d'essence.

L'équation développée pour calculer la consommation d'essence par rapport au DAV est la suivante :

$$Nombre\ de\ Litres\ d'essence\ par\ 100\ km = \frac{3.18 \times DAV}{V} \quad (3.4)$$

Où :

DAV, Débit d'air volumique

V, Vitesse de véhicule

3.3 Système de collecte de données

3.3.1 Avant d'entamer la procédure

La vérification des équipements est effectuée avant le début des activités de collecte de données, afin d'assurer qu'ils fonctionnent conformément aux attentes et que les méthodes de collecte et d'analyse sont suivies. Il est également important que toutes les procédures opérationnelles relatives à la collecte des données utilisées par les opérateurs soient documentées et normalisées pour garantir des résultats cohérents.

En plus, il est important d'identifier les responsables. Il est important de retrouver dans le plan de qualité la ou les personnes responsables de chaque activité. Par exemple, le personnel de collecte de données est responsable du contrôle de la qualité des données car il produit les données et dispose des outils et des ressources nécessaires pour influencer la qualité de ces données. Le plan de gestion de la qualité devrait identifier la dotation en personnel, les rôles et

les responsabilités en matière de contrôle de la qualité et d'acceptation, y compris la documentation et le suivi.

Les opérateurs doivent être munis d'une carte indiquant le début et la fin de la section à étudier.

3.3.2 Durant la procédure

La première étape consiste à préciser le référencement d'emplacements au début du relevé pour un tronçon de route particulier, les nœuds de liaison et les sections devront être prédéterminés. Les méthodes de référencement linéaire qualifiant les composants seront traitées de la manière suivante :

1. Identification des points connus : l'identification des repères est discutée dans la section 2.1.1, ces repères sont pris en photos numériques. Leurs emplacements doivent être indiqué sur la carte en indiquant les coordonnées GPS.
2. Direction : pour chaque vidéo relevée, il est important d'indiquer le sens de déplacement sur la carte.
3. Mesure de distance : l'odomètre du véhicule et une application téléphonique ont été utilisés pour effectuer des mesures de distance.
4. Contrôle des chaussées : la chaussée doit être sèche au moment de l'enregistrement. Par conséquent, si un enregistrement est en cours et qu'avant de finir une tempête se déclenche, l'équipe doit interrompre l'enregistrement et reprendre une fois la chaussée sèche pour deux raisons :
 - Les taches sur chaussées humides ne sont pas fidèles à la réalité (figure 3-2).
 - L'accumulation de gouttes de pluie sur l'objectif de la caméra influence la netteté des images.

Voici l'équipements requis afin d'obtenir les relevés :

- Deux caméras vidéo numériques géoréférencés (Garmin Dash cam et Garmin Ultra Virb) : La Garmin Ultra Virb est une caméra à haute résolution (4K), elle est fixée sur le capot du véhicule à l'aide d'un support conçu à l'interne (voir figure 3-8), la lentille est orientée sur la surface de la chaussée, suivant un angle bien déterminé. La Dash Cam, elle, sera placée à l'arrière du véhicule.



Figure 3-8 Support conçu pour fixer la caméra au capot

L'utilisation des deux caméras, sur deux directions opposées de la route permet de résoudre le phénomène de la différence de visibilité d'une fissure présenté dans la figure 5-2.

- Système de diagnostic embarqué (OBD), l'application logicielle de l'OBD a été utilisée dans le véhicule pour suivre les données recueillies sur le téléphone, et permet d'enregistrer les rapports de données à la fin de chaque relevé. Ces rapports servent à calculer la consommation et par la suite les émissions polluantes. La figure 3-9 montre l'interface de l'application OBD.

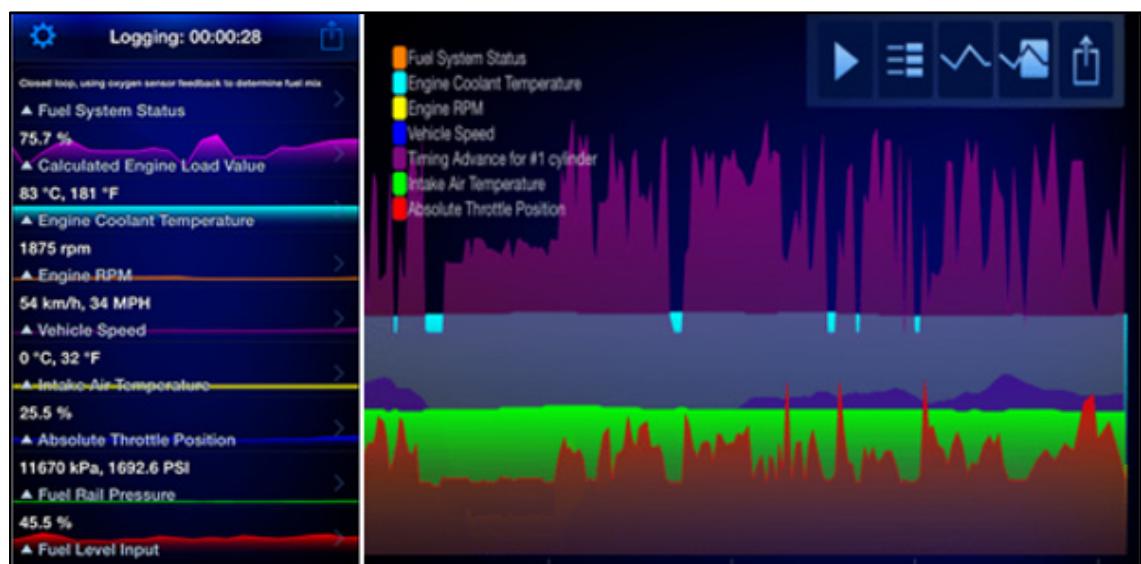


Figure 3-9 Interface de l'application OBD

3.3.3 Post-procédures

La gestion de la qualité des données exige la vérification de la correspondance des vidéos enregistrées aux critères d'acceptation avant leur utilisation dans l'étude de l'état des chaussées. Dès réception des vidéos, les opérateurs vérifient le niveau de clarté, luminosité et niveau d'intégralité du contenu :

1. Clarté des images:

- Facilité de lecture des panneaux d'autoroute; et
- Chaussées dégagées, absence de débris volumineux ou nombreux sur la voie filmée.

2. Luminosité et l'obscurité des images:

Vidéos collectées à des heures lumineuses de la journée où il n'est pas nécessaire d'allumer les phares du véhicules ou des lampadaires ni en temps pluvieux pour éviter des passages flous ou parasités.

3. Relecture des images :

Les images découpées doivent respecter l'ordre croissant dans le temps, c'est-à-dire qu'elles doivent être découpées dans le sens du déplacement du véhicule, vers l'avant.

4. Images manquantes :

Un minimum d'images manquantes doit être respecté pour la réalisation de l'étude.

3.4 Système d'analyse et de visualisation

Une fois soumises, les données sur l'état de la chaussée sont examinées pour assurer leur exactitude. Les données, les vidéos et les images relatives à l'état de la chaussée sont traitées conformément aux procédures standards et analysées en fonction des problèmes de qualité. Il convient de créer un fichier Excel dédié au calcul de l'indice de condition visuel, présenté dans la figure suivante, chaque feuille du fichier correspond à 1 km de la chaussée relevée.

Start m	End m	Dégradation de type A				Dégradation de type B				Segment ICV																
		DEF Gr	DEF Am	OR Gr	OR Am	FF Gr	FF Am	FAI Gr	FAI Am	FLJ Gr	FLJ Am	FLR Gr	FLR Am	FTR Gr	FTR Am	NDP Gr	NDP Am	PEL Gr	PEL Am	PEI Gr	PEI Am	ARR Gr	ARR Am	RE Gr	RE Am	DES Gr
0	50					1	1	1	4			1	2			3	1	1	1	1	2					6.67
50	100			2	1	2	2			1	3			1	2			1	2						6.67	
100	150					2	1	1	2											1	1				2.56	
150	200					2	3	1	2			1	4	1	3	3	1				1	2				10.26
200	250			2	2	1	2	1	4										1	3					6.67	
250	300					1	5	2	2					2	4					1	2				9.74	
300	350	2	1			2	1	1	4			2	2			1	4								8.21	
350	400					1	1								2	1									1.54	
400	450					2	1	2	2			1	1						1	1					4.10	
450	500	2	1			1	3	1	3			1	3			2	1			1	3				8.21	
500	550					2	2			1	2														3.08	
550	600					1	4	3	2	1	1					2	3								8.72	
600	650			2	1	2	1	3	1			2	1			3	2			1	3	2	1		10.26	
650	700	1	1			2	4	2	2																6.67	
700	750					1	3	1	2								2	2							4.62	
750	800	1	4			2	1	2	1	1	2								1	4					7.18	
800	850							1	1								2	4		2	1				5.64	
850	900					1	1	2	2	2	4			1	3		3	1		1	2				10.77	
900	950						2	1	1	4	1	2						2	5						9.23	
950	1000					3	2	1	1					1	1				1	1					4.62	
		ICV Type A 11				ICV Type B 4.6				6.77																

DEF : Déformation
OR : Ornière
FF : Fissuration de fatigue
FAI : Faiençage

FLJ : Fissuration longitudinale de joint
FLR : Fissuration transversale de retrait thermique
FTR : Fissuration longitudinale de retrait d'argile
NDP : Nids de poule

PEL : Pelade
PEI : Peignage
ARR : Arrachement
RE : Ressuage
DES : Désernage

Figure 3-10 Feuille de calcul conçue pour calculer l'indice de condition visuel

Pour chaque 1 km, l'indice ICV est calculé ainsi que les indices partiels ICV-A et ICV-B (définis dans la partie précédente). L'indice ICV permet de :

- Diviser la route en sections homogène d'indice ICV proches.
- Dans le cas, de l'adoption de l'ICV et de son emploi de manière cyclique permet d'obtenir un historique de dégradation de la chaussée et d'étudier la dégradation au fil du temps.
- Pour tout dommage, les coordonnées géographiques exactes sont relevées de la vidéo, puis transcrives sur le fichier Excel.

3.4.1 Outil graphique

L'outil graphique proposé dans cette recherche est Google Earth (GE). Il offre la possibilité de visualiser toutes les données nécessaires à l'analyse de l'état de la chaussée sur une même plateforme. Il ne remplace pas les logiciels SIG, mais permet plutôt de visualiser toutes les données de ces logiciels.

3.4.1.1 Résolution de Google Earth

La résolution de l'image fournie par le programme Google Earth dépend avant tout de l'endroit géographique. En effet, la résolution n'est pas homogène sur toute la planète. En général, les grandes agglomérations sont beaucoup plus détaillées que les milieux ruraux. La résolution maximale est de 2,58 cm/pixel (1 pouce/pixel), et peut arriver à 15 mètres/ pixel, généralement dans les pays en voie de développement (McClintock, 2014).

Une résolution de 15 m/pixel n'est pas suffisante pour visualiser les données et faire les analyses. Il existe plusieurs sources privée ou publique d'images satellites de meilleure qualité. Ces images peuvent être intégrées sur la plateforme Google Earth, comme le montre la figure 3-11, afin que l'analyse soit plus efficace.



Figure 3-11 Intégration des photos satellites sur la plateforme GE

3.4.1.2 Format de Google Earth

Keyhole Markup Language (KML), format de fichier utilisé pour afficher des données géographiques dans GE. Les fichiers KML peuvent être distribués facilement, téléchargés sur un site Web et ouverts par tout utilisateur de Google Earth. KMZ est la version compressée du

fichier KML, le contenu d'un fichier KMZ est un document KML unique à la racine et, éventuellement, des superpositions, des images, des icônes et de modèles 3D référencés dans le KML.

Le format KML peut supporter (voir figure 3-12) :

1. Des points, polyligne et entités polygonales
2. Des symboles et icônes
3. Types de ligne
4. Étiquettes
5. Données d'attribut
6. Liens vers des images ou vidéos

3.4.1.3 Exporter au KML

GE n'est pas un logiciel SIG, mais il permet d'importer les données des logiciels SIG. De nombreux sites Web offrent des solutions de conversion pour manipuler des ensembles de données de nombreux formats. Parmi ces sites Web :

- Arc Scripts <http://arcscripts.esri.com>
- Safe Software <http://www.safe.com>
- Arc2Earth http://www.spatialdatalogic.com/CS/blogs/brian_flood/default.aspx
- GeoMedia <ftp://ftp.ingr.com/outgoing/KML.zip>
- ArcGIS 9.x <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=14273>

3.4.1.4 Visualisation

Google Earth impressionne toujours par ses performances et sa simplicité d'utilisation en termes de navigation sur une planète virtuelle 3D. Une fois installé le logiciel télécharge automatiquement les données (modèle de terrain et image nappée) au gré de la navigation sur la surface globale. Les images satellites forment la base, plusieurs informations peuvent être importées et utilisées comme le montre la figure 3-12.

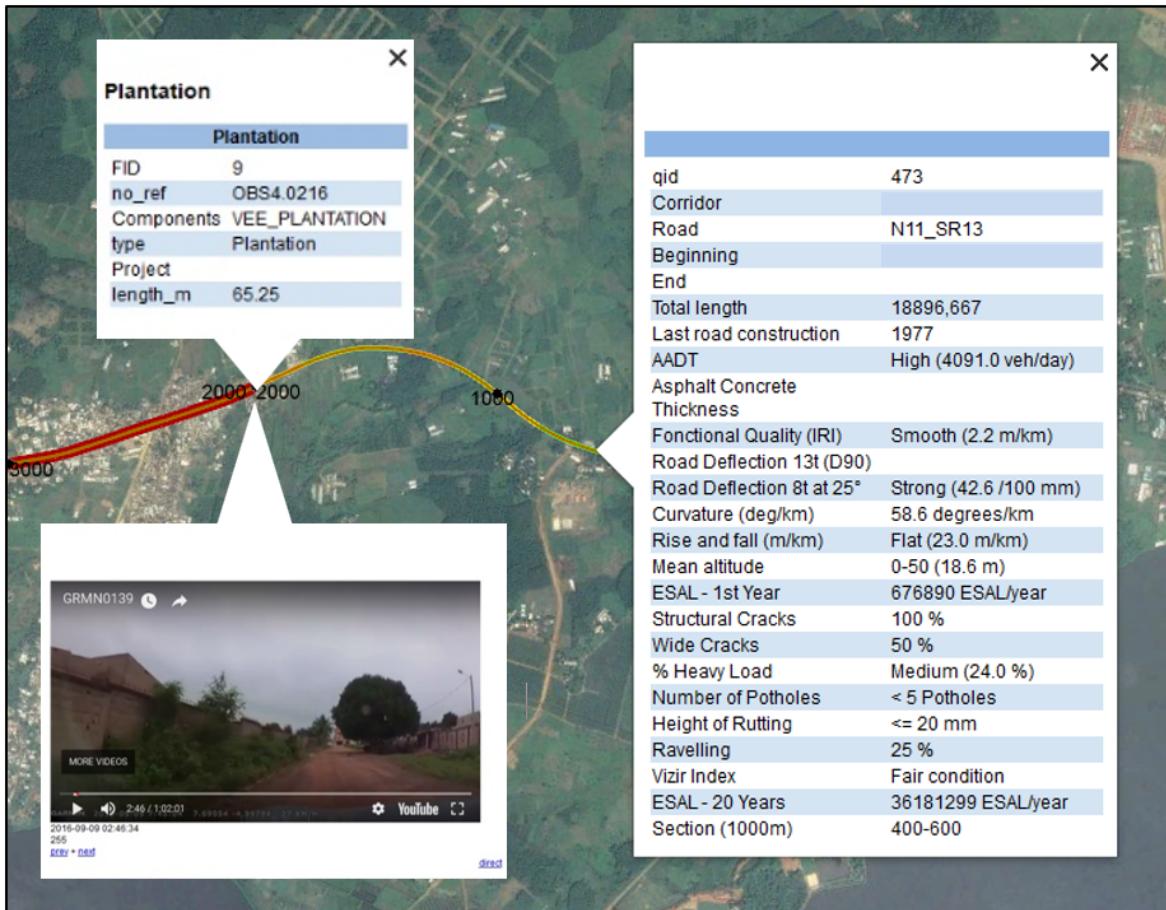


Figure 3-12 Visualisation des données importées sur GE

Suivant la figure 3-12, toutes les données peuvent être présentées sur une seule plateforme :

- Données inventaires : nom de la route, géométrique, trafic, nature de la chaussée, date de constructions;
- Indice de VIZIR, IRI et nombre de nids de poule;
- Type de pavage, texture, rugosité, surélévation, courbure, déclivité;
- Données environnementales;
- Images de déteriorations avec leurs coordonnées GPS exactes, ainsi que leur type, gravité et ampleur; et
- Vidéos prises depuis la route, pour référencer l'environnement proche de la chaussée, et présenter la condition de la surface de la chaussée.

Tous les points, polylignes ou polygonal, quelle que soit la projection définie, peuvent être exportées sous forme de fonctions bidimensionnelles ou tridimensionnelles.

Quelques autres fonctionnalités :

- Possibilité d'incorporer la symbolise de couche ArcMap dans le fichier KML exporté;
- Étiquetage des entités ponctuelles, linéaires et surfaciques; et
- Description des entités individuelles à l'aide des attributs de la base de données.

Grâce à Google Earth, il est possible d'intégrer les données transcrives sur le fichier Excel en deux clics. Ainsi, toutes les données, à savoir; le type, la gravité et l'ampleur des dommages et leurs coordonnées géographiques. GE permet de créer des liens Web sur le cloud, par exemple les vidéos peuvent être sur YouTube, et visualisée en lien sur Google Earth. Toutes ces données peuvent être échangées facilement par courriel en format KMZ.

3.4.2 Avantages de Google Earth dans la gestion des chaussées

Google Earth à l'avantage de permettre aux gestionnaires dans le système de gestion de chaussées de :

- Visualiser les données SIG de manière polyvalente et gratuite;
- Accéder aux résultats des analyses par les spécialistes non SIG à l'exemple des politiciens, fonctionnaires et conseillers;
- Générer facilement des fichiers compatibles avec Google Earth;
- Partager et utiliser facilement; et
- Visualiser plusieurs types de données ensemble.

3.4.3 Critiques et limites de Google Earth

Google Earth n'est pas conçu pour la gestion des chaussées et n'est pas un logiciel SIG. Ses outils ne sont pas spécifiques au domaine, et la consultation des données sur cloud nécessite une absolument une connexion à internet. Un autre inconvénient majeur est le problème de conversion entre Google Earth et quelques logiciels SIG (données spatiales externes et KML), qui peut provoquer un risque de perte de données. Lorsqu'il est nécessaire d'obtenir une analyse plus poussé, Google Earth s'évère inefficace.

CHAPITRE 4

GESTION DE LA QUALITÉ DE LA COLLECTE DES DONNÉES SUR L'ÉTAT DES CHAUSSÉES

Ce chapitre regroupe plusieurs concepts concernant la qualité, pour bien connaître les enjeux relatifs à l'implantation de la gestion de la qualité pour la collecte des données. Tout d'abord l'historique du phénomène, des concepts du domaine de la qualité, le coût, et finalement l'exploitation de la qualité pour la collecte des données de condition des chaussées.

Le premier chapitre présente une définition générale des composants, types et indices de performance des chaussées, puis une explication des causes de détériorations et l'importance d'une maintenance préventive régulière dans l'entretien des chaussées. Le deuxième chapitre présente les sept étapes du processus de gestion des chaussées, et présente une revue de littérature sur les méthodes utilisées pour la collecte et présentation des données de la condition des chaussées. La méthodologie de recherche est présentée dans le troisième chapitre.

Le besoin général est de développer un outil qui permet le suivi de la condition de la route qui soit un support dans les prises de décisions d'entretien. Cet outil, *qui fait partie des systèmes de gestion des chaussées*, permet de collecter, rassembler et visualiser l'état des chaussées d'une manière continue.

La performance de la chaussée dépend de divers facteurs, tels que le type et l'épaisseur de la chaussée, le climat, la charge de circulation, les conditions de drainage, le type de fondation et la qualité de la construction. La variabilité de la performance de la chaussée attribuable à ces types de facteurs peut varier d'un segment de chaussée à l'autre, d'une année à l'autre, et se reflète dans l'état de la chaussée. Les performances de la chaussée sont généralement suivies à travers les récoltes d'état de la chaussée (par exemple, fissuration, faille et orniérage), la

sévérité (faible, moyenne et élevée) et l'étendue (longueur, surface, dénombrement) de détérioration de la chaussée.

Les données sur l'état de la chaussée sont un élément essentiel de la gestion de la chaussée, du fait que ces données sont utilisées pour diverses fonctions comme l'élaboration de modèles de prédiction de performance, l'établissement de la performance de différents types de revêtements et l'évaluation de l'état actuel. Il est important de s'assurer que les résultats de l'enquête sur l'état de la chaussée sont aussi fiables, exacts et complets permettant l'amélioration, et l'efficacité des résultats de la gestion de la chaussée (Mihelcic, Zimmerman, & Auer, 2014).

L'établissement d'un plan de gestion de la qualité pour la collecte des données sur l'état des chaussées aidera à obtenir des données d'état fiables, exactes et complètes et abordera les étapes à suivre pour résoudre les problèmes de qualité des données. Sans un plan documenté, les agences sont moins susceptibles d'appliquer systématiquement les activités de gestion de la qualité d'une année à l'autre et d'évaluer l'efficacité des techniques utilisées.

4.1 La qualité

4.1.1 Définition

La qualité est depuis longtemps un souci permanent pour l'homme. Il n'est pas évident de s'en tenir à une seule définition de la qualité qui est à mauvaise en constante évolution. Cependant, la littérature parle longuement du sujet, voici quelques définitions qui s'applique au présent contexte :

1- “*La qualité d'un produit ou d'un service est son aptitude à satisfaire les besoins des utilisateurs*” (Ruban, 2002).

2- “*Degré auquel un ensemble de caractéristiques satisfasse des exigences*” (ISO 9000).

3- “*Conformité aux exigences*” (Cosby, 1995).

4-“*La qualité totale est un ensemble de principes et de méthodes, organisés en stratégie globale visant à mobiliser toute l'entreprise pour obtenir une meilleure satisfaction du client au moindre coût*” (Hogue, 1992).

5-“*Aptitude à l'emploi*”(Juran, 1988).

6-“*La qualité a 2 dimensions, la qualité obligatoire et l'attrayante*” (Lillrank & Kanō, 1989).

7-“*La qualité est l'addition des besoins clients exprimés et implicites*” (Deming, Quality, & Competition Position, 1982).

La qualité est un concept multidimensionnel (Fortin, 1996), l'évolution instantanée des choix ou la consommation d'un service peut causer la satisfaction du client, alors que la qualité est issue d'un processus d'évaluation d'une suite d'expérience réparties sur une période de temps suffisamment longue.

4.1.2 Évolution de la qualité

Jusqu'au 19^{ème} siècle, la qualité se limitait à la connaissance du métier, la conscience professionnelle et l'amour du travail bien fait.

4.1.2.1 La première partie du 20^{ème} siècle

L'apparition de l'inspection, Les moyens de communication se développent, la demande est en croissance, la main d'œuvre est disponible mais mal formée sur les techniques. La performance des machines est faible et la production est coûteuse, de la nécessité de développer une production efficace et rentable au plus vite.

La révolution industrielle, a joué un rôle déterminant dans la naissance du taylorisme. Le taylorisme est une méthode de travail développé par Frederick Winslow Taylor (1856-1915), un ingénieur américain qui a trouvé un domaine d'application à ses idées dans le cadre de la révolution du 20^{ème} siècle. Cette méthode préconise l'organisation scientifique du travail, grâce à une analyse détaillée des modes et techniques de production (gestes, rythmes, cadences) dans

le but de trouver la meilleure façon de produire, de rémunérer (salaire horaire), et donc le meilleur rendement possible. Grâce au Taylorisme, la productivité est multipliée par trois et les salaires augmentent. Les outils de cette méthode sont cités ci-dessous :

- Organisation du travail :
 - Contrôle du temps passé sur une opération;
 - Maîtrise des méthodes de travail; et
 - Répartition des tâches.
- La gestion du personnel :
 - Choisir les bonnes personnes;
 - Contrôle sur le personnel; et
 - Rémunération Appropriée.
- L'organisation de l'entreprise:
 - Démembrer les attributions du contremaître classique; et
 - Centraliser le travail de conception.

Selon Taylor, l'application de ces principes nécessite du temps (3 à 5 ans) et l'implication d'intervenants externes.

4.1.2.2 La 2^{ème} moitié du 20^{ème} siècle

Le marché s'ouvre aux services et produits, l'évolution des moyens d'échange et à la communication. L'homme est forcé d'intégrer une démarche de qualité pour résoudre les problèmes de plus en plus complexes.

L'apparition du contrôle de la qualité, le développement de ce concept s'est déroulé en trois époques:

- 1- Entre les années 40 et 60 : La demande est supérieure à l'offre, d'où l'engouement à produire plus. Les produits commencent à être contrôlés, les bons produits sont acceptés et les mauvais sont rejetés.

- 2- Entre les années 60 et 70 : La production a augmenté et s'ajuste à la demande. Il faut alors vendre. L'assurance de qualité, il est question d'étudier et définir les méthodes de contrôles à appliquer, pour la production et la vente des produits.
- 3- Après l'année 80 : C'est la qualité totale, l'offre et la demande ce déséquilibre, la demande recule, il faut donc étudier et analyser le marché.

Durant le 20^{ème} siècle, la qualité du contrôle de la qualité a évolué (1900) à la qualité totale (2000). Plusieurs scientifiques comme CROSBY, JURAN, ISHIKAWA, DEMING, ont développé des méthodes pour améliorer le fonctionnement de l'entreprise; bien former le personnel et satisfaire le client.

La gestion totale de la qualité est une approche de gestion qui exige que tous les employés travaillent en accord afin d'améliorer la qualité des services et des produits, et du même coup la satisfaction de la clientèle. La qualité devient synonyme de performance. L'évolution de la qualité est présentée dans la figure 4-1.

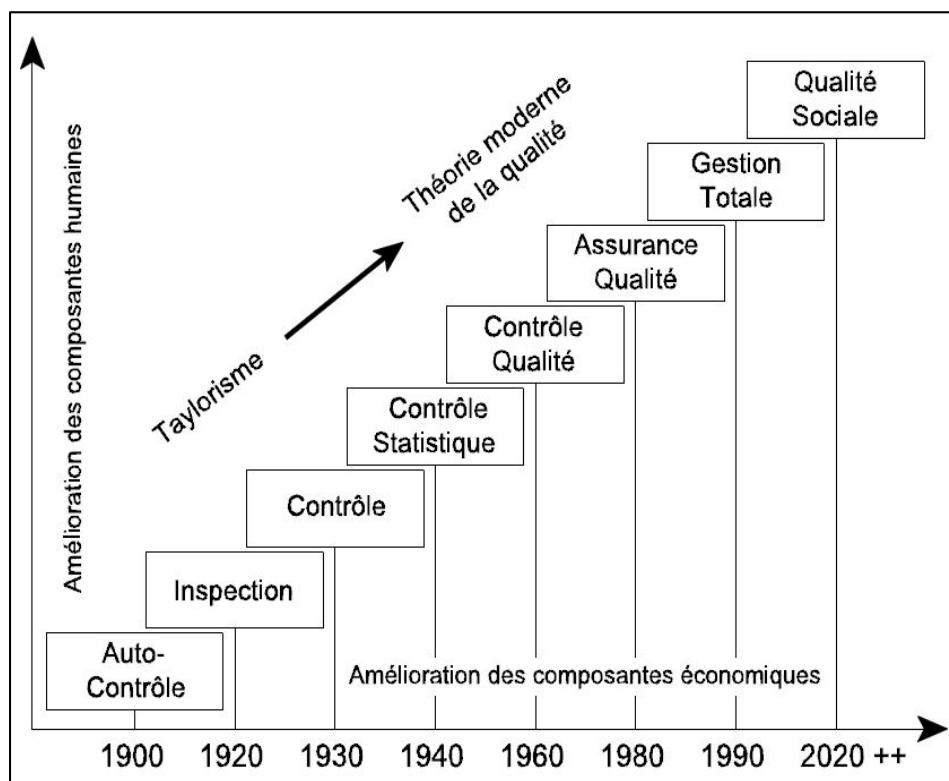


Figure 4-1 L'évolution de la qualité
Adaptée par (Thouin, 2015)

4.1.3 L'organisation internationale de normalisation (ISO)

En 1987, l'organisation internationale de normalisation (ISO) a élaboré une série de normes (9000), ces normes ont l'avantage de fournir :

- Des normes internationales homogènes et cohérentes;
- Vérifications objectives de l'assurance de la qualité par une tierce partie; et
- La possibilité d'une amélioration continue.

Tableau 4-1 L'évolution de la norme ISO
Adapté par (Huet-Kouo, 2015)

1960	Naissance du concept d'assurance qualité
1979	Création de l'ISO/TC 176
1987	Publication de la 1 ^{ère} version des normes ISO 9000
1990	Décision de révision en 2 phases
1994	Révision phase 1 : ISO 9000 jusqu'au 9004
1996	Adoption des cahiers des charges phase 2
2000	Publication des ISO 9000, 9001 et 9004
2002	Publication de l'ISO 19011 (norme d'audit)
2003	Décision de lancement de la revue des ISO 9001 et 9004
2004	Adoption des cahiers des charges
2008	Publication ISO 9001, version 2008

Des organisations telles que l'organisation internationale de normalisation, l'institut national des normes et de la technologie (NIST) et d'autres ont avancé le concept d'application des principes de gestion de la qualité au point que la gestion de la qualité est devenue maintenant un domaine d'études.

4.1.4 Tendance future de la qualité

Consiste à garantir les “bonnes pratiques sociales” au sein l’entreprise, au niveau de la gestion des ressources humaines qu’à l’externe dans les rapports avec les fournisseurs et sous-traitants qui doivent eux aussi appliquer des règles morales (Munari & Oriani, 2001).

4.1.5 Tendance contractuelles futures

Les contrats exigent de l’entrepreneur qu’il réalise le projet, objet du contrat, en respectant les exigences de qualité tout en réduisant la surveillance externe. Ces contrats sont structurés pour gérer les risques et non pour administrer un projet (Thouin, 2015).

4.2 La non qualité

L’opposé de la qualité est la non qualité. Les études montrent qu’il est plus coûteux de corriger les défauts et les erreurs que de “bien faire” dès le départ. A titre d’illustration, le coût pour réaliser un produit défectueux est le double du prix de production du produit initial s’il avait été correctement réalisé (Rosenfeld, 2009). Cette différence de prix est plus petite si la détection du défaut arrive au cours de la production que s’il était détecté par le client (non-conformité, insatisfaction, suivi du client).

4.2.1 Coût de la non qualité

E. Balladur (1986) a estimé un coût minimal de 2500 euros/an par salarié. G. Longuet (2007) a évalué le coût de non qualité, en France, à 15 % du chiffre d’affaire des entreprises. Et le SEI (Software Engineering Institute) a estimé les coûts de non qualité aux environs de 50% des opérations du chiffre d’affaire (Couturier, 2014).

4.2.2 Les composants de coût de non qualité

1. Coût de non qualité interne: Rebut, défauts, erreurs, retouches, perte de temps supplémentaire sur le produit avant expédition.

2. Coût de non qualité externe: Garantie, réclamations, remises, litiges, pénalités, procès, perte de clientèle, logistiques et stockages, image de marque de l'entreprise.
3. Coût de prévention: Dépenses engagées pour faire le contrôle de réception et de processus.
4. Coût de détection: Dépenses engagées pour faire le contrôle d'entrée et vérifier la conformité des produits aux exigences de qualité.

Le rapport entre les coûts de chaque catégorie et le coût total varie. De nombreuses entreprises affichent des ratios qui ressemblent à se présenter dans le tableau suivant :

Tableau 4-2 Le rapport entre les coûts de chaque catégorie et les coûts totaux varie considérablement (Institute, 2016).

Catégorie de coût de qualité	Pourcentage du totale
Interne	25 à 40 %
Externe	25 à 40 %
Prévention	0.05 à 5 %
Détection	10 à 50 %

La figure suivante représente les composants de coût de non qualité.

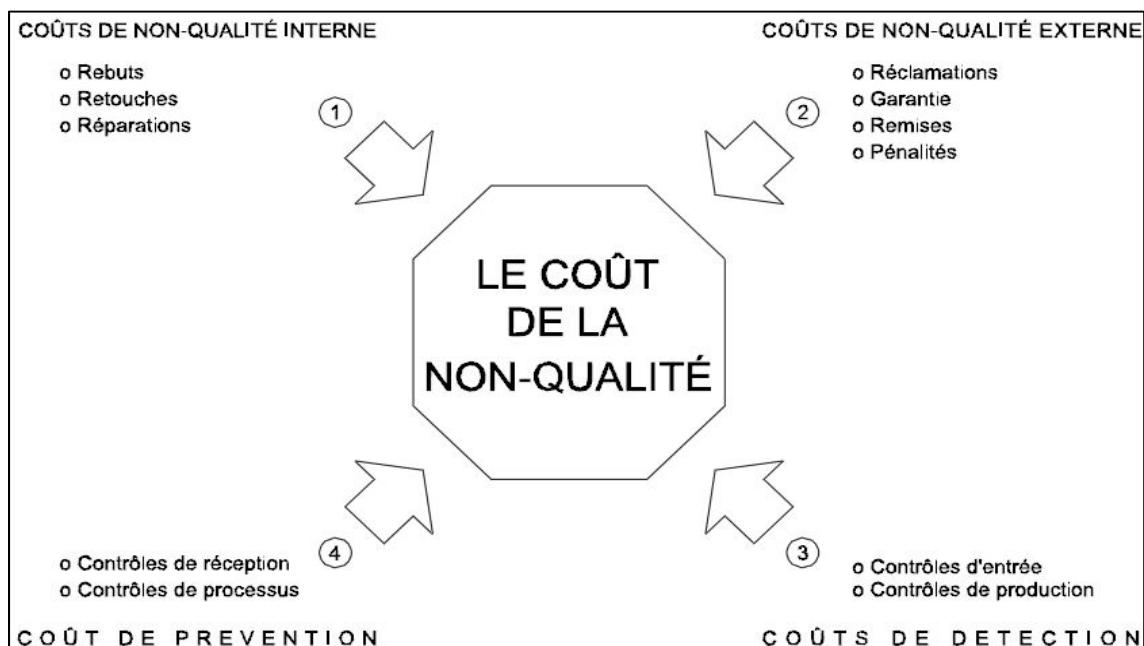


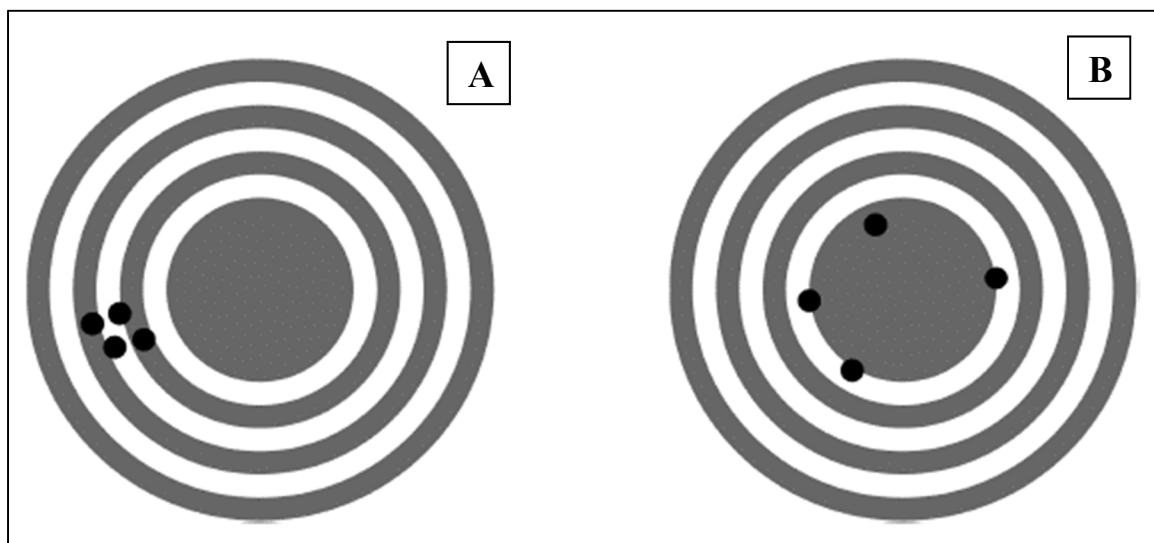
Figure 4-2 Les composants de coût de non qualité
Adaptée par Bouchard et Plante (2002)

4.3 Gestion de la qualité de la collecte des données

L'entretien et la réhabilitation des routes dépendent de l'état physique de la route actuelle, d'où l'importance d'un suivi régulier (surveillance de l'état des chaussées). La surveillance joue un rôle essentiel dans la gestion des chaussées car elles fournissent des informations précieuses qui constituent le support de décisions d'entretien et de réhabilitation. Les différentes méthodes de collecte de données sont déjà présentées dans le chapitre 2.

La gestion traditionnelle de la qualité des données repose sur l'approche selon laquelle il existe une seule valeur « vraie » ou de référence (la vérité fondamentale) et que les données mesurées sont aussi proches que possible de cette valeur réelle (Pierce & Zimmerman, 2015).

La qualité des données est alors décrite comme étant l'écart par rapport à la valeur réelle due à des erreurs aléatoires et systématiques. Les erreurs aléatoires ont tendance à réduire la précision, tandis que les erreurs systématiques ont tendance à réduire l'exactitude. La figure 4-3, tirée de *Pierce et McGovern (2014)*, présente la différence entre haute précision, faible exactitude et haute exactitude et faible précision.



A. Haute précision, faible exactitude

B. Haute exactitude, faible précision

Figure 4-3 Exemples de précision et exactitude
(Pierce & McGovern, 2014)

4.3.1 Avantages de l'implantation d'un plan de gestion de la qualité

Les systèmes de gestion des chaussées sont plus fiables, plus précis et plus complets lorsque des données de meilleure qualité sont utilisées. Des données de qualité inférieure peuvent mener de mauvaises décisions, entraînant un gaspillage d'argent ou une réduction de la valeur d'un système de gestion des chaussées. Cependant il existe également un équilibre entre les données de qualité, le temps et le coûts requis pour les collecter.

Selon Shekharan et al. (2007), les bénéfices de l'implantation d'un plan de gestion de la qualité pour la collecte des données sont :

- Amélioration de la précision, exactitude et de la cohérence des données;
- Meilleure crédibilité au sein de l'organisation;
- Meilleure conformité avec les exigences de données externes;
- Meilleure intégration avec d'autres données internes de l'agence;
- Économies par rapport aux recommandations de traitement plus appropriées; et
- Amélioration de l'aide à la décision pour les décisionnaires.

4.3.2 Utilisations des données collectées

La qualité des données sur l'état des chaussées a des impacts directs et indirects sur les processus de gestion de chaussée. Pierce et McGovern (2014) ont identifiés les principales utilisations des données comme le suit :

- Caractérisation de l'état actuel;
- Projeter les conditions futures;
- Développer les recommandations de traitement;
- Développer les modèles de détérioration prévue de la chaussée;
- Préparer les programmes de travail annuels et pluriannuels; et
- Analyser les impacts de divers scénarios de traitement et de budget.

4.4 Protocoles d'évaluation de la collecte de données

La réussite d'un plan de gestion de la qualité repose sur la définition des méthodes, des normes et des protocoles à utiliser pour collecter les données sur l'état des chaussées (Pierce & Zimmerman, 2015). Alors que les agences ont généralement des procédures bien définies, il existe une variabilité entre les éléments de données inclus et les protocoles utilisés. Les protocoles / guides d'évaluation de l'état des chaussées doivent définir clairement les types de détériorations, les niveaux de gravité, les méthodes d'évaluation (nombre, longueur ou superficie), l'intervalle de rapport et la méthode de calcul des valeurs de condition. L'incapacité à comprendre et à communiquer l'un ou l'autre de ces éléments peut avoir un impact négatif sur l'utilité des données reçues par l'agence.

4.4.1 Critères d'acceptation

Le plan de gestion de la qualité établit et documente les exigences de qualité des données pour tous les livrables. Il est important de spécifier les normes de qualité pour chaque élément de données collecté. Les mesures spécifiques qui seront utilisées pour déterminer le niveau de qualité acceptable des données doivent également être identifiées.

Les exigences de qualité des données dans un plan de gestion de la qualité définissent généralement le niveau de résolution, la précision et la répétabilité de chaque élément de données.

4.4.2 Identification des responsabilités

Le plan de gestion de la qualité décrit les différentes activités et indique qui est responsable de cette activité lors de la collecte des données. Il devrait identifier les rôles en matière de contrôle de la qualité et d'acceptation, y compris les rapports, la documentation et le suivi/résolution des problèmes.

4.4.3 Contrôle de la qualité

Le contrôle de la qualité comprend les activités réalisées pour évaluer et ajuster les processus de production afin d'obtenir le niveau souhaité de données de qualité (Haas & Canada, 1997). Les techniques courantes utilisées pour le contrôle de qualité des données collectées sur l'état des chaussées comprennent : (1) l'étalonnage des équipements, (2) la formation du personnel, (3) les tests de contrôle et de vérification sur site, (4) le contrôles des résultats et (5) le contrôle de traitement des données :

- (1) L'étalonnage de l'équipement : L'étalonnage des équipements est une caractéristique importante du plan de gestion de la qualité. Les équipements utilisés sont calibrés et les méthodes de test et d'analyse sont acceptées avant la collecte des données. Ils doivent être contrôlés périodiquement par la suite pour vérifier que l'équipement fonctionne conformément aux attentes et que les méthodes de collecte et d'analyse sont suivies.
- (2) Formation du personnel : C'est un élément important du contrôle de la qualité dans le plan de gestion de la qualité. Les équipes de terrain doivent apprendre à calibrer, utiliser et dépanner des équipements complexes; les évaluateurs doivent apprendre les protocoles appropriés et passer des tests de compétence.
- (3) Tests de contrôle et de vérification sur site : Le contrôle et la vérification sont des activités de gestion de la qualité critiques effectuées avant et pendant la collecte des données. Les sites de contrôle sont des segments de route dont l'état de la chaussée a généralement été mesuré.
- (4) Contrôles des résultats : Le programme de contrôle de la qualité pour la collecte des données sur l'état des chaussées comprend généralement des vérifications des résultats aléatoires, une reproductibilité inter-évaluateur et des vérifications des données pour vérifier l'exactitude et la répétabilité des résultats. Si les évaluations de l'état de la chaussée ne satisfont pas aux normes de qualité, des mesures correctives sont prises, telles que le recyclage des évaluateurs ou les tests.
- (5) Contrôle de traitement des données : Les équipes de collecte de données sur l'état des chaussées effectuent généralement une série de vérifications de données sur le terrain;

Une fois soumises, les données sur l'état de la chaussée sont examinées au bureau pour assurer leur exactitude. Au bureau, les données, vidéos et les images relatives à l'état de la chaussée sont traitées conformément aux procédures standards et analysées en fonction des problèmes de qualité.

4.4.4 Acceptation

Les agences utilisent diverses techniques pour inspecter les données d'état de la chaussée et évaluer leur qualité avant l'acceptation. Les essais sur site de contrôle sont souvent utilisés avant et pendant l'enquête sur l'état de la chaussée afin d'évaluer et de contrôler la pertinence du processus de contrôle de la qualité. Les vérifications globales, les échantillonnages et les comparaisons de séries chronologiques sont généralement utilisés pour vérifier la qualité des données fournies. Les vérifications globales typiques incluent l'inspection des données qui sont en dehors des plages attendues, des segments manquants ou des éléments de données, et une analyse statistique pour vérifier les incohérences des données.

D'autres tests d'acceptation peuvent inclure une deuxième analyse ou surveillance d'un échantillon de section afin de s'assurer de la qualité du résultat. Le plan de gestion de la qualité doit définir le délai ou la fréquence récurrente pour effectuer les contrôles d'acceptation des données.

4.4.5 Action corrective

Le plan de gestion de la qualité doit spécifier les mesures correctives à prendre si des données ne répondent pas aux exigences de qualité. Cela peut inclure l'étalonnage de l'équipement, une formation supplémentaire à l'intention de l'évaluateur ou la réévaluation des sections de la chaussée.

Il est important de définir clairement les actions correctives avant la collecte plutôt que d'attendre la découverte d'un problème.

4.4.6 Élaboration de rapports

La documentation du contrôle de la qualité et les procédures d'acceptation doivent être effectuées pendant chaque phase de la collecte des données. La préparation de rapports est un élément important du plan de gestion de la qualité, car il permet de suivre les problèmes et d'améliorer en permanence le processus de qualité. Les rapports permettent également de suivre les problèmes et de prendre des mesures pour éviter que les mêmes problèmes ne se reproduisent.

CHAPITRE 5

VALIDATION DE L'OUTIL POUR UN SUPPORT DE DÉCISIONS D'ENTRETIEN

La revue de littérature a prouvé que les outils de gestion d'entretien existants ne sont pas capables d'offrir une continuité au niveau de détection de dégradation des chaussées, ce qui entraîne des pertes économiques, de temps et de qualité. De ce fait pour répondre à la problématique de ce mémoire : « Comment collecter et visualiser les données des chaussées d'une manière continue et non coûteuse ? », un outil d'aide à la prise de décisions est développé à l'interne. Le chapitre 4 a également démontré les bénéfices de l'implantation d'un plan de gestion de qualité pour la collecte de données. Les systèmes de gestion des chaussées sont plus fiables, plus précis et plus complets lorsque des données de meilleure qualité sont utilisées. Des données de qualité inférieure peuvent mener de mauvaises décisions, entraînant un gaspillage d'argent ou une réduction de la valeur d'un système de gestion des chaussées.

Le développement de l'outil d'aide à la prise de décisions est réalisé pour répondre aux objectifs présentés dans la première partie de ce mémoire :

- 1- Un système de collecte de données simple, non coûteux et établi selon un plan de gestion de la qualité normalisé qui permet le découpage de chaussée en sections homogènes pour créer un historique de référence, servant dans la planification périodique d'intervention sur les chaussées, dont l'apport se révélerait bénéfique pratiquement et les coûts moindres à moyen et long terme; et
- 2- Une plateforme accessible, gratuite et compréhensible afin de visualiser les données de façons synoptiques pour permettre la prise de décisions par les ingénieurs dans les situations qui touchent le génie routier.

5.1 Études de cas n°1

Il s'agit d'un projet de transport à Sri Lanka, qui a pour objectif de contribuer à améliorer la circulation des marchandises et des personnes dans et autour de la région métropolitaine de Colombo. Ce projet comporte cinq tronçons de route tels que présentés dans le tableau suivant. Seuls les résultats du premier tronçon (Avissawella – Ratnapura) seront discutés dans ce mémoire.

Tableau 5-1 Tronçons de route du projet de transport à Sri Lanka.

Tronçon de route	Description	Longueur
Avissawella - Ratnapura	Située au Sud-Ouest / deux voies	40,1 km
Bergala-Wellawaya	Située au Sud-Est / une voie	37,3 km
Dambulla - Naula	Située au Nord / deux voies	19,7 km
Kalagahawela – Dambulla	Située au Nord / deux voies	18 km
Ratnapura - Pelmadulla	Située au Sud-Ouest / deux voies	22,1 km

L'utilisation de l'outil proposé dans ce projet nous a permis de déceler les dégradations. Ces dégradations ont été reportées sur une carte Google Earth, l'image suivante résume l'ensemble des dégradations décelé pour le tronçon de la route Avissawella-Ratnapura.

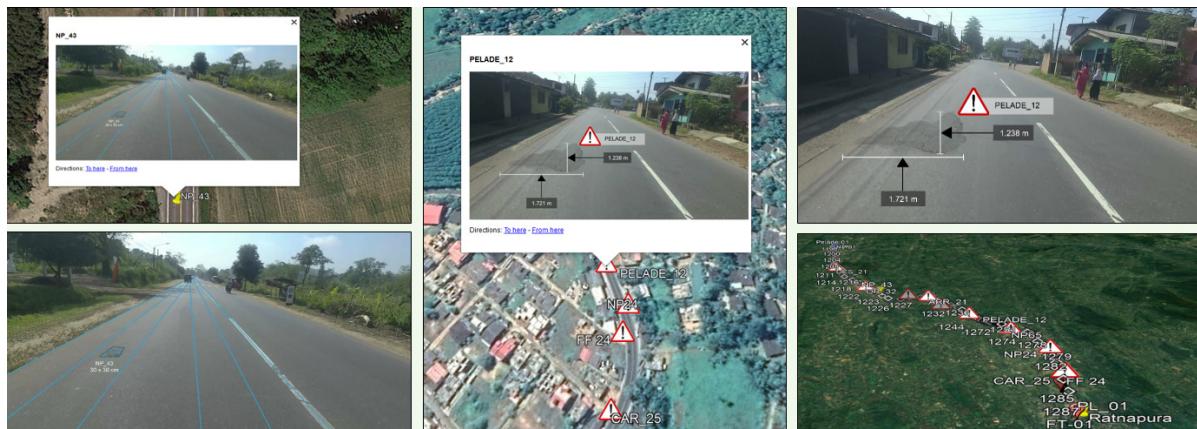


Figure 5-1 Dégradations décelées pour le tronçon de la route Avissawella-Ratnapura

5.1.1 Évaluation de l'état de chaussée

L'évaluation de l'état de chaussée sur le tronçon étudié est faite suivant la méthode développée, et présentée dans la figure 5-2.

L'application de cette méthode nous a permis de diviser le tronçon de route étudié en deux sections homogènes. La première section de 6 km est en mauvais état et montre des défauts grave et localisée, tandis que la deuxième section est de 34 km est généralement en bon état.

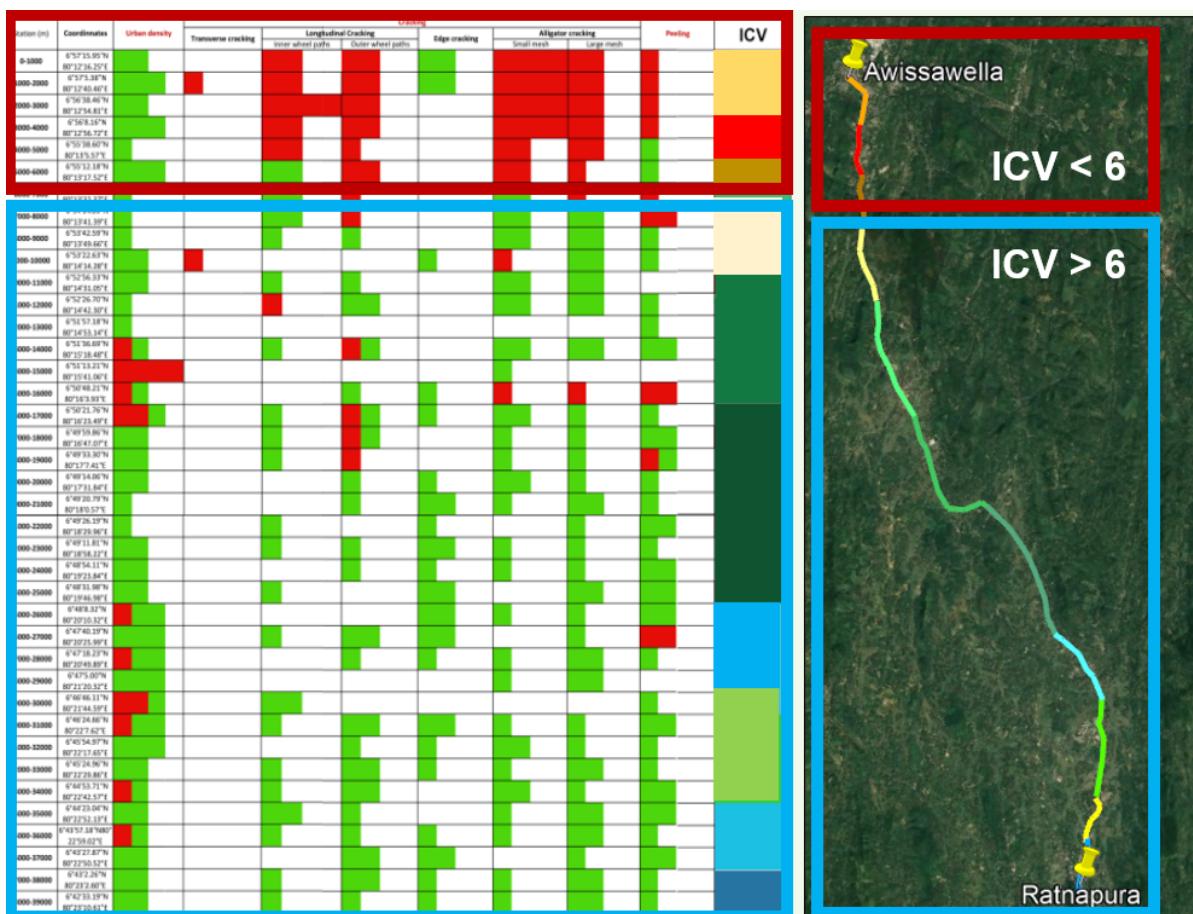


Figure 5-2 Découpage du tronçon de route en sections homogènes.

Les photos et vidéos nous permettent à remarquer que la dégradation qui prévaut sur le premier tronçon de route Avissawella-Ratnapura est la fissuration à petites mailles ou alligator c'est une série de fissures polygonales interconnectées (voir figure 5-3). Les fissures ne sont pas toujours localisées dans les passages de routes.



Figure 5-3 Photo prise par la caméra virb fixé sur le capot du véhicule

Les tests de laboratoires ont confirmé la présence d'oxydation. Les désenrobages au niveau des fissures sont très probablement causés par les véhicules, car il existe deux causes principales de fissuration à petites mailles; l'oxydation ou la fatigue. Une analyse de la capacité structurelle est donc nécessaire. Les résultats ont montré que la couche de base sera bientôt défaillante en raison de la fatigue structurelle et des ornières doivent être observées.

5.1.2 Évaluation environnementales

La Garmin Dash Caméra fixé au pare-brise de l'auto, avec un lentille de 106 ° de largeur, est orientée vers l'environnement, nous permettent d'étudier la topographie, et le drainage du chaussée inspecté. Dans ce tronçon, la route est mieux décrite comme une route interurbaine avec de petites étendues de terres agricoles et beaucoup de développement en bordure de route, s'étendant sur plusieurs rangées d'habitations des deux côtés de la route. De Plus, il existe un grand nombre de murs de soutènement exposée aux glissements de terrain dans cette zone.

5.2 Études de cas n°2

Il s'agit d'une route en Asie de Sud, fait partie d'une autoroute qui traverse la région sur plus de 1 000 km. Le segment de la route étudié est de 29,07 km, à deux voies. Il a été construit en 1982. Le trafic journalier moyen annuel est d'environ 4 000 véhicules par jour, dont 44% sont des véhicules lourds ou des camions.

L'IRI a été mesurée par un dispositif ARRAB Roughometer Class III conformément aux normes ASTM E1926-98. Les résultats sont présentés dans la figure 5-4.

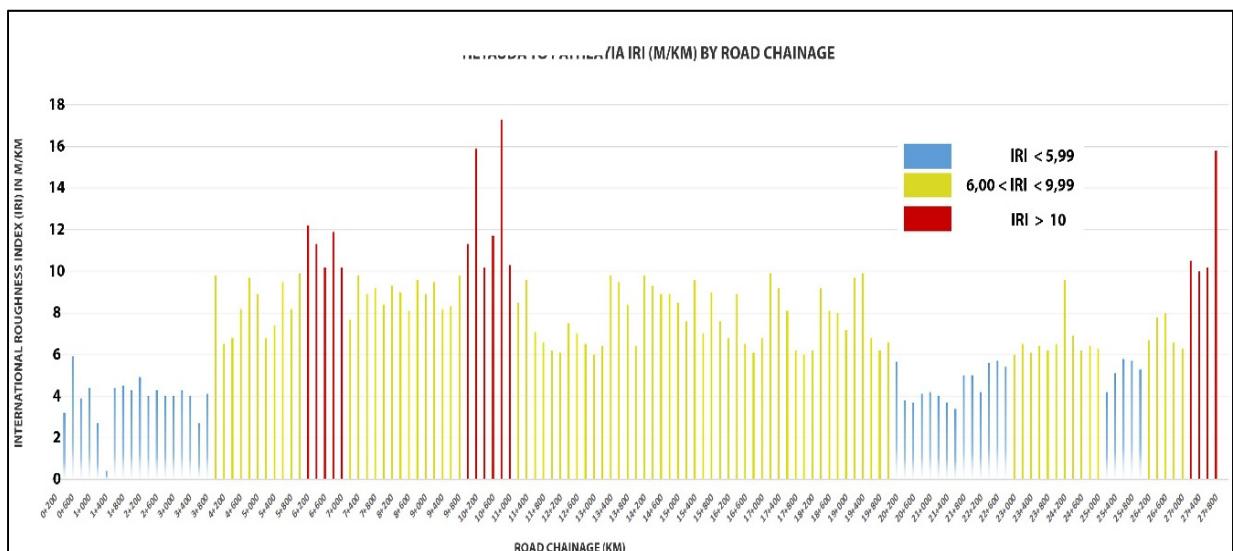


Figure 5-4 Valeur IRI en 2017 par le dispositif ARRAB Roughmeter

5.2.1 Détermination de la (les) cause (s) de détiorioration

La première étape pour comprendre la ou les cause(s) de détiorioration est l'observation ; bien qu'un médecin doive comprendre tous les symptômes possibles pour arriver à un diagnostic, l'ingénieur doit enquêter en profondeur sur la ou les causes immédiates de la détiorioration observée de la chaussée.

Pour cet exercice, une équipe préalablement formée, a collecté les données de l'état de la chaussée au moyen des caméras vidéo et suivant le protocole discuté dans la première partie de ce chapitre.

Les vidéos ont été analysées au moyen d'un ordinateur à distance en utilisant les règles de l'indice visuel tel que décrit dans la partie précédent de ce mémoire. Les résultats de l'étude préliminaire de dégradation sont présentés dans la figure 5-5.

Station (m)	Coordinates	Summary distress classification	Urban density	Bleeding	Rutting		Cracking				Peeling	Potholes or disintegration	
					Rutting		Transverse cracking	Longitudinal Cracking		Edge cracking	Alligator cracking		
					Northbound	Southbound		Inner wheel paths	Outer wheel paths		Small mesh	Large mesh	
0-1000	27°25'21.17"N 105.64"E												
1000-2000	27°24'50.24"N 105.55"E												
2000-3000	27°24'19.29"N 105.45"E												
3000-4000	27°23'58.38"N 105.35"E												
4000-5000	27°23'16.37"N 105.25"E												
5000-6000	27°22'45.06"N 105.15"E												
6000-7000	27°22'33.44"N 105.05"E												
7000-8000	27°21'52.53"N 104.95"E												
8000-9000	27°21'37.91"N 104.85"E												
9000-10000	27°21'16.67"N 104.75"E												
10000-11000	27°20'49.58"N 104.65"E												
11000-12000	27°20'28.69"N 104.55"E												
12000-13000	27°20'07.87"N 104.45"E												
13000-14000	27°19'51.05"N 104.35"E												
14000-15000	27°19'30.23"N 104.25"E												
15000-16000	27°18'53.62"N 104.15"E												
16000-17000	27°18'40.02"N 104.05"E												
17000-18000	27°17'40.16"N 103.95"E												
18000-19000	27°17'29.33"N 103.85"E												
19000-20000	27°17'18.27"N 103.75"E												
20000-21000	27°16'53.87"N 103.65"E												
21000-22000	27°15'32.29"N 103.55"E												
22000-23000	27°15'10.71"N 103.45"E												
23000-24000	27°14'26.88"N 103.35"E												
24000-25000	27°13'53.17"N 103.25"E												
25000-26000	27°13'21.27"N 103.15"E												
26000-27000	27°12'49.37"N 103.05"E												
27000-28000	27°12'27.38"N 102.95"E												

Figure 5-5 Classification de dégradation par des sections de 1km

De plus, les vidéos ont été analysées pour diagnostiquer la ou les causes de détérioration. Le rassemblement des données sur une même plateforme permet de donner aux ingénieurs une idée globale de l'état de la route et, par suite, de savoir l'origine des dégradations et donc de guider les mesures supplémentaires pour déterminer précisément la source de détérioration.

Les analyses sur les photos extraites des vidéos montrent (1) la présence d'orniérage dans le chemin de roues, ce qui représente un danger pour la sécurité des véhicules, (2) le saignement est répandu sur toute la surface de la route, et (3) des problèmes de drainage.

Sur la base de l'évaluation de la dégradation, des mesures supplémentaires ont été effectués afin de déterminer la ou les cause(s) de détérioration les plus probables.

5.3 Validation de la méthode OBD

Comme déjà discuté dans le chapitre trois, l’OBD peut être utilisé pour calculer la consommation d’essence. La littérature a montré un lien entre la consommation d’essence et l’état de la chaussée, en plus le calcul d’émissions polluantes est utilisé par l’étude économique. Des tests ont été faits pour valider la méthode OBD pour le calcul de consommation d’essence.

5.3.1 Identification des itinéraires

Trois itinéraires ont été choisis pour calculer la consommation de carburant :

1. Itinéraire 1 : 7.7 km de longueur situé à Saint-Jérôme, avec seulement 20% d’autoroute, voir photo 5-6 pour les spécifications d’itinéraire.

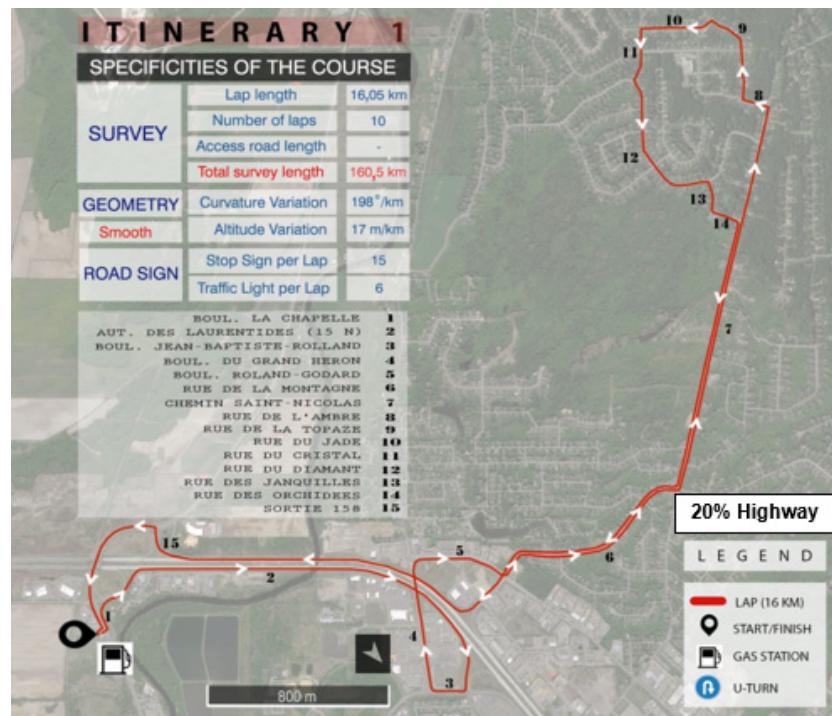


Figure 5-6 Carte de l’itinéraire 1

2. Itinéraire 2 : 7 km de longueur situé à Montréal, pas d’autoroute, voir photo 5-7 pour les spécifications d’itinéraire.



Figure 5-7 Carte de l'itinéraire 2

3. Itinéraire 3 : 10 km de longueur situé à Montréal, pas d'autoroute, voir photo 5-8 pour les spécifications d'itinéraire.

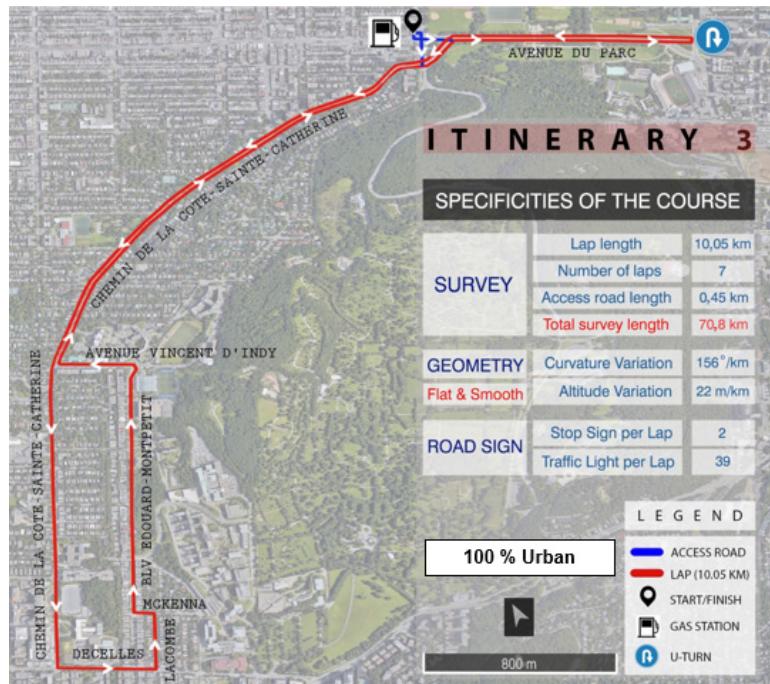


Figure 5-8 Carte de l'itinéraire 3

5.3.2 Méthode de calcul

Les trois itinéraires commencent à une station de service comme indiqué respectivement aux figures 5-3, 5-4 et 5-5. L'opérateur exécute les mêmes actions au début et à la fin de chaque série de tests :

1. Le réservoir de carburant du véhicule est lentement rempli au début de chaque essai.
2. La valeur de l'odomètre est enregistrée au début du test.
3. L'opérateur conduit et répète l'itinéraire sans s'arrêter pour terminer la course.
4. À la fin de la course, le véhicule est arrêté à la même station-service et à la même pompe pour le remplissage.
5. La valeur de l'odomètre est notée à la fin du test.
6. L'opérateur remplit lentement le carburant, limitant le débit pour éviter les vagues et le reflux. Au premier blocage de la pompe, le réservoir est considéré comme plein.
7. Le carburant consommé pendant le voyage est la quantité d'essence ajoutée à la fin de l'essai pour remplir le réservoir qui avait été rempli avant l'essai.

Le nombre de litres de carburant nécessaire à ce plein ainsi que le nombre de kilomètres parcourus, nous permet de calculer la consommation du véhicule. Le dispositif OBD a été utilisé durant chaque course pour calculer la consommation et pour comparer les résultats avec la méthode traditionnelle de calcul.

5.3.3 Validation des résultats

Les étapes présentées ci-dessus permettent de calculer la consommation suivant la méthode de pompe à carburant. Tandis que pour le calcul suivant la méthode proposée, la formule présentée dans la partie 3.2.5 de cette mémoire a été utilisée, voir Annexe II pour les détails de calcul.

Ces deux méthodes de calcul sont comparées avec la consommation théorique, c'est la consommation affichée. Les résultats sont présentés dans le tableau 5-2.

Tableau 5-2 Différence de consommation en pourcentage

Itinéraire	Consommation théorique	Méthode de pompe à carburant	Méthode proposée par l'OBD
1	7,1 L	5,96 L	6,69 L
	Différence en %	17 %	6 %
2	6,66 L	5,71 L	6.80 L
	Différence en %	14 %	3%
3	7,1 L	7,51 L	6,74 L
	Différence en %	6 %	5%

Comme le montre le tableau ci-dessus, les résultats de la méthode proposée par l'OBD sont très proches des résultats de la consommation théorique, ce qui permet de valider cette méthode pour calculer la consommation d'essence et les émissions polluantes, alors d'intégrer le dispositif OBD dans l'outil proposé.

5.4 Conclusion

Grace à l'outil proposé, il a été possible de rassembler et visualiser une multitude de données sur une même plateforme, ce qui permet de donner aux ingénieurs une idée globale sur la route et de visualiser plusieurs paramètres au même moment, facilitant la détection des dégradations, et la classification des dégradations aide les ingénieurs à déterminer la ou les cause(s) de détérioration les plus probables. Les vidéos peuvent être partagées entre différent intervenantes et intervenant tels que les économistes, les politiciens, urbanistes et conseillers. Et cela sert dans l'établissement des rapports préliminaire derrière leurs ordinateurs, ce qui entraîne des économies sur le coût de déplacement des experts grâce aux vidéos, et des économies de fonds qui auraient été utilisé suite de décision inadaptée. L'un des intérêts clés de cette approche est qu'elle est très facilement intégrée sur tous les véhicules. A cet effet les véhicules tel que : taxi et voiture de police sont d'un intérêt particulier car ils arpencent les routes, ce qui pourrait servir à la réalisation d'une collecte de données continue sans déployer des véhicules et des conducteurs.

CONCLUSION

Dans le premier volet de la recherche, une revue de littérature a été consacrée à la présentation du bilan de connaissances ayant trait aux infrastructures de transport en général et aux chaussées en particulier. Le chapitre 1 présente les causes de détériorations les plus connues, ainsi que l'importance de l'entretien préventif. Lorsque le traitement est appliqué au moment idéal, il apporte un meilleur résultat sur la condition de la chaussée à moindre coût. Le chapitre 2 démontre l'importance de la collecte de données continue et de leur analyse dans le processus de gestion des chaussées pour détecter le bon moment pour effectuer l'entretien. La revue de la littérature à démontrer les déficiences des systèmes de gestion actuels et l'importance d'engager de nouvelle procédure d'amélioration du système existant à l'avenir.

L'objectif principal de ce projet est de proposer un outil graphique à faibles coûts pour optimiser le processus de décisions et de gestion des chaussées.

L'outil développé lors de ce projet de recherche, ne se limite pas à la visualisation des données. Il sert également à résoudre les besoins de gestion des chaussées grâce aux nouvelles technologies. Cet outil est réalisé à partir d'un protocole de récolte de donnée, d'un plan de gestion de qualité et de liens web permettant d'afficher les informations directement sur la carte.

L'emploi de cet outil par les agences routières constitue un support bénéfique à l'analyse des données au processus de prise de décisions relatives aux projets d'entretien et à la réhabilitation dans sa globalité, qu'il s'agisse de l'aspect technique ou économique. D'autre part, ce projet permet aux gestionnaires de disposer d'une visualisation intégrale des données considérées lors de la prise de décisions. Ceci leur permet de prendre des décisions plus avisées et ainsi de faire le suivi grâce à l'historique des chaussées et entreprendre les opérations futures d'une manière plus aisée et systématique.

Pour finir, la réalisation de ce travail a permis de prendre du recul sur la situation actuelle et de tirer des recommandations. Après l'émission de la proposition d'outil graphique d'aide à la décision, plus précisément, au niveau informatique, il convient de souligner que Google Earth est limité dans sa fonction d'intégration des données vectorielles attribuées. Cette limitation pourrait être écartée en développant des extensions dédiées à cette fonction de synchronisation entre la visualisation et les données tabulaires. Le format « KML » de Google Earth n'est pas compatible avec tous les formats des logiciels SIG. Afin de contrer cet obstacle, il est recommandé de mener des travaux sur des formats intermédiaires entre « KML » et les formats des logiciels SIG.

Aussi, en termes de développement informatique, un site web devrait être développé pour permettre le partage des données d'état de la chaussée et aux scénarios budgétaires. Sur le plan recherche, il serait bénéfique de développer des méthodes et technologies permettant de maintenir la continuité temporelle des données de performances de la chaussée. D'un point de vue stratégique, cette continuité par les agences routières devrait être encouragées et introduites en tant qu'exigences dans les cahiers des charges puis dans les contrats établis avec les entrepreneurs.

ANNEXE I

CONCEPT MÉTHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE

1. Philosophie de la recherche

Les différentes philosophies de recherche peuvent être comparées principalement de deux manières différentes, à savoir les différentes conceptions philosophiques de l'ontologie et de l'épistémologie. L'ontologie renvoie à des points de vue différents sur la nature de la réalité et de l'être: la réalité existe-t-elle séparément des acteurs sociaux de ce contexte où les acteurs sociaux créent-ils réellement la réalité et en ont-ils des parties indissociables? D'autre part, l'épistémologie concerne des connaissances acceptables pour un chercheur donné. Parmi les différentes sources et types de données, lesquels sont considérés comme fiables et acceptables pour la recherche? Saunders et al. (2009) distinguent quatre approches philosophiques différentes de l'ontologie et de l'épistémologie. Ce sont le positivisme, le réalisme, l'interprétativisme et le pragmatisme Cependant, ce ne sont pas des manières totalement distinctes d'aborder la recherche, elles forment plutôt un continuum de points de vue changeants que des philosophies clairement distinctes. Dans ce mémoire, les résultats sont argumentés pour les relier aux expériences sensées des personnes, le point de vue philosophique est celui qui représente le plus l'interprétativisme.

2. Approche de recherche

Il existe principalement deux approches de recherche différentes: déductive et inductive. L'approche déductive consiste à formuler des hypothèses basées sur la théorie existante et à tester ces hypothèses dans les données empiriques. Inductive, d'autre part, part des données empiriques et tente de former une compréhension et une nouvelle théorie basée sur les preuves empiriques. Les approches déductives et inductives peuvent également être désignées de haut en bas et de bas en haut (Saunders et al. 2009).

La démarche de recherche de cette étude est inductive. L'approche inductive est cohérente avec la philosophie de recherche interprétative appliquée dans cette recherche et, globalement, elle adapte la nature de cette recherche par rapport à l'approche déductive.

3. Choix méthodologique

Bryman (2012) a classé le choix méthodologique de recherche comme suit:

- Méthode mono: une méthode quantitative ou qualitative seule;
- Méthode mixte: méthodes quantitatives et qualitatives utilisées ensemble; et
- Multi-méthode: utilisation multiple de méthodes d'une manière soit « quantitative » soit « Qualitatif seulement ».

Cette étude est une recherche mono-méthode. Seules des données quantitatives sont utilisées dans cette étude et les données sont collectées uniquement par les relevés et enquêtes.

4. Stratégies de la recherche

La stratégie de recherche est la première partie du plan de recherche proprement dit (Saunders et al. 2009). La stratégie de recherche de cette étude est une recherche de méthode. La recherche est une stratégie de recherche qui se concentre sur un seul cadre empirique et tente de comprendre le contexte et la dynamique de ce contexte. Il peut y avoir un cas ou multiplier les cas dans une recherche (Eisenhardt 1989). La stratégie suivie dans ce travail est la recherche de méthode.

5. Horizon temporel

Il est important dans la conception d'une recherche de prendre en compte l'horizon temporel, qui se concentre sur le temps dans les limites d'une recherche. Saunders et al (2012) définissent deux types d'horizon temporel; coupe transversale et longitudinale. La transversalité est utilisée quand l'étude d'un phénomène particulier à un moment donné est nécessaire, alors que

longitudinale lorsque l'étude est prise en série de tâches pour permettre au chercheur d'étudier le changement et le développement (Saunders et al. 2012). Collis et Hussey (2009) définissent l'étude transversale comme une méthodologie utilisée pour étudier des variables ou un groupe de sujets dans différents contextes au cours d'une même période, tandis que l'étude longitudinale est une méthodologie utilisée pour étudier des variables ou un groupe de sujets sur une période donnée. Longue durée.

L'horizon temporel qui convient dans le cadre de cette étude est l'horizon temporel longitudinal car la récolte de données dans le but de gestion des chaussées est un processus où les variables sont étudiées sur le long terme.

6. Techniques et procédures de la recherche

Denscombe (1998) soutient que certaines méthodes de recherche sont mieux adaptées à certaines stratégies de recherche, telles que le lien entre une enquête et des questionnaires, et que ces liens reposent sur des raisons théoriques solides.

Cependant, en recherche sociale dans le cadre d'une stratégie spécifique, il existe encore un certain choix quant aux méthodes à utiliser pour collecter les données, et ce choix dépend en fin de compte de considérations pratiques telles que le calendrier, les ressources disponibles et l'accès aux données.

Jankowicz (2005), quant à lui, adopte le terme "technique", qui contraste avec la méthode de recherche en ce sens que la technique est le processus spécifique "étape par étape" de collecte et d'analyse des données pour extraire les informations. Il a regroupé les principales techniques dans les catégories suivantes:

- Techniques semi-structurées: elles sont ouvertes et comprennent des conversations et des entretiens individuels;
- Techniques structurées: y compris le questionnaire et les entretiens en face à face structurés; et
- Techniques complémentaires: d'observation structurées et expériences sur le terrain.

Jankowicz (2005) affirme également que les techniques structurées ne sont pas nécessairement meilleures ni plus scientifiques simplement parce qu'elles ont tendance à s'accorder avec l'analyse quantitative, mais ce qui est important, c'est le niveau de compréhension possible grâce à la technique particulière. Il soutient également que, même si les entretiens non structurés sont souvent perçus comme une version imparfaite des entretiens, il n'est pas garanti que les entretiens structurés eux-mêmes soient dépourvus d'erreurs et essentiellement impossibles à utiliser. La technique observée dans cette recherche est la technique complémentaire.

7. Limites de la recherche

Chaque recherche comporte des limites découlant en premier lieu de la portée définie de la recherche, du but et des objectifs de recherche spécifiés; d'autre part, du concept de recherche adopté qui comprend la collecte de données et les techniques d'analyse; et enfin de l'interprétation des résultats et d'autres questions à prendre en compte lorsque l'on tente de généraliser ces résultats à des domaines d'intérêt plus larges. Le dernier chapitre de ce mémoire aborde les limites affectant cette recherche en fonction de chaque composante de recherche.

8. Sommaire

Suivant la méthodologie présentée, la recherche suit le schéma présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau A-1 Conception et méthodologie de la recherche

Philosophie	Interprétativisme
Approche	Déductive
Choix méthodologique	Méthode mono-quantitative
Stratégie	Recherche de méthode
Horizon temporel	Longitudinal
Technique et procédure	Technique complémentaire

ANNEXE II

NOTE DE CALCUL DE LA METHODE PROPOSEE

Itinéraire 1

Vehicle Speed (km/h)	Mass Air Flow Rate (g/s)	Liters per 100 km	
1	6,72	21,3696	6,69 L/km
1	6,72	21,3696	
1	6,69	21,2742	
1	6,63	21,0834	
1	6,57	20,8926	
1	6,51	20,7018	
1	6,51	20,7018	
1	6,6	20,988	
1	6,72	21,3696	
1	6,84	21,7512	
1	6,84	21,7512	
1	6,84	21,7512	
1	6,63	21,0834	
1	6,42	20,4156	
1	6,51	20,7018	
1	6,63	21,0834	
1	6,66	21,1788	
1	6,72	21,3696	
1	6,6	20,988	

AII- 1 Calcul de consommation pour l'itinéraire 1

Itinéraire 2		
Vehicle Speed (km/h)	Mass Air Flow Rate (g/s)	Liters per 100 km
1	5.9	18.762
1	5.8	18.444
1	4.96	15.7728
1	4.02	12.7836
1	4	12.72
1	3.98	12.6564
1	3.92	12.4656
1	3.8	12.084
1	3.8	12.084
1	3.88	12.3384
1	3.86	12.2748
1	3.94	12.5292
1	4.02	12.7836
1	4.32	13.7376
1	4.6	14.628
1	4.14	13.1652
1	4.16	13.2288
2	3.62	5.7558
5	1.38	0.87768

AII- 2 Calcul de consommation pour l'itinéraire 2

Itinéraire 3			
Vehicle Speed (km/h)	Mass Air Flow Rate (g/s)	Liters per 100 km	
1	8,58	27,2844	6,74 L/km
1	8,5	27,03	
1	8,42	26,7756	
1	8,02	25,5036	
1	7,54	23,9772	
1	7,86	24,9948	
1	8,02	25,5036	
1	7,46	23,7228	
1	7,3	23,214	
1	7,54	23,9772	
1	7,46	23,7228	
1	8,34	26,5212	
1	8,26	26,2668	
1	7,54	23,9772	
1	7,46	23,7228	
1	7,54	23,9772	
1	7,42	23,5956	
1	7,18	22,8324	
1	7,06	22,4508	
1	6,82	21,6876	
1	6,74	21,4332	

AII- 3 Calcul de consommation pour l'itinéraire 3

BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO, L. (2007). AASHTO LRFD bridge design specifications. *Transportation (Amst)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc.: Washington, DC.
- AASHTO, T. (2009). *Rough roads ahead, fix them now or pay for it later*. Technical Report. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) in Conjunction with Transportation Research Information Program (TRIP).<<http://books.google.com/books>.
- Abdić, I., Fridman, L., Brown, D. E., Angell, W., Reimer, B., Marchi, E., & Schuller, B. (2016). Detecting road surface wetness from audio: A deep learning approach. Dans *Pattern Recognition (ICPR), 2016 23rd International Conference on* (pp. 3458-3463). IEEE.
- Adams, T. M., Koncz, N. A., & Vonderohe, A. P. (2001). *Guidelines for the implementation of multimodal transportation location referencing systems*.
- Adlinge, S. S., & Gupta, A. (2013). Pavement deterioration and its causes. *International Journal of Innovative Research and Development*, 2(4), 437-450.
- Akbarian, M., Moeini-Ardakani, S., Ulm, F.-J., & Nazzal, M. (2012). Mechanistic approach to pavement-vehicle interaction and its impact on life-cycle assessment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2306), 171-179.
- Assaf, G. J. (2016). Gestion d'entretien des infrastructures routières. Ecole de Technologie Supérieure.
- Autret, P. (1991). Vizir-methode assistee par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un reseau routier. *Techniques et methodes des laboratoires des ponts et chaussees*.
- Bang, J. W., Lee, B. J., & Kim, Y. Y. (2017). Development of a semirigid pavement incorporating ultrarapid hardening cement and chemical admixtures for cement grouts. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- Behman, A., & Miraland, T. Z. (2016). *L'étude comparative des équipements autonomes et semi-autonomes d'évaluation des défauts de dégradation des chaussées développées en Europe et en Amérique de Nord*.
- Bergeron, M.-A., Carrier, J., Chartrand, L., Durand, J.-M., Flon, P., Grondin, M., & Martel, N. (2012). Méthodes de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples en milieux rurale et urbain

- Bertrand, J., & Chasseray, P. (2016). *J'ai mal à ma route. 40 millions d'automobilistes.*
- Bezabih, A. G., & Chandra, S. (2009). Comparative study of flexible and rigid pavements for different soil and traffic conditions. Dans *Journal of the Indian Roads Congress* (pp. 153-162).
- Boone, J. M., Parsons, J. L., Feld, S. R., Levy, J. N., & Flaherty, K. L. (2012). Mise en œuvre de procédures de contrôle de la qualité au centre national des opérations du NASS. Dans *Symposium 2011-Catalogue no. 11-522-XCB* (pp. 237). Citeseer.
- Bouchard, C., & Plante, J. (2002). La qualité: mieux la définir pour mieux la mesurer. *Les Cahiers du Service de pédagogie expérimentale*, 11, 12, 219-236.
- Boucher, M. (2001). *Revue générale et comparaison de systèmes de gestion des chaussées.*
- Broten, M. (1997). Local agency pavement Management application guide.
- Bruxelle, C. (2005). *Élaboration d'un cadre de système d'aide à la gestion et à l'entretien (SAGE) des infrastructures civiles* (École de technologie supérieure).
- Busuioc, D., Anstey, K., Rappaport, C., Birken, R., Doughty, J., & Wang, M. (2011). Novel low-cost millimeter-wave system for road surface characterization. Dans *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2011* (Vol. 7983, pp. 79831H). International Society for Optics and Photonics.
- Casas-Avellaneda, D. A., & López-Parra, J. F. (2016). Detection and localization of potholes in roadways using smartphones. *Dyna*, 83(195), 156-162.
- Chang, K., Chang, J., & Liu, J. (2005). Detection of pavement distresses using 3D laser scanning technology. Dans *Computing in Civil Engineering (2005)* (pp. 1-11).
- Coenen, T. B., & Golroo, A. (2017). A review on automated pavement distress detection methods. *Cogent Engineering*, 4(1), 1374822.
- Cosby, P. (1995). Philip Cosby's reflections on quality: 295 inspirations from the world's foremost quality guru: New York: Mac Graw Hill.
- Couturier, G. (2014). *Guide pratique des Marketing*. Société des Ecrivains.
- Delort, R. (1982). 1-L'homme et le milieu. *Points Histoire*, 9-60.
- Deming, W. E., Quality, P., & Competition Position, M. (1982). Press. *Cambridge, Massachussett.*

- Dempsey, C. (2016). Commercial GIS Software Applications. Repéré
- Devaux, N. (2015). Module d'initiation à la géomatique (Note de cours). Consultée le 25, May 2018
- Elhadi, H. M. A. (2009). GIS, a tool for pavement management.
- Feeenstra, T. L., Hamberg-van Reenen, H. H., Hoogenveen, R. T., & Rutten-van Mölken, M. P. (2005). Cost-effectiveness of face-to-face smoking cessation interventions: a dynamic modeling study. *Value in Health*, 8(3), 178-190.
- Fernandes Jr, J. L., Paez, E. M. A., & Lopes, S. B. (2012). PAVEMENT CONDITION INDEX FOR APPLICATION IN URBAN PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS.
- Flintsch, G. W., & McGhee, K. K. (2009). *Quality management of pavement condition data collection* (Vol. 401). Transportation Research Board.
- Fortin, F. (1996). *Le processus de la recherche: de la conception à la réalisation*. Mont-Royal, Québec: Décarie.
- Gillespie, J., & McGhee, K. (2007). Get in, get out, come back!: What the relationship between pavement roughness and fuel consumption means for the length of the resurfacing cycle. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1990), 32-39.
- GISGeography. (2018). Map the world in open source : 13 Free GIS Software Options: . Repéré
- Grataloup, C. (2015). *Géohistoire de la mondialisation-3e éd.: Le temps long du monde*. Armand Colin.
- Haas, R. C., & Canada, T. A. o. (1997). *Pavement design and management guide*. Transportation Association of Canada Waterloo, ON, Canada.
- Hadjidemetriou, G. M., Christodoulou, S. E., & Vela, P. A. (2016). Automated detection of pavement patches utilizing support vector machine classification. Dans *Electrotechnical Conference (MELECON), 2016 18th Mediterranean* (pp. 1-5). IEEE.
- Hardy, J. W., Lefebvre, J. E., & Koliopoulos, C. (1977). Real-time atmospheric compensation. *JOSA*, 67(3), 360-369.
- Hein, D., & Croteau, J.-M. (2004). The Impact of Preventive Maintenance Programs on the Condition of Roadway Networks. Dans *Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Quebec City, Quebec*.

- Hicks, R., Moulthrop, J., & Daleiden, J. (1999). Selecting a preventive maintenance treatment for flexible pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1680), 1-12.
- Hogue, P. (1992). Étude de l'impact de la qualité totale sur les exigences et contenu de taches et sur la rémunération.
- Hudson, W. R. (1994). Pavement management systems lead the way for infrastructure management systems. Dans *Proc. Vol. 2, Third Int. Conf. On Managing Pavements*, TRB. Citeseer.
- Hudson, W. R., Haas, R., & Uddin, W. (1997). *Infrastructure management: Integrating design, construction, maintenance, rehabilitation, and renovation* (Vol. 9). McGraw-Hill New York.
- Huet-Kouo, D. (2015). Le management de l'innovation et évolution de l'ISO 9001. Dans *QUALITA'2015*.
- Huidrom, L., Das, L. K., & Sud, S. (2013). Method for automated assessment of potholes, cracks and patches from road surface video clips. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 312-321.
- Ibraheem, A. T. (2012). Applying Geographic Information System (GIS) for maintenance strategy selection. *Engineering*, 4(1), 44-54.
- Institute, J. (Producteur). (2016). Cost of Poor Quality.
- Jain, A., Nanda, S., Chakraborty, P., Kundra, A., Anuradha, S., Reddy, B., & Kar, P. (2003). Cronkhite-Canada syndrome with adenomatous and carcinomatous transformation of colonic polyp. *Indian journal of gastroenterology: official journal of the Indian Society of Gastroenterology*, 22(5), 189-190.
- Juran, J. M. (1988). *Juran on planning for quality*. Collier Macmillan.
- Kaseko, M. S., & Ritchie, S. G. (1993). A neural network-based methodology for pavement crack detection and classification. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1(4), 275-291.
- Koch, C., & Brilakis, I. (2011). Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, 25(3), 507-515.
- Labi, S., & Sinha, K. C. (2005). Life-cycle evaluation of flexible pavement preventive maintenance. *Journal of transportation engineering*, 131(10), 744-751.

- Landa, J., & Prochazka, D. (2014). Automatic road inventory using LiDAR. *Procedia economics and finance*, 12, 363-370.
- Leamon. (2015). Pavement management implementation
- Les Conseillers, A. (2009). Évaluation des coûts de la congestion routière dans la région de Montréal pour les conditions de référence de 2003.
- Lillrank, P. M., & Kanō, N. (1989). *Continuous improvement: quality control circles in Japanese industry*. Center for Japanese Studies University of Michigan.
- Mathavan, S., Rahman, M., & Kamal, K. (2012). Application of texture analysis and kohonen map for region segmentation of pavement images for crack detection. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2304), 150-157.
- McClintock, N. (2014). Radical, reformist, and garden-variety neoliberal: coming to terms with urban agriculture's contradictions. *Local Environment*, 19(2), 147-171.
- McGhee, K. H. (2004). NCHRP SYNTHESIS 334. *Automated Pavement Distress Collection Techniques: A Synthesis of Highway Practice*.
- Melendi-Espina, S., Morris, C., Turner, T., & Pickering, S. (2016). Recycling of carbon fibre composites. *Carbon 2016*.
- Miah, S., Uus, A., Liatsis, P., Roberts, S., Twist, S., Hovens, M., & Godding, H. (2015). Design of multidimensional sensor fusion system for road pavement inspection. Dans *Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2015 International Conference on* (pp. 304-308). IEEE.
- Mihelcic, J. R., Zimmerman, J. B., & Auer, M. T. (2014). *Environmental engineering: Fundamentals, sustainability, design* (Vol. 1). Wiley Hoboken.
- Moreno, F. A., Gonzalez-Jimenez, J., Blanco, J. L., & Esteban, A. (2013). An instrumented vehicle for efficient and accurate 3D mapping of roads. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(6), 403-419.
- Munari, F., & Oriani, R. (2001). The Impact of Privatization on the Economic Returns to R&D Activities. Empirical Evidence from a Sample of European Firms. Dans. ECIS.
- Nationale, S. é. d. l. I. e. d. l. E. (Producteur). (2014, 2018-06-10). Les bases de l'information géographique.
- Neteler, M., & Mitasova, H. (2013). *Open source GIS: a GRASS GIS approach* (Vol. 689). Springer Science & Business Media.

- Nguyen, T. S., Vrignat, P., & Avila, M. (2007). Détection de défauts sur la surface de chaussées par système de vision. Dans *Colloque GRETSI*.
- Normand, A. A. (2010). *A Study of the Venturi Effect and Venturi Exhaust Primer Graduate Degree/Major: MS Manufacturing Engineering Research Adviser: David Fly, PE* (University of Wisconsin-Stout).
- Ouyang, A., Luo, C., & Zhou, C. (2010). Surface distresses detection of pavement based on digital image processing. Dans *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture* (pp. 368-375). Springer.
- Parida, M., Aggarwal, S., & Jain, S. S. (2005). Enhancing pavement management systems using GIS. Dans *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 158, pp. 107-113). Thomas Telford Ltd.
- Peshkin, D. G., Hoerner, T. E., & Zimmerman, K. A. (2004). *Optimal timing of pavement preventive maintenance treatment applications* (Vol. 523). Transportation Research Board.
- Pierce, L. M., & McGovern, G. (2014). *Implementation of the AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide and software*.
- Pierce, L. M., & Zimmerman, K. A. (2015). Quality Management for Pavement Condition Data Collection. Dans *9th International Conference on Managing Pavement Assets*.
- Porras Díaz, H., Suárez, R., Hernando, J., Mejía Melgarejo, Y. H., & Parra Rodríguez, J. M. (2014). AUTOMATED SYSTEMS FOR DATA ACQUISITION ORIENTED TO EXAMINE FLEXIBLE PAVEMENTS. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 79-98.
- Prasanna, P., Dana, K., Gucunski, N., & Basily, B. (2012). Computer-vision based crack detection and analysis. Dans *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012* (Vol. 8345, pp. 834542). International Society for Optics and Photonics.
- Radopoulou, S. C., & Brilakis, I. (2015). Patch detection for pavement assessment. *Automation in Construction*, 53, 95-104.
- RCN, R. n. C.-. (2017). Cartes de référence. Consultée le 2018-06-05, à <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geographie/atlas-canada/carte-reference/16847>
- Richard, M. J. (2003). ÉTUDES ETRECHERCHES.
- Ritchie, S. G. (1990). Digital imaging concepts and applications in pavement management. *Journal of transportation engineering*, 116(3), 287-298.

- Rosenfeld, Y. (2009). Cost of quality versus cost of non-quality in construction: the crucial balance. *Construction Management and Economics*, 27(2), 107-117.
- Ruban, M. (2002). *Quality Control in Road Construction*. CRC Press.
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2009). *Research methods for business students*. Pearson education.
- Sayers, M., Gillespie, T., & Queiroz, C. (1986). The international road roughness experiment: A basis for establishing a standard scale for road roughness measurements. *Transportation Research Record*, 1084, 76-85.
- Schnebele, E., Tanyu, B., Cervone, G., & Waters, N. (2015). Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. *European Transport Research Review*, 7(2), 7.
- Shahin, M., Stock, C., & Beckberger, L. (1994). Comparing pavement performance and its effect on maintenance and rehabilitation cost. Dans *Proceedings of the Third International Conference on Managing Pavement*, Transportation Research Board, Washington, DC (Vol. 1, pp. 237-245). Citeseer.
- Shekharan, R., Frith, D., Chowdhury, T., Larson, C., & Morian, D. (2007). Effects of comprehensive quality assurance/quality control plan on pavement management. *Transportation Research Record*, 1990(1), 65-71.
- Smith, R. C., Harkey, D. L., & Harris, B. (2001). *Implementation of GIS-based highway safety analyses: bridging the gap*.
- Thouin, P. (2015). Notes de cours : Gestion et assurance de la qualité en construction. . Dans. Ecole de Technologie Supérieure.
- 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 (IJRA)*, 1(1), 53-67.
- Wang, K. C., & Smadi, O. (2011). Automated imaging technologies for pavement distress surveys. *Transportation Research E-Circular*, (E-C156).
- Wang, M., Birken, R., & Shamsabadi, S. S. (2015). Implementation of a multi-modal mobile sensor system for surface and subsurface assessment of roadways. Dans *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2015* (Vol. 9436, pp. 943607). International Society for Optics and Photonics.

- Wolters, A., Zimmerman, K., Schattler, K., & Rietgraf, A. (2011a). *Implementing pavement management systems for local agencies—State-of-the-art/state-of-the-practice synthesis*.
- Wolters, A., Zimmerman, K., Schattler, K., & Rietgraf, A. (2011b). *Implementing Pavement Management Systems for Local Agencies: Implementation Guide*.
- Yoder, E. J., & Witczak, M. W. (1975). *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons.
- Zahab, M. (2016). Les systèmes d'information géographique (SIG) : des outils de visualisation de données associées à un emplacement géographique (la localisation, c'est important!). Repéré sur Notes de la Colline
- Zalama, E., Gómez-García-Bermejo, J., Medina, R., & Llamas, J. (2014). Road crack detection using visual features extracted by Gabor filters. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(5), 342-358.
- Zhang, J., Qiu, H., Shamsabadi, S. S., Birken, R., & Schirner, G. (2014). WiP abstract: System-level integration of mobile multi-modal multi-sensor systems. Dans *Cyber-Physical Systems (ICCPs), 2014 ACM/IEEE International Conference on* (pp. 227-227). IEEE.
- Zhang, Y., McDaniel, J. G., & Wang, M. L. (2013). Estimation of pavement macrotexture by principal component analysis of acoustic measurements. *Journal of transportation engineering*, 140(2), 04013004.
- Zheng, J. (2012). Design guide for semirigid pavements in china based on critical state of asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(7), 899-906.