

Optimisation du choix des interventions sur un réseau routier existant

par

Marion GHIBAUDO

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 9 MAI 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Marion Ghibaudo, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 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 J. Assaf, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Luc Pellecuer, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Sylvain P. Côté, examinateur externe
WSP

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

LE 19 AVRIL 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers les personnes et les organismes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier en particulier mon directeur de recherche, M. Gabriel Assaf, professeur à l'École de Technologie Supérieure, pour m'avoir donnée l'opportunité de mener ce projet, puis pour le partage de son expertise et de son temps.

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

Je remercie M. Frédéric Hébert et M. Sylvain P. Côté, directeurs de projets internationaux en infrastructures et transport chez WSP, pour leur collaboration en me fournissant les données nécessaires aux expériences et aux études de cas présentées dans ce mémoire, et pour leur accueil bienveillant dans les locaux de l'entreprise chaque semaine.

Enfin, je tiens à remercier mes parents pour leur soutien infaillible et leurs encouragements tout au long de mes études.

OPTIMISATION DU CHOIX DES INTERVENTIONS SUR UN RÉSEAU ROUTIER EXISTANT

Marion GHIBAUDO

RÉSUMÉ

La gestion moderne des chaussées doit relever trois défis cruciaux pour prendre une décision d'intervention adaptée au réseau routier détérioré : gérer un nombre grandissant de données et d'informations, fournir des diagnostics des causes de détériorations fiables et prendre en compte les impacts environnementaux. Les systèmes de gestion des chaussées traditionnels ne sont pas appropriés pour combler ces lacunes à l'origine de choix stratégiques inadéquats et de mauvais investissements.

Dans un premier temps, la fiabilité des diagnostics établis selon les méthodes traditionnelles de la gestion des chaussées est remise en question. Deuxièmement, les émissions polluantes issues de la circulation routière sont monétisées. L'ajout des coûts environnementaux dans l'analyse économique démontre qu'il est désormais indispensable de comptabiliser le volet environnemental pour sélectionner la stratégie d'intervention optimale. Enfin, le format analogique figé, communément utilisé, est critiqué au profit des nouvelles technologies de l'information qui proposent des alternatives de gestion prometteuses.

Dans ce contexte, l'objectif principal de ce mémoire est de proposer une amélioration du processus de décision et de gestion des chaussées, par la comptabilisation des impacts environnementaux et par le développement d'une plateforme graphique et numérique qui rassemble, confronte et valorise des données techniques, économiques et environnementales. En conclusion, les contributions de ce mémoire ont pour vocation de permettre aux administrations routières de prendre des décisions d'investissements optimales aux niveaux technique et économique, et de réaliser des interventions plus respectueuses de l'environnement, de la santé et du bien-être des populations. Ce projet s'inscrit dans la perspective du développement durable des chaussées.

Mots-clés : système de gestion des chaussées, entretien routier, diagnostics de dégradations, monétisation, impacts environnementaux.

OPTIMIZATION OF ROAD INTERVENTION CHOICES

Marion GHIBAUDO

ABSTRACT

Pavement management faces three major hurdles when a decision has to be made as to why, how and when to intervene. There are the issue of growing data volumes, which makes the interpretation even more difficult, the reliability of diagnosis of road deterioration causes, and the recognition of environmental impacts on equal grounds as the technical and the economic concerns. Conventional pavement management systems are not suited to integrate all three concerns, which in turn leads to inadequate strategic choices and consequently poor investments.

It is paramount that the right diagnosis is pointed out reliably and it is equally important that polluting emissions, from road traffic, are monetized. The integration of environmental costs in the economic analysis is essential to select the optimal road intervention strategy. Finally, the widely used rigid framework of databases and reports is reviewed in favour of new graphical based information technologies.

In this context, the main objective of this thesis is to improve the decision-making process in order to reflect on better road management. Firstly, the thesis assesses and monetizes the environmental impacts of different strategies. Secondly, the thesis provides a graphic and digital platform that compiles the technical, economic and environmental parameters on one multiple ordinate chart.

The thesis applies these findings on a test case in a West African country, and shows how human health and the well-being of the environment can be taken into account. This project constitutes a positive step toward greater involvement of the road sector in the sustainable development.

Keywords: Pavement management system, road maintenance, diagnoses of road degradations, monetization, environmental impacts.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 DIAGNOSTIC DES DÉTÉRIORATIONS DE LA CHAUSSEE ET VEHICULES LOURDS.....	5
1.1 Indices de l'état de la chaussée	6
1.1.1 Indice de Rugosité International	6
1.1.2 Classification des dégradations	8
1.1.2.1 Classification du ministère des Transports.....	9
1.1.2.2 Système VIZIR.....	12
1.1.3 Quantification des dégradations	14
1.1.3.1 Niveaux de gravité des dégradations.....	14
1.1.3.2 Quantificateurs de la dégradation.....	15
1.2 Objectifs de l'entretien préventif du réseau routier	17
1.3 Limites actuelles du diagnostic des dégradations	19
1.3.1 Limites de l'expert	19
1.3.2 Limites des outils de modélisation	19
1.4 Circulation des véhicules lourds	20
1.4.1 Description du trafic.....	21
1.4.1.1 Débit Journalier Moyen Annuel (DJMA)	21
1.4.1.2 Agressivité du trafic en fonction de la configuration du véhicule.....	21
1.4.1.3 Équivalence Charge Axiale Simple (ÉCAS).....	22
1.4.2 Poids lourds, sources de détérioration de la chaussée dans la littérature	23
1.4.3 Modèle de dégradation en fonction de la sollicitation	24
1.4.4 Lois sur les surcharges	25
1.5 Expérience	26
1.5.1 Objectifs et méthode	26
1.5.2 Acquisition de données	27
1.5.2.1 Caractéristiques des chaussées	27
1.5.2.2 Mesures des dégradations.....	28
1.6 Résultats.....	30
1.6.1 Routes à intervention récente	30
1.6.2 Routes en service depuis plus de 20 ans	30
1.6.3 Route en service depuis plus de 30 ans.....	30
1.7 Analyse des résultats.....	33
1.8 Conclusion et recommandations	35

CHAPITRE 2	QUANTIFICATION ET MONÉTISATION DES ÉMISSIONS POLLUANTES ÉMISES PAR LA CIRCULATION DES VÉHICULES.....	37
2.1	Impacts environnementaux, économiques et sanitaires liés à la circulation routière.....	39
2.1.1	Pollution atmosphérique.....	39
2.1.1.1	Particules fines (PM).....	40
2.1.1.2	Dioxyde de carbone (CO ₂).....	40
2.1.1.3	Monoxyde de carbone (CO).....	41
2.1.1.4	Dioxyde d'azote (NO ₂).....	41
2.1.1.5	Oxydes de soufre (SO _x).....	42
2.1.1.6	Hydrocarbures.....	42
2.1.1.7	Composés organiques volatils (COV).....	43
2.1.1.8	Plomb (Pb).....	43
2.1.2	Poussières.....	44
2.1.3	Pollution sonore.....	44
2.1.4	Vibrations.....	45
2.2	Mise en évidence des liens entre les impacts environnementaux et la route.....	46
2.2.1	Caractéristiques des chaussées.....	46
2.2.1.1	Texture de surface de la chaussée.....	46
2.2.1.2	État et entretien de la chaussée.....	47
2.2.1.3	Localisation, matériaux et géométrie.....	47
2.2.1.4	Vitesse des véhicules.....	48
2.2.2	Impacts de la phase d'utilisation de la route.....	49
2.3	Exposition des pays en voie de développement.....	51
2.3.1	Normes régionales.....	51
2.3.2	Différences climatiques.....	51
2.3.3	Différences de développement économique.....	51
2.4	Études sur la monétisation des émissions.....	53
2.4.1	Étude n°1.....	54
2.4.1.1	Hypothèses et domaines de restriction.....	54
2.4.1.2	Méthodes.....	55
2.4.1.3	Résultats.....	56
2.4.1.4	Limites et incertitudes.....	56
2.4.1.5	Remarques.....	57
2.4.2	Étude n°2.....	57
2.4.2.1	Hypothèses et domaines de restriction.....	57
2.4.2.2	Méthodes.....	60
2.4.2.3	Résultats.....	61
2.4.2.4	Limites et incertitudes.....	61
2.4.2.5	Remarques.....	62
2.4.3	Étude n°3.....	63
2.4.3.1	Hypothèses et domaines de restriction.....	63
2.4.3.2	Méthodes.....	64
2.4.3.3	Résultats.....	65

	2.4.3.4	Limites et incertitudes	66
2.4.4	Étude n°4		66
	2.4.4.1	Domaines touchés par les changements climatiques.....	66
	2.4.4.2	Méthodes	68
	2.4.4.3	Résultats	69
	2.4.4.4	Limites et incertitudes	69
2.4.5	Bilan		71
	2.4.5.1	Remarque sur le coût attribué aux particules	72
	2.4.5.2	Autres études	72
2.5	Limites et incertitudes des études sur la monétisation des impacts de la pollution atmosphérique.....		73
2.5.1	Limites anthropologiques		73
2.5.2	Limites épidémiologiques		73
2.5.3	Limites économiques		75
2.5.4	Manque de connaissance et de données		75
2.6	Expérience		76
2.6.1	Objectifs et méthodes		76
2.6.2	Acquisition de données		77
	2.6.2.1	Caractéristiques des chaussées	77
	2.6.2.2	Stratégies d'intervention	78
	2.6.2.3	Adaptation des coefficients au pays étudié	78
2.7	Résultats et analyses		83
	2.7.1.1	Histogramme des coûts cumulés des émissions polluantes sur toute la période d'analyse, pour chaque option	83
	2.7.1.2	Synthèse des indicateurs économiques, produit du HDM-4.....	88
	2.7.1.3	Courbes des coûts cumulés des émissions par an	90
	2.7.1.4	Histogrammes des bénéfices des différentes stratégies d'intervention face à l'option de ne rien faire, tracés par année et par type de polluant	93
2.8	Conclusion et recommandations		97
CHAPITRE 3 Outils graphiques en gestion des chaussées			99
3.1	Nouvelles technologies de l'information		100
3.1.1	Gestion informatisée de l'information, des documents et des connaissances		100
	3.1.1.1	Gestion de l'information	100
	3.1.1.2	Gestion des documents	100
	3.1.1.3	Gestion des connaissances	101
	3.1.1.4	Base de données informatique	101
3.1.2	Partage de l'information et collaboration en ligne		102
	3.1.2.1	Portails WEB	102
3.1.3	Coûts et bénéfices de l'intégration d'une nouvelle technologie		103
3.2	Systèmes d'informations géographiques (SIG)		105
3.2.1	Origines et évolution		105

3.2.2	Applications	106
3.2.3	Base de données graphiques et non-graphiques	107
3.2.4	Propriétés graphiques et symboles	108
3.2.5	Utilisation dans le domaine des chaussées	111
3.2.6	Limites des SIG pour la gestion des routes	113
3.3	Schémas itinéraires	113
3.3.1	Origines	113
3.3.2	Données référencées sur les schémas itinéraires	114
3.3.3	Exemples	115
3.3.4	Critiques	116
3.4	Conclusion	116
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL	117
4.1	Processus de développement traditionnel	117
4.2	Processus de développement itératif et agile	119
4.3	Étapes de développement de l'outil d'aide à la prise de décision	121
4.3.1	Itération : création de la carte-support et de la base de données graphiques	121
4.3.1.1	Analyse des besoins	121
4.3.1.2	Récolte des données	121
4.3.1.3	Conception et implémentation	122
4.3.1.4	Tests et validation de l'itération	123
4.3.2	Itération : création de la base de données non-graphiques	123
4.3.2.1	Analyse des besoins	123
4.3.2.2	Conception et implémentation	124
4.3.2.3	Tests et validation de l'itération	124
4.3.3	Itération : importation de vidéos	124
4.3.3.1	Analyse des besoins	124
4.3.3.2	Conception et implémentation	124
4.3.3.3	Tests et validation de l'itération	125
4.3.4	Itération : création des liens entre la base de données et la carte numérique	125
4.3.4.1	Analyse des besoins	125
4.3.4.2	Conception et implémentation	125
4.3.4.3	Tests et validation de l'itération	125
4.3.5	Itération : partage des données	126
4.3.5.1	Analyse des besoins	126
4.3.5.2	Conception et implémentation	126
4.3.5.3	Tests et validation de l'itération	126
4.3.6	Itération : impression des schémas itinéraires	126
4.3.6.1	Analyse des besoins	126
4.3.6.2	Conception et implémentation	127
4.3.6.3	Tests et validation de l'itération	127

CHAPITRE 5	VALIDATION DE L'OUTIL GRAPHIQUE POUR LA GESTION DES INTERVENTIONS SUR UN RÉSEAU EXISTANT.....	129
5.1	Prise en compte de l'environnement de la chaussée.....	129
5.1.1	Dans le processus d'identification des sources de dégradation	129
5.1.2	Dans le processus de comptabilisation des impacts environnementaux, économiques et sanitaires	130
5.2	Études de cas pour l'identification des sources de dégradation	134
5.2.1	Confrontation des données	134
5.2.1.1	Analyse.....	136
5.2.2	Visualisation des photographies et des vidéos	137
5.2.2.1	Analyse.....	138
5.2.3	Conclusion.....	139
CONCLUSION.....		141
ANNEXE I	PRÉSENTATION DES CONFIGURATIONS DES VÉHICULES ROUTIERS	143
ANNEXE II	PRÉSENTATION DU LOGICIEL HDM-4	151
ANNEXE III	MÉTHODES ET MOYENS DE QUANTIFICATION DES IMPACTS SOCIAUX, SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX.....	167
BIBLIOGRAPHIE.....		171

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Valeurs d'IRI au-delà desquelles la chaussée est considérée déficiente par le MTQ.....7
Tableau 1.2	Types et sources des dégradations du réseau routier10
Tableau 1.3	Catégories de dégradation du système VIZIR.....13
Tableau 1.4	Niveau de gravité des dégradations de type A14
Tableau 1.5	Niveau de gravité des dégradations de type B.....15
Tableau 1.6	Classification des dégradations par type de structure dans HDM-4.....20
Tableau 1.7	Valeurs par défaut des coefficients d'agressivité moyens.....22
Tableau 1.8	Description des sections étudiées27
Tableau 1.9	Longueur des portions de route pour la mesure des indices.....29
Tableau 2.1	Impacts environnementaux engendrés par les phases de construction et d'utilisation de la chaussée50
Tableau 2.2	Coûts des polluants atmosphériques par catégorie économique (2005 CAD\$ / tonne)56
Tableau 2.3	Impacts quantifiés.....58
Tableau 2.4	Effets exclus des analyses59
Tableau 2.5	Moyennes des coûts des dommages par tonne d'émission (2005 €/ton).....61
Tableau 2.6	Comparaison des résultats des émissions62
Tableau 2.7	Impacts des changements climatiques.....64
Tableau 2.8	Monétisation des dommages estimés du changement climatique65
Tableau 2.9	Coûts des dommages des gaz à effet de serre (1998 €/ton).....69
Tableau 2.10	Coûts externes des dommages des gaz à effet de serre (2020 €/ ton)69
Tableau 2.11	Synthèse des coefficients spécifiques à chaque émission polluante.....71

XVIII

Tableau 2.12	Description des sections étudiées	77
Tableau 2.13	Stratégies d'intervention.....	78
Tableau 2.14	Taux de change appliqués pour l'adaptation des coefficients	79
Tableau 2.15	Coefficients exprimés en \$ / tonne pour chaque émission polluante et chaque année.....	82
Tableau 2.16	Indicateurs économiques pour toutes les stratégies d'intervention, calculés par le HDM-4 – Section A.....	88
Tableau 2.17	Indicateurs économiques pour toutes les stratégies d'intervention, calculés par le HDM-4 – Section B	89
Tableau 2.18	Indicateurs économiques pour toutes les stratégies d'intervention, calculés par le HDM-4 – Section C	89
Tableau 2.19	Quantité de polluants en tonne par an, produit du HDM-4 Section A, Option 2	93

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Échelle de l'indice IRI en fonction de différents types de route7
Figure 1.2	Détermination de l'indice de dégradation de surface.....16
Figure 1.3	Influence de l'entretien sur la qualité de la route (fissures de fatigue).....17
Figure 1.4	Influence de l'entretien sur la qualité de la route (valeur de l'IRI)18
Figure 1.5	Courbe prédictive de comportement de la chaussée.....24
Figure 1.6	Histogramme du nombre de véhicules par type d'essieu et par station de pesée.....28
Figure 1.7	Schéma itinéraire pour les trois premiers kilomètres de la Route Aa29
Figure 1.8	Indice de déformation en fonction des ÉCAS cumulés31
Figure 1.9	Indice de dégradation de surface en fonction des ÉCAS cumulés31
Figure 1.10	Indice de fissuration de surface en fonction des ÉCAS cumulés32
Figure 1.11	Indice IRI en fonction des ÉCAS cumulés32
Figure 2.1	Caractéristiques de la route à l'origine des coûts environnementaux48
Figure 2.2	Schéma de la démarche de la méthode IPA pour les émissions polluantes60
Figure 2.3	Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option sur toute la période d'analyse - Section A83
Figure 2.4	Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option sur toute la période d'analyse - Section B84
Figure 2.5	Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option sur toute la période d'analyse - Section C84
Figure 2.6	Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option et chaque année - Section A91
Figure 2.7	Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option et chaque année - Section B.....91

Figure 2.8	Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option et chaque année – Section C.....	92
Figure 2.9	Bénéfices des options 2 et 7 par rapport à l'option 0 – Section A.....	94
Figure 2.10	Bénéfices des options 2 et 7 par rapport à l'option 0 – Section B.....	95
Figure 2.11	Bénéfices des options 2 et 7 par rapport à l'option 0 – Section C.....	96
Figure 3.1	Courbe des coûts cumulés des opérations avec et sans investissement dans les nouvelles technologies de l'information.....	104
Figure 3.2	Carte basée sur une conception assistée par ordinateur (recensement et représentation des rues).....	109
Figure 3.3	Carte basée sur une conception assistée par ordinateur (recensement et représentation des parcelles foncières).....	109
Figure 3.4	Image satellite d'une ville d'Afrique de l'Ouest fournie gratuitement par <i>ArcGIS Online Map Viewer</i>	110
Figure 3.5	Image reconstruite par ordinateur à partir de la photographie précédente fournie gratuitement par <i>ArcGIS Online Map Viewer</i>	111
Figure 3.6	Exemple de schéma itinéraire.....	115
Figure 4.1	Schéma du processus de développement traditionnel Cycle en cascade.....	118
Figure 5.1	Zones habitées référencées sur le schéma itinéraire.....	131
Figure 5.2	Zones cultivées référencées sur le schéma itinéraire.....	132
Figure 5.3	Intersection entre la route étudiée et un chemin de terre, référencée sur le schéma itinéraire.....	133
Figure 5.4	Schéma itinéraire - Étude de cas 1.....	134
Figure 5.5	Agrandissement de la deuxième photographie du schéma itinéraire.....	135
Figure 5.6	Schéma itinéraire - Étude de cas 2.....	137

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CA	Coefficient d'agressivité
CAM	Coefficient d'agressivité moyen
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CBR	California Bearing Ratio
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés Organiques Volatiles
DJMA	Débit Journalier Moyen Annuel
ÉCAS	Équivalence Charge Axiale Simple
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
HDM	Highway Development & Management
Id	Indice de déformation
If	Indice de fissuration
IRI	Indice de Rugosité International
IRRE	International Road Roughness Experiment (Expérimentation Internationale de Rugosité des Chaussées)
Is	Indice global de dégradation de surface
KML	Keyhole Markup Language
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MTQ	Ministère des Transports du Québec

NO ₂	Dioxyde d'azote
OCDE	Organisation pour la Coopération et le Développement Économique
Pb	Plomb
PIB	Produit Intérieur Brut
PM	Particules
PPA	Parité de Pouvoir d'Achat
SGBD	Système de Gestion de Base de Données
SGBDRO	Système de Gestion de Base de Données Relationnelle et Objet
SHRP	Strategic Highway Research Program
SIG	Système d'Informations Géographiques
SO _x	Oxydes de soufre
SQL	Structured Query Language (Langage de requête structurée)
TI	Technologies de l'Information
TRRL	Transport and Road Research Laboratory

INTRODUCTION

Le réseau routier favorise la mobilité des personnes et des marchandises ainsi que la création de liens commerciaux et sociaux entre les pays, les régions, les villes et les villages. La route est porteuse de développement économique et gage de qualité de vie (United Nations, 2001).

La gestion des chaussées est définie comme « la prise de décisions et la direction d'un ensemble d'opérations visant à fournir et à maintenir le réseau routier dans des conditions acceptables pour le public, tout au long de la vie de la chaussée » [notre traduction] (AASHTO, 1985). La gestion des infrastructures routières avait pour objectifs majeurs de concevoir et de construire, puis de maintenir et d'administrer. Désormais, ce sont la préservation du réseau existant, le maintien de la qualité de la chaussée et l'amélioration de l'efficacité des prises de décision qui priment (Kulkarni & Miller, 2003).

Les systèmes de gestion des chaussées soutiennent les décisionnaires depuis leur apparition dans les années 1960. Les étapes constitutives des systèmes de gestion actuels sont : la collecte et la gestion des données, l'emploi de modèles de prédiction du comportement de la chaussée, la réalisation d'analyses techniques et économiques, l'éventuelle priorisation d'une chaussée et enfin l'identification d'une stratégie optimale (Kulkarni & Miller, 2003).

La collecte et la gestion du flux de données est l'un des principaux défis actuels du domaine des transports car de plus en plus de données sont intégrées pour fiabiliser les analyses qui sont réalisées par la suite. Cependant, les outils traditionnellement utilisés ne permettent ni de gérer, ni de confronter, ni de visualiser ces milliers de données amoncelées dans des rapports et des dossiers propres à chacune des domaines qui interviennent lors de l'entretien, du renforcement ou de la réhabilitation d'une chaussée (Vanier, 2001).

L'analyse technique requiert une compréhension des dégradations. Dans la littérature, de nombreux tableaux lient chaque dégradation à une ou plusieurs causes, et à un traitement adapté (Bergeron & Carrier, 2007; Miller & Bellinger, 2003; Towles, 2017). Une analyse

poussée des symptômes et la consultation de ces documents doivent permettre de traiter la cause de la détérioration et non seulement les manifestations de surface. Or, à cause de diagnostics incomplets, la pleine responsabilité des détériorations est généralement portée par un facteur partiellement fautif : le trafic (Henning, Alabaster, Arnold, & Liu, 2014; Kordi, Endut, Wahab, & Baharom, 2012). Si un facteur est accusé à tort, les experts concentrent leurs efforts sur une stratégie inadéquate et s'éloignent du diagnostic de la véritable cause. La stratégie d'intervention étant inadaptée, les ressources sont mal investies et il est fort probable que le défaut refasse surface rapidement.

La circulation routière est à l'origine de nuisances environnementales et sanitaires importantes. Ce mémoire portera essentiellement sur les émissions polluantes, du fait de leur abondance dans la littérature et de leur possible monétisation. Les études ont révélé que les caractéristiques des chaussées influencent la quantité et la gravité des nuisances émises par les véhicules (Bueno, Luong, Terán, Viñuela, & Paje, 2013; Gillespie & McGhee, 2007; Kawakami, Ishigaki, Shirai, Terada, & Kubo, 2017; Pellecuer, 2014). Cependant, l'analyse des impacts environnementaux dépasse de loin le cadre traditionnel des applications des administrations routières. En effet, lors d'une intervention sur une chaussée, le choix d'une stratégie effectuée par les décisionnaires ne tient compte ni des impacts, ni des coûts sanitaires et environnementaux (Pellecuer, 2014).

Une gestion déficiente des données, des diagnostics techniques incomplets et une absence d'analyses environnementales sont à l'origine de constats biaisés, conduisant à des choix d'interventions inadéquats et donc à de mauvais investissements.

Dès lors, comment déterminer la meilleure stratégie d'intervention aux niveaux technique, environnemental et économique pour une chaussée dégradée ?

L'objectif principal de ce projet est de proposer une amélioration du processus de décision et de gestion des chaussées afin d'optimiser la sélection d'une stratégie d'intervention, par la comptabilisation des impacts environnementaux et par le développement d'un outil d'aide à

la prise de décision permettant le rassemblement, la confrontation et la visualisation des données techniques, économiques et environnementales.

Les sous-objectifs du projet de recherche sont de (1) revenir sur le processus de compréhension des dégradations pour déterminer la variable discriminante, véritable cause de la détérioration ; de (2) quantifier et monétiser les émissions polluantes afin de les inclure dans l'analyse économique et donc, dans le processus de prise de décision ; et de (3) référencer sur une plateforme graphique l'ensemble des données techniques à prendre en compte afin d'établir un diagnostic fiable des causes de détérioration.

Ce mémoire est structuré selon trois grands axes, soient trois remises en question des usages de la gestion des chaussées. Les deux premiers volets traitent indépendamment des diagnostics de détérioration des routes et de la monétisation des effets environnementaux. La dernière partie porte sur le développement d'un outil qui intégrera les résultats des deux réflexions précédentes.

La revue de la littérature se déploie sur les trois premiers chapitres qui ont pour vocation de répondre aux sous-objectifs cités précédemment. Les chapitres 1 et 2 appuient la nécessité d'une évolution dans le processus de prise de décision pour l'intervention sur un réseau existant. Le chapitre 1 revient sur les diagnostics de dégradation incomplets et les pertes engendrées par ces mauvais constats. Le chapitre 2 illustre la nécessité de prendre en compte les impacts environnementaux, avec à l'appui les enjeux économiques d'une telle initiative. Le chapitre 3 est une revue de la littérature sur les nouvelles technologies de l'information et les outils graphiques utilisables en gestion des chaussées. Les recherches menées révèlent que les outils existants ne répondent pas pleinement aux besoins spécifiques des gestionnaires des chaussées. Ces recherches sont le point de départ du développement d'un outil d'aide à la prise de décision adapté aux exigences des administrations routières. Dans la continuité du chapitre 3, le chapitre 4 présente la méthodologie de développement de l'outil d'aide à la prise de décision. Enfin, le chapitre 5 valide l'utilité de l'outil au travers d'exemples et de deux études de cas, mettant ainsi en évidence ces avantages.

CHAPITRE 1

DIAGNOSTIC DES DÉTÉRIORATIONS DE LA CHAUSSÉE ET VÉHICULES LOURDS

Le choix d'une stratégie d'intervention sur le réseau routier détérioré doit s'effectuer à partir d'une connaissance complète de la section de route concernée. Les administrations routières ont recours à plusieurs indices traduisant l'état de l'infrastructure : l'Indice de Rugosité International et des indices de dégradation. Aussi, l'entretien, le renforcement ou la réhabilitation d'une chaussée nécessite en amont une compréhension de l'origine des dégradations. Suite à un examen visuel qui permet de répertorier et de qualifier la gravité et l'étendue des dégradations de surface, l'analyse technique doit permettre de découvrir la ou les sources du défaut visible. Le traitement adéquat sera ensuite appliqué en toute connaissance des détériorations.

Cependant, l'histoire nous montre que de nombreuses réhabilitations n'ont pas permis d'allonger la durée de vie de la route comme prévu. Il a été remarqué que plusieurs experts concentraient leurs analyses sur les défauts à corriger plutôt que sur les causes d'apparition de ces défauts (Cammisano, 2007). Une autre erreur est de considérer un facteur partiellement fautif comme pleinement responsable des dégradations. Le trafic, et plus précisément la circulation des véhicules lourds, est souvent accusé de la plupart de dégradations qui apparaissent sur le réseau routier. De ce fait, de plus en plus de pays se munissent de lois limitant la charge et les dimensions des poids lourds afin de conserver la route dans de bonnes conditions et de protéger leurs investissements. Or, le trafic pourrait certes aggraver les dommages routiers, sans être pour autant la source primaire de la dégradation. Les gouvernements concentrent leur temps et leurs investissements dans le contrôle des véhicules lourds et la rédaction de lois pénalisantes, mais tous ces efforts ne résolvent pas la défaillance initiale.

Ce chapitre a pour objectif de démontrer que le trafic n'est pas le seul responsable de la dégradation accélérée des chaussées. Il peut constituer un facteur aggravant sans être la source de détérioration. Les autres facteurs à investiguer seront identifiés et analysés au chapitre 5. Ce chapitre, par une remise en question de la fiabilité des diagnostics, est un premier pas vers la nécessité d'une évolution des méthodes d'auscultation et de prise de décision.

1.1 Indices de l'état de la chaussée

1.1.1 Indice de Rugosité International

L'indice IRI (Indice de Rugosité International) est traditionnellement utilisé par les administrations routières comme un indicateur de la rugosité de la chaussée et du confort de roulement des usagers de la route. Le but de cet indice est de conduire à une décision sur la nécessité de réhabiliter une route.

L'IRI a été développé lors de l'Expérimentation Internationale de Rugosité des Chaussées (IRRE) conduite par la Banque Mondiale, au Brésil, en Angleterre, en France, en Belgique et aux États-Unis. En 1982, au Brésil, les mesures réalisées sur un grand nombre de routes dans des conditions différentes et avec une grande variété d'instruments et de méthodes ont permis d'obtenir une échelle complète de cet indice, présentée Figure 1.1.

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

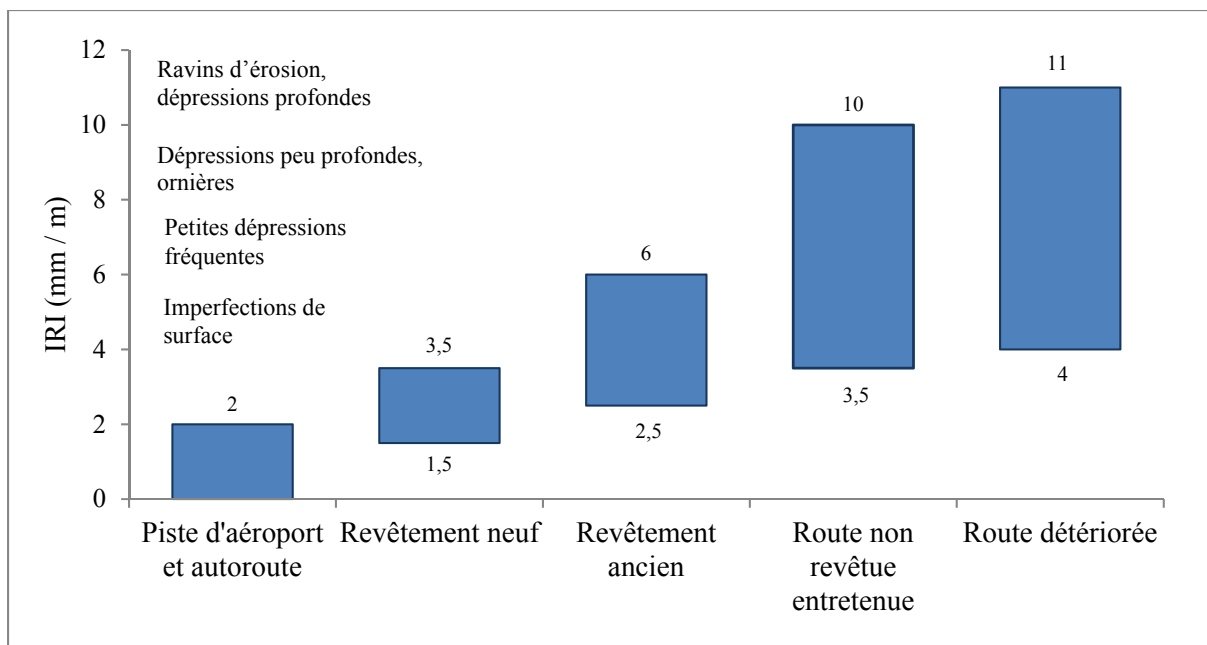


Figure 1.1 Échelle de l'indice IRI en fonction de différents types de route
Adaptée de Sayers et al. (1986)

La Figure 1.1 permet de donner une idée de la valeur de l'IRI en fonction de type de revêtement et de l'état de la route. Cette échelle date de 1986, or il est intéressant de comparer avec des valeurs plus récentes établies dans un pays développé. Aussi, en 2003, le ministère des Transports du Québec (MTQ) a développé des seuils de déficience pour les différentes classes de route au Québec (autoroute, nationale, régionale et collectrice), comme présenté dans le Tableau 1.1 (Richard, 2003).

Tableau 1.1 Valeurs d'IRI au-delà desquelles la chaussée
est considérée déficiente par le MTQ
Tiré de Richard (2003)

CLASSE FONCTIONNELLE	SEUIL DE DÉFICIENCE
Autoroute	$IRI \leq 2.2 \text{ mm / m}$
Nationale	$IRI \leq 2.5 \text{ mm / m}$
Régionale	$IRI \leq 3.0 \text{ mm / m}$
Collectrice	$IRI \leq 3.5 \text{ mm / m}$

Le MTQ propose de continuer de viser la valeur d'IRI de 1,2 m / km, pour les autoroutes et les routes nationales. Si la valeur de l'IRI est supérieure à 1,7 m / km, la route est considérée comme en mauvais état et des travaux doivent être envisagées (Ministère des Transports du Québec, 1999).

Sa stabilité, sa facilité de mesure, son applicabilité dans toutes les conditions et sa fiabilité font de cet indice, un critère reconnu dans tous les pays du monde.

Lorsque la valeur de l'IRI excède le seuil établi par l'administration routière ou le gouvernement, la section de chaussée est considérée comme déficiente. Ce dépassement entraîne une enquête plus approfondie de la portion de la route afin de déterminer le type d'intervention nécessaire pour retrouver le niveau de service de la route.

1.1.2 Classification des dégradations

Une connaissance plus poussée de la section de chaussée déficiente est requise. L'enquête sur l'origine des dégradations permet de sélectionner la stratégie d'intervention optimale pour que la chaussée abîmée retrouve son niveau de service.

Chaque dégradation est répertoriée en fonction de son type, de sa localisation, de son étendue et de sa sévérité, par un technicien parcourant la chaussée à pied ou à bord d'un véhicule équipé de caméras roulant à faible allure. Cette expertise permet d'évaluer l'état global de la surface de la route. Les objectifs de ce procédé sont de :

- découper la route en section homogène, c'est-à-dire présentant les mêmes caractéristiques;
- prioriser l'intervention sur une section;
- déterminer la meilleure solution d'intervention.

La caractérisation et la synthèse des défauts de la route sont des étapes obligatoires dans le processus de gestion des chaussées. Dans la littérature, il existe de nombreux classements des dégradations de la chaussée. La logique de déduction est parfois inversée : le point de départ du raisonnement est la source des dégradations et sont expliquées par la suite les détériorations qui peuvent apparaître dans ces cas. Aussi dans la thèse de Towles (2017), quatre catégories de défauts sont présentées : la détérioration structurelle, la détérioration due aux matériaux, la détérioration thermique et les problèmes de mélange ou de mise en œuvre des matériaux (Towles, 2017).

Les systèmes de classification présentés ci-dessous, possèdent la démarche suivie lors d'un examen visuel de la chaussée puis de son analyse : type de dégradation observée, possibles causes, catégorie de défauts auquel elle s'apparente.

1.1.2.1 Classification du ministère des Transports

Le guide de classification du ministère des Transports s'intéresse uniquement aux chaussées souples. Son objectif est d'uniformiser les dénominations et les critères de mesure des dégradations.

Le Tableau 1.2, inspiré du Guide du ministère des Transports Québécois, lie les types de dégradation avec leurs possibles causes. En s'inspirant des catégories de défauts développées par Towles (2017), la catégorie de défaut « Environnement » a été ajoutée afin de rassembler et de nommer les paramètres naturels influençant les dégradations tels que la géographie, la topographie et la présence d'eau non loin de la route.

Tableau 1.2 Types et sources des dégradations du réseau routier
Adapté de Bergeron et Carrier (2007)

Type de dégradation	Définition	Possibles causes	Catégorie de défaut
Fissuration linéaire	Fissure transversale Rupture du revêtement perpendiculairement à l'axe de la route	Retrait thermique Fragilisation du bitume Classe de bitume inadaptée à la zone	Détérioration thermique Problème de mélange ou de mise en œuvre
	Fissure longitudinale dans les pistes de roues Rupture du revêtement parallèlement à l'axe de la route	Fatigue du revêtement (due à un trafic lourd) Défiance de la capacité structurale causée par une conception structurale insuffisante de la chaussée Affaiblissement à cause d'un mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée Classe de bitume inadaptée au trafic	Détérioration structurale Problème de mélange ou de mise en œuvre <u>Aggravé par un trafic lourd</u>
	Fissures longitudinale hors traces de roues	Joint de construction mal exécuté le long de la travée adjacente Ségrégation de l'enrobé à la pose Vieillessement du revêtement Gel Tassement des matériaux de remblai d'une tranchée	Problème de mélange ou de mise en œuvre Environnement
Fissuration surfacique	Fissure de rive Rupture en ligne droite ou en arc de cercle, inscrite dans une bande d'un mètre, le long de l'accotement ou de la bordure, ou décollement du revêtement	Manque de support latéral Discontinuité dans la structure Apport latéral d'eau de ruissellement dans la structure de chaussée Assèchement du sol support	Environnement Problème de mélange ou de mise en œuvre
	Carrelage Rupture du revêtement formant un patron de fissuration à mailles polygonales	Fatigue Vieillessement de la chaussée Capacité portante insuffisante	Environnement Problème de mélange ou de mise en œuvre Détérioration structurale
Déformation de la surface	Ornières à petit rayon Dépression longitudinale simple, double et parfois triple, de l'ordre de 250 mm de largeur	Enrobé à stabilité réduite par temps chaud Enrobé trop faible pour bien résister au trafic lourd Compactage insuffisant de l'enrobé Usure de l'enrobé en surface	Problème de mélange ou de mise en œuvre Environnement <u>Aggravé par un trafic lourd</u>
	Ornières à grand rayon Dépression longitudinale simple de largeur supérieure à 250 mm	Accumulation des déformations permanentes sous le passage des véhicules lourds Compactage insuffisant des couches granulaires pendant la construction Capacité structurale insuffisante de la chaussée Usure	Problème de mélange ou de mise en œuvre Environnement <u>Aggravé par un trafic lourd</u>

Type de dégradation	Définition	Possibles causes	Catégorie de défaut
Déformation de la surface	Affaissement Dépression localisée de la surface, souvent en bordure de la chaussée ou au voisinage de conduites souterraines, qui provoque l'accumulation d'eau	Manque de support latéral et instabilité du remblai Présence de matériaux inadéquats ou mal compactés Zone de déblai argileux ou secteurs marécageux Affouillement ou assèchement du sol support Mauvais état des réseaux souterrains Points bas non drainés	Problème de mélange ou de mise en œuvre Environnement
	Tôle ondulée Série de vagues transversales, régulières et rapprochées	Couches d'enrobé à stabilité insuffisante Solicitations tangentielles élevées par le trafic lourd aux intersections et dans les pentes abruptes Mauvaise qualité de mise en place du revêtement	Problème de mélange ou de mise en œuvre Environnement <u>Aggravé par un trafic lourd</u>
	Désenrobage et arrachement Érosion du mastic (liant et sable) et perte des gros granulats en surface produisant une détérioration progressive du revêtement	Formulation ou fabrication déficiente de l'enrobé Mauvaise affinité bitume/agrégat Compactage insuffisant ou ségrégation de l'enrobé Surchauffe ou vieillissement de l'enrobé Usure par le trafic intense Solicitations accrues en zones de virage et freinage	Problème de mélange ou de mise en œuvre Environnement <u>Aggravé par un trafic lourd</u>
Défauts de l'enrobé Perte du revêtement	Ressuage Remontée du bitume à la surface du revêtement	Surdosage du bitume Excès de liant d'accrochage Formulation d'enrobé inadaptée aux sollicitations Effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic	Problème de mélange ou de mise en œuvre <u>Aggravé par un trafic lourd</u>
	Pelage Décollement par plaques de l'enrobé de la couche de surface. La couche sous-jacente du revêtement demeure visible	Mauvaise adhésion de la couche de surface Épaisseur insuffisante de la couche de surface Solicitations élevées par le trafic	Problème de mélange ou de mise en œuvre <u>Aggravé par un trafic lourd</u>
	Nids-de-poule Perte localisée du revêtement sur toute son épaisseur généralement arrondie, au contour bien défini. La fondation est exposée.	Manifestation finale d'une combinaison de différents phénomènes : fissuration, infiltration d'eau sous le revêtement, cycle gel/dégel, circulation importante Faiblesse ponctuelle de la fondation Épaisseur insuffisante du revêtement Chaussée fortement sollicitée par le trafic lourd	Problème de mélange ou de mise en œuvre <u>Aggravé par un trafic lourd</u>

Dans le programme Strategic Highway Research Program (SHRP), ce sont les 8 types de fissurations linaires qui sont répertoriées pour les revêtements béton et asphalte : fissures de fatigue, de rive, dans et hors des traces de roue, transversales de retrait thermique, remontée de fissures aux joints, remontée de fissures transversales et longitudinales (Miller & Bellinger, 2003). La cause même du défaut apparaît dans sa nomination.

Chaque dégradation de la route est associée à plusieurs causes probables, autrement dit, un même symptôme possède plusieurs sources possibles. Selon le MTQ, de nombreuses dégradations sont aggravées par un trafic intense, comme mis en valeur dans le tableau précédent. Cependant, la circulation est rarement la seule à entraîner de telles dégradations. En effet, les défauts de conception, de mélange et de mise en œuvre sont mis en avant à plusieurs reprises. Dans cette classification, le trafic apparaît comme un facteur aggravant combiné à un autre défaut.

1.1.2.2 Système VIZIR

Le système VIZIR, né de la collaboration entre l'entreprise *SÉTRA* et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, est une méthode d'évaluation des chaussées souples par un système informatisé. Vingt années d'études du réseau routier français ont débouché sur ce processus à la fin des années 80. Il est issu de la conjonction du progrès du matériel et des méthodes numériques pour le relevé des dégradations et d'une nouvelle orientation des études (Autret & Brousse, 1991).

VIZIR permet d'évaluer la qualité de surface de la chaussée en se basant sur l'examen visuel et l'inventaire des dégradations selon leur étendue et leur degré de gravité. L'état visuel d'une section homogène de chaussée, couplé à des mesures de déflexion ou de portance, permet d'attribuer une note globale de la surface de la chaussée et de qualifier sa qualité. Dans ce système, les dégradations sont classées selon trois catégories (Autret & Brousse, 1991), présentées dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Catégories de dégradation du système VIZIR
Adapté de Autret et Brousse (1991)

Dégradation de type A			
Les dégradations de type A s'intéressent aux défauts structurels de la chaussée concernant l'ensemble des couches et du sol ou seulement la couche de surface. Elles proviennent d'une insuffisance de capacité structurelle de la chaussée. L'examen visuel est généralement couplé avec d'autres mesures (de déflexion ou de portance) afin de déterminer la solution d'intervention.			
Déformation	Orniérage	Fissuration de fatigue	Faïençage
Dégradation de type B			
Les dégradations de type B n'affectent pas la capacité structurelle de la chaussée. Elles proviennent d'un défaut de mise en œuvre, d'un défaut de qualité d'un produit ou bien d'une condition locale particulière que <u>le trafic peut accentuer</u>. La solution d'entretien résulte seulement de la reconnaissance de la dégradation. Généralement, les dégradations de type B ne sont pris en compte dans le choix d'une solution d'entretien que lorsque la chaussée ne présente aucune dégradation de type A.			
Fissuration hors fatigue : • fissures longitudinales de joint • fissures transversales de retrait thermique • fissures longitudinales et transversales de retrait d'argile (dessiccation)	Nids-de-poule	Mouvement de matériaux : • désenrobage et plumage • pelade • peignage • arrachements • ressuage	Accotement et érosion : • dentelle de rive • dénivèlement des accotements Érosion des accotements
Réparations			
Les réparations antérieures dissimulent une déficience de la chaussée. Elles sont comptabilisées dans les dégradations car elles constituent des facteurs aggravant l'estimation de la qualité de la route.			

Lors du relevé des dégradations, l'opérateur note la **localisation**, le **type**, le **degré de gravité** et l'**étendue** de la dégradation.

1.1.3 Quantification des dégradations

1.1.3.1 Niveaux de gravité des dégradations

Pour chacune des dégradations de type A et B, il existe trois niveaux de gravité définis dans le système VIZIR :

Tableau 1.4 Niveau de gravité des dégradations de type A
Tiré de Autret et Brousse (1991)

	Niveau de gravité		
Dégradation	1	2	3
Déformation Orniérage	Sensible à l'usager mais peu important $f < 2$ cm	Graves déformations, affaissements localisés ou orniérage $2 \text{ cm} \leq f \leq 4 \text{ cm}$	Déformations affectant gravement la sécurité ou le temps de parcours $f \geq 4$ cm
Fissuration	Fissures fines dans les traces de routes ou dans l'axe	Fissures franchement ouvertes et / ou ramifiées	Fissures très ramifiées et / ou très ouvertes, lèvres parfois dégradées
Faïençage	Faïençage fin sans départ de matériaux Maillage large (> 50 cm)	Faïençage plus serré (< 50 cm) avec parfois départ de matériaux, arrachement et nids-de-poule en formation	Faïençage très ouvert, découpage en pavé (< 20 cm), avec parfois départ de matériaux
Réparation	• Soit réflexion de tout ou partie du corps de chaussée • Soit intervention de surface liée à des défauts de type B	Intervention de surface liée à des défauts de type A	
		Tenue satisfaisante de la réparation	Dégradations apparaissant sur la réparation elle-même

Avec f , la largeur de la fissure.

Tableau 1.5 Niveau de gravité des dégradations de type B
Tiré de Autret et Brousse (1991)

	Niveau de gravité		
Dégradation	1	2	3
Fissures longitudinale de joint	Fine et unique	Large ($f > 1$ cm) sans arrachement ou Fine et ramifiée	Large avec épaufrures des lèvres ou Large et ramifiée
Nid-de-poule (sur 100 mètres de chaussée)	Quantité < 5 Taille $d \leq 30$ cm	Quantité entre 5 et 10 et $d \leq 30$ cm ou Quantité < 5 et $d \leq 100$ cm	Quantité > 10 et $d \leq 30$ cm ou Quantité entre 5 et 10 et $d \leq 100$ cm
Arrachements : Désenrobage Plumage Pelage	Ponctuel sans apparition de la couche de base	Continus ou ponctuels avec apparition de la couche de base	Continus avec apparition de la couche de base
Mouvement de matériaux	Ponctuel	Continus sur une bande de roulement	Continus sur une bande de roulement et très marqués

Avec d , le diamètre d'un nid-de-poule et f , la largeur de la fissure.

1.1.3.2 Quantificateurs de la dégradation

Les dégradations de type B conduisent à une solution d'entretien qu'en l'absence de dégradation de type A. Dans ce cas, la solution d'entretien résulte seulement de la reconnaissance de la dégradation. Le processus de quantification de la dégradation présenté ci-dessous débouche sur un indice visuel global, valable uniquement pour les dégradations de type A.

L'indice de fissuration, **If**, est attribué en fonction de la gravité et de l'étendue de la fissuration ou de la longueur de route abîmée par le faïençage. If varie entre 1 et 5. Si les deux phénomènes sont présents sur une même section de route, la plus forte des deux valeurs l'emporte. L'indice de déformation, **Id**, est octroyé en fonction de la gravité et de l'étendue de l'orniérage et de la déformation. Id varie entre 1 et 5.

Un premier indice qualifiant la chaussée découle de la combinaison des deux indices, If et Id. Celui-ci peut être corrigé afin de prendre en compte les réparations antérieures de la chaussée. L'indice global de dégradation de surface, **Is**, est ainsi obtenu après ajout du coefficient correcteur. Il fournit une image globale de la qualité du réseau. Is varie de 1 à 7 :

- 1 et 2 correspondent à de bons états de surface;
- 3 et 4 reflètent un mauvais état de surface nécessitant des opérations d'entretien;
- 5, 6 et 7, traduisent un très mauvais état de surface, déclenchant de gros travaux d'entretien ou de renforcement.

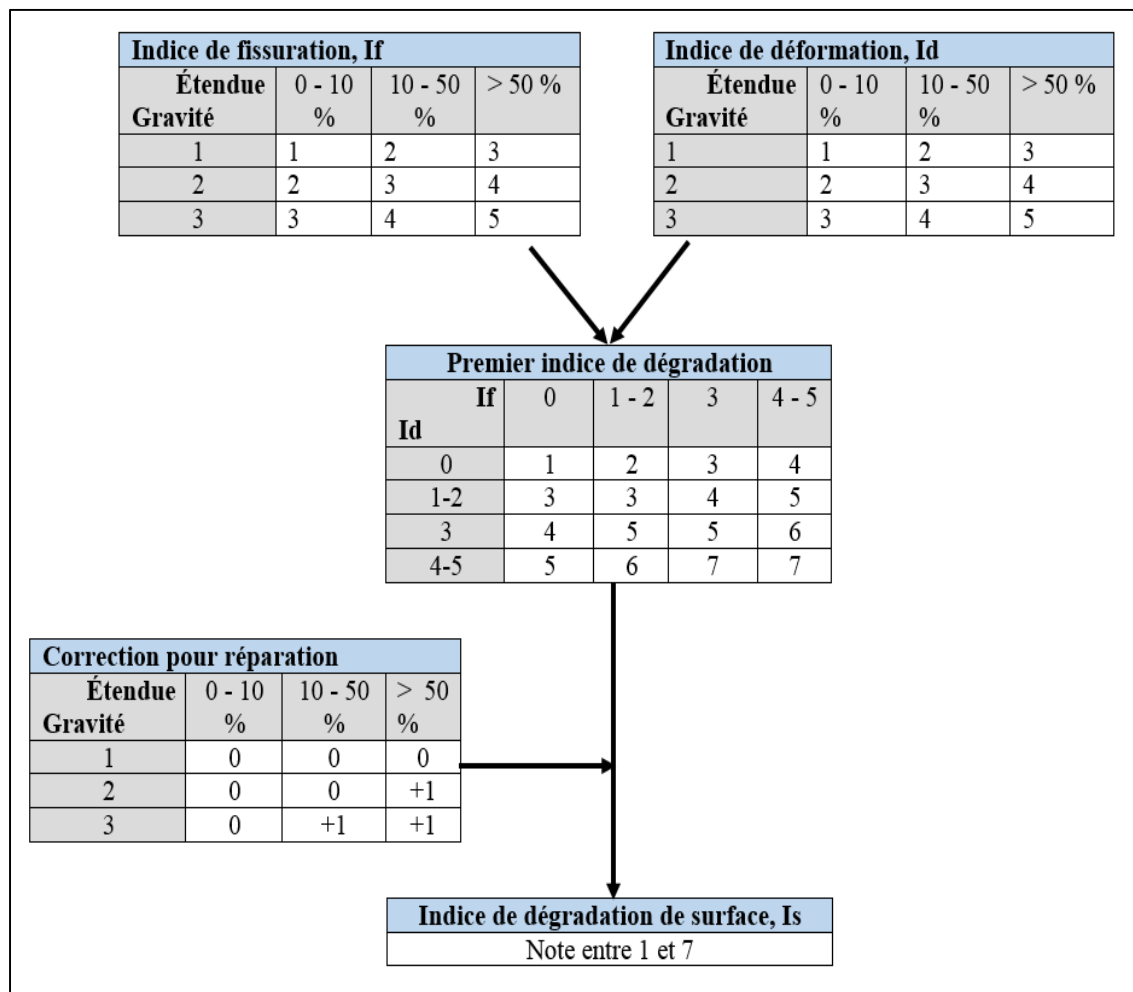


Figure 1.2 Détermination de l'indice de dégradation de surface
Tirée de Autret et Brousse (1991)

1.2 Objectifs de l'entretien préventif du réseau routier

Le relevé des dégradations et les mesures de rugosité permettent de qualifier en partie l'état global de la route et de dresser un portrait de la condition du réseau routier. La finalité est de prévenir les instances du besoin d'intervenir sur la chaussée.

Les objectifs majeurs de l'entretien sont de réaliser les travaux nécessaires pour préserver l'investissement routier, réparer la route, garantir un niveau de service et diminuer les coûts aux usagers. L'entretien préventif a pour buts de préserver la chaussée dans un bon état et d'augmenter sa durée de vie. Ce type d'entretien s'effectue de manière régulière et récurrente, et ce à moindre coût par rapport à un entretien palliatif. En effet, l'entretien palliatif est requis lorsque le niveau de détérioration est important et fait appel à un investissement et des travaux plus lourds.

Afin de caractériser l'état de la chaussée, le graphique de la Figure 1.3 se base sur la densité des fissures de fatigue. Il propose de comparer l'évolution des états théoriques d'une chaussée sur une période de 40 ans, entraînés respectivement par le choix d'un entretien préventif et par l'option de ne rien faire.

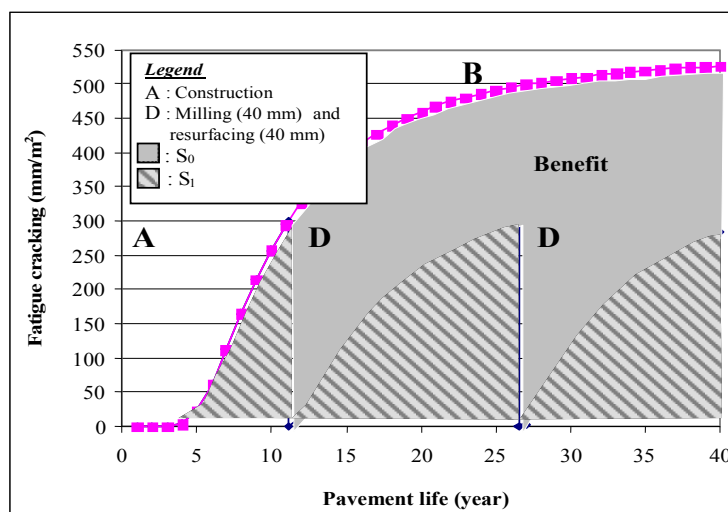


Figure 1.3 Influence de l'entretien sur la qualité de la route (fissures de fatigue)
Tirée de Assaf (2016)

La courbe B traduit l'ampleur des fissures de fatigue pour le scénario sans intervention. Sans entretien, le nombre de fissures augmente jusqu'à ce que la chaussée devienne impraticable en raison de son état de détérioration avancé. Le niveau de fissure est ramené proche de 0 lorsque l'entretien préventif (D), intervenant deux fois sur ce graphique, est entrepris. Réaliser de manière récurrente, il permet de conserver un bon niveau de service : le niveau de fissuration n'atteint pas les extrêmes obtenus avec la stratégie sans intervention. La zone notée S_0 , soustraction des aires sous ces deux courbes, représente les bénéfices cumulés sur la période d'analyse, de l'entretien régulier face à l'option ne de rien faire.

La Figure 1.4 compare plusieurs stratégies d'entretien entre elle et à l'option sans entretien. Le paramètre variant d'une stratégie à l'autre est la fréquence de l'entretien.

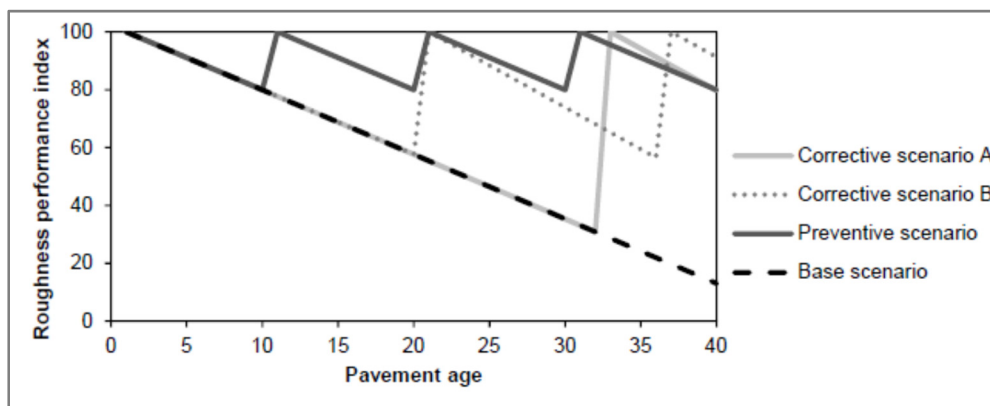


Figure 1.4 Influence de l'entretien sur la qualité de la route (valeur de l'IRI)
Tirée de Pellecuer (2014)

Plus le temps entre deux interventions est long, plus l'IRI est mauvais et la qualité de la chaussée baisse. Toutefois, intervenir tous les 10 ans coûte plus cher qu'une intervention vicennale. La fréquence de l'entretien doit répondre au compromis entre le niveau de service minimum à respecter et les fonds disponibles pour l'entretien.

1.3 Limites actuelles du diagnostic des dégradations

Il y a deux limites au diagnostic des dégradations provenant respectivement de l'expert et des outils de modélisation.

1.3.1 Limites de l'expert

Que ce soit pour les mesures de l'IRI, de l'orniérage ou de la fissuration, les relevés pour les chaussées revêtues sont généralement réalisés manuellement par un opérateur à pied ou à bord d'un véhicule équipé de caméras roulant à faible allure.

Le traitement des données de l'état de la chaussée repose sur l'interprétation et l'expérience de l'inspecteur. Il doit donc posséder une bonne expérience pratique afin de s'assurer de la qualité et de la fiabilité des données recueillies. De plus, la qualité des images prises par les caméras installées sur le véhicule joue un rôle important dans la confiance à accorder à l'interprétation des causes de dégradations.

La répétabilité et la reproductibilité des relevés manuels sont faibles car elles dépendent d'un facteur humain et de la qualité des images. Il peut y avoir une grande différence entre deux évaluateurs et même pour un unique évaluateur, entre deux jours différents (Ministère des Transports du Québec, 2013b).

1.3.2 Limites des outils de modélisation

Malgré la diversité des méthodes de classification des dégradations, lorsqu'il s'agit de les modéliser, les possibilités des logiciels sont limitées. Par exemple, le logiciel Highway Development & Management HDM-4, est un programme de prévision du comportement de la chaussée et d'évaluation économique. Il est présenté en détail en Annexe II pour les besoins du chapitre 2. Il ne reconnaît pas toutes les formes de dégradations. Les dégradations possibles sont classées en fonction des trois classes de surface de chaussées que le logiciel est en mesure de traiter : les bitumeuses, les bétons et les non revêtues, selon le tableau suivant :

Tableau 1.6 Classification des dégradations par type de structure dans HDM-4
Adapté de Odoki et Kerali (2006)

Bitumineuse		Béton	Non revêtues
Fissuration		Fissuration	Perte de matériaux
Arrachements		Épaufrures des joints	
Nids de poule		Décalage de dalles	
Dentelle de rive		Ruptures	
Orniérage		Perte de service	
Macrotexture	Texture de surface		
Adhérence			
Uni		Uni	Uni

Pour les revêtements bitumineux ou béton, la première limite du modèle HDM-4 est la prise en compte de seulement deux types de fissuration linéaire :

- la fissuration structurelle, associée aux charges, à l'âge et à l'environnement;
- la fissuration transversale de retrait thermique (Odoki & Kerali, 2006).

La seconde limite concerne la modélisation des bordures de la route. En effet, la dégradation des fossés réduit la portance de la chaussée et accélère sa détérioration. Plusieurs types de fossés sont spécifiés dans le HDM-4. En revanche, la dégradation des accotements n'est pas encore modélisée dans le logiciel (Odoki & Kerali, 2006).

1.4 Circulation des véhicules lourds

Cette partie introduit les notions et les équations permettant de décrire le trafic. Par la suite, les études dont les résultats accusent la circulation des véhicules lourds et surchargés d'être la principale cause des dégradations seront présentées. Ces études, incriminant le trafic, encouragent les institutions gouvernementales à adopter des lois pénalisant les propriétaires de poids-lourds ne respectant pas la surcharge et les dimensions autorisées.

1.4.1 Description du trafic

1.4.1.1 Débit Journalier Moyen Annuel (DJMA)

Le Débit Journalier Moyen Annuel est défini comme la moyenne sur une journée de 24h, de l'ensemble des véhicules circulant sur la section de route considérée au cours d'une année entière. Les jours de la semaine ne subissant pas le même trafic que les fins de semaine, il s'agit de prendre en compte le nombre de jours estimés de circulation, c'est-à-dire de diviser le nombre de véhicules circulant sur la chaussée par 260 jours / année (semaine de 5 jours) ou par 312 jours / année (semaine de 6 jours), au lieu de 365 jours / année.

Une intervention sur une route entraîne généralement une augmentation du trafic sur la voirie restaurée. Un indice d'accroissement, soit le pourcentage annuel d'augmentation de fréquentation de la route, permet de prévoir le trafic à long terme.

Les véhicules sont comptabilisés par type : cyclomoteur, voiture conventionnelle, camionnette, autocar, bus, camion à un ou plusieurs essieux et véhicule articulé. Par la suite, dans les calculs d'agressivité du trafic, une pondération sera appliquée pour différencier l'impact d'un poids-lourd par rapport à une voiture conventionnelle (Gendron, 2001).

1.4.1.2 Agressivité du trafic en fonction de la configuration du véhicule

L'agressivité du trafic est définie en fonction de la configuration et de la charge à l'essieu des véhicules lourds. Le coefficient d'agressivité pour chaque véhicule se calcule selon l'équation suivante (Doré & Grellet, 2015) :

$$CA = \left(\frac{m_i}{m_{réf}} \right)^4 \quad (1.1)$$

Où : CA, coefficient d'agressivité par véhicule

m_i , poids de l'essieu considéré

$m_{réf}$, poids de l'essieu de référence équivalent

En cas d'absence de station de pesée sur la portion de route concernée, des valeurs par défaut peuvent être intégrées aux calculs. Le tableau suivant rassemble les valeurs par défaut des coefficients d'agressivité moyens selon la classe de véhicule :

Tableau 1.7 Valeurs par défaut des coefficients d'agressivité moyens
Tiré de Doré et Grellet (2015)

Véhicule		Coefficient d'agressivité moyen (ÉCAS)
Camion 1 unité	2 essieux	0.3
	3 essieux	1.5
	4 essieux et plus	5.7
Camion 2 unités	4 essieux et moins	0.5
	5 essieux	1.7
	6 essieux et plus	6.8
Camion 3 unités	5 essieux	1.7
	6 essieux et plus	7.3

1.4.1.3 Équivalence Charge Axiale Simple (ÉCAS)

L'outil ÉCAS ou Équivalence Charge Axiale Simple correspond à un essieu normalisé de 8165 kg (18000 lb) muni de pneus doubles. Il s'agit d'une unité de mesure dans le calcul de dimensionnement structural. En effet, le nombre de l'ÉCAS donne une indication du nombre total de véhicules que peut recevoir la chaussée tout au long de la période d'utilisation prévue lors de la phase de conception et permet de quantifier l'agressivité des véhicules. C'est un outil de dimensionnement des chaussées flexibles. Le trafic supporté par une section de route, dans une direction analysée et sur la voie analysée, se calcule comme suit (Doré & Grellet, 2015) :

$$N_{18} = DJMA_{\text{initial}} * VL * Dir * Voie * CAM * N * fa \quad (1.2)$$

Où : N_{18} , nombre total d'ÉCAS prévus (ÉCAS)

$DJMA_{\text{initial}}$, débit journalier moyen annuel, au début de la mise en service
(véhicules / jour)

VL , pourcentage de véhicules lourds (camions / véhicule)

Dir, pourcentage de camions dans la direction analysée

Voie, pourcentage de camions dans la voie analysée

CAM, coefficient d'agressivité moyen des véhicules lourds (ÉCAS / camion)

N, nombre de jours estimés de circulation (jours)

fa, facteur d'accroissement pour les véhicules lourds.

1.4.2 Poids lourds, sources de détérioration de la chaussée dans la littérature

Dans la littérature, la circulation des poids lourds est considérée comme l'un des facteurs principaux de la dégradation de la chaussée, si ce n'est le premier. Une capacité structurale insuffisante, une mauvaise qualité de construction, l'absence ou la réduction progressive des opérations d'entretien, les conditions climatiques défavorables et les faiblesses du sol support sont reléguées au second plan (Pais, Amorim, & Minhoto, 2013; Sharma, Sitaramanjaneyuiu, & Kanchan, 1995). En effet, les dommages seraient causés par un trafic de plus en plus intense et par une charge par essieu des véhicules de transport de marchandises de plus en plus importante. La durée de service pour laquelle la route a été conçue diminue, tout comme la qualité de la route qui se dégrade plus vite que prévu lors de la conception (Kordi et al., 2012). Les véhicules surchargés entraînent un compactage localisé des couches supérieures de la chaussée et des fissures apparaissent en surface à cause de leur passage. Les dommages structuraux sont causés par les véhicules de marchandises et les dégradations augmentent brusquement avec la charge aux essieux (Sharma et al., 1995). L'étude de Salama, Chatti, et Lyles (2006), conclut que les camions à axe simple ou double entraînent une fissuration plus sérieuse que les camions à axe multiple, et inversement, les camions à axe multiple sont responsables d'un orniérage plus important (Salama et al., 2006).

Dans certains pays, la contribution des usagers de la route est proportionnelle aux dégâts prétendument causés par les charges des véhicules. Les camions doivent donc payer plus que les autres utilisateurs de la route car ils sont responsables de la plupart des dégradations. La majorité des coûts entraînés par l'entretien du réseau existant est donc couvert par les véhicules de marchandises considérés comme à l'origine des dommages (Henning et al., 2014).

1.4.3 Modèle de dégradation en fonction de la sollicitation

Les modèles de dégradation permettent de prévoir l'état de la chaussée tout au long de son cycle de vie. Les lois évolutives permettent de tracer la courbe prédictive de détérioration de la chaussée en l'absence d'entretien et d'y superposer les courbes de détérioration en cas d'entretien selon différentes stratégies et dates d'intervention (Gendron, 2001).

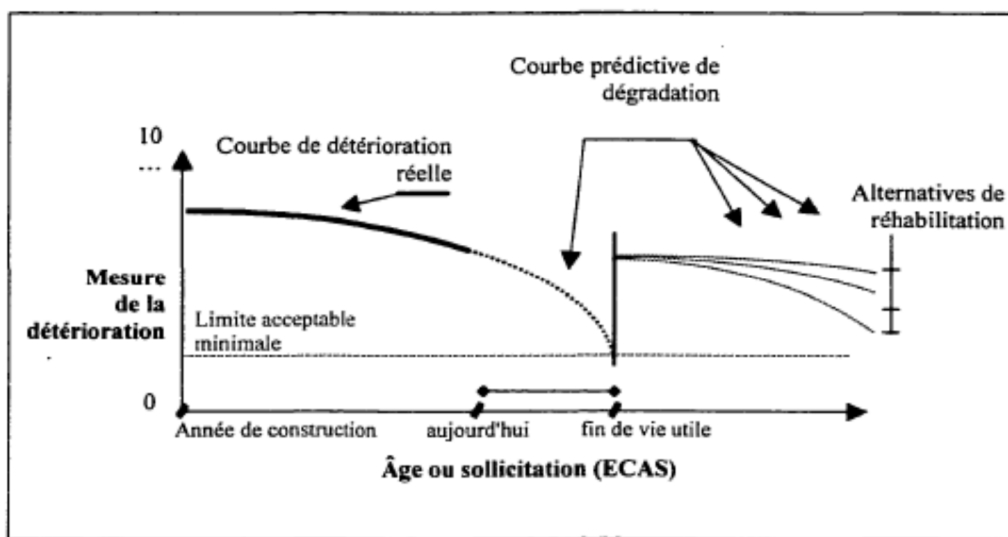


Figure 1.5 Courbe prédictive de comportement de la chaussée
Tirée de Gendron (2001)

Dans le cas présent, la mesure de la détérioration est tracée en fonction de la sollicitation, c'est-à-dire de l'agressivité du trafic ou ECAS et de l'âge. Une telle courbe tend à prouver qu'il existe une relation mathématique universelle entre la détérioration et le trafic.

Cependant, ni le type, ni la localisation (hors ou dans les traces de roue) de la détérioration ne sont spécifiés. De plus, la création de modèles prédictifs se heurte à la remise en question de leur fiabilité. En effet, les lois évolutives décrivant le comportement de la portion de route, doivent prendre en compte les matériaux utilisés, le climat et l'environnement de la chaussée, le trafic et les données historiques du réseau. Un modèle de dégradations est généralement spécifique à une section homogène (Gendron, 2001).

1.4.4 Lois sur les surcharges

La responsabilité du trafic dans le phénomène de dégradation des chaussées, affirmée par ces études, pousse les pays à prendre de nombreuses mesures législatives pour pénaliser les propriétaires de poids-lourds ne respectant pas la surcharge et les dimensions autorisées. La surcharge ou le surdimensionnement des véhicules de marchandises est une infraction au code de la route et au code des douanes dans la majorité des pays du Monde, et fait l'objet de nombreuses normes dans les pays développés comme :

- au Canada, le « Règlement sur les normes de charges et de dimensions applicables aux véhicules routiers et aux ensembles de véhicules routiers » et le « Guide des normes de charges et dimensions des véhicules » ont été adoptés par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports (MTMDET);
- en Europe, la commission européenne a adopté des mesures fixant les dimensions maximales et poids maximaux autorisés.

De plus, les pays en voie de développement sont particulièrement affectés par les problèmes de surcharge des véhicules (Sharma et al., 1995). En Afrique de l'Ouest, le « Règlement 14 » a pour objectif d'harmoniser les normes et les procédures de contrôle du gabarit, du poids, et de la charge à l'essieu des véhicules lourds de transport de marchandises dans les pays membres de l'Union Économique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA). Son application est requise par le conseil de l'UEMOA depuis sa signature en décembre 2005. Toutefois, de nombreuses controverses et désaccords avec les instances locales ont conduit à des reports successifs de dates d'applicabilité du règlement jusqu'en 2017 (Commission de l'Union Économique et Monétaire d'Afrique de l'Ouest, 2017).

Les gouvernements s'accordent donc sur l'imposition de normes sur les surcharges et les dimensions des véhicules dont les objectifs sont de réglementer la concurrence dans le secteur du transport de marchandises, de fluidifier le trafic, et, surtout d'assurer la sécurité des usagers de la route et de sauvegarder les infrastructures et les investissements routiers. Les infractions sont punies par des amendes et une immobilisation du véhicule jusqu'à

transbordement du chargement sur un autre véhicule ou réaménagement du véhicule afin qu'il respecte respectivement les lois sur les surcharges et sur les gabarits.

Toutefois, les valeurs limites de masse totale et de charge à l'essieu pour les véhicules lourds sont spécifiques à un pays. Afin de présenter la majorité des configurations des véhicules lourds circulant et un exemple de leur poids maximal autorisé, l'Annexe I propose un extrait du « *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules* » du MTQ.

1.5 Expérience

1.5.1 Objectifs et méthode

Les lois et les normes sur les surcharges créées dans le but de sauvegarder les réseaux routiers, proviennent d'une tendance à accuser le trafic et plus particulièrement les poids lourds, des maux de la route.

Afin de démontrer que le principe selon lequel les véhicules lourds sont seuls responsables de la dégradation du réseau routier, est faux, ce mémoire est basé sur une méthodologie de recherche quantitative.

L'objectif de l'expérience est de démontrer les affirmations suivantes :

- le trafic n'est pas la source unique de la dégradation accélérée des chaussées;
- le trafic est un facteur aggravant les détériorations de la route, sans en être la source.

Par définition de la recherche quantitative, ce sont la collecte de données numériques et leur analyse par des méthodes mathématiques, statistiques et informatiques qui nous permettront de débattre sur les énoncés précédents.

1.5.2 Acquisition de données

1.5.2.1 Caractéristiques des chaussées

L'échantillon choisi est composé de huit sections de route d'un pays d'Afrique de l'Ouest. Les véhicules circulant sur les routes A et E sont comptabilisés selon une unique direction ; le trafic empruntant les routes B, C et D est répertorié selon deux directions, notées respectivement « a » et « b ». Les routes sélectionnées représentent 10% du réseau routier du pays étudié. Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des sections étudiées :

Tableau 1.8 Description des sections étudiées

Section	Direction	Année de construction	Structure (épaisseur en cm)	Année de dernière intervention
A	a	1981	6BB/12GB/20Gc	2014 (Renforcement)
B	a	1958	5BB/20Sac(3%)/15TVC	2007 (Renforcement)
	b			
C	a	1967	3SA/12Glc/15Gn	1995 (Renforcement)
	b			
D	a	1990	4SA/18Glc/15Gn	1990
	b			
E	b	1969	3SA/9SB/18Gn	1986 (Renforcement)

Avec, pour nomenclature des structures de chaussées :

BB Béton bitumineux

ES Enduit Superficiel

GB Granulat et bitume

Gc Graveleux stabilisé au ciment

Gn Graveleux naturel

Glc Graveleux latéritique stabilisé au ciment

SA Sable bitume

Sac Sable argileux stabilisé au ciment

TVC Tout venant de concassé

Au cours des mois de Janvier à Septembre 2016 inclus, les cinq stations de pesée ont contrôlé tous les véhicules empruntant les routes et répertorié les informations suivantes : date, propriétaire, poids, poids aux essieux, surcharge, immatriculation, marchandise transportée, provenance et destination. Ce sont près de 400 000 mesures de charge de poids lourds qui ont été réalisées et fournies par l'entreprise partenaire *WSP*.

Le graphique suivant présente le nombre de véhicules lourds empruntant les routes contrôlées par les stations de pesées.

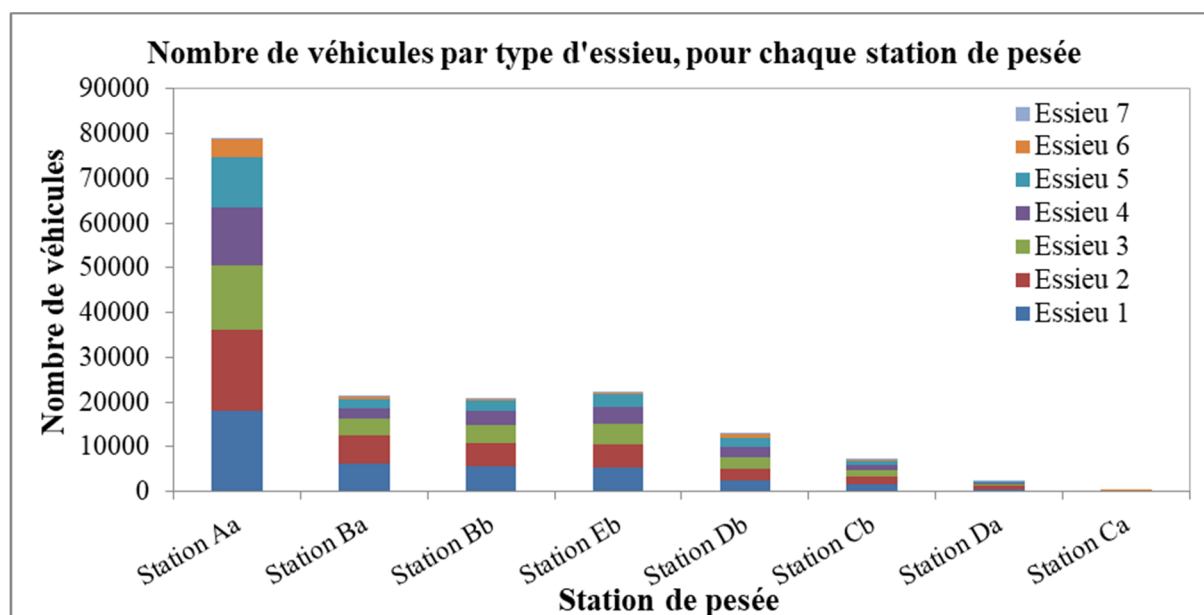


Figure 1.6 Histogramme du nombre de véhicules par type d'essieu et par station de pesée

1.5.2.2 Mesures des dégradations

Les dégradations sont répertoriées sur des schémas itinéraires : la route est découpée en zone homogène en fonction de la valeur des indices IRI, Is, Id et If. Toutes les mesures ont été réalisées au cours de l'année 2016, une journée par section de route.

Les mesures des dégradations ont été effectuées à proximité des stations de pesées sur un kilométrage réduit par rapport à la longueur totale de la route.

Tableau 1.9 Longueur des portions de route pour la mesure des indices

Section	Direction	Longueur de la portion de route pour la mesure des indices
A	a	14 km
B	a	8 km
	b	
C	a	16 km
	b	
D	a	
	b	
E	b	

La moyenne et l'écart type de l'IRI et des indices Id, If et Is sont calculés à partir des valeurs référencées dans les schémas itinéraires spécifiques à chaque portion de route. La Figure 1.7 propose un exemple de schéma itinéraire.

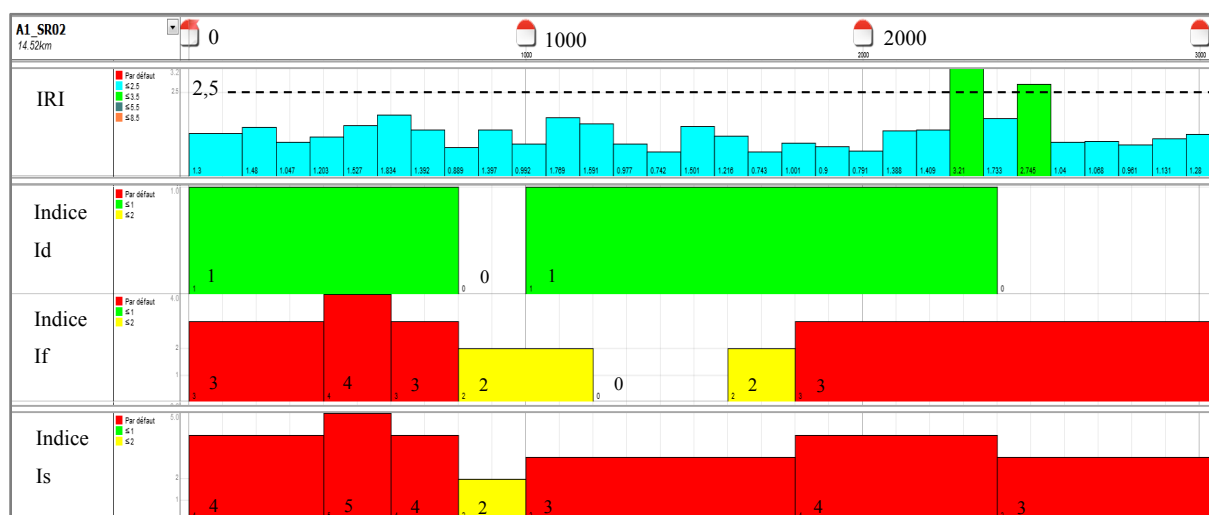


Figure 1.7 Schéma itinéraire pour les trois premiers kilomètres de la Route Aa

1.6 Résultats

1.6.1 Routes à intervention récente

Pour les routes A et B, la dernière intervention date respectivement de 2014, soit 2 ans d'ancienneté au moment des mesures, et de 2007, 9 ans d'ancienneté. Les résultats des sections de route Aa, Ba et Bb sont mis en évidence dans les trois graphiques suivants par un rectangle vert.

1.6.2 Routes en service depuis plus de 20 ans

Pour les routes C et D, la dernière intervention date respectivement de 1995, renforcée il y a 21 ans au moment des mesures, et de 1990, soit 26 ans de service et aucune intervention depuis sa construction. Les résultats obtenues pour les sections de routes Ca, Cb, Da et Db sont encadrés en bleu.

1.6.3 Route en service depuis plus de 30 ans

La route E a été construite en 1969 et renforcée en 1986, soit 30 ans de service à la date des mesures. Il s'agit de la plus vieille route de notre échantillon. Les valeurs des indices de la route Eb sont mises en valeur par un encadré rouge.

Pour les indices Id et Is, les valeurs qui apparaissent dans les schémas itinéraires sont entières. Il a été choisi de ne représenter que leur moyenne respective car les points graphiques, traduisant les valeurs entières des indices, se seraient uniquement superposés et le graphique aurait perdu en clarté.

En revanche, les valeurs de l'IRI sont plus nombreuses et possèdent des décimales. De fait, il devient possible et pertinent de visualiser la dispersion des valeurs de l'IRI pour chaque section de route.

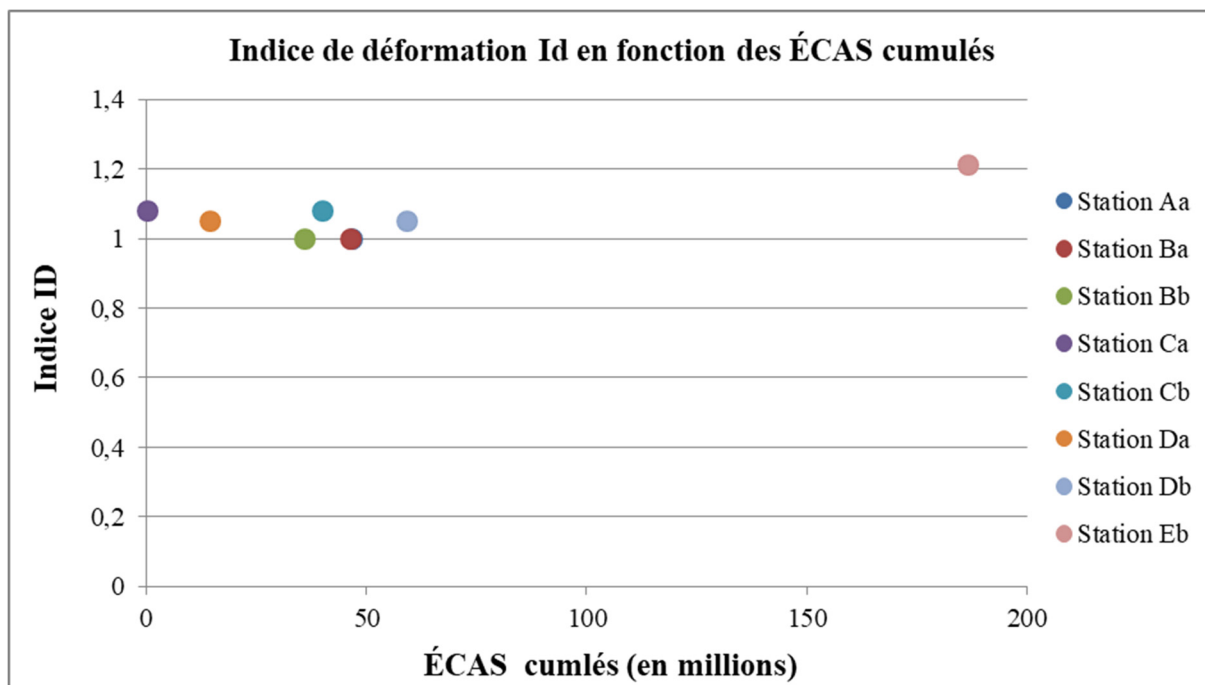


Figure 1.8 Indice de déformation en fonction des ÉCAS cumulés

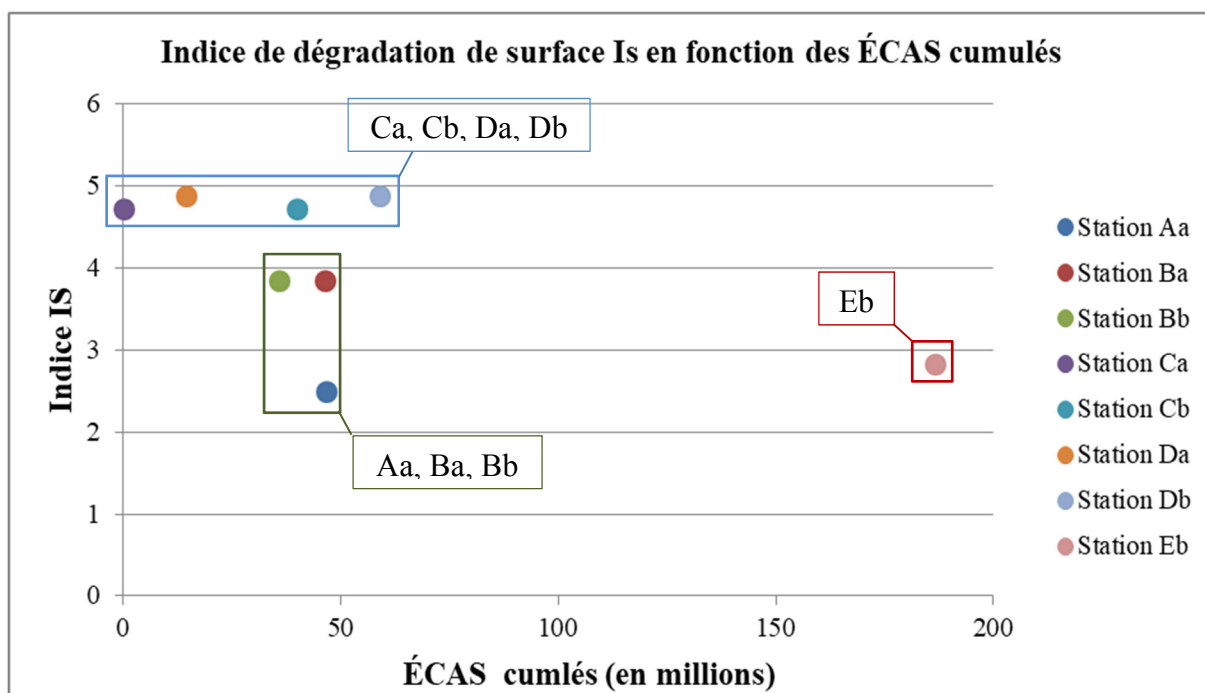


Figure 1.9 Indice de dégradation de surface en fonction des ÉCAS cumulés

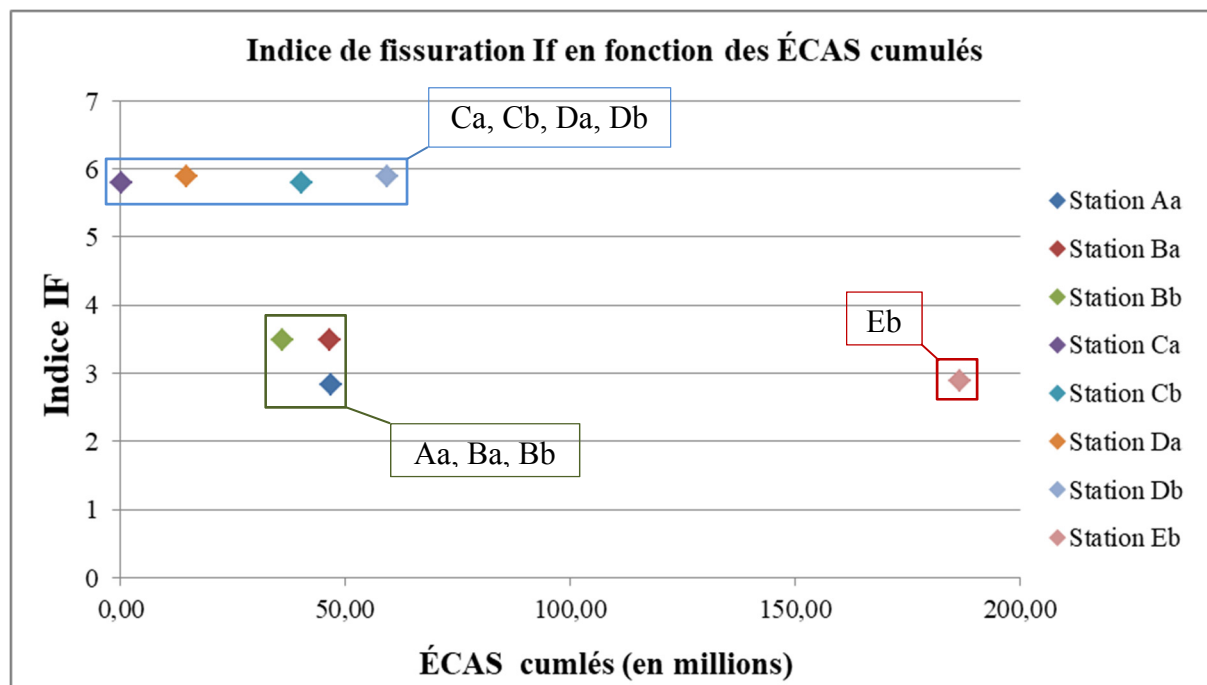


Figure 1.10 Indice de fissuration de surface en fonction des ÉCAS cumulés

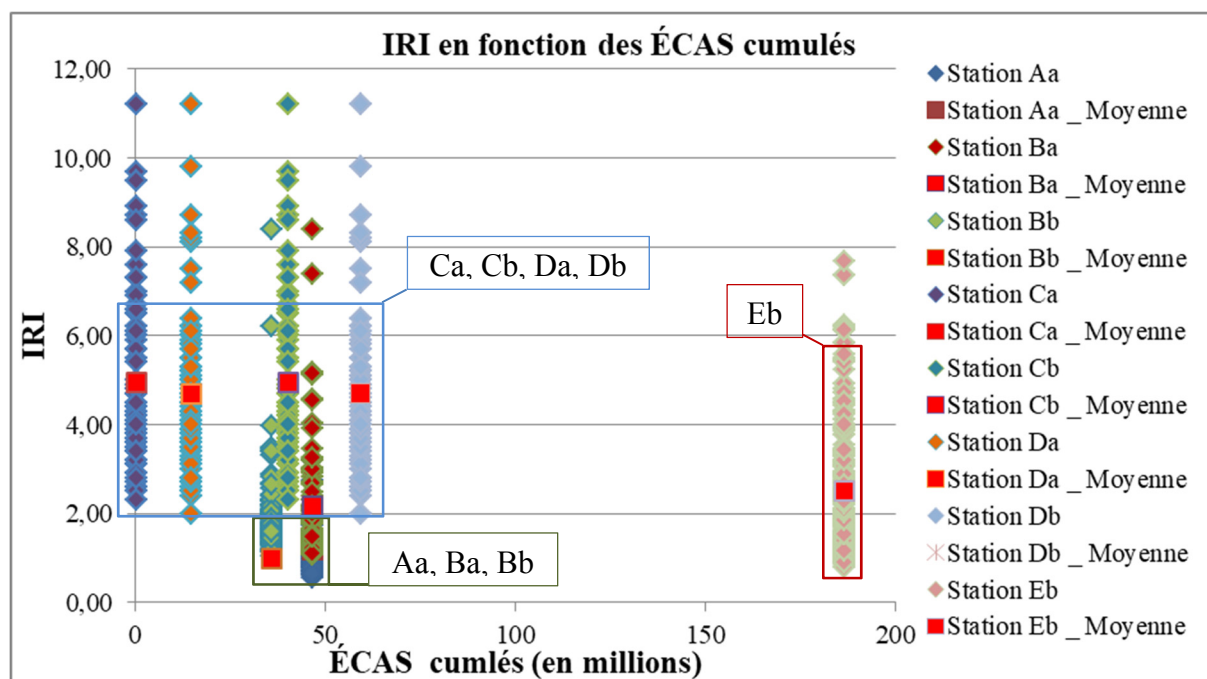


Figure 1.11 Indice IRI en fonction des ÉCAS cumulés

1.7 Analyse des résultats

Les sections Aa, Ba et Bb subissent un trafic intense, aussi bien du point de vue du nombre de véhicules lourds circulant que de leurs charges aux essieux. Il s'agit aussi des routes étudiées les plus jeunes en terme de renforcement. Ces routes possèdent les meilleurs indices, avec un IRI variant entre 1.2 et 2.2, et des indices Id, If et Is inférieurs à 4. Elles sont en bonne condition.

Les sections Ca, Cb, Da et Db subissent un trafic moindre par rapport aux routes précédentes, elles sont toutefois sollicitées car les charges des véhicules sont importantes d'après la valeur des ÉCAS cumulés. Ce sont les routes les plus détériorées avec des valeurs d'indices élevées : un IRI et un indice If supérieurs à 4,7 en moyenne, et Is excédant 5,7. Les routes présentent de sérieuses détériorations, leur état est très mauvais. Malgré les différences notables d'ÉCAS cumulés et de densité de circulation, les valeurs des indices IRI, Is et If sont alignées. Or un alignement horizontal des points traduit l'absence de lien entre les abscisses et les ordonnées.

Les valeurs de l'indice Id sont en moyenne proches de 1. Cela signifie qu'aucune route ne présente de déformation ou d'ornières sérieuses.

La route Eb possède un IRI de 2,5 et les autres indices sont inférieurs à 2,85 en moyenne. Pourtant il s'agit de la route la plus vieille, extrêmement sollicitée au vu des ÉCAS cumulés. La section Eb devrait présenter les pires dispositions si l'état de la route était lié linéairement aux ÉCAS cumulés. Or elle est en meilleur état que des routes 10 fois moins sollicitées.

Les cas étudiés présentent une absence de lien évident entre l'état de la route et les ÉCAS cumulés, entre l'état de la route et le nombre de véhicules y circulant. Les détériorations de surface de la route ne sont pas directement liées au trafic et à son agressivité. Donc la source des dégradations n'est pas le trafic.

Les routes renforcées récemment présentes les meilleures caractéristiques. Les routes non-entretenuées sont aujourd'hui en très mauvais état. Il est recommandé d'intervenir sur ces routes afin de les réhabiliter puis d'effectuer un entretien régulier par la suite pour protéger cet investissement. Il serait également pertinent de référencer les chaussées sensibles à la surcharge afin de définir les raisons de leur défaillance et d'adapter le traitement de renforcement.

La stratégie adoptée ici pour rejeter la conjecture initiale selon laquelle les véhicules lourds sont seuls responsables de la dégradation du réseau routier, est l'utilisation d'un contre-exemple, fréquent en logique et en mathématiques. L'expérience s'appuie sur une recherche quantitative, dont le but est de déterminer la relation entre des variables indépendantes au sein d'un échantillon, pour ensuite généraliser les observations pour une plus large population (Leedy & Ormrod, 2014).

Cette expérience montre qu'il est nécessaire de coupler les relevés des dégradations avec d'autres informations, spatiales et historiques, afin de déterminer la source unique ou les sources combinées des dégradations, pour endiguer le phénomène de détérioration.

Il est recommandé, pour renforcer cette analyse, d'effectuer un suivi historique des dégradations et de la valeur de l'IRI afin de tracer les courbes de l'état de la chaussée en fonction de l'âge et de la sollicitation ; et de réaliser des essais théoriques sur des routes expérimentales dans différentes conditions pour déterminer s'il existe une relation globale entre dégradation et trafic.

1.8 Conclusion et recommandations

Ce chapitre a permis de référencer les moyens actuels dont disposent les experts routiers pour classer et quantifier les dégradations de la surface de la chaussée. Le trafic est considéré dans de nombreux articles et études comme la principale source des dégradations de la chaussée. Les mesures législatives et les normes sur les surcharges et les dimensions des véhicules abondent, encouragées par ce constat.

Or, l'analyse des sections de routes sélectionnées a permis de rejeter la conjecture selon laquelle le volume et l'agressivité du trafic sont pleinement responsables des détériorations de la chaussée. Si la circulation n'est pas responsable, l'investigation doit s'orienter vers les défauts de conception de la chaussée, les problèmes de mélange et de mise en œuvre ou encore vers des raisons environnementales ou climatiques spécifiques à la zone étudiée. Le gouvernement du pays investigué impose des normes sur les surcharges et les dimensions des véhicules, croyant sauvegarder les infrastructures et les investissements routiers. Il est important d'insister sur le fait que les efforts réalisés par les institutions sont basés sur un diagnostic erroné. Ces erreurs sont des conséquences économiques très importantes.

Cette étude remet en question la pleine responsabilité du trafic et donc la fiabilité des diagnostics. Il est donc recommandé de revenir aux fondamentaux des tableaux de causalité afin de mener une recherche approfondie sur les causes de la détérioration qui conduira au choix optimal d'une stratégie d'intervention au niveau technique.

Les limites de l'expert et des outils de modélisation affectent les diagnostics des causes de dégradation. Doubles du manque de fiabilité démontré de ces diagnostics, le développement d'une méthode d'auscultation, plus efficace et plus fiable, est nécessaire. La répétabilité et la reproductibilité des résultats ne doivent plus dépendre des notes manuscrites des experts. Ainsi, l'outil d'aide à la prise de décision doit être automatisé, afin de réduire la marge d'erreur de l'expert. Il doit permettre de rassembler, confronter et de visualiser toutes les données techniques pour l'épauler dans l'identification des sources de dégradation.

CHAPITRE 2

QUANTIFICATION ET MONÉTISATION DES ÉMISSIONS POLLUANTES ÉMISES PAR LA CIRCULATION DES VÉHICULES

Le déplacement des populations et des marchandises contribue fortement au développement économique et à l'amélioration de la qualité de vie. La circulation routière est devenue un élément essentiel de la vie moderne (United Nations, 2001).

Toutefois, la route voit ses bénéfices ternis par le contre-point de ces effets néfastes et nocifs (United Nations, 2001). En effet, la circulation routière est à l'origine d'émissions polluantes importantes : les rejets dans l'atmosphère de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone, de dioxyde d'azote, d'oxydes de soufre, d'hydrocarbures et de particules fines ont des conséquences dramatiques sur le bien-être et la santé des populations, les écosystèmes naturels, l'agriculture et les infrastructures (Han & Naehar, 2006). De plus, les préoccupations environnementales sont désormais au cœur du débat économique, politique, sanitaire et éthique. Les études menées par l'Organisation Mondiale de la Santé, les Nations Unies et de nombreuses agences gouvernementales démontrent l'existence d'un engagement mondial dans cette lutte environnementale (Künzli et al., 2000).

Or, de nombreuses études ont démontré que les caractéristiques de la chaussée, telles que la classe du revêtement, le type de matériaux ou la rugosité de la couche de surface influencent la quantité et le type de nuisances émises par les véhicules (Bueno et al., 2013; Gillespie & McGhee, 2007; Kawakami et al., 2017; Pellecuer, 2014). Le cahier des charges spécifiant les éléments de construction et d'entretien est créé puis détenu par les administrations routières.

Cependant, la gestion de des impacts environnementaux et sanitaires dépasse largement le cadre traditionnel des applications des administrations routières. En effet, le choix d'une stratégie d'intervention est essentiellement basé sur son coût. Les coûts classiquement pris en compte par les systèmes de gestion des chaussées sont ceux de la nouvelle construction, de l'entretien, de la réhabilitation et les coûts pour l'utilisateur ; les seuls paramètres dits

« environnementaux » évalués sont le drainage et les effets sur le climat (Pellecuer, 2014). Dès lors, les impacts environnementaux doivent être associés à un coût pour être intégrés dans les modèles de gestion au même titre que ceux cités précédemment.

Notre recherche commence par une revue de la littérature examinant les impacts environnementaux engendrés par la circulation routière et référant les études sur la monétisation des émissions polluantes. L'objectif est de déterminer un coefficient en unité monétaire par tonne, représentant le coût des impacts de chaque émission polluante sur des paramètres environnementaux définis.

L'expérience menée dans ce chapitre est la suivante : plusieurs stratégies d'aménagement et d'entretien sur des chaussées existantes sont simulées grâce au logiciel HDM-4. Ce dernier permet uniquement de quantifier les émissions polluantes issues de la circulation routière mais pas de les monétiser. Par la suite, les taux de polluants estimés par le HDM-4 pour chacune des stratégies sont multipliés par un coefficient en dollars par tonne, spécifique à chaque émission. Un coût environnemental pourra être attribué à chaque type d'intervention. Ce coût, adapté à la région étudiée, devra constituer un ordre de grandeur réaliste du véritable montant des émissions générées par le trafic en fonction de la stratégie adoptée.

Ce chapitre a pour vocation de démontrer l'intérêt éthique, sanitaire et économique de la prise en compte des impacts environnementaux dans le processus de gestion de chaussées afin de sélectionner la stratégie d'intervention optimale pour un réseau détérioré. De ce fait, la comptabilisation des impacts environnementaux devient une application primordiale de l'outil d'aide à la prise de décision pour le secteur routier qui sera développé.

2.1 Impacts environnementaux, économiques et sanitaires liés à la circulation routière

La circulation routière quotidienne est à l'origine de nombreux impacts environnementaux. Les pollutions atmosphérique et sonore, les poussières et les vibrations générées par le trafic ont des effets néfastes sur les quatre paramètres d'évaluation suivants : le bien-être et la santé des populations, les écosystèmes naturels, l'agriculture et les infrastructures.

2.1.1 Pollution atmosphérique

Selon la Banque Mondiale (2016), la pollution atmosphérique est le quatrième facteur de risque de décès prématurés dans le monde. Il s'agit du type de pollution le plus meurtrier avec 2,9 millions de morts en 2013 (Banque Mondiale, 2016).

La pollution atmosphérique a des répercussions d'ordre physiologique. L'asthme, les maladies pulmonaires obstructives chroniques, les accidents vasculaires cérébraux, le cancer du poumon et la leucémie sont des maladies déclenchées ou dont les symptômes sont aggravés par la pollution de l'air. Il existe également un danger pour les grossesses et les jeunes enfants (naissance prématurée ou mort-nés) (Künzli et al., 2000).

Les Nations Unies ont estimé que plus de 600 millions de personnes sont exposées à des taux dangereux de pollution générée par la circulation (Han & Naeher, 2006). L'étude européenne menée par Künzli et al. (2000), rassemblant des données françaises, autrichienne et suisses a démontré que la pollution atmosphérique représente 6 % de la mortalité totale, soient 40 000 cas dont la moitié est due uniquement à la circulation routière. Cette étude dénombre également 25 000 nouveaux cas de bronchites chroniques chez l'adulte, plus de 290 000 cas des bronchites passagères chez les enfants, 500 000 crises d'asthmes et plus de 16 millions d'arrêts de travail (Künzli et al., 2000).

2.1.1.1 Particules fines (PM)

L'appellation « particules fines » rassemblent des particules présentes dans l'air de tailles, de compositions chimiques et de caractéristiques physiques différentes. Les études environnementales et médicales s'intéressent de plus près aux PM_{10} et aux $PM_{2.5}$, respectivement les particules de diamètre inférieur ou égal à 10 micromètres (μm) et 2,5 μm . Plus les particules sont fines, plus leur capacité à entrer et à se fixer sur les organes humains, surtout les poumons, augmentent (Han & Naehrer, 2006).

Plus de 50 % des émissions de particules en milieu urbain sont dues au trafic, supplantant les rejets réunis de l'industrie, des commerces et du chauffage domestique. Pour la ville de Londres, il s'agit de plus de 80% des particules fines qui sont émises par la circulation des véhicules ; pour Athènes, le taux s'élève à 66,5 %. De plus, les particules générées par le processus de combustion du carburant sont encore plus nocives que celles qui n'ont pas subi cette transformation (Han & Naehrer, 2006).

2.1.1.2 Dioxyde de carbone (CO_2)

Selon l'Agence américaine de Protection de l'Environnement, le secteur des transports est responsable de 33 % des émissions de dioxyde de carbone aux États-Unis. Il atteint ainsi la seconde position derrière le secteur de la production électrique, qui engendre 44% des émissions de dioxyde de carbone dans ce pays (Eisele et al., 2014).

Le dioxyde de carbone entre dans la composition naturelle de l'air à environ 0.04%. Pour une concentration plus élevée, il peut se révéler dangereux voire mortel. Néanmoins, c'est son affiliation aux gaz à effet de serre qui est le plus alarmant. En effet, le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre qui contribue le plus au réchauffement globale, comme le traduit son potentiel de réchauffement global (Eisele et al., 2014). Le potentiel de réchauffement climatique est un indice utilisé pour prédire la contribution au réchauffement climatique d'un gaz à effet de serre par rapport au dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone possède un pouvoir réchauffement 21 fois supérieur au méthane, par exemple (SÉTRA, 2010).

Les gaz à effet de serre engendrent des impacts environnementaux et sanitaires néfastes. Les experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat estiment que la température moyenne risque d'augmenter de 1,4 à 5,8 °C en comparant les prévisions pour 2100 aux données de 1990. Les villes subissent l'effet d'îlot thermique urbain, c'est-à-dire une hausse des températures de 5 à 11 °C par rapport aux zones rurales. L'Association Mondiale de la santé accuse les changements climatiques d'être à l'origine de la mort de plus de 150 000 personnes entre 1970 et 2000 (Campbell-Lendrum & Corvalan, 2007).

L'augmentation du niveau des océans, en lien avec la hausse des températures qui fait fondre des glaciers, menacent les populations, les écosystèmes et les cultures. Le nombre de catastrophes naturelles risque d'augmenter. Enfin, les changements climatiques ont un impact sur les paramètres influençant la transmission de maladies tels que la température, l'humidité, l'évolution des périodes de pluies et d'exposition à certaines affections, ou encore l'apparition de moisissures (Hainesa, Kovatsa, Campbell-Lendrum, & Corvalanb, 2006).

2.1.1.3 Monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone est le produit de la combustion incomplète du carburant. Le monoxyde de carbone est incolore, inodore et stable dans l'air. Les taux les plus élevés ont été mesurés dans les cas de trafic intense ou de congestion. Après inhalation, le CO entre dans les poumons puis passe dans le sang, il empêche alors le transport d'oxygène vers les muscles et le cerveau (Han & Naeher, 2006). Même à de faibles concentrations, il affecte les systèmes nerveux, respiratoire et cardiaque ; il diminue la pression artérielle, l'acuité visuelle et les capacités physiques. D'autres symptômes tels que la fatigue, les migraines, les nausées, les vertiges et la diminution de la capacité de concentration trouvent leur origine dans l'inhalation de ce gaz (Sorin, 2015).

2.1.1.4 Dioxyde d'azote (NO₂)

Le dioxyde d'azote émis lors de phénomènes de combustion, est directement rejeté dans l'atmosphère sous forme de polluant primaire ou est issu de réactions chimiques avec l'air

ambient, classé alors polluant de seconde catégorie. Le dioxyde d'azote irrite les organes respiratoires. Une exposition de courte durée peut engendrer des lésions pulmonaires et à long terme, une réduction de l'immunité et des maladies respiratoires et cardiaques (Environment Protection Authority (EPA), 2004).

La réaction du dioxyde d'azote, combiné aux hydrocarbures et aux composés organiques volatils, avec les rayons du soleil crée un brouillard photochimique opaque et odorant (Han & Naeher, 2006). Ce brouillard réduit la visibilité et le passage des rayons du soleil. Ainsi, un tel mélange bloque la photosynthèse réalisée par les plantes, entraînant un arrêt de leur croissance. De plus, la molécule de dioxyde d'azote est toxique pour la végétation (Environment Protection Authority (EPA), 2004).

2.1.1.5 Oxydes de soufre (SOx)

Le dioxyde de soufre provient de la combustion d'énergies fossiles. Toxiques pour l'humain et la faune, il peut entraîner des problèmes respiratoires, des bronchites, une irritation des voies respiratoires et des maladies cardiovasculaires. Il est également à l'origine de pluies acides qui affectent particulièrement les écosystèmes, mais aussi les cultures et les bâtiments. Le dioxyde de soufre combiné à d'autres particules peut engendrer un brouillard, diminuant la visibilité (New Zealand Ministry for the Environment, 2016).

2.1.1.6 Hydrocarbures

Les hydrocarbures trouvent leur origine dans la combustion incomplète des énergies fossiles, soit du carburant des véhicules et plus particulièrement des poids-lourds et des moteurs diesel. La famille des hydrocarbures réunit près de 100 types différents.

Les hydrocarbures sont des agents cancérigènes et mutagènes (Han & Naeher, 2006). L'irritation des yeux et des voies respiratoires, les problèmes respiratoires détaillés précédemment peuvent également être engendrés par les hydrocarbures composant le carburant des véhicules.

2.1.1.7 Composés organiques volatils (COV)

La circulation routière est le principal émetteur de composés organiques volatiles dans les zones urbaines industrialisées. Plus de 300 types de composés organiques volatils sont référencés. Les BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes) comptent parmi les plus connus et les plus nocifs. Ces substances possèdent un taux élevé de toxicité et sont cancérigènes pour les humains. Elles affectent en particulier le système nerveux (Han & Naehrer, 2006).

2.1.1.8 Plomb (Pb)

Dans la famille des métaux lourds issus de la combustion, le plomb fût principalement émis par la circulation routière. En 1997, l'essence au plomb engendrait 90 % des émissions de plomb dans l'atmosphère dans les zones urbaines des pays en développement. De plus, régionalement, certaines essences étaient plus riches en plomb et une forte densité de véhicules en consommait (Bennett & Greenwood, 2004).

Le plomb s'attaque au système nerveux, au système immunitaire, à l'appareil reproducteur, au foie, aux reins et aux os. Les jeunes enfants sont les plus vulnérables. Une intoxication au plomb peut entraîner des retards mentaux, des troubles du comportement, de l'anémie, de l'hypertension, des déficiences rénales et une diminution de l'immunité. Même à faible concentration, le plomb représente un danger pour la santé humaine (Organisation mondiale de la santé, 2016).

Considéré comme hautement toxique, son utilisation dans l'essence fut interdite dès 1975 aux États-Unis, puis en Europe en 2000. Depuis 2006, l'Afrique de l'Ouest s'est engagée dans la voie du sans plomb également (Smée, 2006).

Ce mémoire portera essentiellement sur les émissions polluantes. Toutefois, les autres types de nuisances ne doivent pas être passés sous silence. Dans un souci d'exhaustivité, les impacts engendrés par les poussières, la pollution sonore et les vibrations sont abordés.

2.1.2 Poussières ou particules grossières

Les poussières ou particules grossières se distinguent des particules fines de par la taille des éléments qui les composent. (CITEPA, 2017)

La poussière est soulevée par les véhicules lorsqu'ils roulent sur une chaussée mal-entretenu, non nettoyée ou le long d'accotement terreux. Ces poussières volatiles retombent sur les appareils électroniques, mécaniques, tapissent les sols et sont inhalées par les êtres vivants.

La poussière abîme et dérègle les équipements électroniques et mécaniques. Elle réduit la fertilité des sols cultivables et recouvrent les végétaux bloquant la photosynthèse. Des dépenses supplémentaires de nettoyage et de maintenance sont nécessaires pour lutter contre les poussières (Çelik, Kamali, & Arayici, 2017).

La concentration élevée de poussières a des conséquences importantes sur la santé telles que l'augmentation du nombre de personnes concernées par des problèmes respiratoires et l'augmentation de la mortalité liée aux maladies respiratoires et cardiovasculaires (Çelik et al., 2017).

2.1.3 Pollution sonore

Le bruit est le grand oublié des impacts, continuellement placé en second plan derrière la pollution atmosphérique et les gaz à effet de serre. Il représente pourtant un danger important sur la santé des riverains, les infrastructures et la biodiversité (Pellecuer, 2014).

Dès 1996, la commission européenne estime qu'environ 20 % des européens, soit 80 millions de citoyens souffrent du bruit. Les scientifiques comptabilisaient alors près de 170 millions de personnes vivant dans des zones où le bruit est une nuisance diurne sérieuse (Nijland, Van Kempen, Van Wee, & Jabben, 2002). Les effets sur la santé des personnes exposées sont de deux types : socio-psychologiques, par exemple l'anxiété, l'irritabilité, les troubles du sommeil, la baisse de performance ou le manque de concentration ressentie au travail en sont les principaux symptômes, et physiques, telles que l'hypertension et les maladies cardiaques. Selon le niveau de bruit, les personnes se plaignent également du désagrément, à l'origine des troubles socio-psychologiques (Nijland et al., 2002). Le bruit affecte le comportement social, la santé mentale et physique des personnes (Çelik et al., 2017).

L'importance du trafic, la vitesse des véhicules, les caractéristiques des véhicules et de la route constituent la base du bruit de la circulation et modulent son intensité. De ce fait, l'augmentation de la densité de population, de l'urbanisation et de la mobilité de personnes a pour effet une augmentation du nombre de moyens de transport. Les niveaux sonores, auxquels nous sommes exposés, seront de plus en plus élevés dans les années à venir (Nijland et al., 2002).

2.1.4 Vibrations

Les effets des vibrations sont liés à ceux du bruit. La dissipation dans le sol et dans l'air de l'onde vibratoire différencie les effets vibratoires de sonores (Pellecuer, 2014). Ces ondes causent des dégâts sur les structures environnantes et peuvent affecter les appareils utilisés dans les entreprises et les hôpitaux (Çelik et al., 2017).

Du point de vue de la santé, les vibrations peuvent avoir les mêmes effets psychologiques et physiologiques que ceux listés pour le bruit (Çelik et al., 2017). Les écosystèmes sont touchés de la même manière que les humains et en fonction de l'intensité de l'exposition (Pellecuer, 2014).

2.2 Mise en évidence des liens entre les impacts environnementaux et la route

2.2.1 Caractéristiques des chaussées

2.2.1.1 Texture de surface de la chaussée

La distribution du contact entre le pneu et la chaussée varie selon la texture de surface, générant des forces de compression et des composantes vibrantes radiale et tangentielle à l'interface (Bueno et al., 2013). Les textures « négatives » sont uniformes et les textures « positives » sont rugueuses. La zone de contact est plus petite pour les éléments de routes appartenant à la première catégorie (Kawakami et al., 2017).

La friction des roues sur la chaussée arrache des particules et des poussières. En suspension dans l'air, leur dispersion est accentuée par le trafic et le vent (Pellecuer, 2014). La nature antidérapante et rugueuse de la chaussée qui vise à garantir la sécurité des usagers, crée une nuisance sonore importante. À plus de 40 km/h, c'est le contact entre la roue du véhicule et la surface de la chaussée qui constitue la source principale de bruit (Bueno et al., 2013).

Afin de traduire l'état de dégradation de la route, les administrations routières disposent de deux indices : l'uni qui traduit la régularité du profil de la chaussée en long et en travers, et l'IRI. Pellecuer (2014) soutient qu'une bonne valeur de l'uni et une faible rugosité permettent une réduction de la pollution atmosphérique et de l'émission de gaz à effet de serre (Pellecuer, 2014). De plus, les études de Gillespie et McGhee (2007) et Kawakami et al. (2017) exposent le lien entre le vieillissement de la route, traduit par l'augmentation de la valeur de l'IRI, et l'augmentation de la consommation de carburant. Les études menées aux États-Unis, citées dans l'article de Gillespie et McGhee (2007), montrent que la consommation de carburant par voiture et par camion augmente respectivement de 0.13 % et de 0.45 % pour chaque incrémentation de la valeur de l'IRI de 1% (Gillespie & McGhee, 2007). Donc, si la route est en mauvais état, $IRI > 1.7$ m/km, (Ministère des Transports du Québec, 1999) la consommation de carburant et donc l'émission de substances nocives sont plus importantes. La résistance de roulement étant plus faible dans le cas de textures

« négatives », la route accroche moins et la génération de pollution est moindre (Kawakami et al., 2017).

La macrostructure de la chaussée influence donc grandement la quantité et la gravité des émissions polluantes.

2.2.1.2 État et entretien de la chaussée

Les dégradations de surface de la chaussée telles que les fissures, les ornières et les arrachements sont à l'origine de bruits ponctuels le long de la chaussée, mais répétés par le nombre de véhicules franchissant l'obstacle (Bueno et al., 2013). Les détériorations diminuent la qualité de la couche de surface de la chaussée et en ce sens, entraîne une augmentation du rejet de polluants.

La fréquence de nettoyage de la route, des bordures, des caniveaux et des accotements influence l'émission de particules et de poussières car les défauts de la chaussée agissent comme des réservoirs dans lesquels elles se déposent (Etyemeziana et al., 2003).

2.2.1.3 Localisation, matériaux et géométrie

En plus de l'état de surface de la route, le type de sols, l'épaisseur et les matériaux des couches constitutives de la route influencent le rejet de polluants (Bueno et al., 2013). En effet, les composés chimiques présents dans la chaussée peuvent réagir avec des gaz présents dans l'air sous certaines conditions de température et de pression ou être emportés par les eaux de pluie et contaminés l'air et les sites à proximité par ruissellement (Pellecuer, 2014). De plus, certains mélanges permettent de diminuer l'empreinte environnementale : par exemple, des études européennes et américaines ont démontré que le mélange bitume-caoutchouc permet de diminuer le bruit de 2 à 10 dB par rapport à un mélange bitumineux dense (Bueno et al., 2013).

La localisation et la géométrie de la route, par exemple à proximité d'un chantier, au croisement avec une route non-revêtue ou bien présentant de nombreux virages, peuvent être à l'origine d'une émission de poussières plus importante (Etyemeziana et al., 2003).

2.2.1.4 Vitesse des véhicules

Les routes construites pour accueillir une circulation rapide possèdent des caractéristiques qui devraient les rendre moins polluantes que les routes à basse vitesse. Cependant, la haute vitesse des véhicules empruntant la première catégorie de chaussée entraîne davantage d'émissions polluantes (Etyemeziana et al., 2003). Des contraintes mécaniques s'appliquent sur le caoutchouc du pneu et donc la température du pneu augmente avec la vitesse. Or l'augmentation de la température peut entraîner un arrachement des matériaux constitutifs du pneu, se classant parmi les COV et les poussières (Dahl et al., 2006). De plus, à haute vitesse, les véhicules consomment plus de carburant et rejettent plus de particules (Etyemeziana et al., 2003).

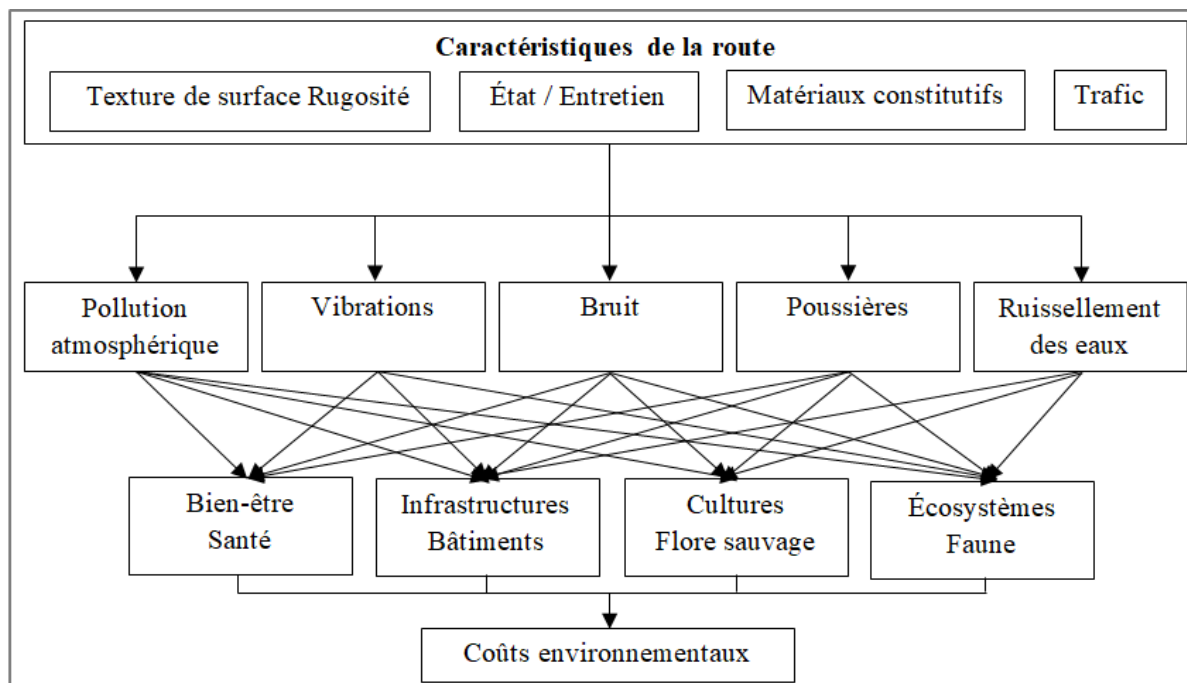


Figure 2.1 Caractéristiques de la route à l'origine des coûts environnementaux
Adaptée de Pellecuer (2014)

2.2.2 Impacts de la phase d'utilisation de la route

Dans les hypothèses initiales de la recherche, il a été choisi de se focaliser seulement sur la phase d'utilisation de la route. La phase d'utilisation est la plus longue de la durée de vie totale de la route. La route est effective et les véhicules l'empruntent. Au cours de cette phase, les dégradations et les défauts apparaissent et la chaussée vieillit. La phase d'utilisation comprend également l'entretien qui constitue actuellement la priorité des systèmes de gestion des chaussées (Kulkarni & Miller, 2003).

La phase d'utilisation de la route comptabilise le plus grand nombre d'impacts environnementaux. Le Tableau 2.1 présente la liste de ses effets classés par catégories touchées : les sols, l'eau, les écosystèmes, l'air, les activités humaines, les déplacements et la réinstallation de populations, le patrimoine et la culture, les sites naturels et enfin la santé et la sécurité.

Tableau 2.1 Impacts environnementaux engendrés par les phases de construction et d'utilisation de la chaussée
Adapté de United Nations (2001)

Paramètres	Impacts environnementaux	
Sol	Glissement de terrain Érosion et modification du relief Sédimentation du bord des routes	Baisse de fertilité Contamination
Eaux	Modification du cours d'eau en surface et en profondeur Dégradation de la qualité de l'eau (déchets, lubrifiants, carburant, détergents) Sédimentation des cours d'eau	
Air	Dégradation de la qualité de l'air	
Sites naturels	Destruction des sites naturels Modification du drainage naturel Dégradation ou destruction de la végétation et des arbres Déforestation et désertification	
Écosystèmes	Dégradation ou destruction d'habitats naturels Dégradation ou destruction de la biodiversité et de la végétation Disparition des zones de reproduction ou de nourriture (animaux aquatiques et oiseaux migrateurs particulièrement touchés) Contamination de sites Transmission de maladies Augmentation du braconnage, de la chasse et de la pêche	
Santé Sécurité	Transmission de maladies Contamination des ressources d'eau potable Accident de la route Fatigue, migraines, nausées, vertiges Bronchites chroniques ou passagères, asthmes Diminution de la pression artérielle, de l'acuité visuelle et des capacités physiques, de la capacité de concentration Troubles nerveux, maladies respiratoires et cardiovasculaires, cancers	
Activités humaines	Division de communautés Désintégration des activités sociales Perturbation ou interruption des modes de transports traditionnels Perte des commerces de bord de routes Dégradation ou perte des habitations de bord de routes	
Déplacements Réinstallation	Déplacement permanent ou temporaire des institutions publiques et privées Déplacement des populations et des commerces	
Culture Patrimoine	Dégradation des sites, des structures et des vestiges archéologiques, historiques, religieux et culturels Dégradation esthétique du patrimoine	

2.3 Exposition des pays en voie de développement

2.3.1 Normes régionales

Les propriétés physiques et chimiques des polluants, qu'ils soient gazeux ou solides (poussières et COV), varient d'une région à une autre. De plus, la composition des carburants, de l'essence ou du diesel alimentant les véhicules, n'est pas universelle (Han & Naeher, 2006). Ne connaissant pas les compositions, ni les moteurs les utilisant et dans lesquels la combustion s'effectue, une généralisation des propriétés des polluants est impossible.

2.3.2 Différences climatiques

Les pays en voie de développement se situent pour leur majorité dans le SUD économique du monde. Leurs conditions climatiques et l'alternance des saisons ne sont pas partagées avec les pays du NORD. Le vent, la pluie et la température sont les trois principaux facteurs influençant la dispersion et l'évolution des émissions polluantes dans l'atmosphère (Han & Naeher, 2006).

En effet, selon les mesures de Han et Naeher (2006) :

- les concentrations en monoxyde de carbone évoluent de manière journalière et saisonnière;
- les taux de dioxyde d'azote et d'hydrocarbures présents dans l'air sont plus forts en hiver qu'en été : les températures élevées accélèrent la dégradation des hydrocarbures donc l'été, les taux sont en baisse;
- les concentrations de polluants à échelle locale décroissent en fonction de la dispersion du vent.

2.3.3 Différences de développement économique

La perception des nuisances, de la pollution et du danger pour la santé dépend des mœurs, de la culture, de la qualité de vie et du niveau de développement du pays. De ce fait, le montant des coûts sociaux ne sera pas identique dans toutes les régions du monde (Çelik et al., 2017).

Les pays en voie de développement n'accueillent pas sur leur route les mêmes véhicules que les pays développés. Malgré un grand nombre de motocyclettes, de nombreux véhicules lourds et de camions empruntent ces chaussées. Les habitudes de conduite, la maintenance des véhicules, l'existence et la qualité du contrôle technique ont un impact direct sur le rejet d'émissions polluantes (Han & Naeher, 2006). De plus, les mesures anti-pollution se font rares dans ces pays.

Les taux de particules fines, de monoxyde de carbone, de dioxyde d'azote et d'hydrocarbures mesurés par Han et Naeher (2006), sont plus importants dans les pays en développement où l'industrialisation et la modification du paysage s'effectuent rapidement. Les plus touchés sont les pays pauvres, paradoxalement, leurs habitants ne contribuent que très minoritairement à l'émission de gaz à effet de serre (Campbell-Lendrum & Corvalan, 2007).

Les villages et des villes s'organisent le long des routes, le passage des véhicules garantissant les échanges économiques. Les hôpitaux ou les cliniques sont souvent dispersés sur le territoire et de nombreuses populations n'y ont pas accès. Or, les admissions à l'hôpital sont enregistrées et permettent de comptabiliser une partie des impacts sanitaires comme le présenteront les études 1 et 2 de la section suivante.

Enfin, la qualité des routes est un facteur important dans l'émission de polluants. Les routes de terre, nombreuses dans les pays en développement, augmentent le temps de trajet, la consommation de carburant, l'émission de particules et le soulèvement des poussières. De plus, le réseau routier, peu développé dans ces pays, est vieillissant et rarement entretenu.

2.4 Études sur la monétisation des émissions

L'analyse économique pour la gestion des chaussées se limite actuellement à la comptabilisation d'effets tangibles et mesurables, aussi appelés effets directs. Or, les impacts sur la santé, le bien-être, la qualité de vie et l'esthétisme ne possèdent pas de valeur marchande, ce sont des effets indirects ou externes (Nijland et al., 2002). Les coûts environnementaux se définissent comme les coûts liés à une détérioration réelle ou potentielle d'actifs naturels en raison d'activités humaines. Il se révèle impossible d'attribuer un coût précis à ces prestations intangibles. Ces effets sont généralement sous-estimés ou mis de côté car difficilement justifiables, et quelques fois, ils sont juste cités pour tenter de les intégrer tout de même au processus.

De nombreux efforts ont été réalisés pour développer des méthodes pour quantifier les produits sans valeur intrinsèque par une substitution de leur montant. Cependant, restées à l'état théorique, leurs applications pour les effets environnementaux dans le processus de gestion des chaussées sont très limitées.

Dans la suite de ce chapitre, seule la pollution atmosphérique sera prise en compte. Dans la littérature, il s'agit de l'impact le plus référencé et les tentatives de comptabilisation et de monétisation sont moins rares. De plus, l'impact sanitaire possède le plus gros poids économique et la grande majorité des cas de santé listés dans la revue de la littérature suivante est attribuable à ce type de pollution. La prise en considération de ces impacts fournira un ordre de grandeur minimisé de l'ensemble des coûts environnementaux dus à la circulation routière.

Les études suivantes ont été choisies pour la pertinence de la méthode adoptée en vue de monétiser les émissions polluantes et pour leurs résultats quantitatifs qui seront exploités dans la partie suivante.

2.4.1 Étude n°1

L'étude n°1 a été réalisée en 2006 à Vancouver, au Canada, par RWDI. Le projet visait à évaluer l'ampleur et l'intensité des effets sur la santé humaine, sur l'environnement et les impacts socio-économiques des émissions polluantes qui résulteraient de la mise en œuvre du projet de métropolitain à Vancouver. Ce projet était supporté par le ministère des Transports de Colombie-Britannique. Le projet compare deux stratégies : « réaliser le projet » ou « ne rien faire » (RWDI Inc., 2006).

2.4.1.1 Hypothèses et domaines de restriction

Les hypothèses régissant l'évaluation du trafic sont (RWDI Inc., 2006) :

- le type de véhicule et la vitesse sont pris en compte;
- la congestion est prise en compte;
- une relation linéaire lie la concentration en polluant et la morbidité;
- des coefficients régionaux liant véhicules et émissions sont appliqués.

Les polluants et les catégories économiques impactées retenus dans l'étude sont :

- les effets sanitaires pris en compte sont les maladies respiratoires et pulmonaires, les cancers du poumon, les cancers infantiles, les effets indésirables à la naissance, les accidents vasculaires cérébraux et cardiovasculaires (Beaton & Hoghoughi, 2010);
- l'impact du monoxyde de carbone, des particules $PM_{2.5}$ et de l'ozone sur la santé de la population de Vancouver;
- l'impact des particules PM_{10} , des oxydes d'azote et des composés organiques volatiles sur la visibilité;
- l'effet de l'ozone sur les cultures environnantes;
- l'effet de l'ozone sur les infrastructures;
- les contributions primaires et secondaires des particules sont incluses;
- lors de l'évaluation, seules les variations importantes des concentrations en ozone et de particules sont retenues.

2.4.1.2 Méthodes

Les **coûts des dommages** reflètent le montant économique total estimé d'une perte. (Victoria Transport Policy Institute, 2015) Les coûts des dommages marginaux dans cette étude, rassemblent les impacts sur la santé, la dégradation de la visibilité, la perte des revenus agricoles, la détérioration des installations et les répercussions liées au changement climatique. Leur évaluation est quantitative : elle se base sur la monétisation des dommages causés par les polluants retenus pour l'étude (RWDI Inc., 2006).

Afin de calculer les effets de l'ozone et des particules sur la qualité de l'air, un **tableur**, *Reduced-Form Source-receptor Tool (ReFSORT)*, traduit la concentration des émissions en qualité de l'air ambiant. Il utilise la relation source-récepteur pour déterminer les concentrations en polluant. Il incorpore les résultats d'études basées sur des modèles de dispersion et de caractérisation chimique. La relation entre les émissions et la qualité de l'air est supposée linéaire. Cette linéarité est ensuite ajustée par un coefficient qui tient compte des phénomènes physiques (dispersion) et chimiques (évolution de la concentration dans l'air ambiant et réactions secondaires) qui influencent les résultats sur la qualité de l'air. Une relation non linéaire simplifiée entre l'ozone et ses précurseurs est appliquée (RWDI Inc., 2006).

L'évaluation du coût de la visibilité est basée sur la **disposition à payer** des citoyens de Vancouver. Pour cette estimation, il s'agit d'interroger les individus pour savoir quelle valeur ils attachent à un bénéfice intangible (Victoria Transport Policy Institute, 2015). Cette étude d'opinion affirme que la population serait prête à payer 30 dollars par foyer par année pour améliorer la visibilité de 5% (RWDI Inc., 2006).

2.4.1.3 Résultats

L'étude n°1 débouche sur des coefficients en dollars canadiens par tonne représentant le coût des impacts de chaque émission. Les résultats numériques de l'étude sont présentés dans le Tableau 2.2 :

Tableau 2.2 Coûts des polluants atmosphériques par catégorie économique
(CAD\$ (2005) / tonne)
Tiré de RWDI Inc. (2006)

Catégories économiques	Polluants	Coûts des dommages (CAD\$ / tonne)
Santé	CO	205 \$ / tonne
	$PM_{2.5}$	317 000 \$ / tonne
	O_3	1 086 \$ / tonne
Visibilité	PM_{10}	3 175 \$ / tonne
	NO_x	934 \$ / tonne
	COV	44 \$ / tonne
Agriculture	O_3	280 \$ / tonne
Infrastructures	O_3	373 \$ / tonne

2.4.1.4 Limites et incertitudes

Certaines incertitudes peuvent être le fruit de la simplicité des relations entre les émissions et la qualité de l'air, utilisées en particulier pour traduire la formation d'ozone. Les incertitudes qualitatives et quantitatives concernant les effets sur la santé d'une exposition aux émissions polluantes sont celles qui sont le plus à même d'induire des modifications dans les valeurs des coefficients.

Pour les relevés dans les agglomérations, l'outil source-récepteur n'est pas sensible aux variations brutales de NO_x . Les résultats présentés sont valables pour de petites variations de concentrations, mais peuvent être faussés ou entraîner des incertitudes si la concentration en NO_x des villes étudiées venait à chuter.

2.4.1.5 Remarques

L'étude n°1 a été menée à Vancouver, au Canada, ville possédant un poids économique important dans un pays développé. Des effets socio-économiques tels que l'emploi, la concurrence et le tourisme, sont évoqués. Il est affirmé que la pollution peut aussi bien créer de l'emploi (dans la santé, par exemple) qu'en supprimer (fuite des populations à cause de la mauvaise qualité de l'air, par exemple). Le tourisme et les nouvelles technologies seraient les secteurs les plus affectés par une diminution de la qualité de l'air.

Pour les pays en voie de développement, les impacts de la route et des émissions sur l'emploi et la concurrence sont également des points primordiaux à envisager, mais pas dans les mêmes proportions qu'une ville comme Vancouver. Si l'extrapolation des résultats d'un pays à un autre est validée, il faudra prendre en considération que les coefficients de cette étude sont définis pour une grande ville dans un pays développé et les adapter au cas d'étude.

2.4.2 Étude n°2

L'étude n°2 a été menée dans 25 pays de l'Union Européenne, en 2005. Quatre zones maritimes sont distinguées des zones terrestres. L'objectif originel de cette étude était de fournir un coût des dommages par tonne de polluant pour les particules ($PM_{2.5}$), le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH_3), l'ozone (O_3) et les composés volatiles organiques (COV), pour chaque pays étudié (AEA Technology Environment, 2005).

2.4.2.1 Hypothèses et domaines de restriction

Les territoires terrestres sont distingués des zones maritimes, afin de considérer l'influence de l'Océan Atlantique et des mers sur les polluants (vent, climat et exposition des populations).

Les polluants évalués sont : les particules ($PM_{2.5}$), le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH_3), l'ozone (O_3) et les composés volatiles organiques (COV).

Les zones étudiées mesurent 50 x 50 km, afin d'obtenir des données météorologiques et chimiques précises et représentatives.

Les impacts quantifiés sont listés dans le Tableau 2.3 et les effets qui ne sont pas pris en compte dans l'étude, sont listés dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.3 Impacts quantifiés
Adapté de AEA Technology Environment (2005)

Catégories	Polluants	Effets comptabilisés
Santé humaine	$PM_{2.5}$	- effets chroniques sur la mortalité, comptabilisés chez les adultes de plus de 30 ans et chez les enfants. - effets chroniques sur la morbidité : les cas de bronchites sont comptabilisés. - effets aigus sur la morbidité comptabilisés par le biais des : admissions à l'hôpital pour problèmes respiratoires admissions à l'hôpital pour problèmes cardiaques consultations du médecin traitant jours d'arrêt maladie jours de manifestation des symptômes prise d'un traitement médical
	O_3	effets aigus sur la morbidité comptabilisés par le biais des : admissions à l'hôpital pour problèmes respiratoires jours d'arrêt maladie jours de manifestation des symptômes prise d'un traitement médical
Agriculture	O_3	perte sur les récoltes : orge, coton, fruit, raisin, houblon, millet, maïs, avoine, olives, pomme de terre, cola, riz, seigle, soja, betterave, tournesol, tabac, blé, légumineuses.

Tableau 2.4 Effets exclus des analyses
Adapté de AEA Technology Environment (2005)

Catégories	Effets	Commentaires
Santé humaine	Effets chroniques de O_3 sur la mortalité et la morbidité	Des effets chroniques sont supposés mais n'ont pas été prouvés.
	Effets directs SO_2 , NO_x , COV	Ces effets ne sont pas inclus dans le modèle EMEP sur lequel se base l'étude.
	Effets des COV après formation de particules organiques secondaires	
Agriculture	Effets directs SO_2 , NO_x	Ces effets sont considérés négligeables d'après les travaux antérieurs.
	Dommages visibles sur les produits commercialisés	Ces dommages sont potentiellement importants selon les cultures touchées.
	Interactions entre polluants et vermines, maladies, climat	Les données exposition-réponse ne sont pas disponibles.
	Acidification	Cet effet est négligeable d'après les travaux antérieurs.
Infrastructures	Effets du SO_2 et de l'acidité sur les bâtiments	Il existe un manque des données exploitables.
	Effets sur le patrimoine culturel	
	Effets sur l'acier dans le béton armé	
	Effet des PM sur la propreté des bâtiments	
	Effets O_3 sur la peinture et le caoutchouc	
Écosystèmes	Effets d'une exposition accrue de O_3 de la biodiversité	L'évaluation des impacts écologiques est encore trop incertaine
	Effets de l'acidification sur la biodiversité	
Visibilité	Changement de la portée visuelle	L'impact est jugé de faible importance pour l'Europe.
Ressources d'eau potable	Quantité et qualité	Il existe un manque des données exploitables.

Les effets exclus de l'étude sont en majorité considérés comme négligeables ou ne donnant pas lieu à une augmentation significative du coût des dommages par tonne de polluant. Toutefois, cette omission entraîne une sous-estimation des dommages.

2.4.2.2 Méthodes

Le modèle de dispersion est basé sur le modèle EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*).

Les analyses suivent la méthode du cheminement d'impacts. La **méthode de cheminement d'impact** (*Impact Pathway Analysis _ IPA*) est qualifiée de méthode ascendante : la source des émissions constitue le point de départ, l'évaluation des paramètres environnementaux comme la qualité de l'air, des sols et de l'eau, constitue le second palier et enfin, l'estimation des bénéfices et des coûts environnementaux boucle le chemin. Le schéma suivant montre la démarche suivie par cette méthode :

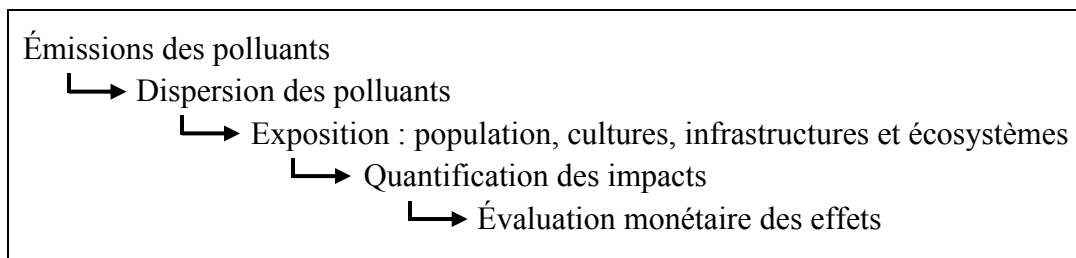


Figure 2.2 Schéma de la démarche de la méthode IPA pour les émissions polluantes

De ce processus, deux scénarios sont systématiquement comparés : celui de référence et le cas étudié. Les données des récepteurs, la concentration en polluants et les fonctions exposition – réponse associées permettent de définir les impacts sur la santé, l'agriculture et les infrastructures spécifiques au cas étudié. Les effets globaux sont également pris en compte.

Lors de la dernière étape de budgétisation, les impacts physiques sont convertis en terme monétaire. Les dommages sont comptabilisés. Les prix du marché, qui sont tangibles, peuvent être utilisés pour estimer les dommages. Cependant, pour les intangibles, on se base sur la **disposition à payer** des populations pour estimer le préjudice dû à la circulation (University of Stuttgart, 2014).

L'évaluation des impacts est basée sur l'**analyse coûts / avantages**, entreprise par le programme CAFE (Clean air Force Europe).

Dans cette étude, afin d'évaluer les valeurs monétaires liées à la mortalité et à la morbidité, la médiane et de la moyenne estimées de la **valeur d'une année de vie** (*value of a life year lost*, VOLY) et de la **valeur d'une vie statistique** (*value of statistical life*, VSL) sont utilisées. Elles se définissent comme le consentement à payer d'un individu pour une réduction du risque de décès (AEA Technology Environment, 2005)

2.4.2.3 Résultats

Finalement, les résultats numériques obtenus lors de cette étude sont rassemblés dans le tableau suivant :

Tableau 2.5 Moyennes des coûts des dommages par tonne d'émission (€ (2005) / tonne)
Tiré de AEA Technology Environment (2005)

Pays Européens	
Ammoniac (NH_3)	31 000 € / tonne
Oxydes d'azote (NO_x)	12 000 € / tonne
Particules ($PM_{2.5}$)	75 000 € / tonne
Dioxyde de soufre (SO_2)	16 000 € / tonne
Composés organiques volatiles	2 800 € / tonne
Zones maritimes d'Europe	
Oxydes d'azote (NO_x)	6 900 € / tonne
Particules ($PM_{2.5}$)	36 000 € / tonne
Dioxyde de soufre (SO_2)	11 000 € / tonne
Composés organiques volatiles	2 300 € / tonne

2.4.2.4 Limites et incertitudes

Les résultats sont basés sur la moyenne des émissions polluantes pour chaque pays et par zone maritime, sans distinction entre les émissions rurales et urbaines. Toutefois, de nombreuses analyses spécifiques montrent que les taux de SO_2 , NH_3 et COV émis dans

l'atmosphère, différent lorsqu'il s'agit de zones rurales et urbaines (AEA Technology Environment, 2005).

Les incertitudes résultent des hypothèses de modélisation et des approximations statistiques. Elles peuvent influencer le coût des dommages dans un sens comme dans l'autre pour chaque simulation. Le manque de connaissance sur le phénomène de dispersion, les réactions secondaires et le comportement des polluants entraînent d'autres approximations. Il n'existe pas de modèle, ni de données exploitables pour permettre une quantification parfaite (AEA Technology Environment, 2005).

2.4.2.5 Remarques

Les coûts des dommages par tonne pour chaque polluant sont calculés pour chaque pays ou zone maritime et sont référencés dans la publication. Afin de comparer les résultats des pays entre eux, nous avons calculé la moyenne, l'écart-type et la différence entre la valeur maximale et minimale pour chaque émission.

Tableau 2.6 Comparaison des résultats des émissions (€ (2005) / tonne)

	NH₃	NO_x	PM_{2.5}	SO₂	COV
Moyenne	31 404 €	11 189 €	69 678 €	15 510 €	2 747 €
Écart-type	22 726 €	7 639 €	48 857 €	9 343 €	2 100 €
Pays Européens					
Moyenne		11 913 €	75 250 €	16 296 €	2 826 €
Écart-type		7 809 €	49 525 €	9 611 €	2 135 €
Valeur maximale	87 000 €	26 000 €	180 000 €	39 000 €	8 000 €
Valeur minimale	5 000 €	1 700 €	12 000 €	4 000 €	420 €
Max - min	82 000 €	24 300 €	168 000 €	35 000 €	7 580 €
Zones maritimes d'Europe					
Moyenne		6 850 €	36 250 €	10 800 €	2 275 €
Écart-type		5 328 €	30 664 €	6 556 €	2 093 €
Valeur maximale		14 000 €	80 000 €	20 000 €	5 400 €
Valeur minimale		1 400 €	14 000 €	5 900 €	1 000 €
Max - min		12 600 €	66 000 €	14 100 €	4 400 €

L'écart-type et la différence entre les valeurs maximale et minimale montrent que les quantités d'émissions rejetées dans l'atmosphère ne sont pas homogènes. La différence de coûts s'élève jusqu'à 168 000 € entre l'Estonie (12 000 €) et la Belgique (180 000 €) pour les PM_{2.5}. L'utilisation de la moyenne pour obtenir un résultat unique pour l'ensemble des pays européens est critiquable lorsque les valeurs sont si éloignées.

La localisation des émissions est primordiale. Les zones maritimes sont certes déjà différenciées dans cette étude, mais les zones rural et urbaines devraient l'être également. De plus, en comparant les coûts des dommages pour chaque pays, il apparaît que le développement économique de la région semble jouer un rôle dans l'importance des rejets. Ce facteur n'est pas pris en compte dans l'étude.

2.4.3 Étude n°3

L'étude n°3 est une étude canadienne, menée par Victoria Transport Policy Institute en 2007. Ce projet fournit une vue d'ensemble des impacts, des coûts et des risques des émissions liées au changement climatique (Litman, 2009).

2.4.3.1 Hypothèses et domaines de restriction

Les hypothèses fixées lors de cette étude sont :

- les analyses prennent en compte une portion limitée des coûts et des risques;
- la possibilité d'une catastrophe naturelle est ignorée;
- la croissance économique est supposée se poursuivre de manière exponentielle;
- les coûts des dommages et des pertes sont définis comme des pertes de terres (dues à l'augmentation du niveau de la mer), des pertes de productivité agricoles (dues à la contamination des ressources en eaux potables, par exemple), la perte de systèmes naturels et de biodiversité (Litman, 2009);
- les dommages estimés du changement climatiques sont comptabilisées en dioxyde de carbone équivalent.

Le Tableau 2.7 présente l'éventail des impacts du changement climatique examinés lors de cette étude :

Tableau 2.7 Impacts des changements climatiques
Adapté de Litman (2009)

Effets directs	Effets secondaires
Augmentation des températures Élévation de la fréquence des vagues de chaleur	Mal-être, maladies et morts Augmentation des coûts de refroidissement et de climatisation
Perturbation des écosystèmes Extinction de certaines espèces	Disparition de milieux producteurs (d'eaux et d'air purs, de poissons et de gibiers), de ressources génétiques (pour des produits pharmaceutiques ou agricoles), d'espaces récréatifs et ressourçant, de valeur esthétique et de modes de vie traditionnelle ou de traditions (chasse et cueillette)
Augmentation du niveau des mers et des océans	Perte de territoires, d'habitats et de terres cultivables Augmentation du coût de protection Prise en charge des réfugiés des zones sinistrées
Changements hydrologiques (sécheresse, inondations, diminution du manteau neigeux, diminution du débit fluvial)	Augmentation du coût de l'eau Diminution de la productivité agricole Diminution de la production d'énergie hydroélectrique
Augmentation du nombre de maladies tropicales	Maladies et morts Menaces pour la productivité agricole
Fonte du manteau neigeux et des glaces	Pertes d'activités récréatives, culturelles, traditionnelles et de mode de vie

2.4.3.2 Méthodes

La monétisation du coût de l'effet de serre est basée sur le prix d'une tonne de dioxyde de carbone. Les gaz à effet de serre ne possèdent pas les mêmes caractéristiques, en particulier la même puissance radiative. Ils n'ont donc pas la même contribution au changement climatique. Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) permet d'estimer la contribution d'un gaz à effet de serre au réchauffement climatique par rapport à la contribution du CO₂ sur une durée fixe (généralement 100 ans). Par exemple, un kilogramme de méthane (CH₄) et un

kilogramme de protoxyde d'azote (N₂O) sont respectivement équivalents à 25 kilogrammes et à 298 kilogrammes de CO₂ (SÉTRA, 2010). Les impacts du changement climatiques comptabilisés dans cette étude, sont donc exprimés en dioxyde de carbone équivalent.

Les administrations routières se concentrent généralement sur les impacts locaux et anthropocentriques. Cependant, les effets du changement climatique traversent les frontières, les générations et menacent aussi bien les milieux naturels que les humains. L'analyse économique est basée sur le long-terme et prend en compte les impacts globaux.

Parmi les méthodes utilisées lors de cette étude, ils utilisent différents taux d'actualisation pour les valeurs monétaires et la valeur actuelle nette (Litman, 2009).

2.4.3.3 Résultats

Les coefficients présentés par l'étude n°3 proviennent d'autres études antérieures qui ont estimés le coût du changement climatique. Seul le CO₂ se voit attribué un coût à la fin de cette étude. Les effets possibles des autres gaz à effet de serre ont été convertis en CO₂ équivalent.

Tableau 2.8 Monétisation des dommages estimés du changement climatique
Tiré de Litman (2009)

Publication	Description	Coût / tonne de CO ₂	US\$ (2007) / tonne de CO ₂
Tol (2005)	Minimum	- 4 € (2000)	-4,43 \$
	Central	11 € (2000)	12 \$
	Maximum	53 € (2000)	59 \$
DLR (2006)	Minimum	15 € (2000)	17 \$
	Central	70 € (2000)	78 \$
	Maximum	280 € (2000)	310 \$
Jokob, Craig & Ficher (2005)	Damage	270 \$NZ (2003)	178 \$
Hohmeyer & Gartner (1992)	Damage	220 \$US (1992)	326 \$
Bein (1997)	Recommandé	1 000 \$CA (1997)	917 \$
	Maximum	4 264 \$US (1997)	3 910 \$

2.4.3.4 Limites et incertitudes

Les impacts à court terme reçoivent une attention particulière tandis que les impacts à long terme ne sont pas inclus. Les analystes rencontrent de nombreuses difficultés lorsqu'il s'agit d'anticiper et de prédire les coûts de manière fiable.

Les coûts du changement climatique augmentent de manière conséquente si les valeurs environnementales et écologiques sont additionnées. Le changement climatique menace des nombreuses espèces et de systèmes écologiques, donc les coûts des dommages pourraient grimper en flèche. Par exemple, si un prix est associé à la perte d'une année de vie d'une espèce, qu'advient-il en cas d'extinction ? De ce fait, l'étude a fixé un nombre de paramètres en prendre en compte fini et une borne supérieure pour garantir un coût des dommages réaliste et non-infini.

Cette évaluation est sensible aux hypothèses réalisées : la valeur d'une vie statistique, le taux d'actualisation annuelle, la vision des générations futures et leurs priorités sont des hypothèses fixées lors des études et peuvent être sujettes à discussion.

Les incertitudes inhérentes à la science des changements climatiques et de leur évaluation économique limitent les analyses (Litman, 2009).

2.4.4 Étude n°4

L'étude n°4 a été réalisée par CE Delft, en Europe en 2008. Elle présente un état de l'art et référence les bonnes pratiques de quantification et de monétisation des coûts externes du changement climatique.

2.4.4.1 Domaines touchés par les changements climatiques

Il existe plusieurs domaines-clés dans lesquels les changements climatiques font des ravages.

L'augmentation du niveau de la mer et des océans : les coûts de protection sont relativement bien connus et pris en compte dans les modèles. L'augmentation du niveau de l'eau favorise les ondes de tempêtes, augmente les intrusions d'eau salée dans les terres et menace les écosystèmes des côtes. Les populations vivant sur de petites îles ou bien dans des régions d'altitude faible sont particulièrement concernées par ses risques d'impacts sociaux et économiques. Ces effets ne sont pas pris en compte.

L'utilisation énergétique dépend des effets sur la température du dérèglement climatique, qui se traduira par une augmentation ou une diminution de l'utilisation du chauffage ou de la climatisation selon les régions. Les modèles prennent en compte cet effet, cependant les scénarii sont difficiles à mettre en œuvre de manière réaliste.

Les impacts sur l'agriculture dépendent des températures et des pluies régionales. La plupart des évaluations capturent les impacts directs. Mais il est important de noter que cette méthode ne permet pas de déterminer les dommages sur les années à venir : ils dépendent des changements dans la demande et des marchés. De plus, des effets plus complexes peuvent survenir (nuisibles, sécheresse, inondations).

Les ressources en eau douce : les changements climatiques auraient pour effet d'exacerber les sécheresses dans les régions où l'eau est déjà rare. Le potentiel de sécheresse et de ces effets sociaux contingents ne sont pas quantifiés. Si la menace pour les ressources en eau est modélisée dans certains modèles, ce n'est que très partiellement.

Les impacts sur la santé : une augmentation de la chaleur l'été et des hivers plus froids augmenteraient la mortalité. L'apparition ou l'intensité de maladies a été relevée par des études spécifiques, et quelques modèles en tiennent compte partiellement. L'augmentation de la menace pour la santé humaine est particulièrement réaliste dans les régions tropicales ou subtropicales. Il s'agit de l'impact anthropocentriste le plus pris en compte dans les études de monétisation des impacts.

Les écosystèmes et la biodiversité : l'analyse des effets sur les écosystèmes est le point le plus problématique en termes d'évaluation fiable et compréhensible des impacts des changements climatiques. Les études ne prennent pas en compte la totalité de ces impacts. La valeur d'un écosystème est une donnée qui n'est pas maîtrisée.

Les évènements climatiques extrêmes (vagues de chaleur, inondations, sécheresses, cyclones tropicaux, typhons) : la fréquence et l'intensité ne dépendent pas du climat moyen. Il n'y a pas d'hypothèses, ni de modèles à long terme de ces variabilités. Ils dépendent de la localisation et du temps. Ces évènements sont exclus des simulations.

Les **catastrophes naturelles** sont exclues des simulations (Maibach et al., 2008).

2.4.4.2 Méthodes

L'approche est la suivante :

- recenser et évaluer l'ensemble des véhicules par catégorie pour la zone étudiée;
- multiplier chaque catégorie de véhicule par un coefficient (en g/km) représentatif des gaz à effet de serre émis;
- ajouter les émissions d'autres gaz à effet de serre convertis en CO_2 équivalent;
- multiplier le nombre de tonnes de gaz à effet de serre exprimé en CO_2 équivalent par un coefficient en euro par tonne, afin d'estimer les coûts externes relatifs aux gaz à effet de serre.

L'approche suit la **méthode de cheminement d'impact**. Le coût de l'augmentation du niveau des océans peut être exprimé en termes de terres perdues. L'impact sur l'agriculture peut être exprimé en coûts supplémentaires pour les producteurs et les consommateurs. Les effets sur les ressources d'eau peuvent être exprimés en fonction des dommages engendrés par les inondations (Maibach et al., 2008).

Les calculs ont pour référence le modèle FUND (*Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution*). Il s'agit d'un « modèle d'évaluation intégré, liant les projections sur les populations, les activités économiques et les émissions, au cycle des gaz à effet de serre, aux modèles de changement climatique et d'augmentation du niveau des océans et aux modèles de prédiction et de monétisation des impacts socio-environnementaux » [notre traduction] (Anthoff & Tol, 2010).

La méthode de comptabilisation des impacts environnementaux à l'aide du PRG est reprise.

2.4.4.3 Résultats

Seul le CO_2 se voit attribué un coût à la fin de cette étude. En effet, les effets possibles des autres gaz à effet de serre ont été convertis en CO_2 équivalent.

Tableau 2.9 Coûts des dommages des gaz à effet de serre (€ (1998) / tonne)
Tiré de Maibach et al. (2008)

Émission	Minimum	Point-centre	Maximum
CO_2	20 € / tonne	42 € / tonne	63 € / tonne

Tableau 2.10 Coûts externes des dommages des gaz à effet de serre (2020 €/ ton)
Tiré de Maibach et al. (2008)

Émission	Minimum	Point-centre	Maximum
CO_2	17 € / tonne	40 € / tonne	70 € / tonne

2.4.4.4 Limites et incertitudes

L'évaluation économique, et plus spécifiquement dans le domaine du changement climatique, est controversée.

Premièrement, il existe un grand manque de connaissance sur les impacts physiques causés par ce réchauffement. Deuxièmement, les impacts tels que les dommages sociaux contingents (conflits régionaux pour les terres ou l'eau) sont extrêmement difficiles à anticiper et à

évaluer. Les estimations des coûts des dommages des gaz à effet de serre varient grandement à cause de problèmes d'évaluation théorique liés à l'équité, l'irréversibilité et les incertitudes.

Les points critiques et les incertitudes limitant l'évaluation des coûts des dommages sont :

- l'évaluation du développement économique à long terme d'un pays et des développements technologiques, associés à l'émission de gaz à effet de serre;
- l'évaluation des impacts physiques et économiques dus au changement climatique et leur sélection pour l'analyse;
- les taux d'actualisation;
- la prise en compte des événements climatiques extrêmes;
- l'adaptation régionale;
- le temps de simulation. (Maibach et al., 2008)

2.4.5 Bilan

Les résultats des études citées précédemment sont consignés dans le Tableau 2.11, tels qu'ils apparaissent dans ces études, c'est-à-dire sans uniformisation des unités monétaires.

Tableau 2.11 Synthèse des coefficients spécifiques à chaque émission polluante

Coûts des polluants atmosphériques par catégorie économique (CAD\$ (2005) / tonne)					
Catégories économiques		Polluants		Coûts des dommages	
Santé		Monoxyde de carbone (CO)		205 \$ / tonne	
		Particules (PM _{2.5})		317 000 \$ / tonne	
		Ozone (O ₃)		1 086 \$ / tonne	
Visibilité		Particules (PM ₁₀)		3 175 \$ / tonne	
		Oxydes d’azote (NO _x)		934 \$ / tonne	
		Composés organiques volatiles		44 \$ / tonne	
Agriculture		Ozone (O ₃)		280 \$ / tonne	
Infrastructures		Ozone (O ₃)		373 \$ / tonne	
Moyennes des coûts des dommages par tonne d’émission (€ (2005) / tonne)					
Pays Européens					
Ammoniac (NH ₃)			31 000 € / tonne		
Oxydes d’azote (NO _x)			12 000 € / tonne		
Particules (PM _{2.5})			75 000 € / tonne		
Dioxyde de soufre (SO ₂)			16 000 € / tonne		
Composés organiques volatiles			2 800 € / tonne		
Zones maritimes d’Europe					
Oxydes d’azote (NO _x)			6 900 € / tonne		
Particules (PM _{2.5})			36 000 € / tonne		
Dioxyde de soufre (SO ₂)			11 000 € / tonne		
Composés organiques volatiles			2 300 € / tonne		
Coûts des dommages estimés du changement climatique (US\$ (2007) / tonne)					
Dioxyde de carbone (CO ₂)			917 \$ / tonne		
Coûts des dommages des gaz à effet de serre (€ (1998) / tonne)					
Émission		Minimum	Point-centre	Maximum	
Dioxyde de carbone (CO ₂)		20 € / tonne	42 € / tonne	63 € / tonne	
Coûts externes des dommages des gaz à effet de serre (€ (2020) / tonne)					
Émission		Minimum	Point-centre	Maximum	
Dioxyde de carbone (CO ₂)		17 € / tonne	40 € / tonne	70 € / tonne	

Les impacts quantifiés dans l'étude n°2 sont compris dans les effets comptabilisés dans l'étude n°1. De ce fait, les résultats de l'étude n°2 pour les effets sanitaires sont inclus dans les résultats de l'étude n°1. Pour les particules PM_{2.5}, présentes dans les deux études, uniquement le coût déterminé dans l'étude n°1 sera pris en compte afin d'éviter le phénomène de double-comptage.

2.4.5.1 Remarque sur le coût attribué aux particules

Le lien entre l'exposition aux particules et l'augmentation des morts prématurées et des effets morbides est bien documenté (Huang, Xu, & Zhang, 2012). La relation entre la pollution des particules fines et la mortalité est robuste (Pope et al., 2002).

Malgré la disparité des coûts exposés dans les études (Banque Mondiale, 2016; Cohen et al., 2005; Huang et al., 2012), ces chiffres reflètent l'ampleur des coûts sanitaires induits par les particules.

Un risque élevé de mortalité est associé en premier lieu aux particules fines et à l'oxyde de soufre. Les grosses particules, les poussières et les gaz polluants, à l'exception du dioxyde de soufre, ne contribuent généralement pas à l'élévation du risque de mortalité (Pope 2002). Les particules sont donc les émissions polluantes les plus meurtrières. De ce fait, en prenant en compte la valeur attribuée à une année de vie perdue, les coûts sanitaires associés aux particules sont bien plus importants que les autres polluants.

2.4.5.2 Autres études

De nombreuses études apportent des pistes de réflexion quant à la manière de référencer, de quantifier puis de monétiser les impacts sociaux, environnementaux et sanitaires. Elles ne fournissent pas de coefficient monétaire exploitable pour la suite de notre étude, mais apportent des détails sur la quantification, qui manquent quelques fois dans les études sélectionnées. Les méthodes et les moyens de quantification proposés dans ces études sont consultables en Annexe III.

2.5 Limites et incertitudes des études sur la monétisation des impacts de la pollution atmosphérique

Par souci de nuancer l'immutabilité des résultats des études gravitant autour de la quantification et de la monétarisation des impacts des émissions polluantes rejetées par la circulation, le paragraphe suivant rassemble les nombreux points critiques et les limites de ces modèles. On ne reviendra pas sur les hypothèses qui limitent le champ des études.

2.5.1 Limites anthropologiques

La sensibilité de la population locale à la pollution, qu'elle se manifeste par le souci de la qualité de vie ou de la santé, est un point essentiel dans les analyses de monétisation. Au présent, elle dépend de la répartition des âges, de la densité de population, du niveau de vie, du niveau de développement économique et de la culture propre à la zone étudiée. Dans les modèles de prévisions, elle dépend en plus de la vision des générations futures et de leurs priorités.

Une incertitude plane également sur le degré de coopération internationale. En effet, les lois et les objectifs écologiques internationaux poussent les pays à réduire les émissions polluantes (protocole de Kyoto, Grenelle de l'environnement, loi sur le plomb). Les relations internationales et la volonté de lutte contre le changement climatique pourraient avoir une influence importante sur les modèles de prévision.

2.5.2 Limites épidémiologiques

Dans l'évaluation du nombre de morts prématurées et d'années d'espérance de vie perdues, les études épidémiologiques présentent des intervalles d'incertitude élevés. C'est le cas, par exemple, dans l'étude de Cohen et al. (2005), où le nombre de morts et d'années de vie perdues à cause des particules sont estimées avec 50 % d'incertitude.

Dans la littérature, les graves effets sur la santé sont souvent mis en avant car les méthodes de dénombrement des cas médicaux liés aux nuisances de la route deviennent accessibles. Cependant, l'inconfort quotidien, l'irritabilité et la perte de concentration ne sont généralement pas diagnostiqués donc ils ne pourront pas être comptabilisés dans nos chiffres. Les relations exposition-réponse sont spécifiques à la région analysée. En effet, bien que les études menées aux États-Unis et en Europe donnent des résultats similaires, les relations exposition-réponse établies en Chine lors de l'étude Kan, Chen, Chen, Fu, et Chen (2004), reposent sur des coefficients plus faibles. Certaines incertitudes peuvent être le fruit de la simplicité des relations qui lient les émissions et la qualité de l'air, les émissions et la santé (RWDI Inc., 2006).

Huang et al. (2012) déplore de nombreuses incertitudes du côté des effets sanitaires, comme des résultats médicaux incomplets, des fonctions exposition-réponse inadaptées dont la concentration de référence et les coefficients sont inappropriés (Huang et al., 2012). Les méthodes d'estimation de l'exposition et de l'extrapolation des fonctions concentration-réponse ont été développées pour de vastes zones géographiques, même en l'absence de données. L'application des résultats quantitatifs à une autre région risque d'être accompagnée d'erreurs substantielles (Cohen et al., 2005).

La question qui taraude les épidémiologistes est : comment affirmer qu'un polluant est le seul responsable de la mort prématurée d'un individu ? (Cohen et al., 2005) En effet, plusieurs polluants distincts peuvent avoir les mêmes impacts. Des réactions chimiques combinant plusieurs polluants peuvent avoir des effets sur la santé, sur les infrastructures, les cultures et les écosystèmes (brouillard photochimique, par exemple). Dans ce cas, comment diviser le coût de l'impact entre les réactifs ? Dès lors, il est compliqué d'attribuer un effet sanitaire à un polluant spécifique. Le problème du « double comptage » apparaît lorsque les effets associés à plusieurs polluants simultanément sont simplement additionnés (Kan et al., 2004).

2.5.3 Limites économiques

Les limites économiques sont intrinsèquement liées aux limites des modèles (valeur d'une vie statistique, valeur d'une année de vie, taux d'actualisation, incertitudes statistiques, utilisation de la moyenne et de la médiane) et des méthodes d'analyse (méthode de cheminement d'impact, méthode d'évaluation contingente). En particulier, les modèles de prévision économique induisent des incertitudes sur les dommages sociaux, sur le développement économique et technologique à long terme d'un pays.

2.5.4 Manque de connaissance et de données

Toutes les études accusent un grand manque de connaissance à plusieurs niveaux, qui altère la précision des modèles et des résultats.

Sur le plan de la physique, la dispersion des polluants repose sur les modèles théoriques de dispersion des molécules, qui ne permettent pas encore d'expliquer tous les phénomènes réels.

En chimie, les réactions secondaires et le comportement des polluants à long terme sont méconnus.

Les modèles de prévision météorologique, en lien avec le changement climatique et ses effets, ne sont pas parfaits.

L'isolement des impacts des polluants sur les différents paramètres d'évaluation pose problème.

2.6 Expérience

2.6.1 Objectifs et méthodes

L'objectif de cette partie est de déterminer le coût des impacts environnementaux pour plusieurs sections de routes nécessitant une intervention, afin d'estimer :

- l'influence de la qualité du matériau de surface sur le rejet d'émissions polluantes;
- l'influence du niveau d'entretien sur le rejet d'émissions polluantes;
- leur poids économique dans le budget global de ce type d'intervention.

Trois sections de routes qui composent le réseau d'une des capitales économiques de l'Afrique de l'Ouest, ont été sélectionnées pour cette expérience. Plusieurs stratégies d'intervention ont été déterminées en se basant sur un examen de l'état de la chaussée, pour être ensuite comparées à celle de ne pas agir.

Le logiciel HDM-4 est un programme de prévision du comportement de la chaussée et d'évaluation économique de la conception et de l'entretien des routes. Il est le seul logiciel reconnu qui permette de quantifier les émissions polluantes sur une période d'analyse donnée pour différentes stratégies d'intervention. Les résultats produits sont des quantités de polluants en tonne par an, consignées dans de volumineux tableaux et des indicateurs économiques. L'Annexe II sur le logiciel HDM-4 présente les applications, les paramètres d'analyse et de modélisation, et les équations de quantification du logiciel.

Ces données sont par la suite converties en dollar, en les multipliant par des coefficients en dollars américains par tonne, adaptés à la situation du pays étudié. En effet, les études, dont sont issus les coefficients en dollars par tonne consignés dans le Tableau 2.11, ont été menées dans les pays développés. Or, notre expérience prend place dans un pays en voie de développement, donc une adaptation des coûts est requise.

Les résultats finaux sont présentés sous forme de plusieurs graphiques spécifiques à chaque section de route :

- les histogrammes et les courbes d'évolution des coûts cumulés des émissions sur la période d'analyse;
- les indicateurs économiques fournis par le HDM-4;
- les histogrammes des bénéfices et des coûts des différentes stratégies d'intervention comparées à l'option de ne rien faire, tracés par année et par type de polluant.

2.6.2 Acquisition de données

2.6.2.1 Caractéristiques des chaussées

L'échantillon est composé de trois sections de route. Les routes sélectionnées sont les axes routiers les plus importants de cette capitale économique d'Afrique de l'Ouest.

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des sections étudiées :

Tableau 2.12 Description des sections étudiées

Section	A	B	C
Année de construction	1975	1975	1981
Année de dernière réhabilitation	1975	1975	1981
Année des travaux prévus	2013 (non réalisés)		
Classe de route	Primaire ou structurante		
Classe de surface	Bitumineuse		
Nombre de voies	4	6	6
Vitesse autorisée (km / h)	60		
Épaisseur de la couche de surface (mm)	100		
Épaisseur de la base (mm)	250		
Longueur de la section (km)	7	11	7
Largeur des accotements (m)	3	3	3
IRI (m / km)	4	3,7	3,3
Fissures linéaires (%)	7	5	10
Superficie des arrachements (%)	3	3	1
Nids-de-poule (nb / km)	1	3	0
Profondeur des ornières (mm)	5	5	5
Qualité du drainage	Moyenne	Pauvre	Bonne

2.6.2.2 Stratégies d'intervention

Toutes les sections de l'échantillon subissent un fraisage qui consiste à désagréger et à retirer le revêtement de surface de la chaussée sur une épaisseur déterminée à l'aide d'une fraiseuse ou d'une planeuse. Sur cette nouvelle surface, une couche de liant d'accrochage est appliquée pour assurer une bonne adhérence du nouveau revêtement. Une couche de revêtement bitumineux est répandue ensuite et constitue la nouvelle couche de roulement. (Bitume Québec, 2008)

Les paramètres qui varient d'une option à l'autre sont la qualité de l'enrobé constitutif de la nouvelle couche de surface et la fréquence de l'entretien. Ces programmes d'intervention seront comparés à la stratégie 0, qui consiste à laisser la chaussée dans cet état et à ne pas intervenir. Le tableau suivant présente les différentes stratégies d'interventions :

Tableau 2.13 Stratégies d'intervention

Option	Fraisage et couche de liant d'accrochage	Qualité de l'enrobé de la nouvelle couche de surface	Fréquence de l'entretien
1	Oui	Basse qualité	100 %
2	Oui	Haute qualité	100 %
3	Oui	Basse qualité	50 %
4	Oui	Haute qualité	50 %
5	Oui	Basse qualité	25 %
6	Oui	Haute qualité	25 %
7	Oui	Basse qualité	Aucun
8	Oui	Haute qualité	Aucun
0	Non	Aucun	Aucun

2.6.2.3 Adaptation des coefficients au pays étudié

Taux de change

La revue de la littérature sur la monétisation des émissions polluantes a permis l'obtention de coefficients spécifiques à chaque émission polluante, rassemblés dans le Tableau 2.11. Ces coefficients sont exprimés en dollars américains, en dollars canadien et en euros par tonne.

Aussi une conversion dans la même unité est requise, le dollar américain est choisi comme référence. Les taux de change sont supposés constants. Pour nos calculs, les valeurs suivantes seront appliquées :

Tableau 2.14 Taux de change appliqués pour l'adaptation des coefficients

Dollars américains / Dollars canadiens	0,75 US\$ / CAD
Dollars canadiens / Euros	1,06 US\$ / €

Taux d'actualisation

Les études sur la monétisation datent respectivement de 1995 et de 2005. La première année de la période de simulation sur HDM-4 est 2018. Un taux d'actualisation de 1% est appliqué afin d'extrapoler les résultats de 1995 et 2005, en 2018. Après 2018, un taux d'actualisation nul est appliqué.

Le taux d'actualisation permet également d'assurer une répartition équitable des coûts des dommages entre les générations présentes et futures. Plus ce taux est faible, plus le coût de la pollution atmosphérique est valorisé et moins l'effort de réduction des émissions est reporté sur les générations futures. (SÉTRA, 2010)

Le calcul des coûts des émissions est itératif. Pour chaque polluant, chaque année, la formule mathématique suivante est appliquée :

$$\frac{1}{(1+r)^n}$$

Où : r, taux d'actualisation (tenant compte de l'inflation) $r = 10\%$;

et n, représentant une année : $\begin{cases} n = 0, \text{ correspond à 2018} \\ n = 1, \text{ correspond à 2019} \\ \dots \\ n = 19, \text{ correspond à 2037} \end{cases}$

Importance de la localisation des émissions

L'objectif de cette partie est d'adapter les coefficients à la région étudiée. La plupart des études citées pour la monétisation des effets environnementaux ont été menées dans les pays développés, comme les États-Unis, le Canada et les pays européens. En effet, les pays d'origine des coûts des émissions, rapportés dans le Tableau 2.11 n'ont aucun point commun, que ce soit aux niveaux économique, législatif, climatique ou géographique, avec le pays en voie de développement dans lesquels l'expérience est menée.

Les impacts sur la santé sont liés : à la densité de population, à la proximité et à la qualité des soins (hôpitaux, cliniques, médecins de proximité), au développement et au poids économique de la région. À l'image de la relation exposition-réponse dans l'étude de Blanchard et al. (2008), l'extrapolation des coûts des émissions tels quels, doit s'effectuer dans des conditions raisonnables :

- les expositions à la pollution atmosphérique doivent être similaires;
- les populations touchées doivent posséder des caractéristiques similaires (âge, sexe, mode de vie...);
- les conditions météorologiques doivent être voisines;
- les indicateurs sanitaires doivent être analogues;
- les méthodes de mesure des niveaux de polluants doivent être identiques (Blanchard et al., 2008).

Une adaptation des coûts des émissions est requise car l'extrapolation des coûts tels quels n'est pas envisageable au vu des conditions énoncées. Le Produit Intérieur Brut (PIB) permet de mesurer et de comparer le bien-être économique, la taille des économies et la productivité. L'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE) s'intéresse plus particulièrement aux dépenses de santé. Le PIB en termes de parité de pouvoir d'achat (PPA) permet de comparer les niveaux de consommation des services de santé et les prix de ces services entre les pays. Selon cette organisation, « *les PPA du PIB (...) sont les taux de conversion les plus fiables* ». Or, notre analyse de la littérature a montré que ce sont les coûts

sanitaires qui sont les plus élevés. Les PPA du PIB semblent tout indiqués pour la conversion. (OCDE, 2007)

Les coûts des émissions sont multipliés par le rapport du PIB de la région étudiée et des PIB de l'Amérique du Nord ou de l'Europe selon les coefficients.

Phénomènes locaux et globaux

Il faut distinguer les impacts locaux sur la santé et l'économie, des impacts globaux liés au réchauffement climatique. Les études récentes statuent sur un lien entre les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et le changement climatique mondial. Les effets des émissions des gaz à effet de serre sont globaux, c'est-à-dire que quelle que soit la localisation de la source d'émission, ils sont présents dans l'atmosphère et participent à la hausse globale des températures.

Les impacts du changement climatique peuvent être reliés à des caractéristiques physiques et géographiques de la région : la densité de population, le nombre des kilomètres de côtes (menacés par la montée des eaux), le volume des nappes phréatiques et des sources d'eau douce (potentiellement souillées par les polluants), le nombre d'espèces animales et végétales ou encore la superficie des terres cultivables (comptabilisables dans les pertes agricoles potentielles). Toutefois, la prise en compte de tous ces paramètres n'est pas nécessaire en vue d'obtenir un ordre de grandeur du coût des émissions et des limites des études sélectionnées ci-dessus.

Le coût du dioxyde de carbone est donc multiplié par le rapport des populations de la zone étudiée et du monde. Ce qui explique son poids négligeable dans les calculs de monétisation.

Le Tableau 2.15 rassemble les coefficients exprimés en dollars américains par tonne, pour chaque polluant et chaque année, adaptés à la région étudiée.

Tableau 2.15 Coefficients exprimés en dollars américains par tonne
pour chaque émission polluante et chaque année

Année	Hydrocarbures	Monoxyde de carbone	Oxydes d'azote	Dioxyde de soufre	Dioxyde de carbone	Particules $PM_{2.5}$
2018	180 \$/tonne	11 \$/tonne	626 \$/tonne	849 \$/tonne	0,27 \$/tonne	17 309 \$/tonne
2019	164 \$/tonne	10 \$/tonne	569 \$/tonne	772 \$/tonne	0,24 \$/tonne	15 736 \$/tonne
2020	149 \$/tonne	9 \$/tonne	517 \$/tonne	702 \$/tonne	0,22 \$/tonne	14 305 \$/tonne
2021	135 \$/tonne	8 \$/tonne	470 \$/tonne	638 \$/tonne	0,20 \$/tonne	13 005 \$/tonne
2022	123 \$/tonne	8 \$/tonne	427 \$/tonne	580 \$/tonne	0,18 \$/tonne	11 822 \$/tonne
2023	112 \$/tonne	7 \$/tonne	388 \$/tonne	527 \$/tonne	0,17 \$/tonne	10 748 \$/tonne
2024	102 \$/tonne	6 \$/tonne	353 \$/tonne	479 \$/tonne	0,15 \$/tonne	9 771 \$/tonne
2025	92 \$/tonne	6 \$/tonne	321 \$/tonne	436 \$/tonne	0,14 \$/tonne	8 882 \$/tonne
2026	84 \$/tonne	5 \$/tonne	292 \$/tonne	396 \$/tonne	0,13 \$/tonne	8 075 \$/tonne
2027	76 \$/tonne	5 \$/tonne	265 \$/tonne	360 \$/tonne	0,11 \$/tonne	7 341 \$/tonne
2028	69 \$/tonne	4 \$/tonne	241 \$/tonne	327 \$/tonne	0,10 \$/tonne	6 673 \$/tonne
2029	63 \$/tonne	4 \$/tonne	219 \$/tonne	298 \$/tonne	0,09 \$/tonne	6 067 \$/tonne
2030	57 \$/tonne	4 \$/tonne	199 \$/tonne	270 \$/tonne	0,09 \$/tonne	5 515 \$/tonne
2031	52 \$/tonne	3 \$/tonne	181 \$/tonne	246 \$/tonne	0,08 \$/tonne	5 014 \$/tonne
2032	47 \$/tonne	3 \$/tonne	165 \$/tonne	224 \$/tonne	0,07 \$/tonne	4 558 \$/tonne
2033	43 \$/tonne	3 \$/tonne	150 \$/tonne	203 \$/tonne	0,06 \$/tonne	4 144 \$/tonne
2034	39 \$/tonne	2 \$/tonne	136 \$/tonne	185 \$/tonne	0,06 \$/tonne	3 767 \$/tonne
2035	36 \$/tonne	2 \$/tonne	124 \$/tonne	168 \$/tonne	0,05 \$/tonne	3 425 \$/tonne
2036	32 \$/tonne	2 \$/tonne	113 \$/tonne	153 \$/tonne	0,05 \$/tonne	3 113 \$/tonne
2037	29 \$/tonne	2 \$/tonne	102 \$/tonne	139 \$/tonne	0,04 \$/tonne	2 830 \$/tonne

2.7 Résultats et analyses

2.7.1.1 Histogramme des coûts cumulés des émissions polluantes sur toute la période d'analyse, pour chaque option

L'histogramme des coûts cumulés des émissions sur toute la période d'analyse tracé pour chaque option, permet de comparer l'influence de la qualité du matériau de surface et de l'entretien sur le rejet d'émissions polluantes et de classer les options par ordre croissant de coûts environnementaux. Les stratégies opposées, la moins et la plus chère d'un point de vue environnemental, sont identifiées.

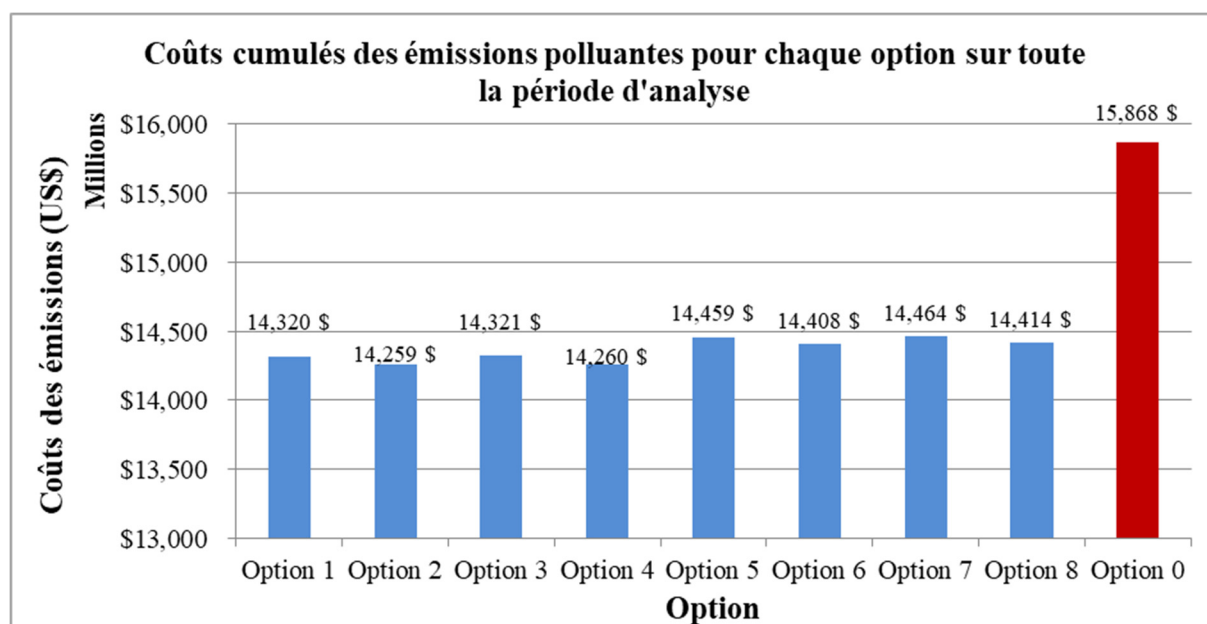


Figure 2.3 Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option sur toute la période d'analyse - Section A

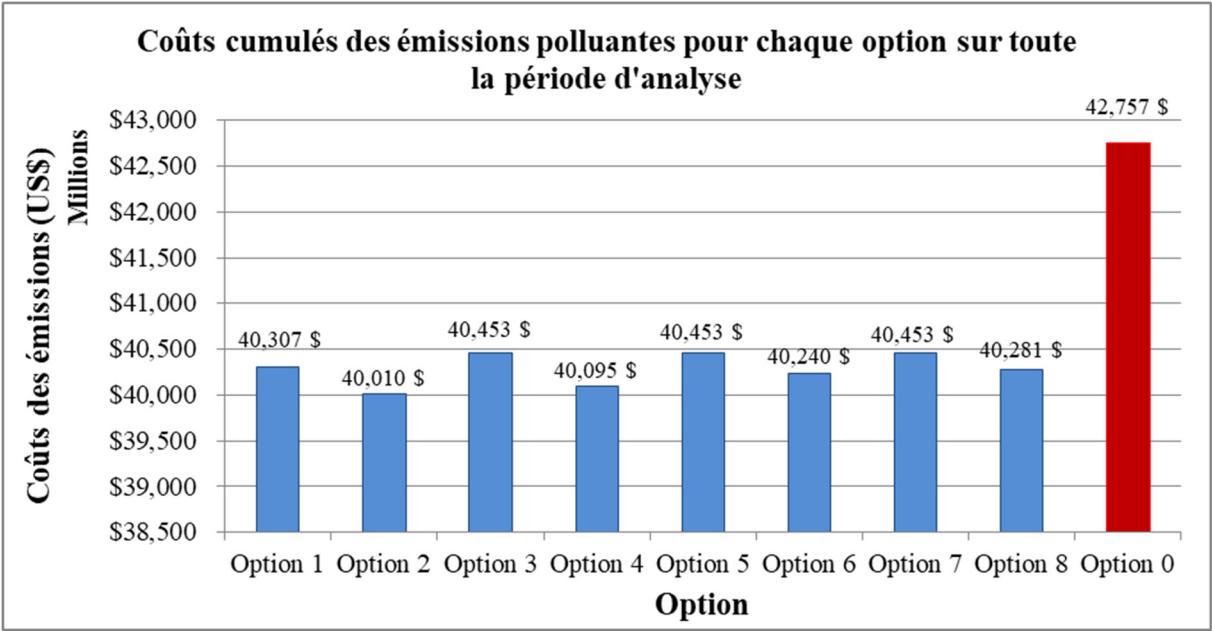


Figure 2.4 Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option sur toute la période d’analyse - Section B

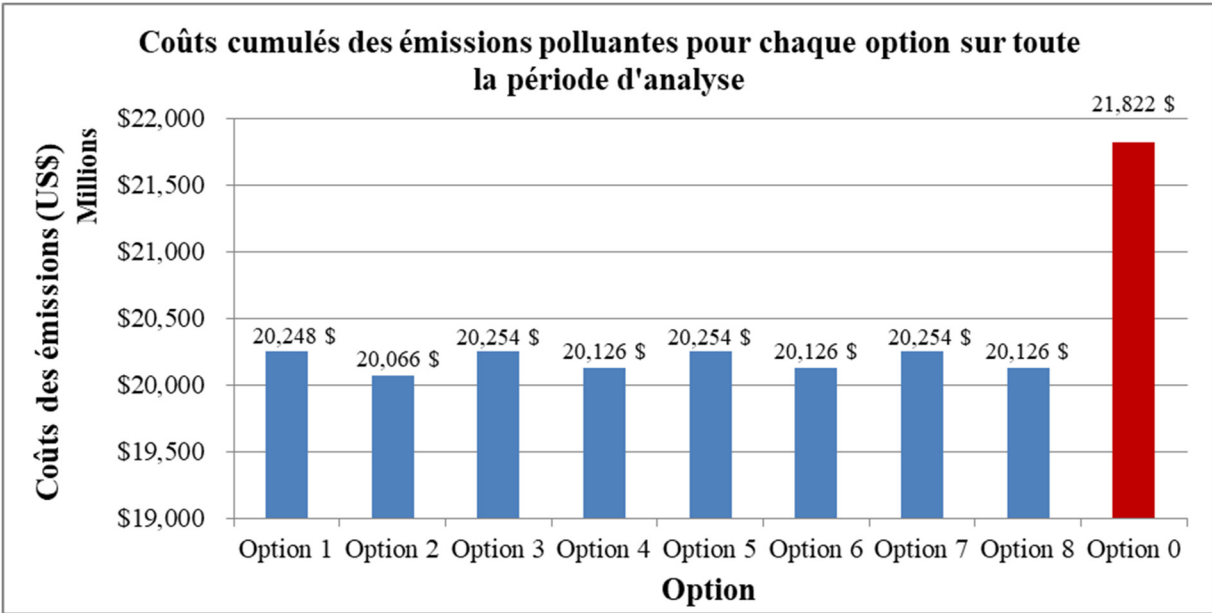


Figure 2.5 Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option sur toute la période d’analyse - Section C

Pour toutes les sections, les coûts cumulés des émissions polluantes sont maximaux lorsque l'option 0 (ne pas agir) est entreprise.

Les options 2 (nouvelle couche de surface de haute qualité et entretien 100 %) et 7 (nouvelle couche de surface de basse qualité et aucun entretien) présentent respectivement le coût cumulé des émissions polluantes le plus faible et le plus élevé pour toutes les sections simulées. L'économie engendrée par les options 2 et 7, par rapport à l'option 0, est calculée. L'option 2 et l'option 7 permettent d'économiser :

- respectivement 1,609 millions et 1,404 millions de dollars sur les coûts environnementaux par rapport à l'option de ne pas agir pour la section A;
- respectivement 2,747 millions et 2,304 millions de dollars sur les coûts environnementaux par rapport à l'option de ne pas agir pour la section B;
- respectivement 1,756 millions et 1,568 millions de dollars sur les coûts environnementaux par rapport à l'option de ne pas agir pour la section C.

Intervenir, c'est faire économiser plusieurs millions de dollars à la société sur les impacts environnementaux.

En confrontant l'option 1 et l'option 2, pour lesquelles le seul paramètre variable est la qualité du matériau constitutif de la nouvelle couche de surface, **l'option haute qualité présente un coût cumulé des émissions moins important par rapport à l'option basse qualité :**

- de 0,43 % pour la section A;
- de 0,74 % pour la section B;
- de 0,89 % pour la section C.

La même analyse se répète lorsque l'option 3 est comparée à l'option 4, l'option 5 à l'option 6, l'option 7 à l'option 8 :

- l'option haute qualité présente une économie sur les coûts des impacts environnementaux, comprise entre 0,35 % et 0,43 % pour la section A;

- l'option haute qualité présente une économie sur les coûts des impacts environnementaux, comprise entre 0,43 % et 0,88 % pour la section B;
- l'option haute qualité présente une économie sur les coûts des impacts environnementaux, comprise entre 0,63 % et 0,89 % pour la section C.

En comparant l'option 2, l'option 4, l'option 6 et l'option 8, pour lesquelles le paramètre variable est le niveau d'entretien de la future chaussée, **l'option 2 proposant un entretien maximal est moins coûteuse** d'un point de vue environnemental de :

- 1,08 % par rapport à l'option n'offrant aucun entretien pour la section A;
- 0,67 % par rapport à l'option n'offrant aucun entretien pour la section B;
- 0,30 % par rapport à l'option n'offrant aucun entretien pour la section C.

Plus la qualité de la couche de surface est bonne, moins le coût des émissions polluantes est élevé. Plus le niveau d'entretien est élevé, moins le coût des émissions polluantes est élevé.

Pour toutes les sections, l'option 2 (haute qualité de l'enrobé de la nouvelle couche de surface et entretien régulier) est comparée à l'option 7 (basse qualité de l'enrobé de la nouvelle couche de surface et aucun entretien) :

- l'option 2 présente une économie de 1,42 % par rapport à l'option 7, sur les coûts des impacts environnementaux, pour la section A;
- l'option 2 présente une économie de 1,10 % par rapport à l'option 7, sur les coûts des impacts environnementaux, pour la section B;
- l'option 2 présente une économie de 0,93 % par rapport à l'option 7, sur les coûts des impacts environnementaux, pour la section C.

Combiner les bonnes solutions d'ingénierie au niveau du choix des matériaux de la couche de surface et de l'entretien permet de réaliser davantage d'économies sur les coûts environnementaux.

Toutefois, en s'intéressant de plus près aux options 2 (haute qualité de l'enrobé de la nouvelle couche de surface et entretien régulier) et 4 (haute qualité de l'enrobé de la nouvelle couche de surface et 50 % d'entretien), l'écart des coûts représente :

- 230 dollars pour la section A;
- 84 985 dollars pour la section B;
- 59 528 dollars pour la section C.

Les économies estimées entre ces deux options sont très faibles, voire inexistantes si elles sont mises en relation avec les limites et les incertitudes des études utilisées pour cette monétisation.

2.7.1.2 Synthèse des indicateurs économiques, produit du HDM-4

Le logiciel HDM-4 produit des tableaux rassemblant les indicateurs économiques de chaque stratégie d'intervention, liés à une section de la chaussée. L'objectif est de comparer ces résultats aux coûts des émissions polluantes afin de déterminer leur poids économique dans le budget alloué à la remise à niveau et à l'entretien de la chaussée.

Tableau 2.16 Indicateurs économiques pour toutes les stratégies d'intervention, calculés par le HDM-4 – Section A

Option	RAC	CAP	C	B	NPV	NPV / RAC	NPV / CAP	TRI
0	0,455	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	5,047	4,998	4,598	76,542	71,950	14,256	14,396	55,9
2	7,105	7,056	6,650	77,803	71,154	10,015	10,084	46,7
3	5,077	4,998	4,622	76,640	72,019	14,185	14,409	55,9
4	7,135	7,056	6,680	77,886	71,206	9,979	10,092	46,7
5	5,036	4,998	4,580	64,221	59,641	11,844	11,933	55,7
6	7,094	7,056	6,638	65,027	58,389	8,231	8,275	46,3
7	4,998	4,998	4,543	59,709	55,166	11,038	11,038	55,6
8	7,056	7,056	6,601	60,408	53,807	7,626	7,626	46,1

Avec : RAC, coûts totaux actualisés de l'administration routière

(millions de dollars américains)

CAP, investissements actualisés de l'administration routière

(millions de dollars américains)

C, augmentation budgétaire par rapport à l'option de base

B, économies aux usagers par rapport à l'option de base

(millions de dollars américains)

NPV, bénéfices actualisés, $NPV = B - C$ (millions de dollars américains)

NPV / RAC, rapport bénéfices / coûts totaux, indicateur de rentabilité d'investissement relatif

NPV / CAP, rapport bénéfice / investissements, indicateur de rentabilité d'investissement relatif

TRI, taux de rentabilité interne (%)

Tableau 2.17 Indicateurs économiques pour toutes les stratégies d'intervention, calculés par le HDM-4 – Section B

Option	RAC	CAP	C	B	NPV	NPV / RAC	NPV / CAP	TRI
0	0,983	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	9,442	9,350	8,458	225,508	217,049	22,989	23,214	141,8
2	13,292	13,200	12,308	252,045	239,736	18,037	18,162	111,8
3	9,498	9,350	8,515	225,179	216,664	22,811	23,173	141,8
4	13,348	13,200	12,365	252,742	240,377	18,008	18,210	111,8
5	9,441	9,350	8,457	218,880	210,422	22,289	22,505	141,8
6	13,291	13,200	12,307	235,530	223,223	16,796	16,911	111,8
7	9,350	9,350	8,367	212,871	204,505	21,872	21,872	141,8
8	13,200	13,200	12,217	225,690	213,474	16,172	16,172	111,8

Tableau 2.18 Indicateurs économiques pour toutes les stratégies d'intervention, calculés par le HDM-4 – Section C

Option	RAC	CAP	C	B	NPV	NPV / RAC	NPV / CAP	TRI
0	0,609	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	5,528	5,474	4,919	111,238	106,319	19,234	19,423	121,5
2	7,782	7,728	7,173	124,310	117,136	15,053	15,157	97,6
3	5,561	5,474	4,952	110,791	105,839	19,033	19,335	121,5
4	7,815	7,728	7,206	124,306	117,100	14,984	15,153	97,6
5	5,524	5,474	4,915	109,759	104,844	18,981	19,153	121,5
6	7,778	7,728	7,169	119,702	112,533	14,469	14,562	97,6
7	5,474	5,474	4,865	107,836	102,971	18,811	18,811	121,5
8	7,728	7,728	7,119	115,873	108,754	14,073	14,073	97,6

Les coûts cumulés des émissions polluantes sur la période d'analyse sont supérieurs aux coûts totaux des travaux et aux investissements actualisés de l'administration routière pour toutes les stratégies et pour toutes les sections.

Les économies sur les coûts environnementaux sont maximales lorsque l'option 2 est sélectionnée plutôt qu'une des autres options proposées. Les économies entraînées par le choix de l'option 2 par rapport à l'option 0, représentent :

- 22,65 % des coûts totaux pour la section A;
- 21,67 % des coûts totaux pour la section B;
- 22,57 % des coûts totaux pour la section C.

Les économies au niveau environnemental, engendrées par les différentes stratégies peuvent être comptabilisées comme un bénéfice. Les bénéfices actualisés de l'option 2 augmentent respectivement de :

- 1,609 millions de dollars, soit 2,26 % pour la section A;
- 2,747 millions de dollars, soit 1,15 % pour la section B;
- 1,756 millions de dollars, soit 1,50 % pour la section C.

Les coûts cumulés des émissions polluantes sur la période d'analyse sont supérieurs aux coûts totaux des travaux. Les bénéfices engendrés par l'option la plus respectueuse de l'environnement représentent en moyenne 1,6 % des bénéfices totaux actualisés. Les bénéfices maximaux représentent plus de 20 % des coûts totaux.

2.7.1.3 Courbes des coûts cumulés des émissions par an

Les courbes des cumulés des émissions par an permettent d'observer l'évolution des coûts année après année, afin de déterminer les moments où les stratégies divergent et engendrent des bénéfices.

Par souci de clarté et de compréhension, les prochains graphiques présenteront seulement trois stratégies d'intervention :

- option 2 : haute qualité de l'enrobé de la nouvelle couche de surface et entretien régulier;
- option 7 : basse qualité de l'enrobé de la nouvelle couche de surface et aucun entretien;
- option 0 : aucune intervention.

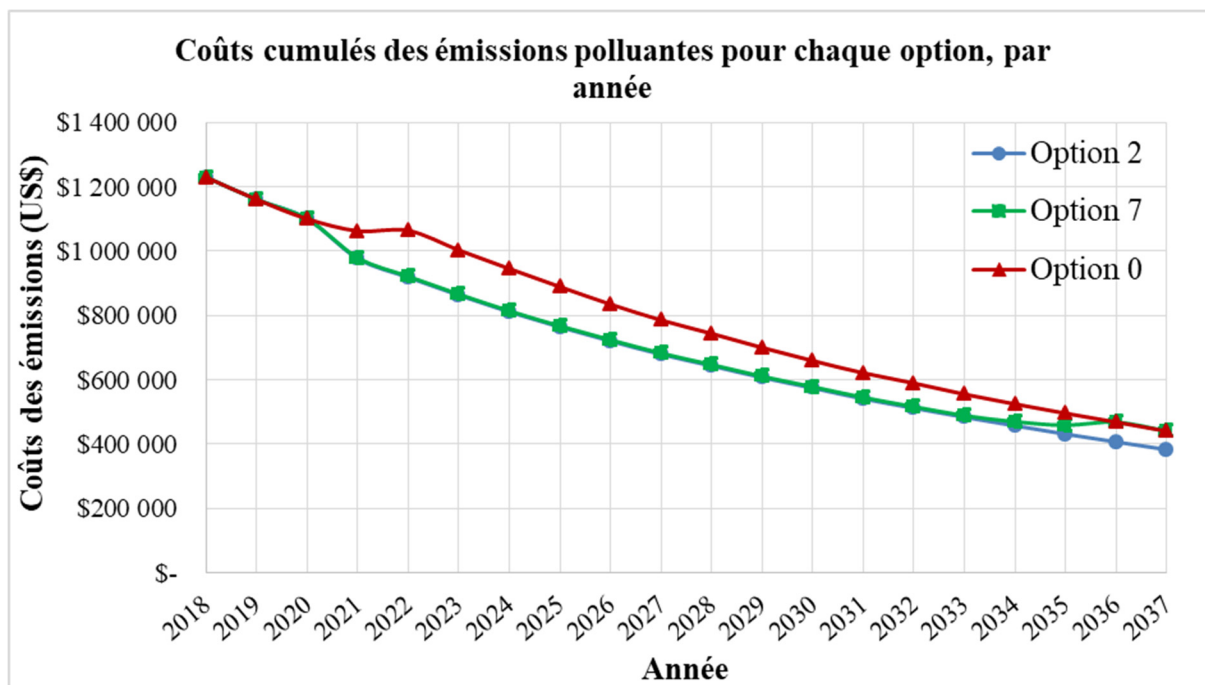


Figure 2.6 Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option et chaque année - Section A

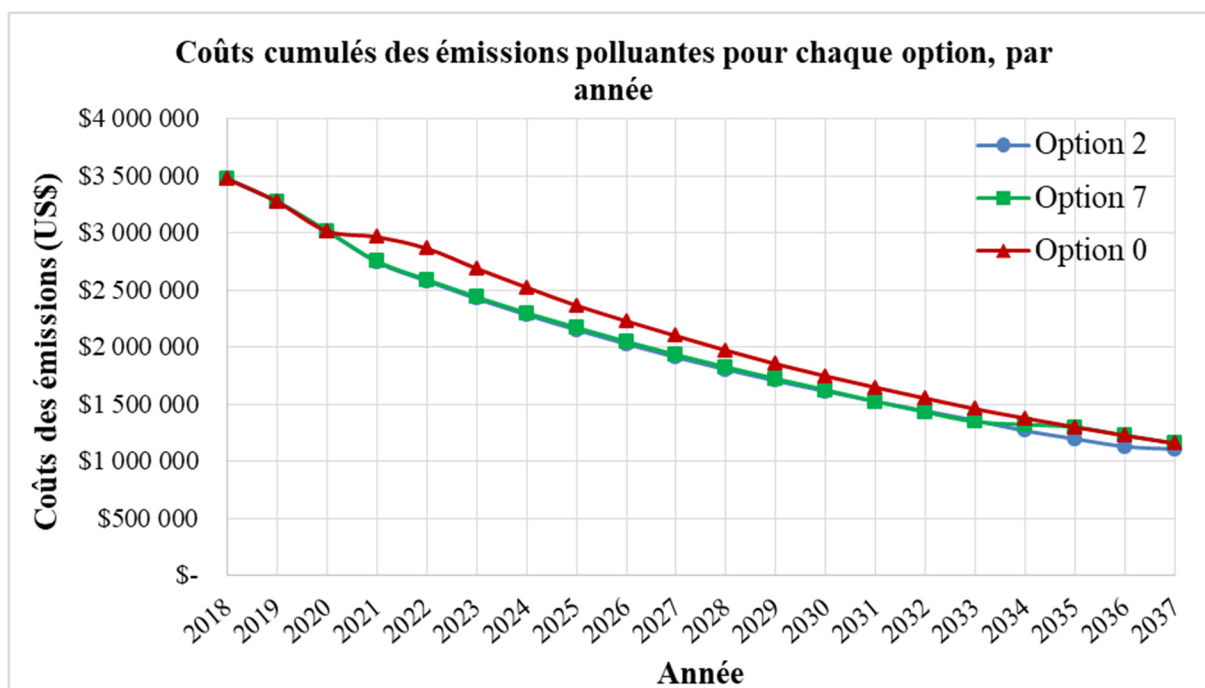


Figure 2.7 Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option et chaque année - Section B

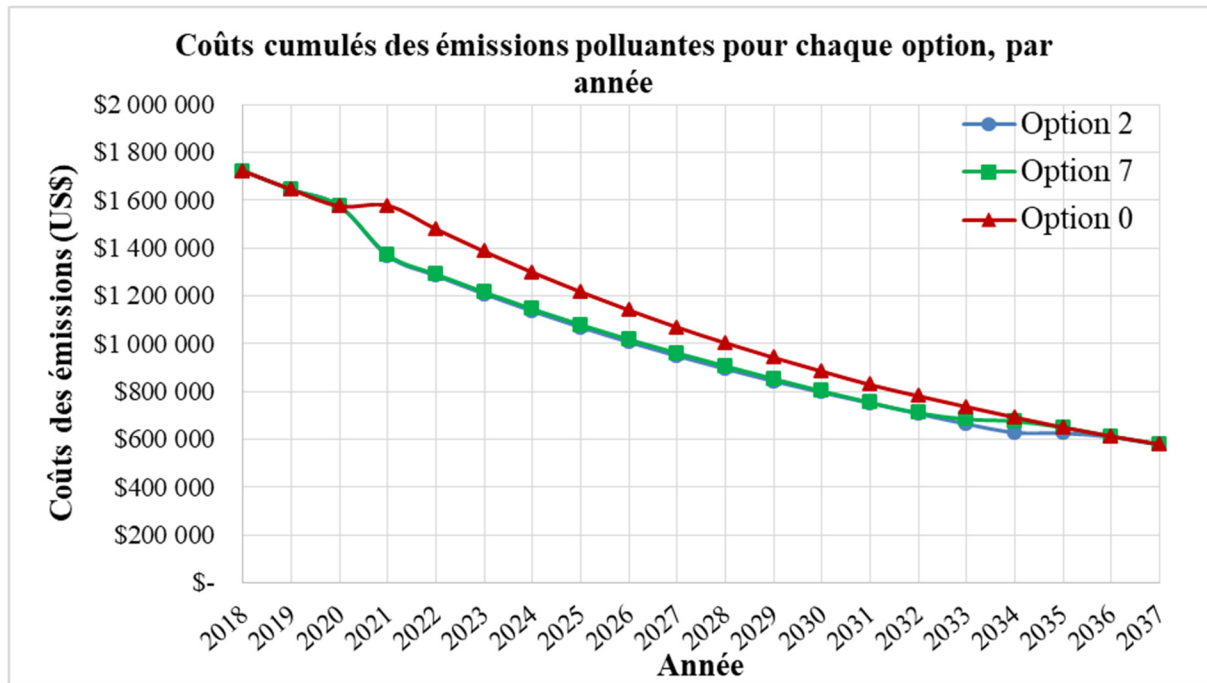


Figure 2.8 Coûts cumulés des émissions polluantes pour chaque option et chaque année – Section C

Les deux premières années, les coûts des émissions polluantes cumulés sont égaux pour toutes les sections. Les bénéfices d’une intervention sont comptabilisables au bout de la troisième année de mise en service de l’infrastructure.

Les coûts cumulés pour les options 2 et 7 sont les mêmes jusqu’en 2032 pour la section C et 2033 pour les sections A et B, c’est-à-dire respectivement durant les 14 et 15 premières années de la phase d’utilisation de la chaussée reconstruite. La différence de coût observable les dernières années de la simulation est due à un plus mauvais état de la chaussée consécutif à l’option 7 par rapport à l’option 2 qui aura préservé la couche de roulement.

Le matériau choisi et l’entretien appliqué ont une influence sur le coût des impacts environnementaux lorsque la route atteint la fin de son cycle de vie.

C’est l’état de la couche de surface et l’âge de la chaussée qui vont influencer sur la quantité d’émissions polluantes rejetées dans l’atmosphère.

2.7.1.4 Histogrammes des bénéfices des différentes stratégies d'intervention face à l'option de ne rien faire, tracés par année et par type de polluant

Le logiciel HDM-4 produit de volumineux tableaux présentant les quantités de polluants en tonne par an, pour chaque stratégie, dont un exemple est exposé ci-dessous.

Tableau 2.19 Quantité de polluants en tonne par an, produit du HDM-4
Section A, Option 2

Année	Hydrocarbures	Monoxyde de carbone	Oxydes d'azote	Dioxyde de soufre	Dioxyde de carbone	Particules <i>PM_{2.5}</i>
2018	247,57	980,23	439,13	14,51	36 624,45	50,68
2019	256,95	1 015,30	454,69	15,09	37 948,74	52,65
2020	268,00	1 055,75	472,14	15,77	39 514,25	55,00
2021	261,97	1 043,56	466,93	15,29	38 926,74	53,46
2022	270,99	1 077,37	481,71	15,84	40 188,97	55,35
2023	280,10	1 111,77	496,75	16,39	41 475,54	57,26
2024	289,46	1 147,43	512,40	16,95	42 808,41	59,21
2025	299,92	1 186,20	529,31	17,60	44 255,69	61,41
2026	311,15	1 227,29	547,19	18,29	45 788,66	63,79
2027	322,61	1 269,24	565,41	19,00	47 355,42	66,22
2028	336,13	1 316,99	586,06	19,86	49 139,65	69,12
2029	348,74	1 363,26	606,21	20,64	50 862,69	71,79
2030	363,01	1 414,39	628,41	21,53	52 769,52	74,83
2031	376,11	1 463,15	649,53	22,34	54 594,50	77,59
2032	391,52	1 519,18	673,59	23,29	56 690,09	80,86
2033	406,86	1 574,22	697,36	24,26	58 747,11	84,14
2034	423,09	1 632,02	722,37	25,28	60 907,95	87,61
2035	438,86	1 690,97	747,17	26,24	63 121,82	90,93
2036	455,56	1 754,67	773,97	27,25	65 522,48	94,41
2037	471,84	1 813,21	799,08	28,27	67 724,08	97,89

Les histogrammes des bénéfices des différentes stratégies d'intervention face à l'option de ne rien faire, tracés par année et par type de polluant ont été obtenus par la différence des coûts pour chaque émission entre l'option 2 et l'option 0, ainsi qu'entre l'option 7 et l'option 0.

D'une manière plus intuitive que par la lecture des tableaux de quantité de polluants, produits par le logiciel HDM-4, ils permettent de déterminer : si les rejets de chaque émission prise

individuellement sont moins importants dans le cas d’une intervention par rapport à l’option de ne pas agir, quelle émission est la plus coûteuse et de définir l’évolution de la quantité de polluant rejeté en fonction de l’âge et de l’état de la chaussée.

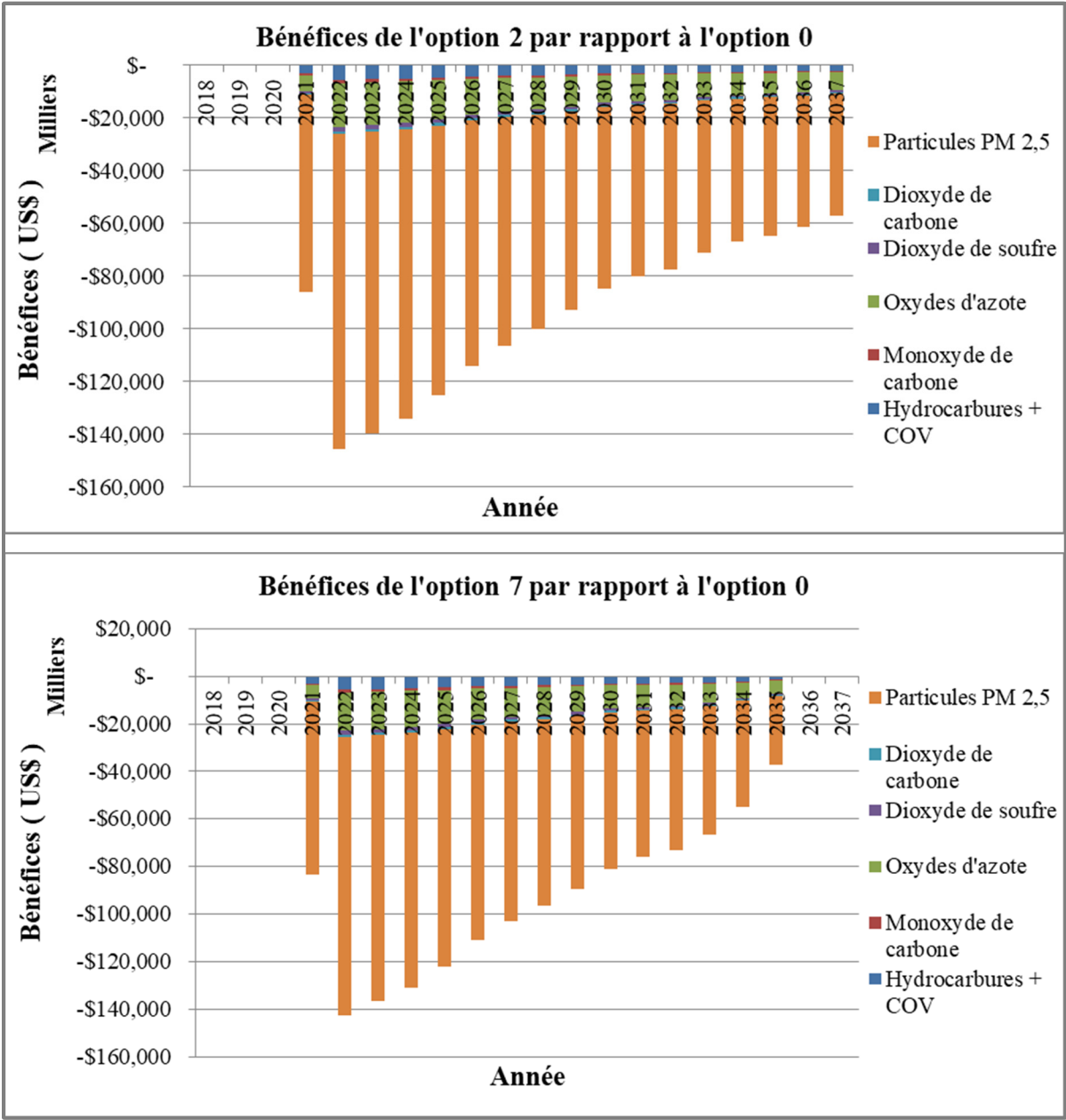


Figure 2.9 Bénéfices des options 2 et 7 par rapport à l'option 0 – Section A

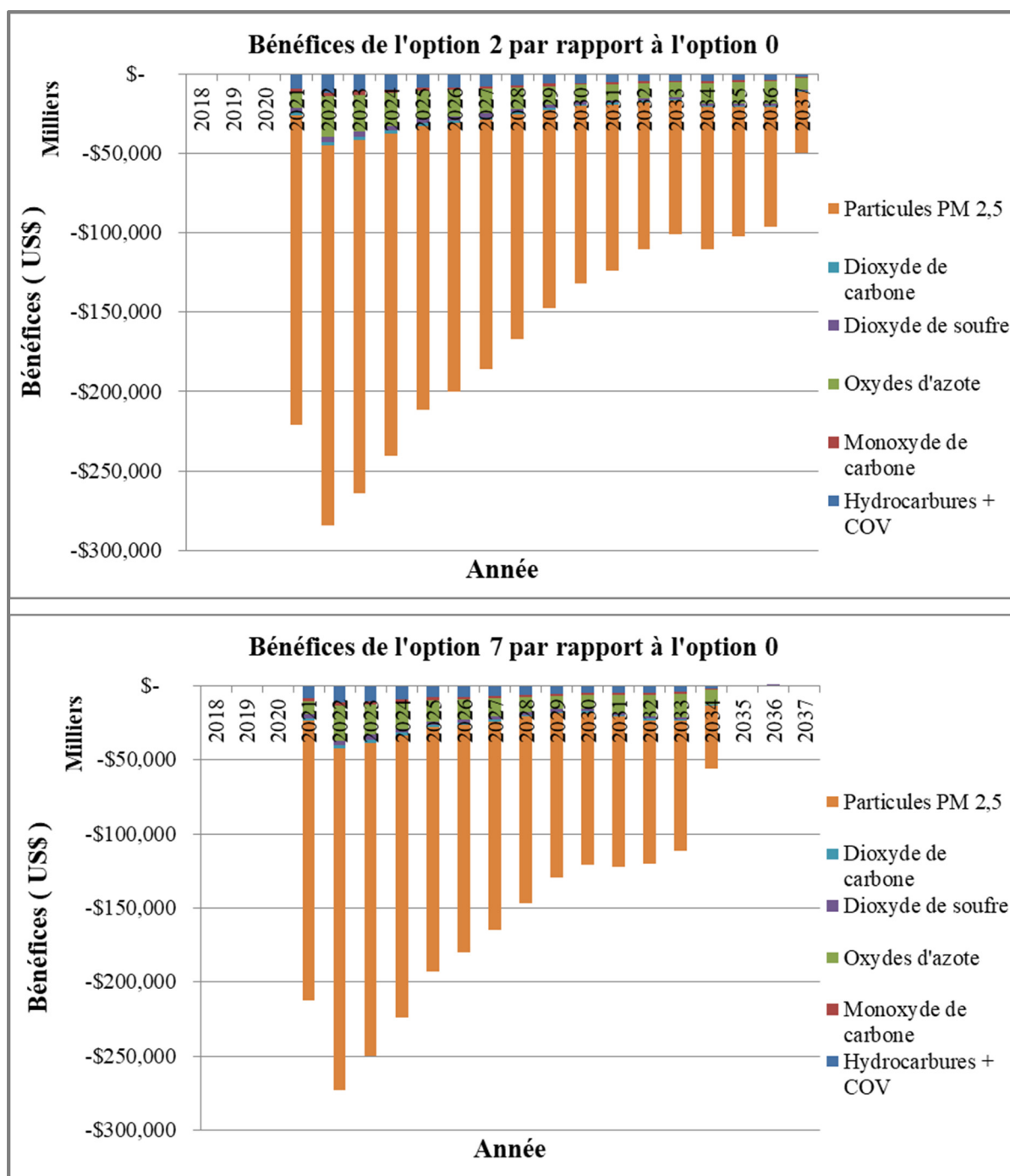


Figure 2.10 Bénéfices des options 2 et 7 par rapport à l'option 0 – Section B

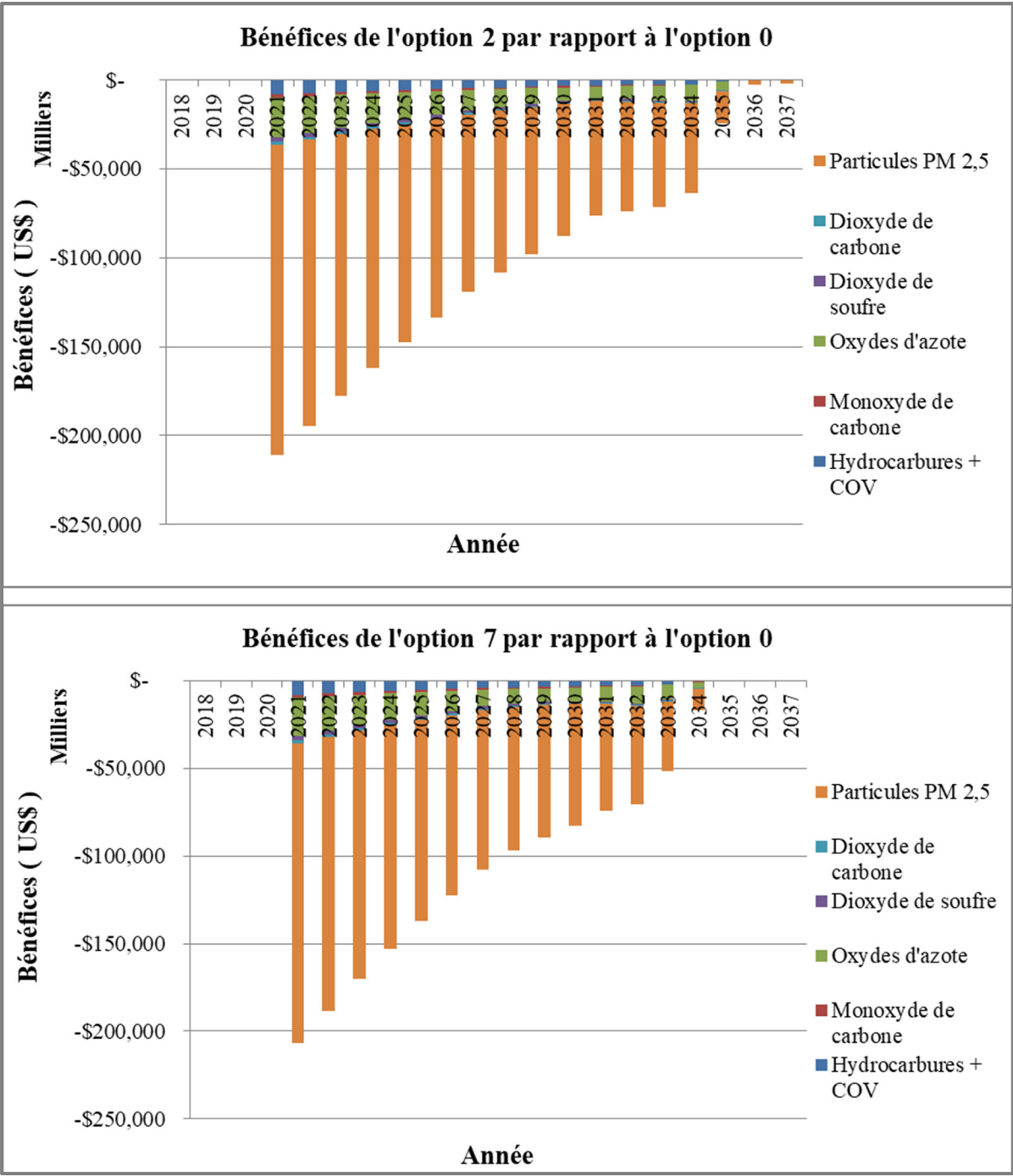


Figure 2.11 Bénéfices des options 2 et 7 par rapport à l'option 0 – Section C

Il s'agit bien de bénéfices pour chaque émission. **Quelle que soit l'option, intervenir entraine moins de rejets pour toutes les émissions polluantes.**

Les commentaires suivants ont pour objectif de distinguer les quantités de polluants émis et le coefficient en dollars américains par tonne approprié spécifiquement à chaque émission.

Les particules possèdent le coût environnemental le plus élevé car leur coefficient en dollars par tonne est le plus élevé. En effet, la quantité de particules émises s'élève à 50,68 tonnes pour la section A en choisissant l'option 2 en 2018 contre 36 624,45 tonnes de CO₂, 980,23 tonnes de CO, 439,13 tonnes de NO_x et 247,57 tonnes d'hydrocarbures. Les oxydes d'azote arrivent second dans le palmarès des coûts environnementaux, car le nombre de tonnes par an rejetées est le deuxième plus important après le dioxyde de carbone, alors que son coefficient est moins élevé que celui du dioxyde de soufre et des particules. Les quantités de dioxyde de carbone rejetées dans l'atmosphère sont énormes. Toutefois, leur coût environnemental est très faible car le coefficient appliqué est infime du fait de sa comptabilisation en tant que phénomène global.

L'état de la couche de surface et l'âge de la chaussée influencent la quantité et le type d'émissions polluantes rejetées dans l'atmosphère. Le coût environnemental des particules dépasse largement celui des autres émissions polluantes.

2.8 Conclusion et recommandations

Ce chapitre a permis d'établir la liste des impacts liés à la circulation routière sur le bien-être et la santé des populations, les écosystèmes naturels, l'agriculture et les infrastructures. Les liens successifs entre les impacts environnementaux et le trafic, puis entre ces impacts et les caractéristiques des chaussées, et enfin entre ces impacts et les coûts environnementaux ont été démontrés dans la revue de la littérature.

La pollution atmosphérique est le phénomène néfaste le plus important et l'impact sanitaire des émissions polluantes est celui qui se prête le mieux à une quantification puis à une monétisation.

Notre expérience repose uniquement sur la monétisation des émissions polluantes (hydrocarbures, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre, dioxyde de carbone et particules) affectant des paramètres d'évaluation précis. L'expérience a montré que la qualité du matériau de surface et la fréquence de l'entretien jouent un rôle dans la quantité d'émissions polluantes qui seront rejetées dans l'atmosphère par les véhicules empruntant la route rénovée. Les bénéfices environnementaux calculés par rapport à l'option de ne pas agir, couvrent près d'un quart des coûts totaux de l'intervention et de l'entretien. Aussi lors du choix de la stratégie d'intervention, les impacts environnementaux des émissions polluantes possèdent un poids économique non négligeable. De plus, les chiffres obtenus dans l'expérience sont adaptés au niveau économique du pays. Les coûts environnementaux et sanitaires locaux obtenus correspondent aux coûts réels absorbés par les habitants de ce pays en voie de développement. Ils seraient encore plus élevés dans un pays développé. Malgré les hypothèses restrictives, les incertitudes intrinsèques aux études anthropologiques et épidémiologiques et le manque de connaissance scientifique, l'approche proposée dans ce chapitre permet de calculer un ordre de grandeur des coûts environnementaux.

En conclusion, ce chapitre démontre tour à tour la faisabilité de la monétisation des impacts environnementaux dans le but de les incorporer dans les systèmes de gestion des chaussées, l'indispensabilité de leur comptabilisation pour estimer les coûts réels et les bénéfices des différentes stratégies d'intervention, et la pertinence de leur prise en compte pour limiter les impacts environnementaux et sanitaires de la chaussée au cours de sa phase d'utilisation. Ce chapitre met en exergue la possibilité pour les organismes de gestion des chaussées d'influencer l'intensité des rejets d'émissions polluantes dues à la circulation routière, et de prendre en compte le volet environnemental lors du choix d'une stratégie d'intervention.

L'outil décisionnel devra permettre une visualisation de l'environnement voisin de la chaussée, des zones habitées, des champs cultivés et des régions sauvages. Il devra rassembler les éléments sur le climat et les particularités naturelles ou administratives régionales.

CHAPITRE 3

OUTILS GRAPHIQUES EN GESTION DES CHAUSSEES

Le premier chapitre présente les déficiences des diagnostics actuels des causes de dégradations, entraînant des interventions inadaptées et de mauvais investissements, et insiste sur le besoin de développer une méthode d'auscultation plus efficace et plus fiable. Le second chapitre souligne la nécessité de prendre en compte les impacts environnementaux, responsables de lourdes pertes économiques, dans la recherche de la solution optimale d'intervention pour l'entretien, le renforcement ou la réhabilitation de la chaussée. Dans ce contexte, une réingénierie des procédés actuels pré-intervention doit être entreprise afin d'obtenir de meilleurs résultats au niveau des coûts, de la qualité et des délais.

Le besoin général est formulé comme suit : les administrations routières doivent se doter d'un outil d'aide à la prise de décision, support de l'analyse de l'ingénieur, qui permette de rassembler, de confronter et de visualiser les données techniques et environnementales ; qui soit accessible partout et en tout temps ; les experts et les ingénieurs routiers peuvent modifier et ajouter de l'information et les mises à jour devront être immédiates et automatiques. Cet outil s'inscrit dans le cadre des systèmes de gestion des chaussées, « l'ensemble des outils et des méthodes qui assistent les décisionnaires dans leur recherche de stratégies optimales pour fournir, évaluer et maintenir la route dans des conditions de service acceptables pour un temps donné » [notre traduction] (Peshkin, 2011). Leurs objectifs sont d'améliorer l'efficacité des décisions, d'apporter un retour sur les conséquences des décisions, de faciliter la coordination des activités et d'assurer la cohérence des décisions prises (Pellecuer, 2014).

Les nouvelles technologies de l'information (TI) fournissent de nombreuses solutions de stockage, de partage et de visualisation de l'information. Ce chapitre est une revue de la littérature portant sur ces nouvelles technologies, accès sur la recherche de concepts existants qui offrent des pistes pour le futur développement d'un outil personnalisé.

3.1 Nouvelles technologies de l'information

3.1.1 Gestion informatisée de l'information, des documents et des connaissances

3.1.1.1 Gestion de l'information

La gestion de l'information regroupe l'ensemble des fonctions liées à l'établissement de la politique et des procédures d'acquisition, d'analyse, de stockage, de conservation, d'utilisation, d'évaluation et de circulation de l'information.

L'expression « gestion de l'information » est aujourd'hui systématiquement associée à la mise en œuvre de systèmes informatiques pour le traitement de cette information. En effet, les entreprises de la construction sont de plus en plus informatisées répondant ainsi aux besoins de gérer un nombre de données toujours plus grand. L'information est devenue une ressource essentielle, d'où la migration du concept d'information vers celui de « ressources informationnelles » et les liens indissociables entre les notions de technologies de l'information et l'information elle-même (OQLF, 2006).

3.1.1.2 Gestion des documents

La gestion des documents regroupe l'ensemble des opérations de planification et contrôle régissant la création, l'utilisation et la conservation des documents jusqu'à leur destruction ou leur archivage (OQLF, 2006).

Tout comme la gestion de l'information, la gestion des documents s'oriente de plus en plus vers les systèmes informatiques. Un système de gestion des documents électroniques est défini comme l'ensemble des moyens informatiques engagé pour gérer le cycle de vie d'un document électronique, de manière à optimiser l'accès à ce document, à l'information qu'il contient et de le lier à d'autres informations (Rivard, 2017).

3.1.1.3 Gestion des connaissances

La gestion des connaissances a pour objectif de créer de la valeur ajoutée en recensant, structurant, conservant et transmettant l'ensemble des connaissances pertinentes afin d'améliorer l'efficacité, la productivité et la prise de décision, de tirer le meilleur parti de l'actif intellectuel d'une organisation et de constituer à long terme le savoir de l'entreprise (OQLF, 2006). Le processus comprend différentes étapes de création, d'enrichissement, de capitalisation, de validation, et de diffusion de la connaissance. Elle est de plus en plus automatisée dans des systèmes d'information informatisés (Rivard, 2017).

3.1.1.4 Base de données informatique

Une base de données informatique est un ensemble de données stockées sur un support informatique, organisées et structurées. Les utilisateurs peuvent consulter, modifier son contenu et ajouter de nouvelles données.

Un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) est un ensemble de logiciels spécialisés qui permet de :

- organiser les données : il organise les données en tables et crée les mécanismes garantissant un accès rapide aux données ; il informe les utilisateurs sur les structures organisationnelles qu'il emploie;
- modifier les données : le SGBD garantit l'évolution cohérente des données ; il vérifie que les contraintes (unicité ou référence) sont respectées;
- accéder aux données : le SGBD permet l'accès aux données par plusieurs utilisateurs simultanément ; il contrôle les opérations simultanées sur les mêmes données ; il garantit que seuls les utilisateurs autorisés peuvent accéder aux données et les modifier;
- protéger les données : le SGBD garantit l'intégrité et l'accessibilité des données en cas d'incident ou d'attaque (Cornuéjols, 2011).

Un SGBD contient trois niveaux d'abstraction pour masquer certains aspects trop spécifiques aux usagers :

- au niveau physique ou interne, le stockage et les méthodes d'accès aux données sont définis ; il considère le mode d'inscription sur le support qui la mémorise et la structuration des données est décrite de façon très détaillée;
- au niveau logique ou conceptuel, la donnée est considérée de façon sémantique. Son contenu effectif et les relations qui la lient à d'autres données sont définis, soit il définit l'arrangement des informations au sein de la base de données;
- le niveau externe est le niveau d'abstraction le plus élevé. Il est utilisé pour simplifier les interactions entre les utilisateurs et la base. Les données sont présentées sous plusieurs vues selon les besoins.

Il y a plusieurs types d'interface qui existent pour accéder aux données et les gérer. Des interfaces sont nécessaires entre les programmes d'application et la base de données, pour les informaticiens et les codeurs, et pour les usagers fréquents qui ne sont pas des experts informatiques. Les technologies disponibles pour engendrer ces interfaces sont les langages de programmation tels que Structured Query Language (SQL) ou des formulaires simplifiés (Rivard, 2017).

3.1.2 Partage de l'information et collaboration en ligne

3.1.2.1 Portails WEB

Un portail Web est un système de gestion des documents et une plateforme de travail collaborative, basé sur l'infrastructure Internet. Il permet aux différents acteurs d'un projet de collaborer à distance et de transmettre de l'information rapidement. Les portails WEB spécialisés rassemblent et partagent des ressources pour un groupe de personnes ayant un intérêt commun. L'accès aux ressources requiert une identification et un mot de passe afin que seules les personnes concernées puissent consulter et modifier les informations.

3.1.3 Coûts et bénéfices de l'intégration d'une nouvelle technologie

Identifier et quantifier les coûts et les bénéfices est une étape importante dans le choix de l'implémentation d'une nouvelle technologie. La nature et le montant des bénéfices dépendent de la quantité et de la qualité des données à intégrer, de la configuration de la base de données, du niveau de détail et de sophistication du système, tout autant que de l'organisation. Les bénéfices quantifiables sont regroupés en quatre catégories :

- les bénéfices reflétant une amélioration des pratiques existantes : les nouvelles technologies permettent d'automatiser la capture, la manipulation et l'archivage des données géographiques et sont donc à l'origine d'une réduction ou d'une élimination des activités redondantes, du temps pour localiser et obtenir les informations, et d'une amélioration de la productivité. Les économies sont mesurées en temps épargné;
- les bénéfices offerts par des possibilités supplémentaires;
- les bénéfices résultant d'un événement imprévu;
- les bénéfices pouvant résulter de la vente de services d'information.

La réduction des tâches fastidieuses, la rapidité de réponse pour les clients, l'amélioration du processus de décision, l'amélioration du moral des employés et l'augmentation de la confiance en soi donnée par l'opportunité de travailler avec des outils de pointe technologique sont des bénéfices intangibles (Antenucci, Brown, Croswell, & Kevany, 1991).

L'implémentation d'une nouvelle technologie et l'amélioration du processus de décision entraîne des bénéfices pour l'entreprise à long terme. Afin de visualiser les bénéfices, deux courbes des coûts cumulés des opérations, avec ou sans le changement, sont tracés en fonction du temps. L'investissement initial pour implémenter un nouvel outil est important, cependant il devient rentable à long terme, graphiquement lors de l'intersection des deux courbes.

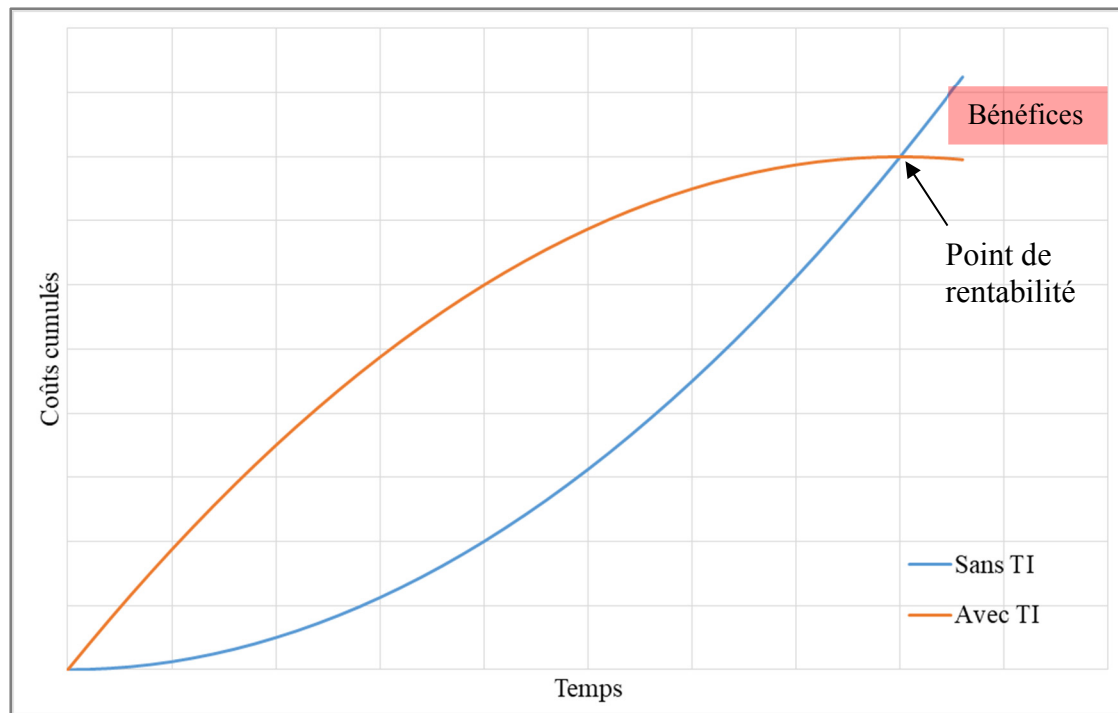


Figure 3.1 Courbe des coûts cumulés des opérations avec et sans investissement dans les nouvelles technologies de l'information
Adaptée de Antenucci et al. (1991)

La gestion informatisée de l'information et les technologies collaboratives sont de plus en plus prisées dans l'industrie. Les propriétés d'organisation, de consultation, d'accès et de partage permettent d'améliorer l'efficacité et la productivité des entreprises. Elles permettent de répondre aux besoins, cités en introduction du chapitre, de rassembler les données routières, d'accessibilité, de mise à jour et de collaboration. De plus, l'investissement sur le long terme dans les nouvelles technologies est payant.

Le besoin de visualiser les données techniques et environnementales est abordé dans la partie suivante.

3.2 Systèmes d'informations géographiques (SIG)

Un système d'informations géographiques (SIG) est une base de données numérique et graphique permettant de rassembler, d'organiser, d'analyser, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement sur une carte virtuelle. Il s'agit d'un outil de gestion des données spatiales et d'aide à la prise de décision.

3.2.1 Origines et évolution

Les systèmes d'informations géographiques reposent sur des technologies informatiques et leur apparition remonte aux années 1950. Les premières tentatives d'obtenir une carte virtuelle sont isolées. En Angleterre, le projet est mené par des botanistes cartographiant la flore ; aux États-Unis, la cartographie est une entreprise militaire pour la défense aérienne.

À la fin des années 1950, une étude sur les transports dans la ville de Chicago a entraîné la création d'un portrait graphique du trafic sur certains axes routiers. Philip Parent identifie ce développement comme la première plateforme automatisée de données graphiques.

Les universités américaines ont joué un rôle important dans l'édification des relations théoriques spatiales et géographiques, nécessaires aux systèmes étudiés. Dans ces années 1950 et 1960, le Massachusetts Institute of Technology (MIT) a développé la conception assistée par ordinateur (CAO), actuellement un outil au fondement des opérations de génie civil et une base des SIG.

Dans les années 1970, les technologies SIG ayant subi d'énormes progrès, elles sont de plus en plus acceptées dans les différents domaines de l'industrie et parmi les agences gouvernementales. Elles permettent d'économiser du temps et de solutionner des problèmes plus efficacement. Elles doivent aussi leur succès à l'émergence des inquiétudes environnementales. En effet, très tôt, les SIG ont été utilisés pour des analyses sur les facteurs influençant la santé humaine, sur les impacts écologiques et économiques de l'occupation et de l'exploitation des terres.

Dix ans plus tard, les progrès technologiques tels que l'évolution de l'affichage, l'intégration d'une palette de couleur et l'impression à jet d'encre, permettent aux SIG de devenir plus fiables, plus productifs, plus ergonomiques et donc, plus répandus. Les premières firmes à intégrer les technologies de gestion de bases de données graphiques furent Comarc Design Systems, ESRI et Intergraph (Antenucci et al., 1991).

Aujourd'hui, ESRI est le chef de file mondial des logiciels SIG et offre des solutions SIG. Selon les études du prestataire spécialisé dans l'étude de marché, P&S Market Research (2017), le marché des SIG est en plein essor, passant d'un investissement de 8,985.5 millions de dollars en 2016 à 17,510.9 millions de dollars d'ici 2023, avec un taux de croissance annuel moyen de 10,1 %. En effet, l'urbanisation massive, le développement des SIG dans les entreprises et dans les pays en voie de développement, tendent à prédire une augmentation de la demande en SIG d'ici 2023 (P&S Market Research, 2017).

3.2.2 Applications

Les SIG sont désormais une technologie de pointe. Ils permettent d'exécuter des requêtes géographiques directes et intuitives plutôt que d'être limitées à des requêtes textuelles (Elhadi, 2009). Ils se sont répandus dans les entreprises et les agences publics qui ont su voir la multiplicité de leurs applications :

- applications commerciales : ils aident les professionnels à prendre les meilleures décisions marchandes au travers d'une représentation des données géo-démographiques et d'analyses de marchés interactives;
- applications politiques : ils fournissent aux administrations élues l'opportunité de mener des analyses sur les données géo-démographiques, afin de rendre une décision politique optimale;
- applications pour la gestion et la planification :
 - gestion des infrastructures : la cartographie des réseaux d'eaux, d'égouts, de gaz, de télécommunications et de routes permet de gérer leur expansion et leur entretien;

- gestion des biens fonciers : les autorités fiscales peuvent tenir un inventaire du parc immobilier;
- gestion des ressources renouvelables : les SIG constituent un moyen efficace de gérer les données sur les ressources naturelles;
- urbanisme : les SIG permettent une planification plus efficace des travaux dans les zones urbaines ou rurales;
- observations et support de calculs :
 - logistique des transports : la carte des routes et des chemins de fer permet aux gestionnaires des transports d'apprécier le trafic;
 - santé publique et sécurité : la cartographie permet de comprendre les mécanismes de propagation de maladie;
- exploitation des réserves de gaz, de pétrole et de minéraux : les SIG entraînent une amélioration des modèles d'exploration pour ces ressources;
- recherche et éducation : des projets de recherche étudient l'utilisation et la valeur sociale, économique et institutionnelle des données recueillies (Antenucci et al., 1991).

3.2.3 Base de données graphiques et non-graphiques

Les SIG sont avant tout une base de données graphique et non-graphique.

Les données dites « graphiques » ou « spatiales » sont des objets possédant une orientation et liées par deux ou trois dimensions à l'espace (Elhadi, 2009). Elles peuvent inclure les coordonnées, les règles et les symboles qui définissent les éléments spécifiques planimétriques d'une carte. Les données spatiales sont utilisées pour générer la carte virtuelle, elles sont le support de la localisation des autres données (Li & Xie, 2010).

La base des données non-graphiques, aussi appelés « attributs », contient les descriptions spécifiques des objets de la carte et les relations entre la carte et les localisations. Ce sont des données textuelles, conservées dans des formats alphanumériques standards et gérées à part des données graphiques à cause de leurs caractéristiques différentes (Antenucci et al., 1991).

Les attributs peuvent désigner pour une rue : sa largeur, le nombre de voies, l'historique de construction, l'état de la chaussée, le volume de trafic ou des photographies ; mais aussi des descriptions de proximité, de contiguïté et les liens numériques entre les attributs et la carte (Li & Xie, 2010).

Les SIG sont composés de strates graphiques supportant chacune, un ou plusieurs attributs associés. L'information géographique est géoréférencée, numérique et visualisable sur une carte (Landry, 2005). Les données collectées sont liées à une localisation précise sur la carte.

3.2.4 Propriétés graphiques et symboles

La topologie de la Terre est recrée par le biais de modèles mathématiques et de photographies satellites (Zhou, Wang, Wang, & Reichle, 2010). Pour les cartes basées sur une conception assistée par ordinateur, les symboles de la base de données graphiques suivants sont utilisés :

- un point : pour un objet de dimension nulle spécifiant une localisation au travers de coordonnées (par exemple l'endroit où les mesures ont été effectuées);
- une ligne : pour un objet à une dimension (par exemple, l'axe de la route);
- une surface : pour un objet à deux dimensions (par exemple, la surface au sol occupée par un bâtiment) (Tsouchlaraki, Achilleos, Nasioula, & Nikolidakis, 2009).

Les figures suivantes sont des exemples de cartes virtuelles générées par une conception assistée par ordinateur, associées à des SIG opérationnels :

La carte, présentée Figure 3.2, a été développée par le Bureau de recensement de la population américaine. Les lignes jaunes représentent les rues et sont associées à une plage d'adresses.

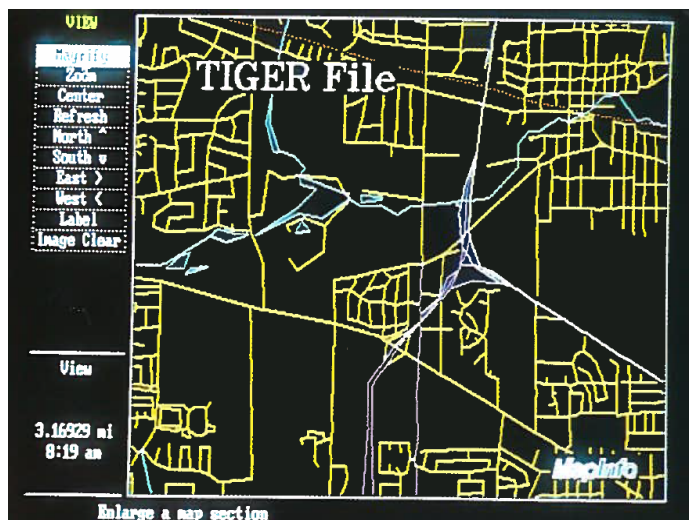


Figure 3.2 Carte basée sur une conception assistée par ordinateur
(recensement et représentation des rues)
Tirée de Antenucci et al. (1991)

Développée par la compagnie *Intergraph*, utilisée dans les systèmes d'informations et d'utilisation du territoire, le SIG de la Figure 3.3 permet de localiser une parcelle de terre et de visualiser ces informations.

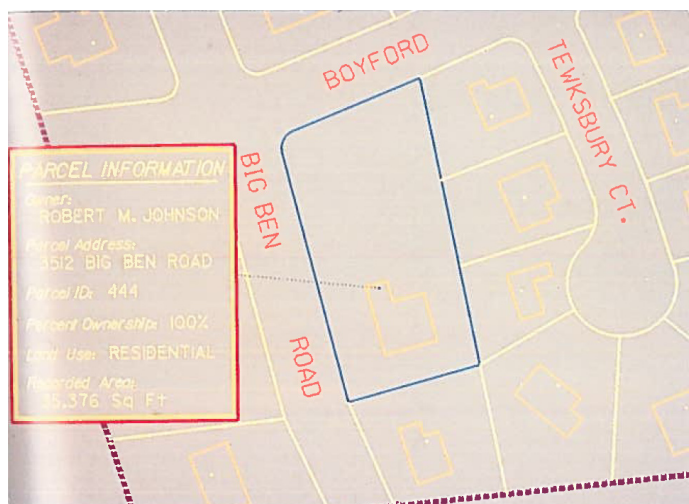


Figure 3.3 Carte basée sur une conception assistée par ordinateur
(recensement et représentation des parcelles foncières)
Tirée de Antenucci et al. (1991)

Cependant, la disponibilité et la gratuité des images satellitaires et aériennes de haute qualité a entraîné leur utilisation accrue dans les SIG.

Les images satellitaires et les photographies aériennes à haute résolution permettent l'obtention de cartes plus détaillées. Les mises à jour d'Octobre 2017, permettent d'obtenir des images ayant une résolution d'un mètre pour la plupart des pays du globe et de 0,3 mètres pour les États-Unis et l'Europe de l'Ouest. Les outils de visualisation d'*ESRI*, tels *qu'ArcGIS Online Map Viewer*, *ArcGIS Desktop*, et *ArcGIS Pro*, sont équipées de cette technologie. Sur le site d'*ESRI*, une mappemonde virtuelle et dynamique est accessible gratuitement (*ArcGIS*, 2017).



Figure 3.4 Image satellite d'une ville d'Afrique de l'Ouest
fournie gratuitement par *ArcGIS Online Map Viewer*

Cette évolution profite aussi à la conception assistée par ordinateur. Les dessins numériques sont plus détaillés et plus fiables car ils naissent du décalquage des images satellites ou aériennes. Les images reconstruites par ordinateur ont l'avantage d'être plus dépouillée et plus claires et entraînent une superposition plus lisible de certains attributs comme le nom des rues. Si la fonction du SIG n'est pas l'observation du réel, alors une carte CAO sera privilégiée.

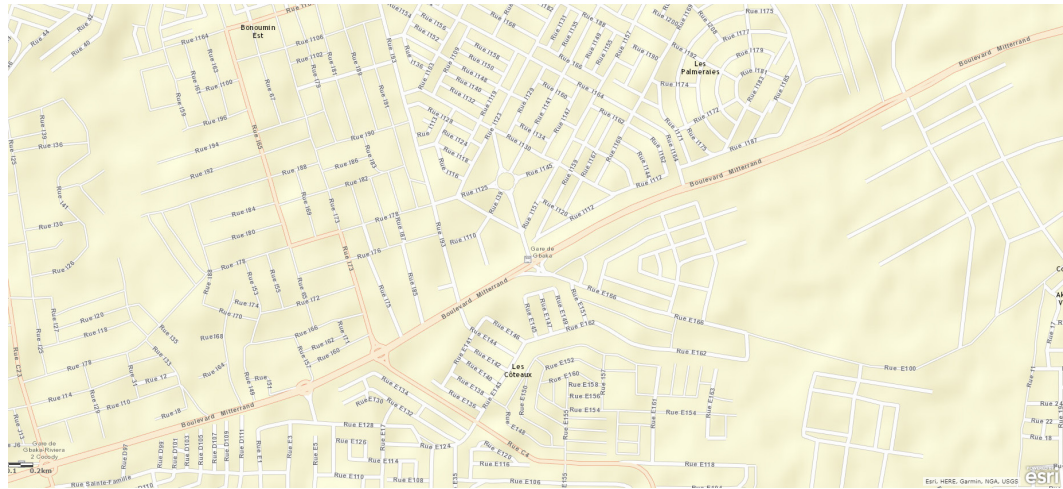


Figure 3.5 Image reconstruite par ordinateur à partir de la photographie précédente, fournie gratuitement par *ArcGIS Online Map Viewer*

Qu'elles soient issues d'une conception par ordinateur ou d'images satellites et aériennes, les cartes produites par les SIG sont personnalisées et personnalisables. Leur objectif est de mettre en valeur les données pour guider la prise de décision.

De nombreuses recherches en sciences cognitives démontrent la supériorité des images devant les chiffres et les mots pour stimuler la compréhension (Bédard, Proulx, Rivest, & Badard, 2006), surtout lorsque ce sont des milliers de données qu'il faut traiter et analyser en vue de prendre une décision d'investissement. Les représentations graphiques offrent une flexibilité dans leur affichage qui permet aux utilisateurs d'établir des interactions plus rapidement. L'attention visuelle est captée par une mise en évidence de certains paramètres (Harold, Lorenzoni, Shipley, & Coventry, 2016).

3.2.5 Utilisation dans le domaine des chaussées

L'utilisation accrue et les bénéfices indéniables des SIG dans le domaine de la construction, poussent ces acteurs à implanter cette technologie dans les entreprises. Elles occupent une place de plus en plus importante dans le développement d'outils de gestion, et sont favorisées par les agences de transport. Selon la *Federal Highway Agencies - USA*, les SIG sont un

« ensemble d'outils et de méthodes assistant les décisionnaires afin de trouver les stratégies les plus efficaces économiquement pour fournir et évaluer l'état de la chaussée et maintenir la route dans des conditions de service acceptable » [notre traduction] (Elhadi, 2009). Grâce à la nature géographique du réseau routier, les données requises pour la gestion des routes possèdent toutes une composante spatiale. Les SIG s'imposent donc comme une technologie prometteuse pour gérer le flot de données routières (Medina, Flintsch, & Zaniewski, 1999). La principale contribution de ces systèmes concerne la collecte, la gestion et l'analyse, de plus en plus détaillées et complètes, des données de la route (Elhadi, 2009).

Les avantages de ces plateformes graphiques sont :

- la flexibilité de l'édition de base de données;
- la possibilité de rassembler les facteurs et les indices concernant l'organisation du réseau, la géométrie des routes, les matériaux de construction, les équipements routiers, le trafic, le climat, les finances, des paramètres concernant l'utilisation des territoires, la pollution et l'hygiène (Tsouchlaraki et al., 2009);
- la visualisation de l'état global du réseau ou d'une section spécifique;
- la visualisation de la distribution dans l'espace des routes en fonction de la valeur d'un indice;
- la mise en évidence des données grâce à un code couleur dynamique (Elhadi, 2009).

Les SIG ne sont que le support de l'analyse de l'ingénieur. Elles vont lui permettre de :

- comparer les zones par le biais d'indices et de diagrammes (Tsouchlaraki et al., 2009);
- hiérarchiser les besoins en entretien des routes d'un réseau;
- rechercher les zones spécifiques selon des critères établis par les ingénieurs (Tsouchlaraki et al., 2009);
- créer des cartes référençant l'état de la chaussée;
- trouver des interactions entre l'état de la route et sa localisation;
- créer de l'information;
- mettre à jour la base de données et simuler de nouvelles conditions pour observer l'impact de divers phénomènes (Tsouchlaraki et al., 2009).

3.2.6 Limites des SIG pour la gestion des routes

Toutes les fonctions citées ne sont que des exemples d'applications que pourraient contenir un SIG dédié au domaine des chaussées. L'élaboration d'une base de données contenant les données requises pour la gestion des routes et de la plateforme de visualisation adéquate doit être entreprise par une industrie privée spécialiste des SIG.

De ce fait, il n'existe pas d'outil répondant au besoin général mais les SIG représentent une piste inspirante pour le développement d'un outil. Malgré ces nombreuses applications, les SIG ne sont pas des systèmes spécifiques aux chaussées. Dans le cadre du développement d'un outil, une enquête sur les outils employés par les experts routiers pour décrire l'état et les caractéristiques de la chaussée doit être entreprise.

3.3 Schémas itinéraires

Le schéma itinéraire est un outil spécifique aux chaussées, bien loin des nouvelles technologies de l'information. Toutefois, il rassemble la plupart des éléments indispensables à l'élaboration des diagnostics de détériorations de la chaussée. Il constitue un point de départ des objets à intégrer dans le nouvel outil.

3.3.1 Origines

Les techniciens sillonnent la route à pied ou en voiture à faible allure afin de relever manuellement les dégradations de surface de la chaussée et les caractéristiques utiles à l'analyse technique. Des zones possédant des caractéristiques similaires apparaissent, la route est alors découpée en section homogène de quelques kilomètres. Leurs observations sont reportées sur un schéma itinéraire, document représentant le linéaire de la route pour une portion de la chaussée.

Cet outil de représentation graphique a été développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) dans les années 1970, et était associé au système d'évaluation des

chaussées souples, Vizir. La manière de reporter les données routières sur le schéma itinéraire a été normalisée dans le « catalogue des dégradations de chaussées » publié en 1972 par le LCPC et le « guide d'auscultation des chaussées souples » en 1977, en même temps que l'uniformisation de la méthode de classification et de quantification des dégradations de surface des chaussées.

L'objectif du schéma itinéraire est de fournir un portrait des dégradations de surface de la chaussée d'une section de route. À partir de cette image de la chaussée, l'ingénieur pourra ensuite déterminer les causes des détériorations et le traitement à adapter.

3.3.2 Données référencées sur les schémas itinéraires

Les schémas itinéraires produits sont formatés. Les données qui apparaissent sur le schéma itinéraire original, sont :

- le nom de la route;
- la localisation et la longueur de la section étudiée;
- le nombre de virages, la somme des dénivelées et la largeur de la chaussée constituent les seules descriptions de la géométrie;
- la description de l'environnement se limite à la présence de fossés et d'accotements et à leurs largeurs;
- le trafic cumulé équivalent en véhicules / jour dont les camions;
- l'évaluation des dégradations de la route : la localisation, le type, la gravité et l'étendue de la dégradation sont spécifiés. Pour la structure, l'opérateur relève les déformations, l'orniérage, la fissuration, le faïençage et les réparations. Pour le revêtement, il note les arrachements, les désenrobages, les nids de poule et l'état du joint longitudinal;
- les renseignements sur la structure : l'épaisseur et la nature des couches sont référencées;
- les mesures de portance, de déflexion, d'uni sont ajoutées, ainsi que la date à laquelle les mesures ont été effectuées.

3.3.3 Exemples

Sur le schéma itinéraire, la dégradation est représentée par un rectangle dont la couleur traduit le niveau de gravité et les dimensions délimitent la portion de route dégradée.

Le schéma itinéraire suivant propose de rassembler les caractéristiques de 6 km de route sur un feuillet. La route est localisée. Sa composition, ses dimensions et la description des fossés et des accotements sont spécifiées. Les dégradations répertoriées apparaissent en nuance de vert : un rectangle vide correspondant à un niveau de détérioration faible, hachuré est équivalent à moyen et plein, à une dégradation grave. Des mesures de portance et d'uni effectuées ultérieurement ont été reportées respectivement en violet et en rouge.

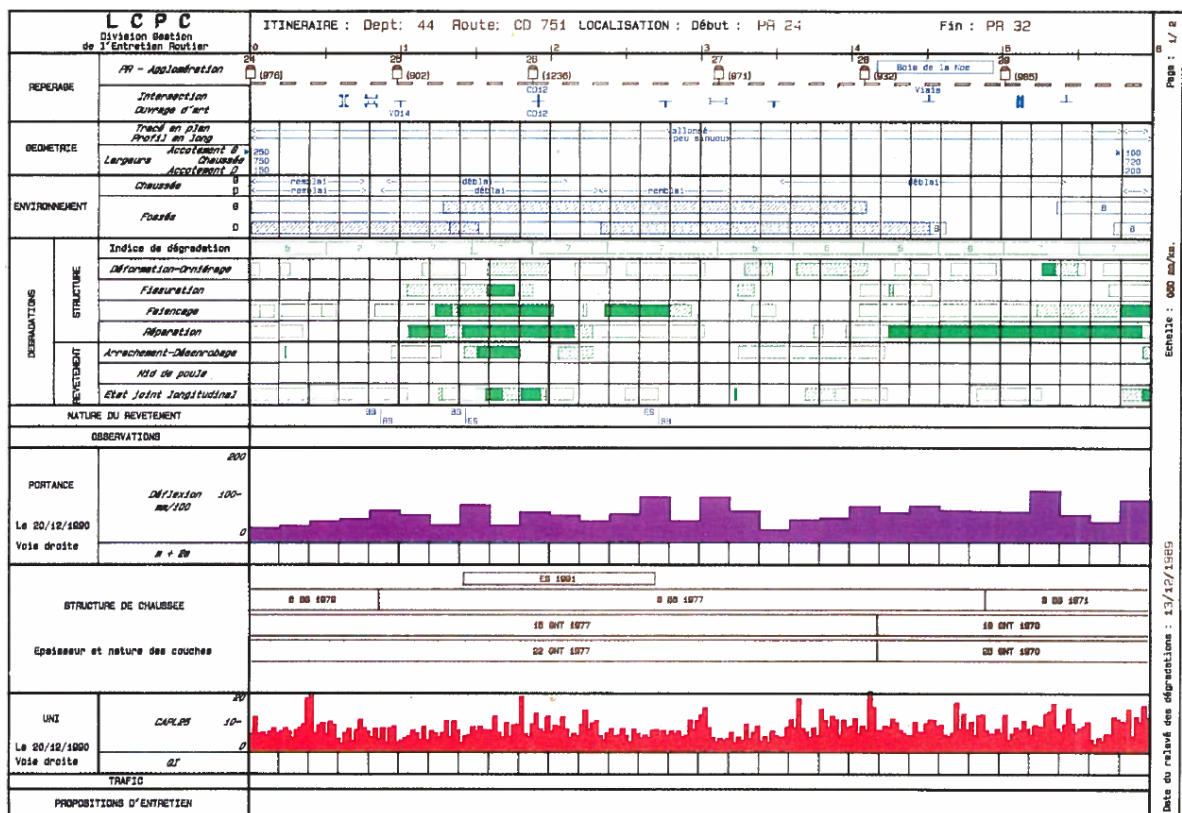


Figure 3.6 Exemple de schéma itinéraire
Tirée de Autret et Brousse (1991)

3.3.4 Critiques

Le schéma itinéraire répond au besoin de référencer les dégradations de la route, suite à un examen visuel. De ce fait, il ne présente que les informations relatives à l'état de la chaussée : les mesures de déflexion, les valeurs de l'IRI, et le référencement des dégradations. Il n'y a pas de détail sur le trafic : sa description se limite au calcul du TJMA, sans précision sur le pourcentage de poids lourds et leur charge.

L'environnement extérieur et le climat ne sont pas précisés. En effet, le schéma itinéraire a pour objectif d'être concis et de la dimension d'une feuille ; toute description manuelle de l'environnement extérieur l'alourdirait. De plus, il est très laborieux, voire impossible de noter tous les détails du milieu.

Les éléments référencés le sont suivant l'appréciation de l'opérateur sur place, qui peut commettre des erreurs ou des oublis.

Même si cette représentation graphique est plus intuitive qu'un texte, le schéma itinéraire traditionnel est figé. Il conserve la rigidité des documents analogiques. Les sections de route sont étudiées une à une et ce format limite l'appréciation globale de l'état du réseau routier.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence les avantages des nouvelles technologies de l'information. Il permet de préciser en conclusion les attentes des experts routiers. Les gestionnaires des chaussées s'attachent particulièrement aux concepts de partage et de visualisation. L'outil développé sera composé d'une carte numérique, support de l'information, inspirée des SIG et d'une base de données collaborative rassemblant les données techniques et environnementales. Des photographies et des vidéos prises depuis la route y seront ajoutées pour référencer l'environnement proche de la chaussée et éviter les erreurs et les oublis des experts. Les informations pertinentes devront apparaître directement sur la carte à la demande de l'utilisateur.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL

Les chapitres 1 et 2 ont révélé les failles du processus actuel de gestion des chaussées lorsqu'il faut intervenir sur une route dégradée. Il a été démontré que leurs impacts entraînaient des pertes économiques, de qualité et de temps. La revue de la littérature du chapitre 3 a permis d'établir que les outils existants ne sont pas adaptés pour répondre complètement aux besoins spécifiques des gestionnaires. De ce fait, pour répondre à la problématique de ce mémoire : « comment déterminer la meilleure stratégie d'intervention au niveau environnemental, technique et économique pour une chaussée dégradée ? », un outil d'aide à la prise de décision est développé à l'interne. Le chapitre 3 a également permis de justifier l'intérêt pour une bonne gestion d'un outil graphique et numérique : la piste exploitée sera de créer un outil à la croisée d'une technologie de visualisation et d'un outil spécifique au domaine des chaussées.

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie de développement adoptée pour se munir d'un outil d'aide à la prise de décision.

4.1 Processus de développement traditionnel

Les méthodes traditionnelles de développement d'outil se caractérisent par une succession de phases séquentielles :

- analyser les besoins, c'est-à-dire définir clairement l'ensemble des exigences des futurs utilisateurs du produit;
- concevoir un système qui répond aux besoins énoncés;
- implémenter, soit programmer en respectant les spécifications des phases précédentes;
- tester la qualité de l'outil;
- installer et maintenir cet outil au sein de l'entreprise commanditaire (Vaucher & Dufour, 2007).

Pour passer à l'étape suivante, il faut que la phase précédente soit validée. Ce processus s'écoule par pallier, sans possibilité de rétroaction ni de sauter une étape, d'où son nom de « cycle en cascade ».

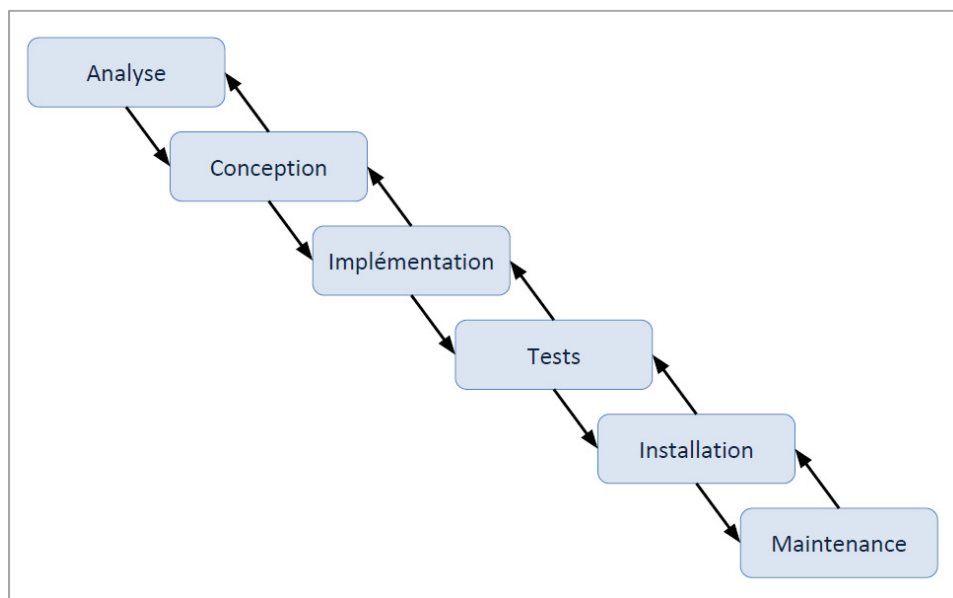


Figure 4.1 Schéma du processus de développement traditionnel - Cycle en cascade
Tirée de Vaucher et Dufour (2007)

La planification est définie suite à la définition des besoins, soit dès le début du projet. Elle est caractérisée par des plans détaillés qui découlent des exigences des utilisateurs finaux. Elle est donc prédictive. Les écarts avec les plans initiaux constituent l'unique façon de suivre l'avancement du projet (Messenger Rota & Tabaka, 2009). Ce type de développement suppose que l'ensemble des besoins est précisé et définitif dès la première étape du processus. Or il arrive fréquemment que les besoins des utilisateurs finaux soient modifiés ou augmentés (Vaucher & Dufour, 2007).

Les risques sont détectés lors de la phase des tests. Cela signifie que le contrôle qualité est tardif puisqu'il survient à la fin du cycle de développement. Ce processus est basé sur une documentation très détaillée pour la définition des besoins et du cahier des charges et lors de la conception afin d'anticiper ces risques (Vaucher & Dufour, 2007).

Le destinataire final n'est pas consulté pendant la quasi-totalité du développement, il découvre le produit fini. Les tests peuvent révéler que l'outil a dévié des besoins réels ou entraîner une modification des besoins (Vaucher & Dufour, 2007).

Il s'agit d'un processus rigide qui ne tolère les changements imprévus qu'au prix de l'invalidation d'une grande partie du travail réalisé et de coûts supplémentaires (Vaucher & Dufour, 2007).

4.2 Processus de développement itératif et agile

Les méthodes agiles pour le développement logiciel font leur apparition dans « *Le Manifeste Agile* » en 2001, pour contrecarrer les nombreux échecs des projets dans les années 1990, attribués à l'utilisation de la méthode trop rigide exposée ci-dessus. Les quatre valeurs défendues par le Manifeste sont basées sur une critique du processus de développement traditionnel et sur une réévaluation des éléments à privilégier lors d'un développement :

Les individus et leurs interactions plus que les processus et les outils;
Des logiciels opérationnels plus qu'une documentation exhaustive;
La collaboration avec les clients plus que la négociation contractuelle;
L'adaptation au changement plus que le suivi d'un plan. (Messager
Rota & Tabaka, 2009, p.49)

Les méthodes agiles utilisent un principe de développement itératif incrémental, qui consiste à découper le projet en plusieurs étapes appelées « itérations ». Chaque itération est une petite cascade d'activités qui inclut des activités d'analyse, de conception, d'implémentation et de test. Le but d'une itération est de produire une version stable, testée et partielle du système final. Le système s'agrandit donc progressivement, itération après itération. Le cycle de vie du logiciel est basé sur le raffinement successif et l'évolution du système à travers une série d'itérations avec rétroaction et adaptation (Vaucher & Dufour, 2007).

La planification du développement est adaptative : des ajustements sont réalisés au fur et à mesure de l'avancement du projet en fonction des changements qui surviennent (Messenger Rota & Tabaka, 2009). Les retours effectués à chaque itération vers le destinataire vont permettre de réduire la documentation initiale. Cela permet également de réaliser un contrôle de la qualité permanent au niveau du produit et du processus. La gestion des risques est intégrée dans le processus global (Messenger Rota & Tabaka, 2009).

Les indicateurs de l'avancement sont le nombre de fonctionnalités implémentées et le travail restant pour répondre au besoin général ou à ceux apparus au cours des vérifications avec le destinataire (Messenger Rota & Tabaka, 2009).

Cette méthode a été conçue dans l'idée que ni le destinataire, ni le développeur de l'outil ne peuvent tout connaître et tout anticiper. Elle permet de s'adapter facilement aux imprévus qui feront inévitablement surface pendant le développement.

Les avantages des méthodes itératives sont :

- meilleure qualité de la communication : l'utilisateur peut clarifier et adapter ses exigences au fur et à mesure ; les incompréhensions et les incohérences peuvent être corrigées;
- meilleure visibilité : le destinataire a eu meilleure visibilité sur l'avancement des travaux et des fonctionnalités finales de l'outil;
- meilleur contrôle de la qualité : les étapes constitutives sont plus courtes et moins complexes, les tests sont effectués régulièrement et les problèmes corrigés;
- meilleure gestion des risques : les risques importants sont détectés lors des premières itérations;
- meilleur contrôle des coûts : les coûts se limitent à chaque itération ; si le test révèle qu'une itération est défectueuse, les pertes vont se concentrer sur cette itération (Messenger Rota & Tabaka, 2009).

4.3 Étapes de développement de l'outil d'aide à la prise de décision

Le développement de l'outil d'aide à la prise de décision est réalisé à l'interne. Les équipes de développement peuvent collaborer aisément avec les utilisateurs finaux : les ingénieurs routiers et les décisionnaires. Les besoins n'étant pas définitifs, le développement de l'outil requiert de la flexibilité et de la communication entre les parties prenantes. De plus, l'administration exige que le produit voit le jour rapidement, ce qui implique une gestion des risques et de la qualité au fur et à mesure. Pour ce projet, le choix d'une méthodologie de développement va se porter sur un processus itératif. Les sections suivantes présentent les macro-itérations réalisées dans le cadre du développement de l'outil.

4.3.1 Itération : création de la carte-support et de la base de données graphiques

4.3.1.1 Analyse des besoins

La revue de la littérature sur les SIG a permis de révéler les avantages de posséder une carte numérique, support de l'information. Pour la conception de cette carte, les gestionnaires ont défini :

- les zones à cartographier;
- la précision et la résolution des images satellites et aériennes nécessaires à la bonne réalisation des analyses par la suite : il s'agit d'obtenir une précision d'image suffisante pour distinguer le réseau routier et l'ensemble des facteurs environnementaux voisins (sites naturels, habitations, cours d'eau).

4.3.1.2 Récolte des données

Dans un premier temps, la recherche d'images employables a commencé sur GoogleEarth, avec une présélection des photographies non nuageuses et récentes. Puis, les données nécessaires à l'élaboration de la carte ont été récoltées auprès de différentes instances, telles que les mairies et le gouvernement de la zone ciblée. Un premier processus itératif de

vérification et de d'évaluation est mis en place pour valider la complétude des données ; en cas de manque, la récolte est recommencée.

La résolution des outils comme GoogleEarth et GoogleMap, n'est pas uniforme sur la totalité du globe, elle varie de 3 centimètres par pixel à 15 mètres par pixel. Les pays les mieux lotis sont les États-Unis et les pays membres de l'Europe de l'Ouest. Dans les pays en voie de développement, la qualité de l'imagerie est généralement moindre. De plus, les dates de mises à jour des images proposées par ces services en ligne ne sont généralement pas précisées.

Finalement, il est décidé de se tourner vers un professionnel et d'acheter des images satellitaires de meilleure qualité, en plus des images aériennes fournies par les ministères. L'imagerie haute résolution satellitaire et aérienne utilisée possède une résolution de 3 à 5 cm par pixel pour la zone sélectionnée.

4.3.1.3 Conception et implémentation

La conception de la carte passe par de la programmation et l'utilisation de la bibliothèque GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*) qui permet de traiter un grand nombre de format d'images géographiques. Les étapes de la conception et de l'implémentation sont :

- la création d'une base de données graphiques;
- la programmation pour l'affichage des images dans le logiciel géospatial en langage Keyhole Markup Language (KML) approprié à la gestion de l'affichage de données géospatiales et création des fichiers KML qui seront stockés dans la base de données graphiques;
- la programmation du script pour combiner les images et produire une orthomosaïque, c'est-à-dire assembler les images pour qu'elles n'en forment plus qu'une;
- la programmation du script pour orthorectifier les images, soit supprimer les distorsions d'angles géométriquement afin d'obtenir une image planimétrique;
- la programmation du script pour géoréférencer les images et tous les points constitutifs;

- la programmation du script d'amélioration de l'image pour obtenir une haute qualité;
- la programmation du script de compression des images.

4.3.1.4 Tests et validation de l'itération

Deux points de contrôle ont été imposés pour garantir la qualité de la carte pendant de la programmation : un premier, une fois que la mosaïque a été orthorectifiée et un second au niveau du géoréférencement des images. Les tests finaux valident la capacité d'agrandir et de rétrécir l'image, l'absence de décalage et de frontières aux limites des orthomosaïques, la qualité du géoréférencement et la rapidité d'acquisition de l'image.

À la fin de cette première itération, la carte, support des données et des informations routières, est créée et implémentée.

4.3.2 Itération : création de la base de données non-graphiques

4.3.2.1 Analyse des besoins

Les revues de la littérature sur les diagnostics de dégradations, les impacts environnementaux et les schémas itinéraires ont révélé que les données pertinentes pour la prise de décision sont :

- la localisation de la route par ses coordonnées de latitude et de longitude, et son altitude;
- le type de climat de la zone étudiée;
- la longueur de la section étudiée et la longueur totale de la route;
- la description du trafic : le volume, le pourcentage de camions les charges, DJMA et le nombre d'ÉCAS;
- les renseignements sur la structure : l'épaisseur et la nature des couches;
- les valeurs des mesures d'IRI, d'uni et de déflexion;
- le rapport des dégradations : localisation, type, gravité et étendue de la dégradation.

4.3.2.2 Conception et implémentation

L'ensemble des données recueillies ont été rassemblées et structurées dans une unique base de données, sous le couvert d'un système de gestion de base de données relationnelle et objet (SGBDRO), PostgreSQL. Les opérations de programmation nécessaires au bon fonctionnement de cette base de données sont :

- la programmation de la base de données en format Postgre SQL;
- la programmation de la découpe automatique du réseau en section de 200 mètres et de 1000 mètres lors de la sélection d'un point de la portion de route;
- la programmation pour l'importation de nouvelles données.

4.3.2.3 Tests et validation de l'itération

Les tests effectués ont permis de vérifier que les utilisateurs finaux étaient capables d'importer, de retrouver et d'exporter des données dans la base d'attributs.

4.3.3 Itération : importation de vidéos

4.3.3.1 Analyse des besoins

Les vidéos sont des instruments qui permettent de visualiser et de valider les données. Elles apportent davantage d'informations sur l'état de la chaussée et son environnement. L'importation de vidéos sur la carte est cohérente avec l'esprit de visualisation du futur outil. Les vidéos doivent être géo-localisées pour assurer la correspondance entre le positionnement sur la carte et les images filmées.

4.3.3.2 Conception et implémentation

Les vidéos sont réalisées par des caméras embarquées à bord d'un véhicule empruntant la route, à faible allure.

Les coordonnées de positionnement des vidéos ont été extraites afin de permettre la géolocalisation des films.

Les vidéos sont stockées dans une base des données non-graphiques. La programmation a été réalisée dans des fichiers KML.

4.3.3 Tests et validation de l'itération

La localisation des vidéos le long de la route est vérifiée.

4.3.4 Itération : création des liens entre la base de données et la carte numérique

4.3.4.1 Analyse des besoins

Les éléments non-graphiques doivent être superposés à la carte. Les vidéos, les images et les études de la route doivent être visionables depuis de la carte.

4.3.4.2 Conception et implémentation

La quatrième étape a été de programmer des hyperliens afin de mettre en relation la base de données non graphiques et la carte. Des fichiers KML sont produits et stockés dans cette base de données.

4.3.4.3 Tests et validation de l'itération

Les données telles que le nom de la route et des zones géographiques apparaissent bien sur la carte. Cliquer sur la route entraine un partage de la fenêtre entre la carte et les informations de la route (vidéos, données pertinentes).

Cette itération permet d'obtenir une maquette numérique pour la révision à l'interne, avant de développer les applications de partage.

4.3.5 Itération : partage des données

4.3.5.1 Analyse des besoins

Les experts routiers doivent pouvoir ajouter des informations dans la base de données et les faire apparaître sur la carte sans avoir recours à l'aide de l'équipe géomatique. La carte, ses applications et les bases de données doivent être consultables facilement par tous les membres.

La carte se met à jour automatiquement.

4.3.5.2 Conception et implémentation

L'outil est constitué d'une plateforme graphique et de bases de données graphiques et non-graphiques en ligne, accessibles avec une connexion réseau et un accès personnalisé.

Les politiques de diffusion des SIG et des instances donatrices des données sont vérifiées.

4.3.5.3 Tests et validation de l'itération

De nouvelles données sont importées et des données sont modifiées dans la base de données, leur nouvel affichage est vérifié directement sur la carte.

4.3.6 Itération : impression des schémas itinéraires

4.3.6.1 Analyse des besoins

Les gestionnaires souhaitent que chaque section homogène de la route possède une fiche représentant le linéaire de la route et répertoriant toutes les données utiles à la prise de décision, appuyées par des photographies. Cette partie de l'outil d'aide à la prise de décision est finalement une nouvelle génération de schémas itinéraires. Ils peuvent choisir de visionner ces schémas itinéraires sur un écran ou de les imprimer.

4.3.6.2 Conception et implémentation

Les étapes de conception et d'implémentation sont :

- la programmation de la génération rapide de schémas itinéraires capturant un kilomètre de route, en lien avec la base de données non-graphiques, les photographies, les vidéos et les figures;
- la programmation de la légende;
- l'ajout d'un hyperlien pour créer le schéma itinéraire en cliquant sur le segment;
- l'ajout d'hyperliens pour capturer cinq images (une tous les 200 mètres) par kilomètre de route depuis la vidéo.

4.3.6.3 Tests et validation de l'itération

Des schémas itinéraires sont créés et imprimés pour vérifier la lisibilité des informations, la pertinence de la mise en page et la qualité des images.

CHAPITRE 5

VALIDATION DE L'OUTIL GRAPHIQUE POUR LA GESTION DES INTERVENTIONS SUR UN RÉSEAU EXISTANT

Le nouvel outil d'aide à la prise de décision est composé d'une base de données, d'une carte numérique et d'hyperliens permettant d'afficher les informations directement sur la carte. La nouvelle version des schémas itinéraires propose une capture de l'ensemble des informations d'une section homogène d'un kilomètre sur un feuillet unique, intégrable aux rapports des experts routiers.

L'objectif de ce chapitre est de valider son fonctionnement, sa fiabilité et l'utilité de ses différentes facettes lors de la préface d'une intervention sur un réseau existant.

Les études de cas suivantes montreront l'intérêt d'avoir recours à l'outil pour éviter les erreurs de diagnostics et pour comptabiliser les impacts environnementaux, reprenant ainsi les deux déficiences majeures débattues dans les chapitres 1 et 2. Les études sont basées sur les données du projet mené en Afrique de l'Ouest, fondements des analyses présentées dans les deux premiers chapitres.

5.1 Prise en compte de l'environnement de la chaussée

5.1.1 Dans le processus d'identification des sources de dégradation

L'environnement de la chaussée peut être responsable de l'apparition d'un défaut sur la chaussée ou entraîner une aggravation de la dégradation. La classification des dégradations par le MTQ, présentées dans le Tableau 1.2, rapporte que l'environnement peut être à l'origine de fissures longitudinales hors des traces de roues, de fissures de rive, de fissures surfaciques, d'ornières, d'affaissements, de désenrobages et d'arrachements. La carte numérique permet de visualiser et de répertorier les facteurs environnementaux qui représentent un risque de dégradation.

Les exemples suivants montrent de quelle manière la visualisation d'un facteur à risque mise en corrélation avec les dégradations observées, permet d'orienter l'analyse vers un bon diagnostic des causes de détérioration et donc vers une solution d'intervention optimale.

La présence d'eau, révélée par l'existence de canaux, de rivières ou de lacs, peut être responsable de fissures, de déformation de la chaussée, d'affaissement et d'affaiblissement des couches inférieures en cas d'infiltration. Si ces défauts sont répertoriés à côté d'un point d'eau apparent, alors les experts routiers devront s'intéresser de près à la capacité drainante de la chaussée.

La végétation bordant la route peut entraîner un soulèvement ou un affaissement de la chaussée. En effet, les racines des arbres peuvent s'introduire dans les couches constitutives de la route. Si les défauts sont observés à proximité d'une zone boisée avec des arbres âgés, une inspection en profondeur de la chaussée est requise pour savoir si la végétation est responsable. Dans ce cas, des opérations d'abattage des arbres et d'essouchement feront parties du programme d'intervention.

Les accotements ou les fossés peuvent réduire la portance de la chaussée et accélérer sa détérioration. Dans le cas où d'une diminution locale de la portance, proche d'un accotement, la stratégie d'intervention inclura un réaménagement des bords de la route.

5.1.2 Dans le processus de comptabilisation des impacts environnementaux, économiques et sanitaires

Dans le chapitre 2, nous avons établi que la pollution a des effets néfastes sur les cinq paramètres d'évaluation suivants : le bien-être et la santé des populations, les écosystèmes naturels, l'agriculture et les infrastructures.

Par le biais de la carte numérique, les experts routiers peuvent repérer des éléments spatiaux pertinents lors de l'analyse.

Les **zones habitées à proximité de la route** : ce sont dans ces zones que les risques sanitaires et de diminution du bien-être sont les plus importants. En fonction de l'importance de ces zones, les spécialistes pourront diagnostiquer l'intérêt de prendre en compte les impacts sanitaires dans leurs études.

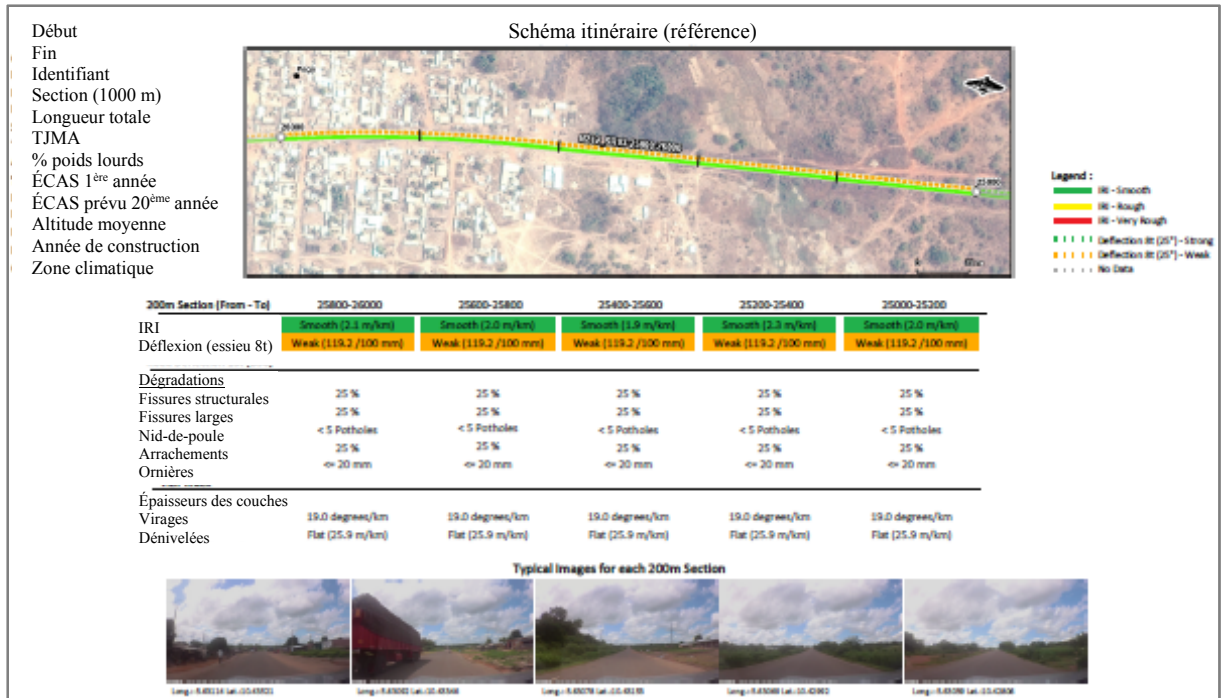


Figure 5.1 Zones habitées référencées sur le schéma itinéraire

Les **champs cultivés** : la pollution atmosphérique et les poussières impactent lourdement les récoltes. En fonction de l’importance de la zone et de son poids économique pour les populations, les experts seront à même de décider si les répercussions de la pollution sur l’agriculture doivent être prises en compte.

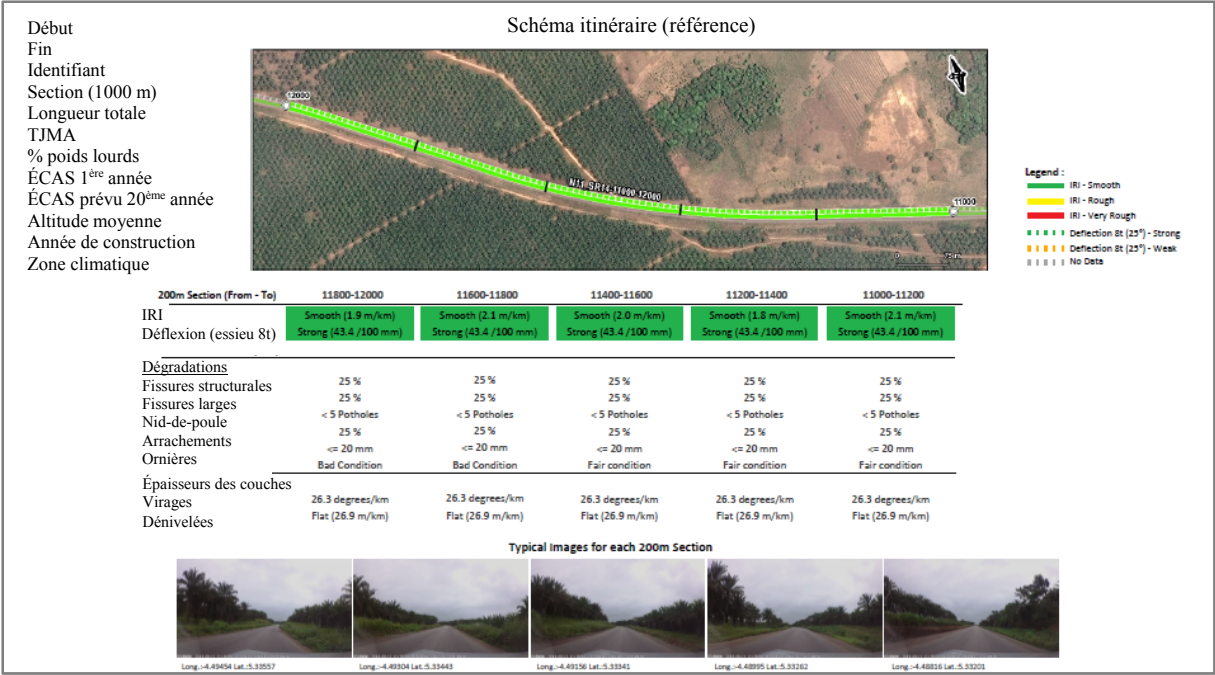


Figure 5.2 Zones cultivées référencées sur le schéma itinéraire

Les accotements en terre, les fossés et les intersections avec des chemins de terres sont à l'origine de poussières. Les photographies aériennes et satellite permettent de repérer les intersections. Les vidéos prises depuis la route permettent de localiser les bords de route mal-entretenus.

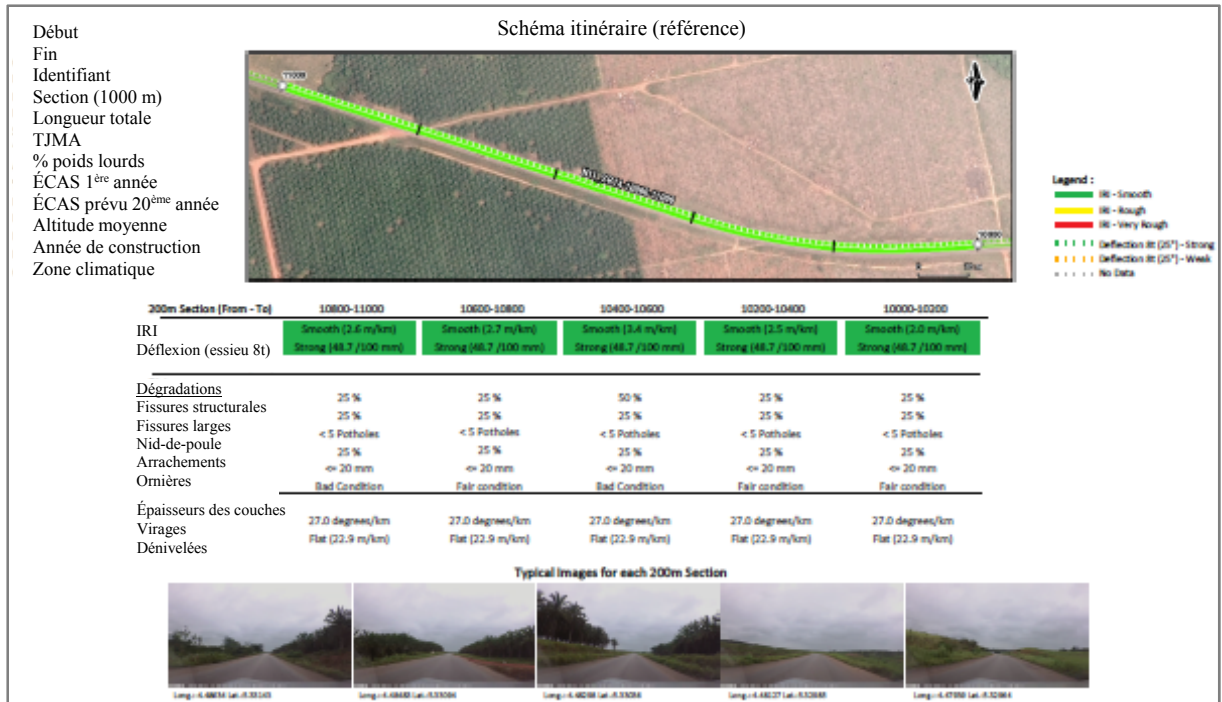


Figure 5.3 Intersection entre la route étudiée et un chemin de terre, référencée sur le schéma itinéraire

5.2 Études de cas pour l'identification des sources de dégradation

5.2.1 Confrontation des données

L'étude de cas concerne une portion de route située en Afrique de l'Ouest, pour laquelle le schéma itinéraire suivant a été établi :

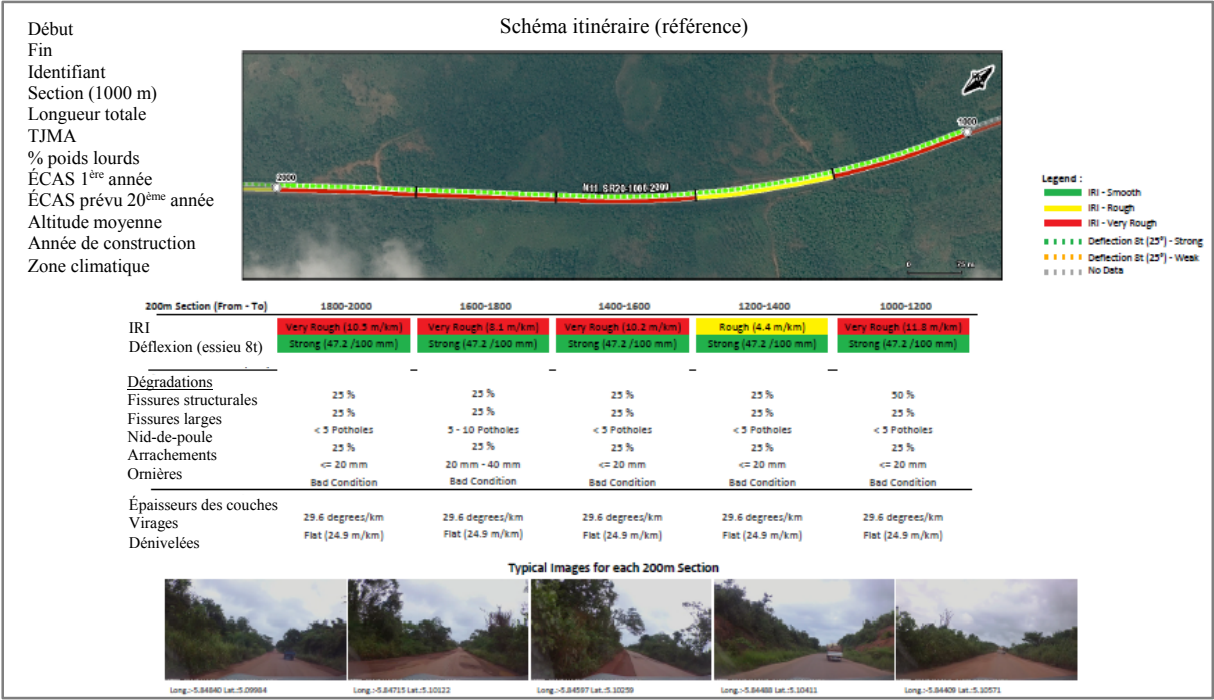


Figure 5.4 Schéma itinéraire - Étude de cas 1

Le schéma itinéraire informe les experts routiers que :

- la route se situe dans une zone inhabitée et non-cultivée;
- la végétation est abondante et aucune présence d'eau n'est révélée sur les images satellites;
- les valeurs de l'IRI sont élevées sur toute la section considérée avec une moyenne de 9,0 m / km sur ce kilomètre, et plus particulièrement, sur le dernier tronçon de 200 mètres où l'IRI atteint 11,8 m / km;

- la déflexion moyenne est de 47,2 / 100 mm, ce qui correspond à une chaussée encore résistante et solide d'un point de vue structural;
- la route est fissurée, l'indice de fissuration atteint 25 % pour les 800 premiers mètres et 50 % les 200 derniers, les fissures sont en grande majorité fines;
- il y a entre 5 et 10 nids-de-poule sur le second tronçon et moins de 5 nids-de-poule pour 200 mètres de route dans les autres cas;
- la route est globalement en mauvais état selon l'indice VIZIR.



Figure 5.5 Agrandissement de la deuxième photographie du schéma itinéraire

Les photographies agrandies permettent de valider l'existence de nids-de-poule et de visualiser la route et les accotements.

5.2.1.1 Analyse

La route est âgée de plus de 20 ans et n'a reçu aucune intervention de renforcement ou d'entretien, elle dépasse largement la période pour laquelle elle a été conçue. À la vue des valeurs d'IRI, de l'importance des dégradations et de l'âge de la chaussée, les résultats attendus étaient de trouver une route structurellement endommagée.

Toutefois, l'analyse des données présentes dans le schéma itinéraire et plus particulièrement des mesures de déflexion montrent que la route est encore en bon état d'un point de vue structural. Ces observations réduisent le nombre de causes possibles de la dégradation de la route puisqu'une déficience structurelle n'est plus envisageable.

En utilisant le Tableau 1.2, la cause la plus probable est désormais l'oxydation liée au vieillissement de la route, qui a entraîné les fissures structurelles et de surface, les nids-de-poule et les arrachements observés.

Si rien n'est entrepris, il est probable que les couches inférieures de la chaussée soient affaiblies causant une perte du support structural. Les travaux qui devront être envisagés en cas de déficience structurelle seront plus longs et plus coûteux. Il est recommandé de rétablir la chaussée sans attendre, en comblant les nids-de-poule et par application d'une nouvelle couche d'enrobés. Cette intervention a pour objectif d'endiguer le phénomène de dégradation et de fournir aux usagers une route en bonne condition.

5.2.2 Visualisation des photographies et des vidéos

L'étude de cas concerne une portion de route située en Afrique de l'Ouest, pour laquelle le schéma itinéraire suivant a été établi :

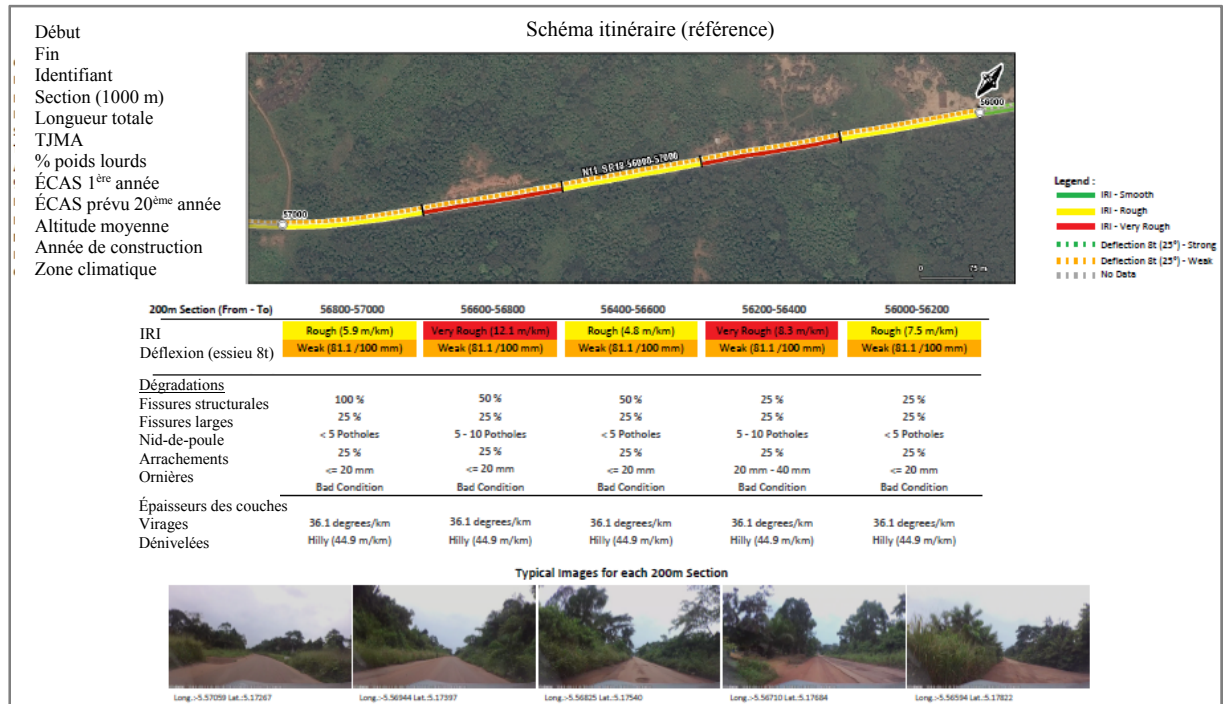


Figure 5.6 Schéma itinéraire - Étude de cas 2

Le schéma itinéraire informe les experts routiers que :

- la route se situe dans une zone inhabitée et non-cultivée;
- la végétation est abondante et aucune présence d'eau n'est révélée sur les images satellites;
- les valeurs de l'IRI sont élevées sur toute la section considérée avec une moyenne de 7,7 m / km sur ce kilomètre, et plus particulièrement, sur le deuxième tronçon de 200 mètres où l'IRI atteint 12,1 m / km;
- la déflexion moyenne est de 81,1 / 100 mm, ce qui correspond à une chaussée affaiblie d'un point de vue structural;

- la route est fissurée, l'indice de fissuration atteint 100 % pour les 200 premiers mètres, 50 % les 400 suivants et 25 % les 400 derniers, les fissures sont en grande majorité fines;
- il y a entre 5 et 10 nids-de-poule sur le second tronçon et moins de 5 nids-de-poule pour 200 mètres de route dans les autres cas;
- la route est globalement en mauvais état selon l'indice VIZIR.

Les images ainsi que les vidéos montrent que la plupart des dégradations ne sont pas localisées dans les traces de roues, mais réparties sur toute la largeur des voies.

5.2.2.1 Analyse

La route est âgée de plus de 20 ans et n'a reçu aucune intervention de renforcement ou d'entretien, elle dépasse largement la période pour laquelle elle a été conçue. Les valeurs de déflexion élevées vont de pair avec une portance faible. Les couches inférieures de la route sont donc atteintes.

Deux mécanismes d'apparition des détériorations sont possibles :

- la rupture des couches inférieures est une conséquence d'une rupture en surface causée, par exemple, par une sollicitation trop intense;
- les manifestations de surface ont été causées par une rupture en profondeur.

Or la présence des dégradations sur toute la largeur de la route et non dans les traces de roues, prouve que le trafic n'est pas responsable d'une sollicitation localisée intense qui aurait entraîné une rupture en surface. En ingénierie routière, une distribution des dégradations est indicatif d'autres mécanismes de défauts que la fatigue ou le vieillissement de la chaussée.

Les ornières sont des manifestations d'une rupture dans les couches inférieures de la chaussée et non pas d'une rupture de la couche de surface. Le défaut est remonté à la surface.

Il faut entreprendre une analyse de la composition de la chaussée (matériaux et épaisseurs) et du sol-support (matériaux, capacité drainante) afin d'identifier la cause de la rupture des couches inférieures.

5.2.3 Conclusion

Via l'outil, le diagnostic des dégradations s'effectue en connaissance des valeurs d'IRI, de déflexion, du répertoire des dégradations, d'images aériennes et satellites et de vidéos prises depuis un véhicule empruntant la chaussée. Le rassemblement des données utiles sur une même page permet de donner aux experts routiers une idée globale de l'état de la route. Cette représentation permet d'écarter d'emblée certaines causes de détérioration impossibles et minimise ainsi les erreurs de diagnostics. Il permet de déterminer quels sont les phénomènes potentiellement à l'origine des dégradations et donc de guider les opérations de prélèvement ou de mesures supplémentaires pour conclure précisément sur la source des détériorations. Les économies entraînées par l'utilisation de cet outil sont de trois types : des économies sur les coûts qu'engendrerait une intervention inadaptée, des économies sur les coûts de déplacement des équipes et des experts grâce aux vidéos et des économies sur les opérations de prélèvement et de mesure qui sont ciblées en fonction des causes potentielles.

En faisant appel à des rapports plus détaillés, qui peuvent être insérés dans la base de données et visionables depuis la plateforme en ligne, les experts pourront fournir des diagnostics étayés sur les causes de détérioration et cibler les zones où la comptabilisation des impacts environnementaux et sanitaires est indispensable. L'outil permet de combler les failles identifiées dans le processus de décision pour conduire à des choix optimaux d'intervention au niveau technique, sanitaire et environnemental pour retrouver le niveau de service de la chaussée.

CONCLUSION

Le processus actuel de prise de décision quant à la stratégie d'intervention à adopter sur une route dégradée est remis en cause dans le premier volet de la recherche. Dans le chapitre 1, le questionnement sur la responsabilité du trafic dans les mécanismes de dégradation de la chaussée, constitue un argument contre la fiabilité des diagnostics des experts. Dans le chapitre 2, il est démontré que le poids économique des impacts environnementaux est chiffrable et loin d'être négligeable, alors que la gestion et la comptabilisation de ces impacts ne font pas partie des applications actuelles des administrations routières. Enfin, dans le chapitre 3, le cadre rigide et l'amoncèlement des informations dans des rapports analogiques, utilisés pour sélectionner le type d'intervention, sont critiqués. Ces trois remises en question ont permis de démontrer l'ampleur des carences de la gestion actuelle dans le but de défendre toute tentative future d'amélioration.

Dans ce contexte, la mise en œuvre de nouveaux procédés pré-intervention est nécessaire. L'objectif principal de ce projet était d'améliorer le processus de décision et de gestion du réseau routier existant, par la comptabilisation des impacts environnementaux et par le développement d'un outil d'aide à la prise de décision permettant le rassemblement, la confrontation et la visualisation des données techniques, économiques et environnementales.

La monétisation des impacts environnementaux permet d'estimer les coûts réels des différentes alternatives de gestion et donc de prendre des décisions d'intervention optimisées au niveau économique et environnemental. De plus, la comptabilisation des impacts environnementaux permet d'influencer sur l'intensité des rejets d'émissions polluantes dues à la circulation routière, une possibilité que détient désormais les organismes de gestion des chaussées. Il est important de souligner l'importance du volet environnemental dans les futures décisions des administrations routières.

L'outil développé lors de ce projet de recherche conjugue les possibilités offertes par les nouvelles technologies de l'information avec les besoins spécifiques à la gestion des

chaussées. Il est composé d'une base de données, d'une carte numérique et d'hyperliens permettant d'afficher les informations directement sur la carte. L'utilisation de cet outil comme support de l'analyse de l'ingénieur, engendre une amélioration de l'efficacité du processus de décision. Il a pour vocation de permettre aux administrations routières de prendre des décisions d'investissements optimales aux niveaux technique, environnemental et économique, et d'entreprendre des interventions plus respectueuses de l'environnement et du bien-être des populations.

L'emploi de l'outil offre des perspectives et des bénéfices, non envisagés lors de l'analyse des besoins des gestionnaires des chaussées. Ainsi, les propriétés de stockage de l'outil permettent de réaliser un historique de la chaussée visant à faciliter les interventions futures. L'information entreposée pour la première intervention demeure utile pour toute la durée de vie de la chaussée et la base de données devient de plus en plus complète et détaillée. De plus, la plateforme constitue un outil dynamique de présentation des projets auprès des clients et des partenaires et favorise la communication entre les parties prenantes d'un projet.

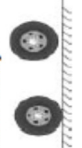
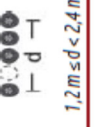
Finalement, ce projet soulève plusieurs questions et ouvrent de nouvelles pistes de développement et de recherche. Premièrement, dans le cadre du développement informatique, deux champs de déploiement sont entrevus. L'extension des applications du logiciel HDM-4 pour assimiler la monétisation des impacts environnementaux est à entreprendre pour ne plus avoir à utiliser un tableur. Le développement de liens entre les produits du logiciel HDM-4 et l'outil d'aide à la prise de décision est à explorer. Deuxièmement, la prise en compte des impacts environnementaux est partielle dans ce projet et donne accès à un ordre de grandeur satisfaisant des coûts des impacts. Afin de rendre compte de l'ensemble des dommages, les émissions des autres phases du cycle de vie de la chaussée pourraient être calculées ; les impacts autres que ceux de la pollution atmosphérique tels que la pollution sonore, les vibrations et les poussières, pourraient être monétisés et ajoutés aux calculs des coûts. L'amélioration des connaissances scientifiques et des modèles de prévision est un point crucial pour augmenter la précision des estimations des coûts environnementaux.

ANNEXE I

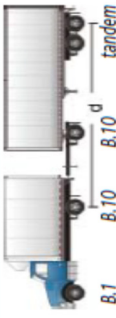
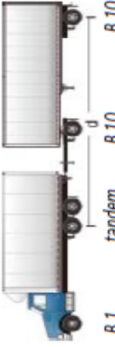
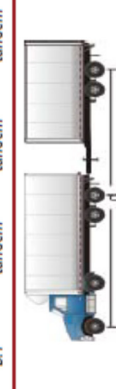
PRÉSENTATION DES CONFIGURATIONS DES VÉHICULES ROUTIERS

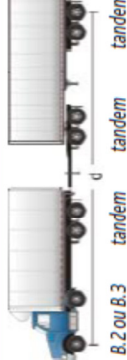
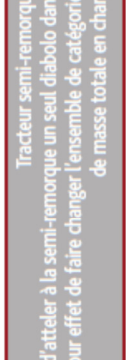
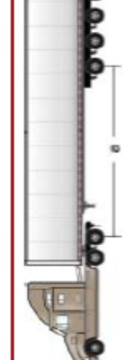
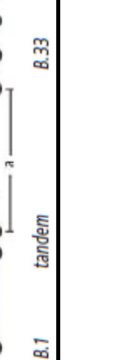
L'objectif de cette annexe est de présenter la majorité des configurations des véhicules lourds circulant sur les routes québécoises et la législation sur leur poids maximal autorisé respectif. Bien que les valeurs limites de masse totale et de charge à l'essieu soient spécifiques à un pays, il a été choisi de proposer un extrait du « *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules* » du MTQ pour définir un ordre de grandeur de ces charges extrêmes.

Cet extrait présente les charges maximales prévues au règlement pour chaque catégorie d'essieu (B.1 à B.57) et les masses totales en charge maximales autorisées pour chaque catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules (A.1 à A.97) (Ministère des Transports du Québec, 2013a).

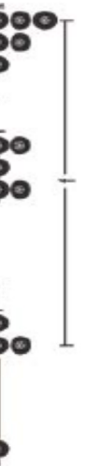
Catégorie d'essieux		Charge maximale prévue au règlement	
		Période normale	Période de dégel
Essieux avant			
B.1	Un essieu avant 	9 000 kg	9 000 kg
B.2	Tandem avant 	16 000 kg	16 000 kg
B.3	Deux essieux ou plus avant 	15 000 kg	15 000 kg
Essieux arrière			
B.10	Essieu simple 	10 000 kg	8 000 kg
B.20	Deux essieux ou plus 	10 000 kg	8 000 kg
B.21	Tandem 	18 000 kg	15 500 kg
B.25	Deux essieux 	13 500 kg	11 000 kg
B.25.1	Deux essieux 	18 000 kg	15 500 kg
Catégorie d'essieux			
		Période normale	Période de dégel
B.26	Un essieu simple et un essieu « donkey » 	10 000 kg	8 000 kg
B.30	Trois essieux 	18 000 kg ¹	15 500 kg ¹
B.31	Tridem ou tridem équivalent 	21 000 kg ²	18 000 kg ²
B.32	Tridem ou tridem équivalent 	24 000 kg ²	21 000 kg ²
B.33	Tridem ou tridem équivalent 	26 000 kg ²	22 000 kg ²
B.40.1	Quatre essieux ou plus 	18 000 kg	15 500 kg
B.40.2	Quatre essieux ou plus 	23 000 kg	20 000 kg
B.41	Quatre essieux ou plus 	26 000 kg	22 000 kg

Catégorie d'essieux		Charge maximale prévue au règlement		Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules	Masse totale en charge maximale prévue au règlement	Distance prescrite
		Période normale	Période de dégel			
B.42	Quatre essieux ou plus  $4,2\text{ m} \leq d < 4,8\text{ m}$	26 000 kg	22 000 kg	A.1	 B.1 B.10  B.1 B.26 17 250 kg	Véhicule d'une seule unité
B.43	Quatre essieux ou plus  $d \geq 4,8\text{ m}$	28 000 kg	24 000 kg			
B.44 ³	Un essieu avant à l'avant d'un tridem muni d'un système de suspensions conçu pour équilibrer la masse entre tous les essieux à 1 000 kg près sans ajustement possible  $2,5\text{ m} < b \leq 3,0\text{ m}$ $3\text{ m} \leq c < 3,6\text{ m}$	32 000 kg	27 500 kg			
B.45 ³	Un essieu avant à l'avant d'un tridem muni d'un système de suspensions conçu pour équilibrer la masse entre tous les essieux à 1 000 kg près sans ajustement possible  $2,5\text{ m} < b \leq 3,0\text{ m}$ $3,6\text{ m} \leq c \leq 3,7\text{ m}$	34 000 kg	29 500 kg			
B.56	Deux essieux (train double de type C)  $d < 3\text{ m}$	17 000 kg	16 000 kg	A.10	 B.1 B.10  B.1 B.10 25 500 kg	Tracteur semi-remorque et véhicule avec remorque Pour tout ensemble de véhicules routiers formé d'un tracteur et d'une seule semi-remorque, il est possible d'atteler à la semi-remorque un seul diabololo dans le but de le déplacer. L'ajout du diabololo n'a pas pour effet de faire changer l'ensemble de catégorie ou d'augmenter sa limite maximale de masse totale en charge.
B.57	Tandem + essieu simple (train double de type C)  $d < 3\text{ m}$	23 000 kg	23 000 kg			

Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules		Masse totale en charge maximale prévue au règlement	Distance prescrite
Véhicule avec remorque			
A.20		43 500 kg	$d \geq 8,0 \text{ m}$
A.21		42 500 kg	$d < 8,0 \text{ m}^4$
A.22		51 500 kg	$d \geq 12,0 \text{ m}$
A.23		50 500 kg	$d < 12,0 \text{ m}^4$
A.24		49 500 kg	$d \geq 9,5 \text{ m}$
A.25		48 500 kg	$d < 9,5 \text{ m}^4$
A.26		55 500 kg	$d \geq 14,0 \text{ m}$
A.27		54 500 kg	$d < 14,0 \text{ m}^4$
A.30		50 000 kg	$d \geq 15,0 \text{ m}$
A.31		49 000 kg	$d < 15,0 \text{ m}^4$
A.11	  	35 500 kg	
A.12		41 500 kg	$a \geq 4,0 \text{ m}$
A.13		40 500 kg	$a < 4,0 \text{ m}^4$
A.19	Un ensemble de véhicules : • dont la configuration n'est pas prévue; ou • muni d'un essieu autovireur localisé ailleurs qu'à l'avant d'un ensemble de trois ou quatre essieux sous une semi-remorque ou localisé ailleurs qu'à l'avant d'un ensemble de trois essieux sous une remorque.		

Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules		Masse totale en charge maximale prévue au règlement	Distance prescrite
A.32	 B.2 ou B.3 tandem B.10 2 essieux	53 500 kg	$d \geq 16,5$ m
A.33	 B.2 ou B.3 tandem B.10 2 essieux	52 500 kg	$d < 16,5$ m ⁴
A.34	 B.2 ou B.3 tandem B.10 2 essieux	53 500 kg	$d \geq 16,5$ m
A.35	 B.2 ou B.3 tandem B.10 2 essieux	52 500 kg	$d < 16,5$ m ⁴
Tracteur semi-remorque Il est permis d'atteler à la semi-remorque un seul diabololo dans le but de le déplacer. L'ajout du diabololo n'a pas pour effet de faire changer l'ensemble de catégorie ou d'augmenter sa limite maximale de masse totale en charge.			
A.40	 B.1 tandem B.31	44 500 kg	$a \geq 4,0$ m
A.41	 B.1 tandem B.31	43 500 kg	$a < 4,0$ m ⁴
A.42	 B.1 tandem B.32	47 500 kg	$a \geq 4,5$ m
A.43	 B.1 tandem B.32	46 500 kg	$a < 4,5$ m ⁴
A.44	 B.1 tandem B.33	49 500 kg	$a \geq 5,5$ m
A.45	 B.1 tandem B.33	48 500 kg	$a < 5,5$ m ⁴
Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules		Masse totale en charge maximale prévue au règlement	Distance prescrite
A.60	 B.1 tandem B.41	49 500 kg	$a \geq 5,5$ m
A.61	 B.1 tandem B.41	48 500 kg	$a < 5,5$ m ⁴
A.62	 B.1 tandem B.42	49 500 kg	$a \geq 5,0$ m
A.63	 B.1 tandem B.42	48 500 kg	$a < 5,0$ m ⁴
A.64	 B.1 tandem B.43	51 500 kg	$a \geq 5,0$ m
A.65	 B.1 tandem B.43	50 500 kg	$a < 5,0$ m ⁴
A.66	 B.1 tandem B.44	55 500 kg	$a \geq 6,0$ m
A.67	 B.1 tandem B.44	54 500 kg	$a < 6,0$ m ⁴
A.68	 B.1 tandem B.45	57 500 kg	$a \geq 5,5$ m
A.69	 B.1 tandem B.45	56 500 kg	$a < 5,5$ m ⁴
Train double de type A ou C			
A.70	 B.1 B.10 B.10 B.10	45 500 kg	$d \geq 10,0$ m
A.71	 B.1 B.10 B.10 B.10	44 500 kg	$d < 10,0$ m ⁴

Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules		Masse totale en charge maximale prévue au règlement	Distance prescrite
Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules		Masse totale en charge maximale prévue au règlement	Distance prescrite
Train double de type C			
Le diabolé à double timon doit satisfaire les exigences de l'article 903 du Règlement sur la sécurité des véhicules automobiles. L'empattement de chacune des semi-remorques est d'au moins 6,25 m et la semi-remorque la plus lourde doit être située à l'avant.			
A.72		53 500 kg	$d \geq 13,5 \text{ m}$
A.73		52 500 kg	$d < 13,5 \text{ m}^4$
A.74		53 500 kg	$d \geq 14,0 \text{ m}$
A.75		52 500 kg	$d < 14,0 \text{ m}^4$
A.76.1		53 500 kg	$d \geq 15,5 \text{ m}$
			
			
			
A.76.2		52 500 kg	$d < 15,5 \text{ m}^4$
A.86			
55 500 kg			
« c » correspond à la distance entre le centre de l'essieu simple ou de l'essieu tandem et le centre des crochets d'attelage.			
a $\geq 3 \text{ m}$ b $\geq 5 \text{ m}$ c $\leq 1,8 \text{ m}$ d $\leq 1,85 \text{ m}$			
A.87			
58 500 kg			
« c » correspond à la distance entre le centre de l'essieu simple ou de l'essieu tandem et le centre des crochets d'attelage.			
a $\geq 3 \text{ m}$ b $\geq 5 \text{ m}$ c $\leq 1,8 \text{ m}$ d $\leq 1,85 \text{ m}$			

Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules		Masse totale en charge maximale prévue au règlement		Distance prescrite		
Train double de type B						
A.90		62 500 kg	f ≥ 16,5 m	B.1	tandem tridem	
A.91		61 500 kg	f < 16,5 m ⁴	B.1	tandem tridem	
Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules						
A.92		59 000 kg	f ≥ 16,5 m	B.1	tandem tridem ou équivalent	
A.93		58 000 kg	f < 16,5 m ⁴	B.1	tandem tridem ou équivalent	
Catégorie de véhicule et d'ensemble de véhicules						
A.94		58 000 kg	f ≥ 16,5 m	B.1	tandem un essieu+tandem	
A.95		57 000 kg	f < 16,5 m ⁴	B.1	tandem un essieu+tandem	
A.96		53 000 kg	f ≥ 16,0 m	B.1	tandem un essieu+tandem	
A.97		52 000 kg	f < 16,0 m ⁴	B.1	1 ou 2 essieux 2 ou 3 essieux 1, 2 ou 3 essieux	

ANNEXE II

PRÉSENTATION DU LOGICIEL HDM-4

Le logiciel HDM-4 est un programme de prévision du comportement de la chaussée et d'évaluation économique de la conception et de l'entretien des routes.

Les outils de gestion de ce logiciel ont été utilisés dans plus de cent pays pour soutenir la prise de décision, pour justifier l'augmentation des budgets de réhabilitation et d'entretien des chaussées, pour réduire les coûts imputés aux usagers (Chaouki Abou-Rjaili, 1999) et pour analyser la rentabilité des projets routiers (Kerali, Odoki, & Stannard, 2006). Son utilisation est préconisée par l'Association Mondiale de la Route.

L'intérêt du logiciel HDM-4 pour notre étude réside dans sa capacité à quantifier les émissions polluantes issues de la circulation routière en fonction des stratégies d'aménagement et d'entretien choisies par l'utilisateur. Les émissions polluantes sélectionnées par le HDM-4 couvrent la majorité des émissions existantes, et surtout incorporent les plus dangereuses pour l'environnement et la santé humaine : le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, le dioxyde d'azote, les oxydes de soufre, les hydrocarbures, les particules fines et le plomb. Les modèles de prévisions environnementales permettent de prédire le nombre de tonnes d'émissions rejetées par type de polluant, par année. Toutefois, les émissions sont quantifiées mais ne sont pas monétarisées (Bennett & Greenwood, 2004). Le logiciel simule l'évolution des quantités année après année, pour chaque scénario, durant la période d'analyse. Afin de comparer les stratégies d'aménagement et d'entretien, les différences nettes de quantités d'émissions sont automatiquement calculées.

1. Historique du logiciel HDM-4

Produit de la Banque Mondiale

En 1968, la Banque mondiale lançait un programme d'études pour la production d'un modèle d'évaluation des projets routiers en partenariat avec *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL), le *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) et le *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Cette coopération débouchera sur la création de nombreux outils :

- le premier fut le *Modèle du Coût de la Route* (*Highway Cost Model*), dont l'objectif initial était d'étudier les relations entre les coûts des travaux routiers et les coûts d'exploitation des véhicules;
- en parallèle du *Highway Cost Model*, le TRRL a développé le *Modèle d'Investissement dans le transport Routier*;
- évolution du HCM, le *Modèle pour la Conception et l'Entretien des Routes* (*Highway Design and Maintenance Standards Model* - HDM) fut créé en 1976;
- se basant sur les résultats prometteurs des modèles précédents, le HDM-III fut développé;
- enfin, le dernier développement est l'outil *Highway Design & Management* HDM-4, dont il existe deux versions.

Les outils de gestion issus de cette coopération permettent de soutenir la prise de décision, de justifier l'augmentation des budgets de réhabilitation et d'entretien des chaussées, de réduire les coûts imputés aux usagers (Chaouki Abou-Rjaili, 1999) et d'analyser la rentabilité des projets routiers (Kerali et al., 2006).

En 1998, l'Association mondiale de la route (AIPCR) acquiert les droits de propriété intellectuelle du HDM-4. Aujourd'hui, cette association réunit les administrations routières de 121 gouvernements et possède des membres dans plus de 140 pays.

Au fur et à mesure des développements, la précision des outils et leur portée géographique devaient accroître. Des recherches sur le terrain dans les pays en voie de développement sont devenues une nécessité pour combler le manque d'information.

Validations internationales

La première étude d'approfondissement des connaissances routières dans les pays en voie de développement, fut menée au Kenya en 1975. Au début des années 1980, des études supplémentaires ont été réalisées dans les Caraïbes, en Inde et au Brésil, afin de rendre le HDM-4 valide géographiquement dans le monde entier (Kerali et al., 2006).

Depuis, les outils de gestion HDM ont été utilisés dans plus de cent pays. Son alliance avec l'Association mondiale de la route lui confère une portée mondiale pérenne.

Développements du HDM-4, version 2

Les données de référence et les relations techniques du HDM-III dataient de 1985. Aussi en 1995, elles nécessitaient une réévaluation afin de prendre en compte une plus large gamme de chaussées, de conditions d'usage et les évolutions technologiques des véhicules. Un état de l'art a été réalisé afin que ces données soient mises à jour pour les calculs des coûts d'exploitation (Kerali et al., 2006).

Bien que conçu pour les pays en développement, l'utilisation du HDM-4 par les pays développés a entraîné la création de nouvelles fonctionnalités : la modélisation des effets de saturation du trafic, de la sécurité routière et des effets sur l'environnement (Kerali et al., 2006).

Après une enquête auprès des organisations en charge des routes, les derniers développements du HDM-4 ont vu le jour dans la version 2, en 2005 (Kerali et al., 2006). C'est cette version qui sera présentée dans la suite de ce chapitre en nous référant aux volumes 1, 2, 4 et 7 de la documentation du logiciel, et utilisée dans les calculs des taux d'émissions polluantes.

2. Rôle du HDM-4 dans la gestion des chaussées

L'objectif principal du logiciel HDM-4 est de fournir des analyses économiques guidant les choix de gestion et d'investissements routiers.

Le HDM-4 calcule le taux de rentabilité, le bénéfice actualisé et le rapport avantages-coût des projets routiers. Les trois principaux types de résultats produits par le HDM-4 sont : des indicateurs d'efficacité économique, des programmes de travaux pluriannuels glissants et des plans stratégiques d'entretien et de développement (Moroïuk, Riley, & Toole, 2006). Ces calculs permettent de :

- vérifier la faisabilité économique des travaux;
- vérifier la viabilité des choix d'investissement;
- comparer différentes politiques alternatives de gestion et d'investissement;
- classer les projets d'aménagement et d'entretien;
- fixer les priorités d'investissement.

3. Applications du HDM-4

Le HDM-4 fonctionne de manière analogue qu'il s'agisse d'une analyse de stratégie, de programme ou de projet. Le comportement de la chaussée est simulé afin d'obtenir des coûts année après année, sur toute la période d'analyse (généralement entre 5 et 40 ans) et pour chaque stratégie de construction et d'entretien envisagée (Moroïuk et al., 2006).

Analyse de stratégie et de programme

L'objectif d'une analyse de stratégie est d'estimer les besoins budgétaires et de planifier à long terme les travaux à réaliser.

L'objectif d'une analyse de programme est de préparer un programme de travaux annuel ou pluriannuel pour les sections de routes sélectionnées par l'utilisateur (Moroïuk et al., 2006).

Analyse de projet

L'analyse de projet consiste en un examen annuel d'un ensemble de sections de routes pour différentes stratégies de travaux et d'entretien, sur la période définie par l'utilisateur. L'objectif est d'estimer la faisabilité économique et technique des projets simulés afin de dégager la solution la plus rentable. Les étapes suivies sont :

- la simulation du comportement de la surface et de la structure de la chaussée, afin de prévoir la dégradation de la route;
- la modélisation des effets et des coûts pour l'administration et les usagers, par année;
- la comparaison économique des options.

Les types d'études concernées sont la construction de routes neuves, l'aménagement et l'entretien des routes existantes, l'aménagement progressif et l'évaluation après travaux (Moroïuk et al., 2006). L'analyse de projet coïncide avec notre étude de cas.

4. Paramètres d'analyse et de modélisation

Caractéristiques de la section de route

Les analyses du HDM-4 portent sur des sections de routes uniformes. Les données d'entrée décrivant les caractéristiques de la section de route sont :

- la géométrie de la route : la longueur de la section, le nombre effectif de voies et la largeur carrossable des voies;
- le dénivelé : la somme des mouvements ascendants et descendants du véhicule selon l'axe vertical par kilomètre de route, mesuré en m/km;
- la sinuosité : la somme absolue des déviations ou des mouvements angulaires des deux tangentes de chaque courbe divisée par la longueur de la section, mesurée en °/km;
- l'altitude moyenne : l'élévation moyenne des sections, par rapport au niveau de la mer;
- le type de chaussée : le HDM-4 différencie les chaussées bitumineuses, en béton et les routes non revêtues. Le type de revêtement, les épaisseurs des différentes couches constitutives sont enregistrés;

- la nature des sols d'assise : le type de fondation, le CBR (California Bearing Ratio) du sol support, le nombre structural de l'AASHTO, l'épaisseur de la fondation et le module de résilience si elle est stabilisée au ciment, la déflexion obtenue à partir de la poutre de Benkelman sous un essieu arrière de 13 tonnes;
- la nature et le nombre de dégradations : la moyenne et l'écart-type de la profondeur des ornières et le pourcentage de fissuration;
- les valeurs de l'UNI, de l'IRI, la portance, l'âge de la chaussée et la date de la dernière intervention;
- l'ensemble des caractéristiques de la circulation : le parc de véhicules, la vitesse moyenne, leur charge, l'ESAL et le taux de croissance du trafic;
- l'environnement de la chaussée : la moyenne des précipitations annuelle et le classement par zone d'aride à humide;
- les coûts des différentes prestations d'aménagement et d'entretien.

5. Normes et modèles d'aménagement et d'entretien

Normes et niveau de service

Les normes sont choisies par l'utilisateur en fonction de la classe de surface, du trafic et de la législation en vigueur. La décision se base sur des critères d'ingénierie, économiques et environnementaux. Une norme est valable pour une section et pour une année complète au moins.

Les normes d'aménagement et d'entretien sont garantes des niveaux de service et de pratique fixés par l'organisme gérant le réseau routier. Il existe des normes de construction neuve, d'aménagement et d'entretien. Elles rassemblent une ou plusieurs opérations de travaux. Les opérations sont spécifiques à un type de chaussée (bitumineuse, béton ou non revêtue), elles sont définies par un critère de déclenchement, des caractéristiques de la chaussée, la durée des travaux, le coût unitaire des opérations et l'effet des travaux.

Cet ensemble d'opérations est entrepris lorsque le critère de déclenchement enregistré est atteint. Les critères peuvent être de nature temporelle, il s'agit alors d'intervalles ou de dates fixes d'intervention ; ou des paramètres physiques comme l'état de la chaussée, sa portance, la condition du drainage ou l'évolution des caractéristiques des véhicules (Odoki & Kerali, 2006).

Catégories de travaux préenregistrées

Le HDM-4 hiérarchise les travaux selon deux groupes imbriqués. Les catégories de travaux englobent les classes de travaux, chaque classe de travaux contient plusieurs types de travaux définis par une ou plusieurs activités de référence, comme le tableau suivant le présente.

Tableau-A II-1 Classification des travaux dans le HDM-4
Tiré de Odoki et Kerali (2006)

Catégorie de travaux	Classe de travaux	Type de travaux
Préservation Objectifs : • Réaliser les travaux d'entretien nécessaires pour réparer la route • Diminuer les coûts aux usagers • Garantir un niveau de service	Entretien courant (Travaux à intervalles rapprochés)	Entretien courant de la chaussée
		Drainage
		Entretien courant des dépendances
	Entretien périodique (Intervalles de plusieurs années)	Traitement préventif
		Imperméabilisation
		Réhabilitation
		Reconstruction
	Travaux spéciaux (Impossible de programmer avec certitude)	Travaux d'urgence
		Service hivernal
Développement Objectifs : • Augmenter la capacité du réseau routier • Améliorer les caractéristiques de la chaussée • Minimiser le coût du transport	Aménagement (Améliorer la capacité de la route en fin de vie ou subissant un changement imprévu)	Élargissement
		Rectification
		Hors chaussée
	Construction (Création d'une nouvelle chaussée)	Reclassement
		Section neuve

6. Émissions polluantes liées à la circulation routière

Les émissions polluantes sélectionnées par le HDM-4 couvrent la majorité des émissions existantes, et surtout incorporent les plus dangereuses pour l'environnement et la santé humaine : le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, le dioxyde d'azote, les oxydes de soufre, les hydrocarbures, les particules fines et le plomb.

Dans la version utilisée, **les effets des émissions ne sont pas monétisés**. Pour chaque stratégie de construction ou d'entretien, seules les quantités de polluants sont estimées ; par la suite, lors de la comparaison de scénarios, les différences nettes de quantités d'émissions sont calculées.

Paramètres influençant le rejet d'émissions polluantes

L'entrée des paramètres initiaux permet de spécifier le parc de véhicules. Les quantités et le type de polluants rejetés varient d'un véhicule à l'autre, selon les dimensions et les technologies embarquées.

Le type de carburant utilisé, essence ou diesel, a une influence sur le rejet de polluants. Les différences de matériaux bruts, la composition chimique, les produits de la combustion et les conditions de température et de pression dans le moteur entraînent une production d'émissions différente. Cependant, **le HDM-4 emploie le même modèle pour représenter la consommation d'essence et de diesel. Le logiciel HDM-4 ne tient pas compte des avancées technologiques** telles que la voiture électrique ou hybride et l'utilisation de biocarburant (Bennett & Greenwood, 2004).

Les moteurs à deux temps sont couramment utilisés dans les pays en développement. Leur avantage principal de consommer peu est contrebalancé par un mauvais rendement énergétique et donc un rejet d'émissions polluantes dans l'atmosphère important. La présence de pot catalytique permettrait de réduire de 94 % les émissions de monoxyde de carbone et de 90 % celles d'hydrocarbures. Pourtant, il est rare d'en trouver sur les véhicules équipés

d'un moteur à deux temps. **Dans la version 2 du HDM-4, un modèle mécaniste traduit l'effet de la technologie du pot catalytique** (Bennett & Greenwood, 2004).

Les rejets dans l'atmosphère d'un moteur chaud sont moins polluants que ceux d'un moteur froid, au démarrage, car les matériaux sont mieux dégradés lors de la combustion. En conséquence, le démarrage est la phase la plus polluante proportionnellement à sa durée. **Les modèles d'émissions du HDM-4 sont basés sur des moteurs chauds**, c'est-à-dire que les véhicules stationnés ne seront pas comptabilisés et ceux démarrant seront comptabilisés comme des moteurs chauds (Bennett & Greenwood, 2004).

Tous les polluants ne sont pas émis par le pot d'échappement des véhicules. Dépendant de la température de l'air et de la valeur de la pression de vapeur du carburant, le phénomène d'évaporation est important. Une grande proportion du rejet d'hydrocarbures provient ainsi des véhicules à l'arrêt, qui ne sont pas pris en compte par le HDM-4. **Le phénomène d'évaporation n'est pas modélisé dans le HDM-4**, car l'impact des stratégies d'investissements sur l'évaporation est minimal (Bennett & Greenwood, 2004).

Dans le septième manuel d'utilisation du HDM-4, les lois environnementales nationales sont considérées comme un facteur influençant les émissions de la circulation. En effet, dans de nombreux pays, bien que la consommation de carburant ne soit pas régulée, le niveau d'émissions l'est. Aussi, qu'importe la consommation propre du véhicule, le niveau des émissions à la sortie du pot d'échappement est uniforme.

Modèles de prévision utilisés

Pour le HDM-4, il est nécessaire de trouver des modèles utiles à la comparaison d'un projet par rapport à un autre, des émissions d'une flotte de véhicules sous certaines conditions par rapport à une autre. Donc, les modèles doivent avoir la capacité de prédire le taux moyen des émissions liées au trafic.

Les émissions doivent être fonction des caractéristiques de la chaussée (géométrie, rugosité, vitesse) ou bien d'autres variables (consommation de carburant). Les analyses An et al. (1997) démontrent une « forte corrélation entre la consommation de carburant et le rejet de polluants au niveau du pot d'échappement sous certaines conditions » (An, Barth, Norbeck, & Ross, 1997).

Enfin, le modèle le plus approprié pour le HDM-4 est de considérer les émissions comme fonction de la consommation de carburant, à l'exception du dioxyde de carbone, calculé sur le modèle du bilan carbone.

Consommation de carburant

Le logiciel HDM-4 adopte les modèles mécanistes pour les calculs de la consommation de carburant des véhicules. Les études menées sur le HDM-III, et les recherches en Afrique du Sud et en Australie, supportent et justifient l'utilisation de modèles mécanistes pour la simulation de la consommation de carburant. Ils tiennent compte :

- des forces s'opposant au mouvement;
- des forces internes aux véhicules;
- de la vitesse;
- de la consommation pendant les phases d'accélération et de décélération;
- du type de véhicule.

Le modèle offrant le plus grand potentiel et prenant en compte l'ensemble des points listés ci-dessus, est celui d'*ARFCOM*, un programme de recherche australien. C'est le modèle choisi pour le HDM-4 (Bennett & Greenwood, 2004).

Le modèle utilisé prévoit une consommation de carburant proportionnelle à la puissance du véhicule et au rendement énergétique du carburant. Il permet de prendre en considération les congestions et l'accélération (Bennett & Greenwood, 2004). Les équations suivantes sont toutes issues du Volume 7 de la documentation du logiciel.

$$FC = \frac{IFC * MassFuel * 1000}{v} \quad (A II-1)$$

Avec : FC, consommation de carburant (g/km)

MassFuel, masse de carburant (g/mL)

v, vitesse du véhicule

$$IFC = \max(FC_{\min}, \xi P_{\text{tot}}(1 + d_{\text{FUEL}})) \quad (A II-2)$$

Avec : IFC, consommation instantanée de carburant (mL/s)

$FC_{\min}$, consommation minimale de carburant (mL/s)

ξ , coefficient de rendement puissance/carburant (mL/kW/s)

P_{tot} , puissance totale du véhicule

d_{FUEL} , consommation supplémentaire due à l'accélération

La limite du modèle basé sur la consommation d'essence est que l'émission de certains polluants ne dépend pas physiquement de la quantité de carburant consommé. Le modèle le plus approprié pour le HDM-4 est de considérer les émissions comme fonction de la consommation de carburant, à l'exception du dioxyde de carbone, calculé sur le modèle du bilan carbone.

Monoxyde de carbone

Le rejet de monoxyde de carbone est directement proportionnel à la consommation de carburant.

$$E_{CO} = a_{CO} * FC \quad (A II-3)$$

Avec : E_{CO} , rejet de monoxyde de carbone à la sortie du pot d'échappement (g/km)

a_{CO} , coefficient de monoxyde de carbone ($\frac{g_{CO}}{g_{\text{carburant}}}$)

Hydrocarbures

Les hydrocarbures sont issus de la combustion complète et incomplète du carburant.

$$E_{HC} = a_{HC} * FC + \frac{r_{HC}}{v} * 1000 \quad (\text{A II-4})$$

Avec : E_{HC} , rejet d'hydrocarbures à la sortie du pot d'échappement (g/km)

a_{HC} , coefficient d'hydrocarbures ($\text{g}_{HC}/\text{g}_{\text{carburant}}$)

r_{HC} , constante représentant la combustion incomplète (g/s)

Particules

De même que les hydrocarbures, les particules sont issues de la combustion complète et incomplète du carburant.

$$E_{PM} = a_{PM} * FC + \frac{r_{PM}}{v} * 1000 \quad (\text{A II-5})$$

Avec : E_{PM} , rejet de particules à la sortie du pot d'échappement (g/km)

a_{PM} , coefficient de particules ($\text{g}_{PM}/\text{g}_{\text{carburant}}$)

r_{PM} , constante représentant la combustion incomplète (g/s)

Dioxyde de soufre

Le rejet de dioxyde de soufre est directement lié à la quantité de soufre présent initialement dans le carburant. Dans ce modèle, il est estimé que la totalité du soufre se transforme en dioxyde de soufre dans le moteur.

$$E_{SO_2} = 2 * a_{SO_2} * FC \quad (\text{A II-6})$$

Avec : E_{SO_2} , rejet de dioxyde de soufre à la sortie du pot d'échappement (g/km)
 a_{SO_2} , coefficient de dioxyde de soufre. Il dépend du type de véhicule et de carburant
utilisé : pour les véhicules à essence $a_{SO_2} = 0.0005$, pour les diesels, $a_{SO_2} = 0.005$

Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote sont les émissions les moins reliées à la consommation de carburant. De ce fait, l'équation liant les NO_x et le carburant est plus complexe.

$$E_{NO_x} = \max(a_{NO_x} * \left(FC - \frac{FR_{NO_x}}{v} * 1000\right), 0) \quad (A II-7)$$

Avec : E_{NO_x} , rejet d'oxydes d'azote à la sortie du pot d'échappement (g/km)
 a_{NO_x} , coefficient d'oxydes d'azote ($\frac{g_{NO_x}}{g_{carburant}}$)
 FR_{NO_x} , seuil minimal d'oxydes d'azote en dessous duquel les émissions d'oxydes d'azote sont très faibles (g/s)

Plomb

Le HDM-4 modélise également les émissions de plomb. La quantité de plomb émise dans l'atmosphère est proportionnelle à celle présente dans le mélange initial. La présence de plomb dans les carburants a été très combattue par les organismes pour des raisons d'atteintes à la santé. De ce fait, les teneurs en plomb des carburants sont très faibles, voire nulles.

$$E_{Pb} = Prop_{Pb} * a_{Pb} * FC \quad (A II-8)$$

Avec : E_{Pb} , rejet de plomb à la sortie du pot d'échappement (g/km)
 a_{Pb} , coefficient de plomb ($\frac{g_{Pb}}{g_{carburant}}$). Il dépend du type de véhicule et de carburant utilisé :

- pour les véhicules à essence $a_{Pb} = 0.000537$
- pour les diesels, $a_{Pb} = 0$

Dioxyde de carbone

Les pots catalytiques visent à réduire le rejet de polluants et de composés chimiques dans l'atmosphère. Les catalyseurs convertissent le monoxyde de carbone et les hydrocarbures en dioxyde de carbone mais ne traitent pas le CO_2 directement.

La quantité de CO_2 émise comptabilise le carbone consommé lors de la combustion. La présence d'un pot catalytique augmente la quantité de CO_2 mesurée, par conversion d'une partie du monoxyde de carbone, des hydrocarbures et des particules en CO_2 . Le carbone non inclus dans les autres émissions est considéré par défaut comme du CO_2 .

$$E_{\text{CO}_2} = 44.011 * \left(\frac{FC}{12.011 + 1.008a_{\text{CO}_2}} - \frac{E_{\text{CO}}}{28.011} - \frac{E_{\text{HC}}}{13.018} - \frac{E_{\text{PM}}}{12.011} \right) \quad (\text{A II-9})$$

Avec : E_{CO_2} , rejet de dioxyde de carbone à la sortie du pot d'échappement (g/km)

a_{CO_2} , paramètre représentant le ratio entre les atomes d'hydrogène et de carbone dans le carburant 12.011, 13.018, 28.011 et 44.011, masses molaires respectives des particules, des hydrocarbures, du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone

Dans le moyen à long terme, les hydrocarbures et le monoxyde de carbone tendent à former du dioxyde de carbone. De ce fait, la concentration en CO_2 dans l'atmosphère sera plus élevée que dans le calcul précédent.

7. Limites du HDM-4

Les effets environnementaux sont quantifiés, mais ne sont pas monétarisés. Ils ne peuvent donc pas être pris en compte dans les modèles de gestion des chaussées traditionnels au titre de coûts. À ce stade, seule une comparaison des taux d'émissions estimés année par année peut être engagée pour définir la meilleure stratégie d'un point de vue environnemental.

Les limites des modèles du HDM-4 sont synthétisées ci-dessous :

- le même modèle est utilisé pour représenter la consommation d'essence et de diesel (au coefficient de masse près);
- les avancées technologiques telles que la voiture électrique ou hybride et l'utilisation de biocarburant, ne sont pas représentées;
- un modèle de voiture est associé à un type de carburant;
- même si un modèle mécaniste traduit l'effet de la technologie du pot catalytique, dans la pratique, chaque voiture n'est pas étudiée pour définir si elle en possède un ou pas;
- les modèles d'émissions du HDM-4 sont basés sur des moteurs chauds;
- le phénomène d'évaporation n'est pas modélisé dans le HDM-4.

Ses hypothèses restrictives tendent à considérer les résultats des calculs du HDM-4 comme une minimisation des émissions rejetées par la circulation routière.

ANNEXE III

MÉTHODES ET MOYENS DE QUANTIFICATION DES IMPACTS SOCIAUX, SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX

Le recours à la méthode hédonique ou à la théorie de la préférence révélée par Paul Samuelson. Par exemple, le prix d'une maison située le long d'un axe bruyant sera moins élevé que sa semblable située dans une rue calme. Une partie du coût de l'impact du trafic sur la qualité de vie, la qualité de l'air et la sécurité des riverains, sous le couvert du prix de l'immobilier, est ainsi estimé (Victoria Transport Policy Institute, 2015).

L'emploi du coût de prévention ou de contrôle : le contrôle et la prévention permettent de se prévenir d'un incident qui aura un coût. Cette méthode permet de donner un ordre de grandeur du montant du préjudice. Par exemple, si une industrie dépense 1000 \$ par tonne d'un polluant pour réduire ses émissions, on peut en déduire que ces émissions imposent un coût d'au moins 1000 \$ par tonne (Victoria Transport Policy Institute, 2015).

Le recours au taux de compensation financière, estimé par le coût du préjudice ou du dommage causé (Victoria Transport Policy Institute, 2015).

L'évaluation du cycle de vie (Life cycle assessment _ LCA) est une méthode scientifique qui permet de mesurer l'empreinte environnementale d'un matériau, d'un produit ou d'un service au cours de sa vie. Il s'agit d'une procédure itérative à étapes multiples qui calcule l'impact environnemental pour chaque phase de la vie du produit ou du service. L'ensemble du processus de construction est décortiqué : les objectifs basés sur les prévisions d'utilisation, les moyens engagés dans la réalisation du produit, le choix des matériaux et de leur acheminement jusqu'au site, les déchets potentiels et rejets produits. Le potentiel de réchauffement planétaire, la consommation d'énergie primaire, la pollution atmosphérique et de l'eau, et l'utilisation des ressources naturelles sont simulés (Athena Sustainable Materials Institute, 2017).

Jugée comme essentielle et fiable pour l'évaluation des impacts environnementaux par l'Institut Athéna, l'évaluation du cycle de vie a démontré son intérêt lors de nombreuses études et est largement acceptée dans la communauté internationale des recherches environnementales. Le LCA intervient en complément d'autres méthodes d'évaluation des impacts environnementaux. En effet, il ne permet pas de chiffrer ou de budgétiser l'impact (Athena Sustainable Materials Institute, 2017).

La comptabilisation de l'effet des gaz à effet de serre peut se baser aussi sur « l'équivalent carbone », méthode voisine du PRG. Il prend seulement le carbone résultant de la combustion des hydrocarbures et non le dioxyde de carbone. La conversion entre les deux méthodes est basée sur le rapport des masses molaires d'un atome de carbone (12 g/mol) et d'une molécule de CO_2 (44 g/mol), soit 3 / 11 (SÉTRA, 2010).

L'utilisation d'un coefficient de risque déterminé par une étude à échelle nationale (les États-Unis, ici) pour les adultes et une méta-analyse d'études sur la mortalité infantile, pour déterminer le nombre de morts ou d'années de vie enlevées (Cohen et al., 2005).

L'estimation de la mortalité et la morbidité par le biais de statistiques annuelles régionales, pour cet exemple, le « *Health Statistical Yearbook of Guangdong Province 2007* », réalisé en Chine (Huang et al., 2012).

Le recours à des études chronologiques qui capturent les effets aigus de la pollution atmosphérique en analysant l'association entre le taux de mortalité journalier et le taux de pollution sur un ou plusieurs jours (Kan et al., 2004).

La création du concept d'*utilité de vivre avec une maladie* en associant un état de santé à un coefficient. Par exemple, l'utilité de vivre avec une bronchite chronique est de 0.68, soit une perte de 32% en qualité de vie. Vivre en parfaite santé équivaut à un 1. Plus l'état de santé se détériore plus on approche du 0 qui représente le décès (Huang et al., 2012).

Le temps perdu pour une consultation est estimé à 0.5 jour, pour des patients hospitalisés respectivement pour cause de maladies respiratoires et de maladies cardiovasculaires, 9.5 et 11.5 jours sont comptabilisés (Huang et al., 2012).

L'utilisation d'un indicateur ou d'un traceur : les niveaux de certains polluants caractéristiques sont censés refléter la pollution atmosphérique globale et les différentes sources de pollution rencontrées. Les particules fines $PM_{2.5}$ et PM_{10} , l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, les métaux lourds, les hydrocarbures et les composés organiques volatiles en font partie (Blanchard et al., 2008).

L'utilisation de relations exposition-risque issus d'études épidémiologiques, pour définir les impacts sur la santé à court et à long terme (Blanchard et al., 2008).

BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO. (1985). *Guidelines on Pavement Management*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AEA Technology Environment. (2005). Damages per tonne emission of PM2.5, NH3, SO2, NOx and VOCs from each EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas. *European Commission DG Environment*.
- An, E., Barth, M., Norbeck, J., & Ross, M. (1997). Development of Comprehensive Modal Emissions Model : Operating Under Hot-Stabalized Conditions. *Transportation Research Record*, 970706, 52 - 62. doi: 10.3141/1587-07
- Antenucci, J., Brown, K., Croswell, P., & Kevany, M. (1991). *Geographic Information Systems : A guide to the technology*.
- Anthoff, D., & Tol, R. S. J. (2010). FUND - Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution.
- ArcGIS. (2017). ArcGIS World Imagery. Repéré à <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>
- Assaf, G. J. (2016). *Notes de cours : Analyse des coûts totaux (LCCA)*. École de Technologie Supérieure.
- Athena Sustainable Materials Institute. (2017). About LCA. Repéré à <http://www.athenasmi.org/>
- Autret, P., & Brousse, J.-L. (1991). *VIZIR : méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un réseau routier*. Paris: LCPC.
- Banque Mondiale. (2016). Les décès dus à la pollution atmosphérique coûtent 225 milliards de dollars à l'économie mondiale. Repéré à <http://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2016/09/08/air-pollution-deaths-cost-global-economy-225-billion>
- Beaton, R., & Hoghoughi, P. (2010). The South Fraser Perimeter Road Environmental and Health Impacts. Repéré à <http://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob370/students/class10/rabeaton/www/result/nighlights/index.html>
- Bédard, Y., Proulx, M.-J., Rivest, S., & Badard, T. (2006). *Geographic Hypermedia: Concepts and Systems*. Springer. doi: 10.1007/978-3-540-34238-0_10

- Bennett, C. R., & Greenwood, I. D. (2004). *Volume Seven _ Modelling road users and environmental effects in HDM-4* (Vol. 7). Association mondiale de la route.
- Bergeron, M.-A., & Carrier, J. (2007). *Guide de mesure et d'identification des dégradations des chaussées souples*.
- Bitume Québec. (2008). *Guide de bonnes pratiques - La mise en oeuvre des enrobés*.
- Blanchard, M., Borrelli, D., Chardon, B., Declercq, C., Fabre, P., Host, S., Jusot, J.-F., Larrieu, S., Lefranc, A., Medina, S., Pascal, L., Prouvost, H., Wagner, V. (2008). Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine _ Concepts et méthodes. *Institut de veille sanitaire*.
- Bueno, M., Luong, J., Terán, F., Viñuela, U., & Paje, S. E. (2013). Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise of an asphalt rubber pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(7), 606-613. doi: 10.1080/10298436.2013.790547
- Cammisano, D. (2007). *Développement d'un outil de diagnostic et de confirmation des causes de détérioration des chaussées flexibles* (École de Technologie Supérieure).
- Campbell-Lendrum, D., & Corvalan, C. (2007). Climate Change and Developing-Country Cities : Implications For Environmental Health and Equity. *Journal of Urban Health*, 84(1), 109-117. doi: 10.1007/s11524-007-9170-x
- Çelik, T., Kamali, S., & Arayici, Y. (2017). Social cost in construction projects. *Environmental Impact Assessment Review*, 64, 77-86. doi: 10.1016/j.eiar.2017.03.001
- Chaouki Abou-Rjaili, B. (1999). *Développement et calage des modèles de comportement du réseau de chaussées rigides du MTQ* (Ecole de Technologie Supérieure, Montréal).
- CITEPA. (2017). Poussières en suspension. Repéré à <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/poussieres-en-suspension>
- Cohen, A. J., Ross Anderson, H., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Kunzli, N., Gutschmidt, K., Pope, A., Romieu, I., Samet, J. M., Smith, K. (2005). The global burden of disease due to outdoor air pollution. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 68. doi: 10.1080/15287390590936166
- Commission de l'Union Économique et Monétaire d'Afrique de l'Ouest. (2017). *Communiqué sur l'application du règlement relatif à la charge à l'essieu*.
- Cornuéjols, A. (2011). *Bases de données*. AgroParisTech.

- Dahl, A., Gharibi, A., Swietlicki, E., Gudmundsson, A., Bohgard, M., Ljungman, A., Blomqvist, G., Gustafsson, M. (2006). Traffic-generated emissions of ultrafine particles from pavement–tire interface. *Atmospheric Environment*, 40.
- Doré, G., & Grellet, D. (2015). *Logiciel mécaniste-empirique de conception des chaussées souples i3C - Guide de l'utilisateur*. Université de Laval.
- Eisele, W. L., Fossett, T., Schrank, D. L., Farzaneh, M., Meier, P. J., & Williams, S. P. (2014). Greenhouse Gas Emissions and Urban Congestion. *Journal of the Transportation Research Board*, 2427, 73-82. doi: 10.3141/2427-08
- Elhadi, H. M. A. (2009). *A tool for pavement management*. (Royal Institute of Technology, Sweden).
- Environment Protection Authority (EPA). (2004). Photochemical smog. What it means for us. 21.
- Etyemeziana, V., Kuhnsb, H., Gilliesb, J., Chowb, J., Hendricksonc, K., McGownc, M., & Pitchford, M. (2003). Vehicle-based road dust emission measurement (III): Effect of speed, traffic volume, location, and season on PM10 road dust emissions in the Treasure Valley, ID. *Atmospheric Environment*, 37.
- Gendron, P. M. (2001). *Éléments essentiels à l'implantation d'un système de gestion des chaussées* (École de Technologie Supérieure).
- 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. doi: 10.3141/1990-04
- Hainesa, A., Kovatsa, R. S., Campbell-Lendrumb, D., & Corvalanb, C. (2006). Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health. *Journal of The Royal Institute of Public Health*, 120, 585-596. doi: 10.1016/j.puhe.2006.01.002
- Han, X., & Naeher, L. P. (2006). A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. *Environ Int*, 32(1), 106-120. doi: 10.1016/j.envint.2005.05.020
- Harold, J., Lorenzoni, I., Shipley, T., & Coventry, K. (2016). Cognitive and psychological science insights to improve climate change data visualisation. *Nature Climate Change*, 6(12).
- Henning, T., Alabaster, D., Arnold, G., & Liu, W. (2014). Relationship between traffic loading and environmental factors and low-volume road deterioration. *Journal of the Transportation Research Board*, 2433, 100–107. doi: 10.3141/2433-11

- Huang, D., Xu, J., & Zhang, S. (2012). Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China. *Environmental Science & Policy*, 15(1), 38-47. doi: 10.1016/j.envsci.2011.09.007
- Kan, H., Chen, B., Chen, C., Fu, Q., & Chen, M. (2004). An evaluation of public health impact of ambient air pollution under various energy scenarios in Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, 38(1), 95-102. doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.038
- Kawakami, A., Ishigaki, T., Shirai, Y., Terada, M., & Kubo, K. (2017). Evaluation method of pavement surface characteristics for rolling resistance. *Road Materials and Pavement Design*, 1-10. doi: 10.1080/14680629.2017.1304264
- Kerali, H. G. R., Odoki, J. B., & Stannard, E. E. (2006). *Volume Un _ Vue d'ensemble de HDM-4* (Vol. 1). Association mondiale de la route.
- Kordi, N. E., Endut, I. R., Wahab, M. Y., & Baharom, B. (2012). The relationship between traffic volume of heavy vehicles and the performance of Malaysian Federal Roads Route One (FT01) In Selangor: a case study. *IEEE Business, Engineering & Industrial Applications Colloquium*, 430-434.
- Kulkarni, R., & Miller, R. (2003). Pavement Management Systems : Past, Present, and Future. *Journal of Transportation Research Board*, (1853), 65-71. doi: 10.3141/1853-08
- Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Henri, M., Horak Jr, F., Puybonnieux-Textier, V., Quénel, P., Sommer, H. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution : a European assessment. *The Lancet*, 356, no 9232, 795-801.
- Landry, J.-A. (2005). *Système d'information géographique et télédétection* (École de Technologie Supérieure).
- Leedy, P., & Ormrod, J. E. (2014). *Practical Research : Planning and Design*.
- Li, Q., & Xie, F. (2010). Expressway Maintenance Decision Support System Based on GIS. 139-141. doi: 10.1109/icie.2010.324
- Litman, T. (2009). *Climate Change Emission Valuation for Transportation Economic Analysis* (Victoria Transport Policy Institute).
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B., Bak, M. (2008). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector* (CE Delft).

- Medina, A., Flintsch, G., & Zaniewski, J. (1999). Geographic Information Systems–Based Pavement Management System : A Case Study. *Transportation Research Record*, 1652.
- Messenger Rota, V., & Tabaka, J. (2009). *Gestion de projet : Vers les méthodes agiles*. Paris: Eyrolles.
- Miller, J., & Bellinger, W. (2003). *Distress identification manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. Office of Infrastructure Research and Development and Federal Highway Administration.
- Ministère des Transports du Québec. (1999). *Bulletin d'information technique - Spécifications d'UNI et traitement des données d'IRI*. Direction du laboratoire des chaussées. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/info-dlc/Documents/1999/99-04.PDF>
- Ministère des Transports du Québec. (2013a). *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules routiers*. Gouvernement du Québec.
- Ministère des Transports du Québec. (2013b). *Plan d'intervention en infrastructures routières locales*. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-finan/municipalites/amelioration-reseau-routier-municipal/Documents/ComplementInfoTechniquesAuscultation.pdf>
- Moroiuk, G., Riley, M., & Toole, T. (2006). *Volume Deux _ Guide des applications de HDM-4* (Vol. 2). Association mondiale de la route.
- New Zealand Ministry for the Environment. (2016). Specific Air Pollutant : Sulphur dioxide. Repéré à <http://www.mfe.govt.nz/air/specific-air-pollutants/sulphur-dioxide>
- Nijland, H. A., Van Kempen, E. E. M. M., Van Wee, G. P., & Jabben, J. (2002). Costs and benefits of noise abatement measures. *Transport Policy*, 10, 131-140.
- OCDE. (2007). *Panorama de la Santé 2007 - Indicateurs de l'OCDE*.
- Odoki, J. B., & Kerali, H. G. R. (2006). *Volume Quatre _ Structure analytique et descriptions du modèle* (Vol. 4). Association mondiale de la Route.
- OQLF. (2006). Le grand dictionnaire terminologique
Repéré à <http://www.granddictionnaire.com/>
- Organisation mondiale de la santé. (2016). Intoxication au plomb et santé.
Repéré à <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/fr/>

- P&S Market Research. (2017). Global Geographic Information System (GIS) Market to Witness 10.1% CAGR During 2017 - 2023.
Repéré à <https://www.psmarketresearch.com/press-release/global-geographic-information-system-market>
- Pais, J. C., Amorim, S. I. R., & Minhoto, M. J. C. (2013). Impact of Traffic Overload on Road Pavement Performance. *Journal of Transportation Engineering*, 139(9), 873-879.
- Pellecuer, L. (2014). *Modélisation des impacts environnementaux de la circulation routière en vue de leur intégration dans les systèmes de gestion des chaussées* (École de Technologie Supérieure).
- Peshkin, D. (2011). *Preservation Approaches for High-Traffic-Volume Roadways – SHRP2 Renewal Research*.
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *Journal of the American Medical Association*, 287(9).
- Richard, M. (2003). *Évaluation du profil de la surface des pistes de roulement du métro de Montréal*. Institution de recherche Robert-Sauvé.
Repéré à <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-344.pdf>
- Rivard, H. (2017). *Notes de cours : La gestion des documents électroniques et des connaissances*. École de Technologie Supérieure.
- RWDI Inc. (2006). South Fraser Perimeter Road - Regional Air Quality Impact Assessment. *Environmental Assessment Application*, 16.
- Salama, H. K., Chatti, K., & Lyles, R. W. (2006). Effect of Heavy Multiple Axle Trucks on Flexible Pavement Damage Using In-Service Pavement Performance Data. *Journal of Transportation Engineering*, 132(10). doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:10(763)
- Sayers, M., Gillespie, T., & Patersonm, Z. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. World Bank technical paper; no. WTP 46. Washington DC ; World Bank. .
- SÉTRA. (2010). *Rapport d'études : Monétarisation des externalités environnementales*. Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements.
- Sharma, B. M., Sitaramanjaneyuiu, K., & Kanchan, P. K. (1995). Effect Of Vehicle Axle Loads On Pavement Performance. *Road transport technology*, 4, University of Michigan Transportation Research Institute, 263-272.

- Smée, V. (2006). L'Afrique élimine l'essence au plomb. *Novethic*.
Repéré à <http://www.novethic.fr/empreinte-terre/pollution/isr-rse/l-afrique-elimine-l-essence-au-plomb-97697.html>
- Sorin, B. (2015). The Contributions To The Study Of Carbon Monoxide Pollution Due To Car Traffic In A Densely Populated Area. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, 66(1). doi: 10.1515/aucts-2015-0019
- Towles, C. (2017). *Maximizing economic returns for large, publicly funded road infrastructure investments through improved economic, engineering and construction information management* (École de Technologie Supérieure).
- Tsouchlaraki, A., Achilleos, G., Nasioula, Z., & Nikolidakis, A. (2009). *Designing and creating a database for the environmental quality of urban roads, using GIS* présentée à 7th WSEAS International Conference on ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and DEVELOPMENT.
- United Nations. (2001). Multistage environmental and social impact assessment of road project : guidelines for a comprehensive process.
- University of Stuttgart. (2014). ExternE - External Costs of Energy. The impact pathway approach. Repéré à http://www.externe.info/externe_d7/?q=node/46
- Vanier, D. J. (2001). Why industry needs asset management tools. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(1), 35-43. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:1(35)
- Vaucher, S., & Dufour, B. (2007). *Développement agile*. Université de Montréal.
- Victoria Transport Policy Institute. (2015). Transportation Cost and Benefit Analysis - Techniques, Estimates and Implications. Repéré à <http://www.vtpi.org/tca/>
- Zhou, G., Wang, L., Wang, D., & Reichle, S. (2010). Integration of GIS and data mining technology to enhance the pavement management decision making. *Journal of Transportation Engineering*, Volume 136(4), 332-341. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000092

