

Développement d'une approche pour la préservation et le
développement d'un sous-réseau routier en Afrique
subsaharienne

par

Emmanuel Kossè KABA

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

MONTRÉAL, LE 07 AVRIL 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Emmanuel Kossè Kaba, 2020



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

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Gabriel J. Assaf, directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Kamal Al-Haddad, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Fausto Errico, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Della McMillan, membre externe indépendant
Université de Floride

M. Laurent Gauthier, membre externe
EXP international

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

LE 01 AVRIL 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEUR

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, le professeur Gabriel J. Assaf. Ce fut un véritable privilège d'avoir été son étudiant à la maîtrise et au doctorat. Monsieur Assaf, merci très sincèrement pour votre confiance, vos conseils et le soutien que vous m'avez apporté tout au long de cette thèse. Sans ce soutien, ce projet de recherche n'aurait certainement jamais vu le jour, car je l'avoue, au début je ne savais pas réellement quelle direction prendre. Je tiens aussi à vous dire que c'est principalement grâce à vos cours en conception et en gestion des routes que je me suis orienté dans ce domaine. Mon domaine de prédilection était les bâtiments et les ouvrages d'art. Je vous témoigne toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce projet de recherche, pour leurs précieuses suggestions, ainsi que pour les commentaires pertinents qu'ils m'ont prodigués après l'examen doctoral oral, notamment sur les approches scientifiques de la méthodologie. Vous m'avez permis de m'améliorer considérablement.

J'aimerais aussi dire merci à tous mes collègues du local A1568, plus particulièrement mon ami Soro Nahouo ainsi qu'à la communauté scientifique de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) de Montréal.

Enfin, un grand merci à mes parents et ma sœur dont l'amour inconditionnel m'a permis de ne jamais abandonner. Papa et maman, je vous dédis cette thèse, car vous m'avez inculqué des valeurs humaines et fourni l'aide nécessaire tout au long de mes études.

DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE POUR LA PRÉSERVATION ET LE DÉVELOPPEMENT D'UN SOUS-RÉSEAU ROUTIER EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Emmanuel Kossè KABA

RÉSUMÉ

Les investissements des bailleurs de fonds et des gouvernements demeurent clairement insuffisants pour assurer le développement et la préservation des réseaux routiers dans les pays d'Afrique subsaharienne (ASS). Les outils de gestion qui pourraient faciliter la prise de décisions économiquement viables et socialement acceptables pour la construction, la préservation et la réhabilitation durables des routes manquent. Les effets directs de ces lacunes sont la faible densité de routes revêtues et la détérioration avancée des routes existantes.

Dans les pays d'Afrique subsaharienne, la prise en compte des aspects sociaux et environnementaux dans la prise de décision en gestion des chaussées est en effet très limitée, voire inexistante.

C'est dans ce cadre, que cette thèse a pour objectif de proposer une approche qui permet de prioriser les projets de construction et de préservation de routes, en intégrant les aspects techniques, économiques, sociaux et environnementaux, au niveau réseau puis au niveau projet.

Cette approche est basée sur l'indice de priorité de financement des routes (IPFR) pour la priorisation et la sélection adéquates des projets routiers au niveau réseau. Cet indice se base sur la saisie et l'analyse en composantes principales de données routières pour en dégager des indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux.

Dans la première partie de cette thèse, un IPFR est proposé pour classer conjointement les deux types de projets routiers par priorité de financement. Par la suite, quatre projets de construction (bitumage de routes non-revêtues) et six projets de préservation, totalisant 330 km de routes, ont été sélectionnés selon leur admissibilité au programme du bailleur de fonds et sur la base de leur IPFR. Ces projets prioritaires nécessitent des investigations et des analyses approfondies au niveau projet, d'où l'importance de développer des méthodes rationnelles intégrées.

Au niveau projet, deux méthodes rationnelles intégrées permettent de déterminer respectivement les meilleures interventions de bitumage et d'entretien périodique.

Une première méthode rationnelle intégrée est proposée dans la seconde partie de cette thèse afin de choisir les meilleures options de bitumage pour les routes non-revêtues. Cette méthode est fondée sur le dimensionnement mécaniste-empirique et l'intégration des aspects

VIII

environnementaux et sociaux dans l'analyse économique conventionnelle via une analyse multicritère. L'option de bitumage en enrobé dense (ED), sélectionnée grâce à cette méthode, permet de maximiser la valeur actuelle nette et les avantages sociaux, d'améliorer le confort au roulement et de réduire le risque d'accident ainsi que de réduire la pollution atmosphérique.

Une deuxième méthode rationnelle est présentée dans la troisième partie de cette thèse pour déterminer les meilleures interventions d'entretien de routes candidates selon la réduction de consommation d'énergie, la réduction des quantités et des coûts des émissions polluantes (CCVEE), des coûts totaux de transports (CTCV) et des contraintes budgétaires sur une période de 20 ans. Les meilleures interventions choisies à l'aide de cette deuxième méthode sont des options d'entretien périodique permettant de réduire d'environ 23% la consommation d'énergie, d'économiser environ 23 % des CCVEE et 30 % des CTCV.

En conclusion, cette thèse démontre l'importance et la possibilité d'utiliser le concept des routes durables par l'intégration quantitative et qualitative des facteurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux pour la gestion durable des routes en ASS aux niveaux réseau et projet.

Mots clés : Afrique Subsaharienne, projet de construction et d'entretien, priorisation, analyse économique, analyse multicritère, indice composite, indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux

DEVELOPMENT OF AN APPROACH FOR THE PRESERVATION AND DEVELOPMENT OF A SUB-SAHARAN AFRICAN ROAD SUB-NETWORK

Emmanuel Kossè KABA

ABSTRACT

Donor and government investments remain insufficient to ensure the development and preservation of roads in Sub-Saharan Africa countries (SSA). Management tools that could help the decision-making process regarding the sustainable construction and preservation of roads are lacking. The direct effects of these shortcomings are the low density of paved roads and the increase of the deterioration rate of existing roads.

In SSA, social and environmental aspects are rarely included in pavement management decision-making process.

The objective of this thesis is to develop an approach for the prioritization of road construction and preservation projects by integrating technical, economic, social and environmental aspects at the network level, and then at the project level.

This approach is based on the Road Funding Priority Index (RFPI) for the appropriate prioritization and selection of road projects at the network level, and two integrated rational methods for the respective choices of the best road upgrading alternative and the best road periodic maintenance alternatives at the project level.

In the first part, a RFPI is proposed to rank the two types of road projects (construction and preservation projects) in order of priority. This index is based on principal components analysis of road data to include technical, economic, social and environmental indicators. Subsequently, ten high-priority road projects, totaling 330 km including four construction projects (upgrading of unpaved roads) and six preservation projects are selected according to their eligibility to the donor road funding program and their RPFIs. These high-priority roads projects are candidate sections to upgrading and periodic maintenance alternatives requiring in-depth investigations and analysis at the project level, hence the importance of establishing integrated rational methods.

In the second part of this thesis, an integrated rational method is proposed to choose the best upgrading alternative for unpaved road sections (high-priority road construction projects). This method is based on mechanistic-empirical pavement structural design and the integration of environmental and social aspects into the classic economic analysis via a multi-criteria analysis. The asphalt concrete (AC) upgrading alternative selected using this method, maximize net present value and social benefits, and reduce the risk of accidents and air pollution.

In the third part of this thesis, a second integrated rational method is suggested to choose the best road preventive maintenance alternatives (best periodic maintenance activity) according

to the reduction of energy consumption, the savings of pollutant emissions costs (CCVEE) and total transport costs (CTCV), and budget constraints over a period of 20 years during the pavement operation phase. The best preventive alternatives selected based on this method are periodic maintenance activities that reduce approximately 23% of the total vehicle consumption energy (EGLOB) and save approximately 23% of the CCVEEs and 30% of the CTCVs.

This thesis highlights the importance and demonstrates the possibility of using the concept of sustainable roads with the quantitative and qualitative integration of technical, economic, social and environmental indicators and criteria for the sustainable management of roads in SSA at the network and project levels.

Keywords: Construction and maintenance projects, prioritization, economic analysis, multicriteria analysis, composite indicator, technical, economic, social and environmental indicators, Sub-Saharan Africa.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	13
1.1 Gestion des chaussées	13
1.1.1 Définition de la gestion des chaussées.....	13
1.1.2 Les niveaux de décision en gestion des chaussées.....	13
1.1.3 La structure et les composantes du système de gestion des chaussées.....	15
1.2 La gestion durable des chaussées.....	19
1.3 Analyse de cycle de vie.....	21
1.4 Analyse économique des projets routiers	24
1.4.1 Analyse de coûts de cycle de vie (ACCV).....	25
1.4.2 Analyse coût –avantage (ACA)	26
1.4.2.1 Valeur actuelle nette (VAN).....	26
1.4.2.2 Taux de rendement interne (TRI)	27
1.4.2.3 Rapport avantage-coût (RAC)	27
1.4.3 Analyse coût-efficacité (ACE).....	28
1.5 Méthode de priorisation des projets routiers.....	29
1.5.1 Sélection basée sur le classement	29
1.5.2 Optimisation mathématique	30
1.5.3 Choix des méthodes de priorisation.....	33
1.6 Conclusion et recommandations	34
CHAPITRE 2 ROAD FUNDING PRIORITY INDEX FOR SUB-SAHARAN AFRICA USING PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS.....	37
2.1 Abstract.....	37
2.2 Introduction.....	38
2.3 Literature review.....	41
2.3.1 Cost-Benefit Analysis (CBA)	41
2.3.2 Multi-criteria Analysis (MCA)	42
2.3.3 Composite Indicators (CI).....	45
2.4 Data source.....	49
2.5 Study area.....	49
2.6 Methods.....	52
2.6.1 Theoretical framework.....	54
2.6.2 Selection of indicators.....	55
2.6.3 Transformation of indicators.....	63
2.6.4 Normalization of Indicators	64
2.6.5 Correlation and signification.....	64
2.6.6 Weighting using PCA	65
2.6.6.1 A brief description of PCA	65

2.6.6.2	Number of principal components to be retained and principal components rotation.....	66
2.6.6.3	Selection of explicative indicators and determination of indicators.....	67
2.6.7	Aggregation and determination of RFPI.....	68
2.6.7.1	Aggregation and total scores of projects.....	68
2.6.7.2	Determination of RFPI.....	68
2.7	Results and discussion	69
2.7.1	Limitations of study	69
2.7.2	Correlation of indicators	69
2.7.3	Number of retained principal components and explicative indicators.....	70
2.7.4	Weighting coefficients	73
2.7.5	Weights of indicators	74
2.7.6	Total scores of projects	76
2.7.7	RFPI and road projects ranking	77
2.8	Conclusion and recommendations	85

CHAPITRE 3 MÉTHODE RATIONNELLE INTÉGRÉE DE DIMENSIONNEMENT ET D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE BITUMAGE DE ROUTE NON REVÊTUES DE « HAUTE PRIORITÉ » INCLUANT LES ASPECTS SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

		87
3.1	Résumé.....	87
3.2	Introduction.....	88
3.3	Revue de littérature.....	90
3.3.1	Types de revêtement de surface des routes.....	90
3.3.2	Méthodes de dimensionnement des chaussées	93
3.3.3	Évaluation économique des projets routiers	98
3.3.4	Impacts sociaux et environnementaux des projets routiers.....	99
3.4	Zone d'étude	100
3.5	Méthodologie	101
3.5.1	Sélection des tronçons en fonction de l'IPFR.....	103
3.5.2	Investigations et collecte des données	105
3.5.2.1	Inventaire, évaluation et vérification des caractéristiques physiques.....	106
3.5.2.2	Étude du trafic.....	107
3.5.3	Étude géotechnique.....	115
3.5.4	Dimensionnement des tronçons de route sélectionnés (CEBTP et ALIZE).....	117
3.5.5	Configuration et calage du modèle HDM-4.....	118
3.5.6	Analyse économique, analyse de sensibilité et intégration des critères sociaux et environnementaux.....	120
3.5.6.1	Analyse économique.....	120
3.5.6.2	Analyse de sensibilité	125

3.5.7	Intégration des critères environnementaux et sociaux	126
3.5.8	Choix de la meilleure alternative de bitumage	132
3.6	Résultats et discussion	132
3.6.1	Structures des chaussées et vérification des contraintes admissibles	132
3.6.1.1	Structures des chaussées des tronçons de route - Méthode CEBTP	132
3.6.1.2	Vérification des contraintes dans les structures de chaussées	135
3.6.2	Analyse économique.....	137
3.6.2.1	Trafic.....	137
3.6.2.2	État (IRI) des tronçons avant et après le bitumage	138
3.6.2.3	Synthèse de l'analyse économique	139
3.6.3	Analyse de sensibilité	140
3.6.4	Intégration des aspects sociaux et environnementaux	142
3.6.5	Meilleure option de bitumage	146
3.7	Conclusion et recommandations	147

CHAPITRE 4 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE SUR LE CYCLE DE VIE, ANALYSE ENVIRONNEMENTALE ET PROGRAMMATION SOUS CONTRAINTE BUDGÉTAIRE DES INTERVENTIONS D'ENTRETIEN POUR LES CHAUSSÉES FLEXIBLES STRUCTURELLES DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT			151
4.1	Résumé.....		151
4.2	Introduction.....		152
4.3	Méthodologie		156
4.3.1	Zone d'étude et identification des tronçons		158
4.3.2	Inventaire et collection des données		159
4.3.2.1	Étude de trafic		159
4.3.2.2	Évaluation fonctionnelle		160
4.3.2.3	Évaluation structurale		162
4.3.2.4	Les données sur les coûts.....		163
4.3.2.5	Division des tronçons en sections homogènes.....		164
4.3.2.6	Résumé des données routières de l'étude		164
4.3.3	Détermination et validation des niveaux de service		166
4.3.4	Établissement des options d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction.....		168
4.3.5	Calcul des coûts unitaires des émissions polluantes.....		173
4.3.6	Analyse technique et économique avec le logiciel HDM-4.....		176
4.3.6.1	Détermination de la quantité totale de cycle de vie de consommation d'énergie.....		177
4.3.6.2	Coûts du cycle de vie des émissions polluantes.....		179
4.3.6.3	Coûts totaux du cycle de vie de transport (CTCV).....		179
4.3.6.4	Optimisation sous contrainte budgétaire.....		180
4.4	Résultats et discussion		184
4.4.1	États des sections homogènes en fonction des options.....		184

4.4.2	Meilleure option en considérant la consommation d'énergie par les véhicules (EGLOB)	191
4.4.3	Meilleures options en considérant les coûts du cycle de vie des émissions polluantes	198
4.4.4	Meilleures options en considérant les coûts totaux du cycle de vie de transport	204
4.4.4.1	Répartitions des coûts totaux du cycle de vie de transport	210
4.4.5	Optimisation sous contraintes budgétaires.....	212
4.4.5.1	Options optimums et ordre de priorité d'entretien des sections.....	212
4.4.5.2	Analyse budgétaire en fonction de l'IRI et des coûts de travaux.....	215
4.4.5.3	Programme quinquennal de travaux	217
4.4.6	Systèmes des résultats et recommandations	218
4.5	Conclusion	220
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSION		223
LIMITES, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHES		231
ANNEXE I	PANEL D'EXPERTS ET PARTIES PRENANTES DE L'ÉTUDE.....	235
ANNEXE II	ÉQUATIONS ET HYPOTHÈSES DE CALCUL DES SOLlicitATIONS ET DES CONTRAINTES ADMISSIBLES.....	237
ANNEXE III	ÉTAPES DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE POUR LA PRISE EN COMPTE CONJOINTE DES ASPECTS ÉCONOMIQUES, ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX (TRONÇONS A10) (Odoki et Kerali, 2000b).....	239
ANNEXE IV	COÛTS UNITAIRES DES ÉMISSIONS POLLUANTES.....	247
ANNEXE V	ÉQUATIONS POUR LA DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE CONSOMMÉE PAR LES VÉHICULES MOTORISÉS (Bennett et Greenwood, 2000).....	249
ANNEXE VI	PRINCIPALES ÉTAPES DE DÉTERMINATION DES COÛTS DE CYCLE DE VIE DES EXTERNALITÉS ENVIRONNEMENTALES (CCVEE).....	251
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		253

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Avantages et inconvénients des méthodes de priorisation34
Tableau 3.1	Composition du trafic108
Tableau 3.2	Taux de croissance en fonction de la période d'analyse111
Tableau 3.3	Caractéristiques des couches de la structure de la chaussée existante en Graveleux latéritique117
Tableau 3.4	Paramètres généraux.....121
Tableau 3.5	Les caractéristiques des tronçons homogènes122
Tableau 3.6	Normes des travaux d'entretien et d'aménagement.....124
Tableau 3.7	Les options sans et avec projet125
Tableau 3.8	Scénarios de l'analyse de sensibilité126
Tableau 3.9	Critères et objectifs de l'AMC127
Tableau 3.10	Poids relatifs aux critères.....128
Tableau 3.11	Indice de performance du critère social.....131
Tableau 3.12	Structures des chaussées –CEBTP134
Tableau 3.13	Comparaison des caractéristiques géotechniques avec les valeurs recommandées par le Guide CEBTP134
Tableau 3.14	Structures des chaussées retenues.....135
Tableau 3.15	Hypothèses couche de base et couche de surface.....135
Tableau 3.16	Vérifications des contraintes et déformations - Enduit superficiel bicouche136
Tableau 3.17	Vérifications des contraintes et déformations -Enrobé dense136
Tableau 3.18	Synthèse de l'analyse économique.....140
Tableau 3.19	Sensibilité - croissance du trafic +/- 20%.....141
Tableau 3.20	Sensibilité - Coût d'investissement +/-20%.....141

Tableau 3.21	Sensibilité - Trafic normal +/-20%.....	141
Tableau 3.22	Résultats de l'AMC.....	142
Tableau 3.23	Indicateurs économiques des meilleures options de bitumage en ED -2016	143
Tableau 4.1	Type de dégradation et unités de mesure.....	162
Tableau 4.2	Coûts unitaires des travaux d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction	163
Tableau 4.3	Résumé des données de l'inventaire, de l'évaluation fonctionnelle, de l'évaluation structurelle et de l'étude du trafic	165
Tableau 4.4	Niveaux de service.....	167
Tableau 4.5	Normes des travaux d'entretien courant	171
Tableau 4.6	Options d'entretien des sections en enrobé bitumineux.....	172
Tableau 4.7	Option d'entretien des chaussées en enduit superficiel bicouche	173
Tableau 4.8	Options optimums en fonction des contraintes budgétaires	214
Tableau 4.9	Plan quinquennal d'entretien des sections	218
Tableau 4.10	Synthèse des meilleures options	219

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Système de gestion des chaussées18
Figure 1.2	Phases et composantes du cycle de vie des chaussées.....22
Figure 1.3	Aire délimitée par la courbe de performance et l'indicateur de performance minimum29
Figure 2.1	Member countries of ECOWAS.....50
Figure 2.2	Stages of RFPI.....53
Figure 2.3	RFPI of projects - very high to medium.....78
Figure 2.4	RFPI of projects - low79
Figure 2.5	RFPI of projects - very low80
Figure 2.6	Partition by priority level.....81
Figure 2.7	Partitions of road projects.....82
Figure 2.8	High-priority projects84
Figure 3.1	Structure-type d'une chaussée.....93
Figure 3.2	Sollicitations internes dans la structure de la chaussée97
Figure 3.3	Zone d'étude des projets de bitumage.....101
Figure 3.4	Étape de développement de la méthode rationnelle intégrée pour le choix des options de bitumage des routes de « haute priorité»102
Figure 3.5	Projet de construction de routes de «haute priorité»104
Figure 3.6	TJMA sur la période d'analyse137
Figure 3.7	TJMA sur la période d'analyse139
Figure 3.8	Quantités d'émissions polluantes des options du tronçon A5.....144
Figure 3.9	Quantités d'émissions polluantes des options du tronçon A10.....145
Figure 3.10	Quantité d'émissions polluantes des options du tronçon A11145

Figure 3.11	Quantité d'émissions polluantes des options du tronçon A16	146
Figure 4.1	Méthodologie d'évaluation de cycle de vie et programmation sous contrainte budgétaire des interventions d'entretien de chaussées flexibles de « haute priorité » intégrant les coûts des émissions polluantes et la consommation d'énergie	157
Figure 4.2	Zone d'étude et Projets d'entretien de « haute priorité ».....	158
Figure 4.3	Sections homogènes par niveau de service.....	168
Figure 4.4	Évolution de l'uni de la section homogène SH1 en fonction des différentes options	186
Figure 4.5	Évolution de l'uni de la section homogène SH2 en fonction des différentes options	187
Figure 4.6	Évolution de l'uni de la section homogène SH3 en fonction des différentes options	187
Figure 4.7	Évolution de l'uni de la section homogène SH4 en fonction des différentes options	188
Figure 4.8	Évolution de l'uni de la section homogène SH5 en fonction des différentes options	188
Figure 4.9	Évolution de l'uni de la section homogène SH6 en fonction des différentes options	189
Figure 4.10	Évolution de l'uni de la section homogène SH7 en fonction des différentes options	189
Figure 4.11	Évolution de l'uni de la section homogène SH8 en fonction des différentes options	190
Figure 4.12	Évolution de l'uni de la section homogène SH9 en fonction des différentes options	190
Figure 4.13	Évolution de l'uni de la section homogène SH10 en fonction des différentes options	191
Figure 4.14	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH1	193
Figure 4.15	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH2	193
Figure 4.16	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH3	194

Figure 4.17	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH4	194
Figure 4.18	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH5	195
Figure 4.19	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH6	195
Figure 4.20	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH7	196
Figure 4.21	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH8	196
Figure 4.22	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH9	197
Figure 4.23	Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH10	197
Figure 4.24	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH1	199
Figure 4.25	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH2	199
Figure 4.26	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH3	200
Figure 4.27	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH4	200
Figure 4.28	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH5	201
Figure 4.29	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH6	201
Figure 4.30	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH7	202
Figure 4.31	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH8	202
Figure 4.32	Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH9	203
Figure 4.33	Coûts du cycle de vie des émissions polluantes de la section SH10	203
Figure 4.34	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH1	205
Figure 4.35	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH2	206
Figure 4.36	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH3	206
Figure 4.37	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH4	207
Figure 4.38	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH5	207
Figure 4.39	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH6	208
Figure 4.40	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH7	208

Figure 4.41	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH8.....	209
Figure 4.42	Coûts totaux de cycle de vie de la section SH9.....	209
Figure 4.43	Coûts totaux du cycle de vie de la section SH10.....	210
Figure 4.44	Répartition des coûts totaux de cycle de vie.....	211
Figure 4.45	Ordre de priorité des sections en fonction des VAN/Cinv	215
Figure 4.46	Variation de l'état et des coûts de travaux en fonction du budget	216

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AASTHO	American Association of State Highway Transportation Officials
ACA	Analyse Coût –Avantage
ACCV	Analyse de Coûts de Cycle de Vie
ACE	Analyse Coût-Efficacité
ACV	Analyse de Cycle de Vie
AE	Algorithme Évolutionnaire
AE	Analyse Économique
AG	Algorithme Génétique
AHP	Analyse Hiérarchie des Procédés
AMC	Analyse Multicritère
ASS	Afrique SubSaharienne
CCVEE	Coût de Cycle de Vie des Externalités Environnementales
CEBTP	Centre D’Étude Expérimental des Bâtiments et Travaux Publics
CTCV	Coût Totaux de Cycle de Vie
DD	Développement Durable
ED	Enrobé Dense
EGLOB	Énergie Globale
ERR	Entretien, Réhabilitation et Reconstruction
ESB	Enduit superficiel bicouche
GL	Graveleux Latéritiques
IC	Indice Composite
IPFR	Indice de Priorité de Financement des Routes
IR	Infrastructures Routières
IRI	Indice de Rugosité International
MiDA	Mobilizing Institutional Investors to develop Africa’s Infrastructure
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PCA	Principal Components Analysis
PIB	Produit Intérieur Brut

PMS	Pavement Management System
RAC	Rapport Avantage- Coût
RFPI	Road Funding Priority Index
SGC	Système de Gestion des Chaussées
TRI	Taux de Rendement Interne
UEMOA	Union Économique et Monétaire Ouest Africaine
VAN	Valeur Actuelle Nette

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1. Contexte

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

En Afrique Subsaharienne (ASS), la route est le moyen privilégié de déplacement : 80% des marchandises et 90% des personnes transitent par la route (United Nations, 2009). Le réseau routier en ASS est pourtant peu développé et le manque d'investissement se reflète dans le mauvais état général des chaussées (Foster et Briceño-Garmendia, 2010).

L'ASS, d'une superficie de 1 000 km², est traversée par seulement 204 kilomètres de routes dont seulement 25 % sont revêtues. À titre comparatif, la densité moyenne mondiale des routes est de 944 kilomètres de routes pour une superficie de 1 000 km² et 50 % de celles-ci sont revêtues (Foster et Briceño-Garmendia, 2010). Ce manque de routes revêtues contribue à l'isolement d'une partie de la population, en particulier des régions rurales, entravant l'exportation de produits agricoles ainsi que l'accessibilité à l'éducation, aux services de santé et aux commerces (AFDB, 2018; Starkey et al., 2002).

Dans les pays en développement, et plus particulièrement en ASS, les besoins en terme d'investissements dans les infrastructures routières sont significativement plus importants que les investissements réels (MiDA, 2018). En effet, les dépenses nécessaires pour maintenir et développer le réseau routier en ASS sont estimées à 9,6 milliards de dollars par an (Tessa, 2016). Or, les dépenses actuelles ne sont que de 6,9 milliards de dollars, soit 30% en deçà (Foster et Briceno-Garmendia, 2010).

Ce manque d'investissements dans la préservation et l'entretien périodique ainsi que la mauvaise gestion des actifs routiers sont à l'origine de la détérioration importante du réseau

routier en ASS. Effectivement, plus de la moitié des routes de l'ASS sont en mauvais état (Sinate et al., 2018) et 75 % des routes non revêtues présentent des dégradations importantes (Gwilliam et al., 2008b). Les conséquences de ce manque d'investissements sont : (1) la détérioration plus rapide des chaussées (*déformation, orniérage, fissuration, faïençage, nids de poule et arrachements*), (2) l'augmentation des coûts d'exploitation des véhicules, (3) des temps de trajet, (4) du risque d'accident (Chen, 2009), et (5) des polluants émis par les véhicules motorisés (*hydrocarbures, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre, dioxyde de carbone, particules et plomb*) (Salih, Edum-Fotwe et Price, 2016).

0.2. Problématique

0.2.1. Le déficit de financement des projets routiers

Les fonds pour financer les projets routiers proviennent du budget général des gouvernements (*ou trésorerie nationale*), des taxes sur les produits pétroliers, des redevances d'usage de la route (*péages*) ainsi que des appuis des bailleurs de fonds (Beuran, Gachassin et Raballand, 2013; BOAD, 2015b; Gwilliam et Shalizi, 1996). Le financement provenant du secteur privé ne représente qu'une faible partie des fonds alloués aux projets routiers.

Les gouvernements et les partenaires de financement (*Banque mondiale, Union européenne, Banque africaine de développement, Millennium Challenge Corporation, etc.*) assurent le financement de la quasi-totalité des projets de développement (*aménagement et construction*) et de réhabilitation des routes en Afrique à travers des allocations du budget général, des prêts et des subventions d'appui au développement (Biau, Dahou et Homma, 2008).

Bien que des fonds routiers soient créés dans la majorité des pays africains pour le financement exclusif des projets d'entretien préventif (Haule, 2015), il n'en demeure pas moins que ces fonds restent toujours dépendants des attributions du budget national, ce qui engendre un déficit de financement pour le développement des réseaux routiers. D'après (Mbara, Nyarirangwe et Mukwashi, 2010), les pays développés et émergents consacrent au moins 5 %

de leur PIB aux Infrastructures Routières (IR), tandis que la majorité des pays en développement, y compris les pays de l'ASS, utilisent à peine 2 % de leur PIB (Mbara, Nyarirangwe et Mukwashi, 2010).

0.2.2. La création et l'évolution des fonds routiers

Après leur indépendance, la majorité des pays de l'ASS ont en effet créé des comptes spéciaux nommés « fonds routiers », qui étaient provisionnés par des taxes et des redevances routières (Benmaamar, 2006a) dans la perspective de combler la pénurie de financement pour l'entretien préventif. Ces fonds routiers dits de « première génération » qui devaient servir à financer exclusivement les travaux d'entretien préventif ont été abrogés, car ils n'ont pas offert la performance escomptée. En effet, ces premiers fonds, en plus de ne pas être des entités indépendantes du gouvernement, ont connu une mauvaise gestion, ont été utilisés pour d'autres dépenses non autorisées, et même détournés. Avec les réformes du secteur routier à la fin des années 1980, des solutions ont été proposées pour régler les problèmes récurrents de ces fonds routiers, notamment une gestion plus commerciale et une intégration effective des usagers dans la gestion de l'entretien routier. Ainsi, ces réformes ont permis la création de nouveaux fonds routiers dits de « deuxième génération » (Brushett, 2005). Les principales caractéristiques de ces nouveaux fonds étaient définies de la manière suivante : (1) une base juridique solide, une autonomie administrative, des règles et une réglementation ; (2) une entité de financement, mais qui n'exécute pas de travaux d'entretien ; (3) une fonction de contrôle strict, et un conseil d'administration public-privé ; (4) des recettes stables issues des redevances d'usage de la route directement versées sur le compte bancaire du fonds routier ; (5) des systèmes de gestion financière adéquate avec une structure administrative efficace et efficiente ; et (6) des audits financiers et techniques effectués sur une base régulière (Heggie, 1999). Rares sont les fonds routiers actuels instaurés dans les pays africains respectant ces six principales caractéristiques (Benmaamar, 2006a).

Théoriquement, les fonds routiers de deuxième génération devraient être indépendants du budget général avec des revenus stables provenant exclusivement des recettes d'usage de la

route telles que la redevance sur le carburant, les péages, les frais de transit, les droits d'immatriculation des véhicules et les amendes de surcharge. Or, les fonds routiers de la majeure partie des pays africains sont toujours assujettis à plus de 50 % aux affectations du budget général des gouvernements et aux appuis financiers des partenaires de développement (Benmaamar, 2006a).

Parmi les revenus des fonds routiers, la redevance sur le carburant est la plus importante avec une contribution de plus de 80 % et 51 % respectivement au Niger et au Burkina Faso. Ces redevances devraient être fixées à 76 FCFA/L pour financer adéquatement l'entretien préventif. Cependant, la redevance sur le carburant réellement perçue est comprise entre 25 à 40 FCFA/L, ce qui est même insuffisant pour financer l'entretien courant (BOAD, 2015b). Par conséquent, il y a un déficit de financement de l'entretien routier.

0.2.3. L'iniquité du financement des projets routiers

Les administrations routières et les bailleurs de fonds ont tendance à accorder de manière quasi systématique, la priorité au développement du réseau routier au lieu d'effectuer l'entretien préventif des routes existantes. Les principales raisons de cette tendance sont les suivantes : (1) le manque d'attractivité politique de l'entretien routier ; (2) la concurrence du financement de l'entretien routier avec les autres projets routiers et d'autres secteurs ; (3) le manque d'outils adéquats pour prédire les changements ou ajustements des normes d'entretien en fonction des niveaux des allocations budgétaires ; (4) le manque d'experts puisque l'entretien routier est considéré par les professionnels comme un emploi pour ingénieurs de second rang ; et (5) l'insuffisance des fonds de recherche accordés à l'entretien routier par les universités, qui ne le considèrent pas comme un sujet intellectuel (Levik, 2001).

Par conséquent, les principales causes de cette tendance créent une iniquité entre le financement des projets de construction des routes et celui de l'entretien des routes existantes. Cette iniquité de financement des projets routiers accélère les besoins en termes de réhabilitation et de reconstruction, qui s'avèrent au moins 4 fois plus dispendieux que

l'entretien préventif effectué au moment opportun (Adlinge, 2009). Parmi les 80 pays bénéficiant de l'assistance technique et financière de la Banque mondiale, un quart des routes revêtues et un tiers des routes non revêtues sont dans un état nécessitant une reconstruction. Le montant d'une telle reconstruction se situe entre 40 et 45 milliards de dollars. De tels coûts auraient pu être évités si seulement 12 milliards de dollars avaient été déboursés préalablement pour l'entretien préventif (Donnges, Edmonds et Johannessen, 2007). De plus, en ASS, plus de 150 milliards de dollars ont été investis pour le développement du réseau routier pendant les trois dernières décennies, et ce, au détriment de l'entretien routier. Cette négligence de l'entretien routier a entraîné une perte de plus de 50 milliards de dollars en actif routier en ASS (Levik, 2001).

0.2.4. La gestion inadéquate des routes

En outre, dans un contexte de fonds limités, une gestion inadéquate exerce une influence néfaste dans le processus d'établissement des priorités de financement des projets de développement et d'entretien préventif. Toutefois, très rares sont les administrations routières de l'ASS associant des indicateurs fiables et pertinents aux trois piliers du développement durable (économie, social, et environnement) pour évaluer les projets routiers (SSATP, 2014). Pourtant, les experts présents lors du forum annuel du *programme de politiques de transport en Afrique* qui s'est déroulé le 12 décembre 2013 à Dakar (Sénégal) étaient unanimes quant à l'inclusion des objectifs du développement durable dans le transport routier.

D'après des travaux de recherche réalisés par la Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes et l'agence allemande de coopération technique, la gestion inadéquate des réseaux routiers génère des pertes annuelles représentant entre 1 et 3% du PIB dans les pays d'Amérique latine et des Caraïbes (Schliesser et Bull, 1992).

0.3. Objectifs

Eu égard au déficit de financement des projets de développement et d'entretien des routes, au manque de fonds pour combler ce déficit et à la négligence chronique de l'entretien préventif dans les pays de l'ASS, il devient crucial pour les administrations routières de gérer de façon efficace les ressources disponibles afin d'assurer un financement équitable des deux types de projets routiers (construction et entretien), tout en intégrant le concept de gestion durable des routes dans leur processus de prise de décision tant au niveau réseau qu'au niveau projet. Le développement du réseau routier consiste à l'aménagement et à la construction des routes. L'aménagement se réfère à l'élargissement (partiel, ajout de voie), à la rectification (améliorations géométriques, aménagement de carrefour) et aux travaux hors chaussée (ajout d'accotement, amélioration du drainage, etc.), tandis que la construction se réfère à la réalisation de nouvelles routes et au reclassement des routes non revêtues (modification de la classe de surface) (Odoki et Kerali, 2000c)

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse est de fournir aux administrations routières et aux bailleurs de fonds, une approche qui permette de mettre sur un même plan la préservation (entretien préventif) des routes revêtues existantes et le développement du réseau routier (reclassement des routes non revêtues), en tenant compte des indicateurs rattachés à la performance des chaussées et au développement durable, communs aux deux types de projets routiers et de l'admissibilité au programme de financement des bailleurs de fonds.

Cette approche doit plus particulièrement permettre de classer conjointement les projets d'entretien routier et de reclassement des routes non revêtues en s'appuyant sur des indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux agrégés afin de sélectionner les projets routiers prioritaires au niveau réseau. Par la suite, ces projets prioritaires feront l'objet d'investigations et d'analyses plus approfondies au niveau projet pour déterminer les meilleures options de bitumage et d'entretien préventif.

Pour atteindre l'objectif principal précité, les sous-objectifs suivants ont été définis :

- 1) La suggestion d'un cadre théorique et conceptuel, dans lequel sont définies la dimension technique et les trois dimensions du développement durable relatif aux deux types de projets routiers (reclassement et entretien). Ce cadre a permis la sélection des indicateurs et le choix des méthodes de pondération et d'agrégation de ces derniers.
- 2) L'énumération de tous les indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux communs aux deux types de projets. Ces indicateurs doivent être pertinents, mesurables et applicables au contexte de l'ASS.
- 3) L'établissement d'un indice composite par l'agrégation des indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux. Cet indice composite doit permettre de classer conjointement les projets de reclassement et d'entretien d'un sous-réseau routier d'un pays de l'ASS par ordre de priorité de financement.
- 4) L'identification et la sélection des projets de reclassement et d'entretien des routes prioritaires selon l'exigence du bailleur de fonds. En effet, le bailleur de fonds requiert 330 km de routes prioritaires sur les 1541 km de routes du sous-réseau routier de la zone d'étude pour son programme de financement. Ces projets routiers prioritaires regroupent les projets de construction (reclassement) et les projets de préservation (entretien routier).
- 5) La détermination des meilleures options de bitumage des projets de reclassement prioritaires sur le cycle de vie, en fonction de la réduction des émissions polluantes qu'elles engendrent, et des critères économiques et sociaux.
- 6) La détermination des meilleures interventions d'entretien périodique des projets de préservation prioritaires sur le cycle de vie, en considérant l'économie sur les coûts totaux de transport et les coûts des émissions polluantes, la réduction de la consommation d'énergie par les véhicules motorisés pendant la phase d'exploitation et les contraintes budgétaires.

0.4. Aperçu de la méthodologie générale

En vue d'atteindre l'objectif principal et les objectifs spécifiques mentionnés ci-dessus, la présente recherche s'appuie sur la consultation des experts (communication personnelle et méthode Delphi) issus des administrations routières des pays de l'ASS, des bailleurs de fonds et du milieu universitaire ainsi que sur un examen de l'état de l'art au sujet des principaux indicateurs de gestion durable des routes et des différentes méthodes de priorisation et d'optimisation des projets routiers.

Le développement de l'indice de priorité de financement des routes (IPFR) est basé sur le processus de construction des indices composites du manuel *Handbook on constructing composite indicators* de l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OECD, 2008), notamment pour le développement du cadre théorique et conceptuel, la sélection, la pondération et l'agrégation des indicateurs techniques, économiques, environnementaux et sociaux. L'IPFR, qui est un outil de gestion des routes, permet ainsi de classer conjointement et par ordre de priorité les projets de reclassement et de prévention. Un IPFR de 100 correspond à un projet de niveau de priorité « très élevé », alors qu'un IPFR de 5 correspond à un niveau de priorité « très faible ».

Ces projets prioritaires choisis en fonction de l'exigence du bailleur de fonds des projets routiers de référence, sont par la suite analysés de façon plus approfondie en utilisant des données détaillées et exhaustives provenant principalement des investigations et de la collecte des données sur ces tronçons sélectionnés. Une fois les tronçons candidats au bitumage (projets de reclassement prioritaires) dimensionnés par la méthode empirique-mécaniste, l'intégration des aspects environnementaux et sociaux dans l'analyse économique conventionnelle par l'analyse multicritère permet de sélectionner la meilleure option de bitumage pour chacun de ces tronçons.

L'application de l'analyse économique couplée avec l'analyse environnementale et l'optimisation sous contraintes budgétaires sur le cycle de vie permet de choisir les meilleures interventions préventives selon l'état fonctionnel et structurel de ces tronçons. L'analyse

économique et la monétisation des impacts environnementaux, en les corrélant au PIB et au cycle de vie, permettent de déterminer les coûts totaux de transport minimaux constitués des coûts aux administrations, des coûts aux usagers et des coûts des émissions polluantes pendant la phase d'exploitation. Les coûts totaux de transports constituent alors un critère de sélection de la meilleure intervention préventive. Les deux critères supplémentaires de sélection des meilleures interventions préventives sont la consommation d'énergie des véhicules pendant la phase d'exploitation et la disponibilité des fonds. Le sous-modèle *effets sociaux et environnementaux* quantifie les émissions polluantes ainsi que le bilan énergétique qui, dans cette présente recherche, représente la consommation des ressources des véhicules (carburant, lubrifiants, pneus, etc.) pendant la phase d'exploitation et le cycle de vie de la chaussée, en vue de leur comparaison avec les options de base (option d'entretien minimum).

0.5. Originalité

L'originalité de ce travail de recherche réside dans le fait qu'il n'existe aucun indice composite adapté à la gestion durable des projets routiers en ASS permettant de prioriser conjointement les projets de construction et d'entretien des routes en se basant sur des indicateurs communs associés au développement durable et sur une méthode d'analyse statistique multivariée telle que l'analyse en composantes principales. De plus, l'innovation de cette approche est fondée sur sa méthodologie, qui permet de prendre en compte les aspects sociaux et environnementaux de même que les facteurs techniques et économiques tant au niveau réseau qu'au niveau projet dans le processus de gestion des chaussées. Ces aspects sociaux et environnementaux sont représentés par des indicateurs quantitatifs et qualitatifs. Ces derniers nécessitent une participation effective et inclusive de toutes les parties prenantes des projets, y compris la population de la zone d'influence des projets routiers (population locale et usagers) et des intervenants multidisciplinaires tels que les ingénieurs routiers, les environnementalistes, les sociologues et des économistes. Cette participation de tous les acteurs concernés permet de prendre en considération les préoccupations sociales et environnementales qui sont d'autant plus importantes dans les régions rurales de l'ASS.

0.6. Plan de la thèse

La structure du présent document est composée de cinq parties, qui constituent les différents chapitres de la thèse.

Le chapitre 1 propose une revue de la littérature sur la gestion des chaussées, le concept de gestion durable des chaussées et la méthode d'analyse de cycle de vie, sur laquelle est basée l'évaluation des impacts environnementaux des chaussées. Les méthodes d'analyse économique et les méthodes d'aide à la décision pour la priorisation des infrastructures routières sont également abordées dans ce chapitre.

Le chapitre 2, consacré à l'article 1, s'intitule *Road funding priority index for sub-saharan Africa using principal components analysis*, qui a été publié à la revue *Case Studies on Transport Policy (ELSEVIER)*. Ce chapitre présente un nouvel indice de priorité de financement des routes (IPFR), qui est un indice composite issu de la pondération et de l'agrégation des indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux, se basant respectivement sur l'analyse en composantes principales et la méthode d'agrégation linéaire. En classant par ordre croissant les valeurs de IPFR, les projets routiers prioritaires sont choisis équitablement en prenant en considération l'exigence du bailleur de fonds (voir section 0.3.).

Le chapitre 3 comporte l'article 2 intitulé *Méthode rationnelle intégrée de dimensionnement et d'évaluation économique des projets de bitumage de routes non revêtues de « haute priorité » incluant les aspects sociaux et environnementaux dans les pays en développement*, soumis à la revue *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*. Ce chapitre présente une méthode intégrée constituée de différentes étapes rationnelles pour sélectionner les meilleures options de bitumage des projets de construction prioritaires en considérant simultanément la méthode de dimensionnement empirique-mécaniste, l'analyse économique et l'analyse hiérarchique des procédés (AHP).

Le chapitre 4 est dédié à l'article 3 intitulé *Évaluation économique sur le cycle de vie, analyse environnementale et programmation sous contraintes budgétaires des interventions d'entretien pour les chaussées flexibles structurelles dans les pays en développement*. Cet article a été publié dans la revue *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*. Il évalue d'abord l'état fonctionnel et structurel des tronçons routiers candidats aux interventions préventives (projets de préservation prioritaires) et sélectionne par la suite les types d'entretien périodique adéquats en fonction de l'économie sur le cycle de vie des coûts totaux de transport, de la réduction des émissions polluantes et de la consommation des ressources des véhicules, pendant la phase d'exploitation. Les meilleures interventions préventives en cas de restrictions budgétaires et le programme quinquennal d'entretien des routes prioritaires sont également relatés dans ce chapitre.

La conclusion générale de la thèse récapitule les résultats pertinents obtenus et les principales contributions de cette recherche et souligne les limites et les perspectives de la recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente les avancées scientifiques récentes et les processus de gestion conventionnelle et durable des chaussées. L'analyse du cycle de vie (ACV), l'analyse économique (AE) ainsi que les méthodes d'optimisation applicables aux projets routiers sont également décrites dans ce chapitre.

1.1 Gestion des chaussées

1.1.1 Définition de la gestion des chaussées

La gestion des chaussées (GC) est un processus d'identification des stratégies optimales à différents niveaux de décision (stratégique, réseau et projet) et d'implémentation de ces stratégies. Elle regroupe toutes les activités qui sont mises en place pour le maintien de la chaussée dans un état fonctionnel. Ces activités comprennent l'acquisition initiale des informations, la planification, la programmation et la réalisation de nouvelles constructions, d'entretien et de réhabilitation ainsi que tous les paramètres de conception, de construction et de suivi périodique des chaussées pendant la phase d'exploitation (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a).

1.1.2 Les niveaux de décision en gestion des chaussées

Une gestion adéquate des chaussées permet d'aider les décideurs dans leur processus de prise de décision à trois niveaux (AASHTO, 2012a; Wolters et Zimmerman, 2008; Wolters et al., 2011) :

- **Niveau stratégique** : À ce niveau, des stratégies à long terme sont adoptées par les décideurs de telle sorte qu'elles reflètent les priorités des administrations et des parties prenantes. Elles consistent en la mise en place des seuils de performance, d'affectation de fonds et des stratégies de préservation. Les structures des décisions stratégiques sont en

général moins robustes que celles des autres niveaux. En effet, sur le plan stratégique, les décisions résultent d'hypothèses, qui dépendent de la capacité de prévision de plusieurs scénarios, y compris des scénarios politiques.

- **Niveau réseau (tactique) :** Au niveau réseau, les besoins globaux du réseau routier dans son ensemble sont pris en compte et des programmes pluriannuels d'amélioration des chaussées sont développés. De plus, pour toutes les routes constituant le réseau routier, plusieurs stratégies peuvent être analysées : par exemple, une stratégie dans laquelle les routes en mauvais état sont prioritaires (*worst-first*) et une stratégie alternative dans laquelle une combinaison de projets d'entretien préventif, de réhabilitation et de reconstruction est incorporée. Les résultats issus des analyses effectuées au niveau réseau sont généralement présentés aux décideurs au niveau stratégique afin de les assister dans l'établissement des objectifs de performances réalistes et l'évaluation des options d'investissement. La collecte des données de tout le réseau routier est très dispendieuse. Cela oblige les administrations routières à trouver un équilibre entre le niveau de détail des données et les ressources disponibles pour collecter ces données. Les données utilisées au niveau réseau ont généralement un niveau de détail modéré, mais restent plus raffinées que les données du niveau stratégique.
- **Niveau projet (opérationnel) :** À ce niveau, les décisions prises concernent des tronçons de route particuliers du réseau routier. Ce niveau est généralement une étape subséquente du niveau réseau. Par exemple, au niveau réseau, les tronçons candidats à l'entretien périodique sont identifiés, et au niveau projet une évaluation plus exhaustive et détaillée est réalisée afin de déterminer le type d'entretien périodique approprié à chaque tronçon en se basant sur les données de terrain. Les activités au niveau projet sont généralement planifiées sur une durée très courte, par exemple les 2 ou 3 premières années d'un programme quinquennal de préservation ou de réhabilitation de 5 ans. De plus, au niveau projet, les données sont plus exhaustives et détaillées que celles des autres niveaux de décisions (stratégique et réseau). Ces données sont issues d'investigations approfondies effectuées sur les tronçons sélectionnés et la zone d'influence des projets routiers. Puisque

le niveau réseau concerne un nombre réduit de tronçons du réseau routier, les ressources pour collecter les données détaillées sur le terrain sont accessibles par les administrations routières.

Les différences entre les trois niveaux de décision résident principalement dans les statuts professionnels des décideurs ou gestionnaires, les types de décision, la plage considérée d'actifs, le niveau de détail des données et l'ampleur des décisions (AASHTO, 2012a). Par exemple, sur le plan stratégique, les décideurs sont des élus, des représentants des conseils municipaux, des délégués des commissions des transports et des directeurs des administrations routières alors qu'à l'échelle du réseau, les décideurs sont des ingénieurs spécialisés (ingénieur routier, ingénieur de construction, ingénieur des matériaux, ingénieur d'exploitation, etc.).

1.1.3 La structure et les composantes du système de gestion des chaussées

L'analyse des stratégies possibles visant à déterminer les stratégies optimales se fait à l'aide d'un système de gestion des chaussées (SGC) ou *Pavement Management System (PMS)* en anglais. Un SGC est l'ensemble des méthodes et outils adoptés pour assister les administrations routières dans la gestion optimale de leur patrimoine routier (O'Flaherty et Hughes, 2016). Ainsi, le SGC fournit aux décideurs des stratégies optimales issues de procédures rationnelles clairement établies (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). La Figure 1.1 présente de manière exhaustive les différentes composantes d'un SGC comprenant tous les niveaux de décisions. Toutefois, ces composantes peuvent être regroupées en huit composantes principales qui sont (Kumar, 2014c) : l'identification du réseau routier, les données d'inventaire, la collecte des données du trafic, l'inspection sur le terrain, l'analyse des données, la planification et la budgétisation, le système de rétroaction sur la performance des interventions et la prise de décision. Puisque qu'une importante partie des composantes principales du SGC a déjà été abordée dans les chapitres 3 et 4 (articles 2 et 3), cette section est limitée à de brèves descriptions de celles-ci énumérées comme suit (Kumar, 2014c) :

- **Identification du réseau routier :** L'identification consiste d'abord à désigner les routes en fonction de leurs classes fonctionnelles (route nationale, route inter-État, route régionale, etc.), et de leur type (route revêtue, non revêtue). Par la suite, ces routes peuvent être découpées en longueurs différentes (section ou tronçon homogène) en fonction du trafic, des conditions climatiques et de la similarité des paramètres techniques en termes d'indice d'état de la chaussée (IEC ou pavement condition index) (Kumar, 2014c).
- **Données d'inventaire :** Les données d'inventaire routier comprennent les informations sur la structure de la chaussée et sur l'historique de construction, d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction. Les données de la structure de la chaussée sont composées des informations sur les épaisseurs et la composition des couches, tandis que les données historiques comprennent les informations telles que les dates, les détails ainsi que les coûts de travaux de construction, de prévention, de réhabilitation et de reconstruction des routes. Les données de l'inventaire comportent aussi les données d'identification des chaussées (longueur, largeur, nombre de voies, emprise, etc.) ainsi que l'historique du trafic (composition du trafic, nombre et charges des véhicules). Les données de l'inventaire sont le plus souvent issues des bases de données des administrations routières et des directions des routes (Kumar, 2014c; O'Flaherty et Hughes, 2016).
- **Collecte des données du trafic :** Des campagnes de comptage et de pesage du trafic sont réalisées sur chaque section de route afin de déterminer le débit moyen journalier annuel (DJMA) et le nombre d'équivalents de charge axiale simple (ÉCAS), qui constituent les intrants du dimensionnement et de la priorisation des sections candidates basée sur le trafic.
- **Inspection sur le terrain :** L'inspection est effectuée sur les tronçons ou sections homogènes du réseau routier pour collecter des données des états des chaussées et du drainage, des données de la nappe phréatique le long des sections, les données de la capacité structurelle, les données de la qualité du roulement et les données sur l'adhérence et la sécurité.

- **Analyse des données :** L'analyse des données consiste principalement à déterminer les besoins des projets routiers, c'est-à-dire les besoins budgétaires de l'entretien, la réhabilitation et des impacts des travaux d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction (ERR) passés et proposés. Les besoins en intervention préventive (travaux d'entretien routier) sont fondés sur les principes d'ingénierie tandis que les besoins budgétaires sont basés sur les principes de l'analyse économique.
- **Planification et budgétisation :** La planification, qui consiste à établir au préalable les activités (ou interventions) d'entretien et à déterminer les coûts et le calendrier d'exécution de ces activités, s'avère indispensable pour l'allocation du budget, de même que pour la budgétisation à long terme.
- **Système de rétroaction sur la performance des interventions :** La rétroaction (feedback) dans un SGC instaure un mécanisme de détermination de l'efficacité du programme d'entretien (Hang, 2009). Le système de rétroaction permet entre autres de réviser les coûts unitaires, les estimations, les modèles de performance des chaussées, les décisions concernant les interventions préventives, etc.
- **Prise de décision :** La prise de décision est la composante la plus importante du SGC. Cependant, les décisions ne peuvent reposer exclusivement sur les méthodes, les logiciels ou les outils du SGC. Les logiciels de gestion des chaussées ne font qu'assister les gestionnaires dans la sélection de l'intervention appropriée à partir d'une liste des meilleures interventions applicables, qui est issue de l'analyse des données à différents niveaux de décisions. De ce fait, les résultats constitués d'indices globaux d'états et de leurs coûts d'interventions peuvent être consignés dans un rapport en vue d'une présentation de ces résultats obtenus au plus haut niveau de décision tel que le niveau stratégique.

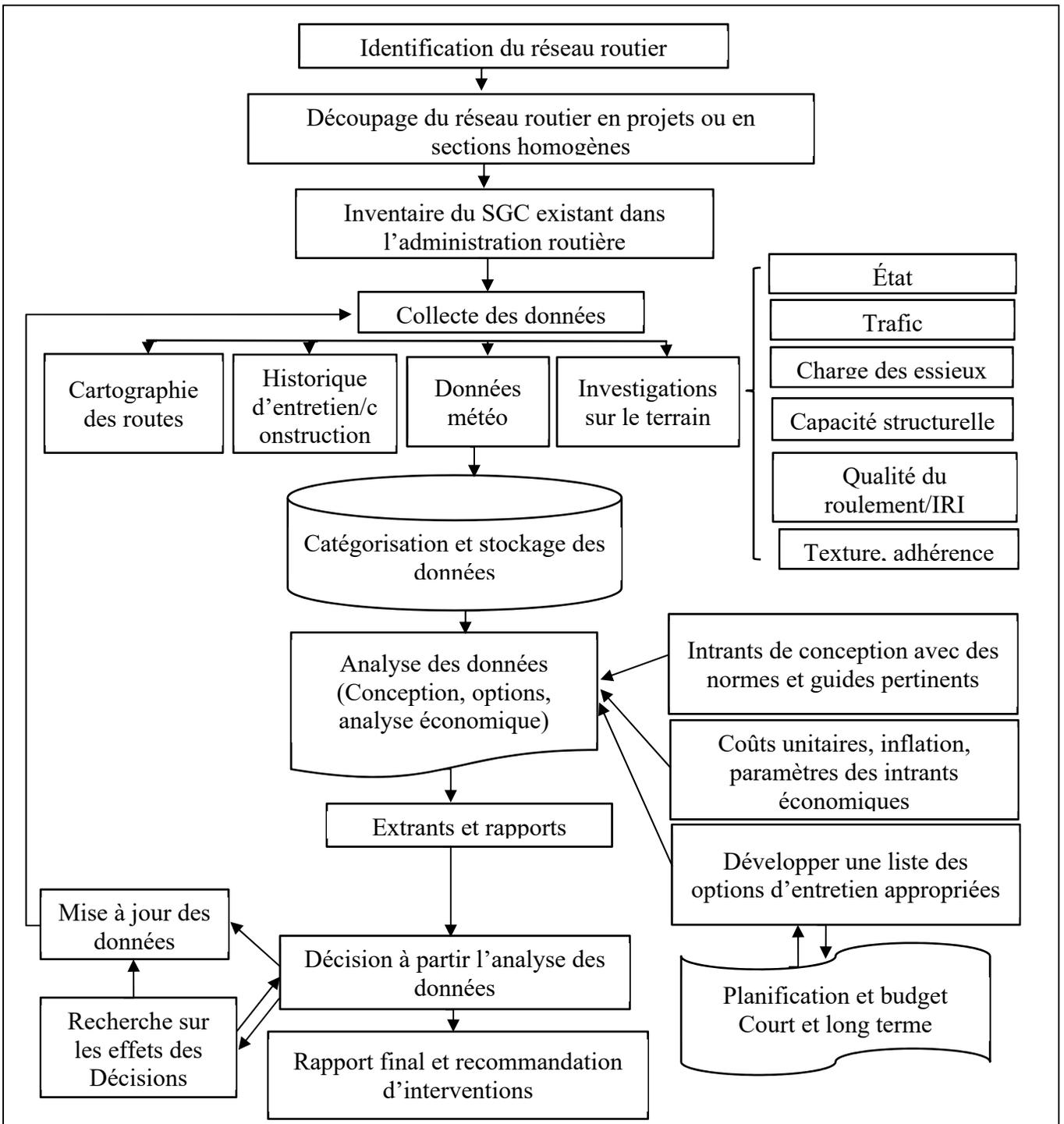


Figure 1.1 Système de gestion des chaussées

Adaptée de Kumar (2014c)

1.2 La gestion durable des chaussées

La gestion durable des routes est l'application des principes du développement durable (DD) aux pratiques conventionnelles de gestion des chaussées. Les principes du DD sont fondés sur trois principaux piliers, qui sont l'économie, l'environnement et le social. Par conséquent, une gestion durable adéquate consiste à intégrer dans l'analyse les impacts économiques, environnementaux et sociaux, au même niveau que les aspects techniques afin de comparer les compromis des investissements routiers (construction, entretien et réhabilitation) (Gopalakrishnan, Harvey et Steyn, 2014). De plus, une bonne compréhension de la gestion conventionnelle des chaussées s'avère indispensable pour intégrer au processus de prise de décision en gestion des chaussées des administrations routières, le concept de DD en tant que pratique commerciale fondamentale prenant en compte la sélection des projets, la sélection du type d'intervention, la gestion de cycle de vie et le compromis entre les trois piliers du DD.

L'intégration du concept du DD dans le processus de prise de décision en gestion des chaussées des administrations routières peut se faire au niveau projet, au niveau réseau et au niveau stratégique (Gopalakrishnan, Harvey et Steyn, 2014).

- **Au niveau projet :** Le concept de DD peut être intégré au niveau projet dans la prise de décisions concernant le dimensionnement des chaussées, les techniques et la planification de construction, les programmes de gestion de l'entretien et de la réhabilitation ainsi que ceux de gestion de la congestion, l'acquisition des matériaux, etc. (Gopalakrishnan, Harvey et Steyn, 2014). Au niveau projet, les matériaux des différentes couches des chaussées peuvent être remplacés par des matériaux recyclés sur place afin de minimiser l'utilisation de matériaux conventionnels, les coûts de construction et l'impact du transport des matériaux sur les usagers. Toutefois, l'option de construction avec les matériaux recyclés doit être analysée simultanément avec des options de construction avec des matériaux conventionnels de construction sur le cycle de vie pour déterminer l'option comportant les plus faibles coûts totaux sur le cycle de vie. Au niveau projet, les différentes techniques d'ERR peuvent être analysées afin de mesurer leur impact sur l'état des chaussées du point

de vue environnemental. Par exemple, les interventions périodiques améliorant l'UNI des chaussées peuvent faire l'objet d'analyse parce qu'elles engendrent des réductions des coûts des usagers, de la consommation d'énergie et des émissions polluantes pendant la phase d'exploitation de la chaussée, les deux dernières réductions se référant aux aspects environnementaux (Gopalakrishnan, Harvey et Steyn, 2014). De plus, au niveau projet, la durabilité peut être aussi prise en compte dans le choix de la meilleure surface de revêtement par une analyse de cycle de vie sur les différents matériaux de revêtement (béton ou enrobé) en raison de l'étroite corrélation de la consommation du carburant et des émissions polluantes avec les propriétés de la chaussée (texture, rugosité) (Hallin, 2011).

- **Au niveau réseau :** À ce niveau, les trois piliers du DD peuvent être envisagés pour l'établissement des stratégies d'entretien et la sélection des projets. Cela peut inclure la modification des objectifs d'une analyse au niveau réseau de sorte qu'une approche multicritère soit requise pour l'analyse des besoins sans aucune contrainte et l'optimisation. (Gopalakrishnan, Harvey et Steyn, 2014). En général, le problème multi-objectif issu du processus de gestion des chaussées au niveau réseau est transformé à un problème mono-objectif en considérant certains de ces objectifs comme des contraintes. Cela permet ainsi aux administrations routières de minimiser ou maximiser un objectif particulier (par exemple la minimisation des coûts divisés par la performance de l'état de la chaussée) sujet aux contraintes, qui proviennent des objectifs initiaux (par exemple les contraintes budgétaires ou les contraintes définissant un état minimum admissible de la chaussée) (Wu et Flintsch, 2009). L'inconvénient majeur de l'approche mono-objectif réside dans le fait que les objectifs sont reformulés comme étant des contraintes, ce qui génère des résultats non compensateurs après analyse. Par conséquent, il n'y a aucune certitude que la valeur sélectionnée à l'aide de cette approche est non-dominée. Une solution non-dominée est une solution dans laquelle il est impossible d'améliorer le résultat d'une variable sans empirer les valeurs des variables restantes. De plus, la présence d'autres valeurs plus optimales peut être identifiée en fonction de l'ampleur de la relaxation des contraintes (Goodwin et Wright, 1998).

- **Niveau stratégique :** La gestion des chaussées au niveau stratégique requiert la définition des objectifs et l'établissement de la planification stratégique. Ce faisant, l'établissement des indicateurs de performance qui associent les objectifs préétablis des administrations routières (économique, environnemental et social) aux degrés d'atteinte de ces objectifs constitue le noyau d'une gestion durable adéquate des chaussées (AASHTO, 1998; Gopalakrishnan, Harvey et Steyn, 2014).

1.3 Analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation et de comparaison des dommages environnementaux des produits ou services afin de choisir le service ou le produit dont les dommages environnementaux causés à la société sont les plus faibles. Toutefois, l'évaluation et la comparaison doivent prendre en considération le cycle de vie. Les phases de cycle de vie d'un produit sont l'extraction des matériaux, la fabrication, le transport, la distribution, l'utilisation et la fin de vie (Bardeesi et Attallah, 2015). En s'appuyant sur ces phases, Satero et Horvath (2009) ont suggéré des phases pour l'analyse du cycle de vie des chaussées. Telles que présentées à la Figure 2, ces phases de cycle de vie des chaussées sont les matériaux, la construction, l'exploitation, l'entretien et la fin de vie ou le recyclage.

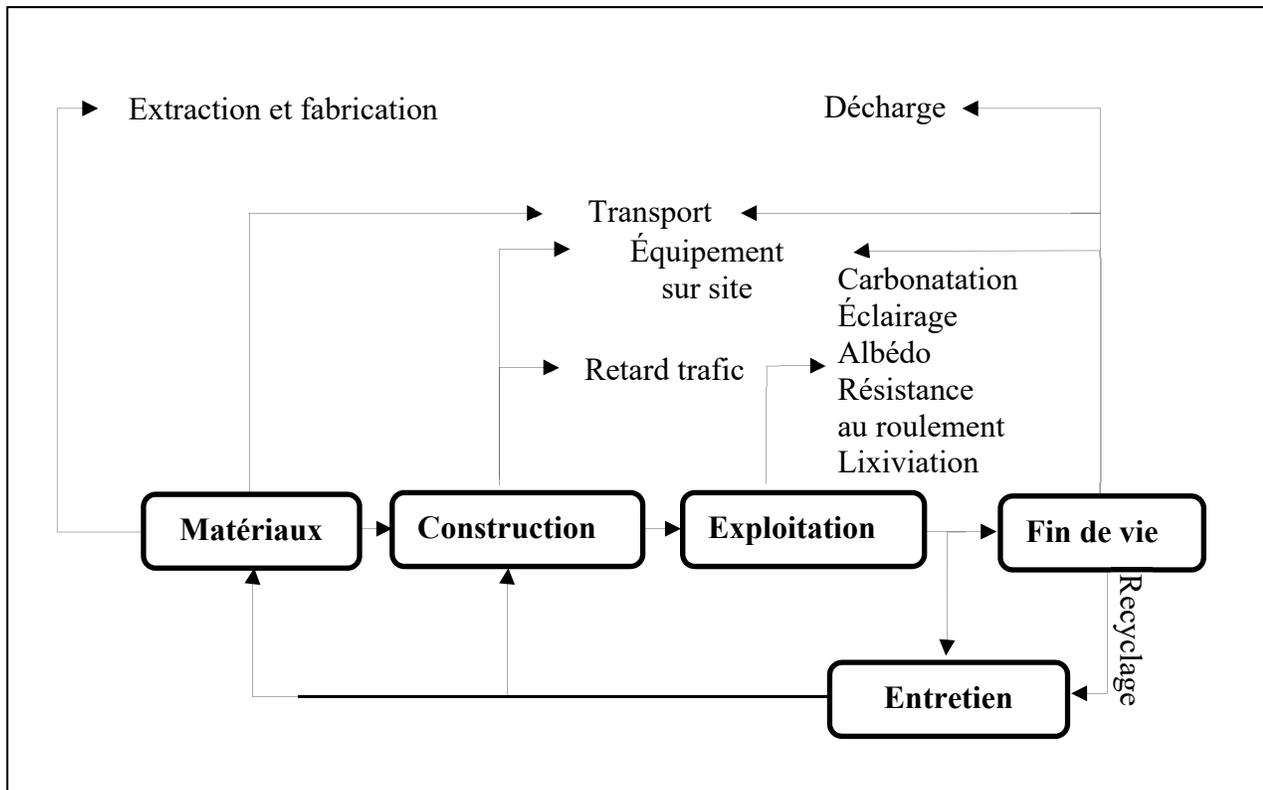


Figure 1.2 Phases et composantes du cycle de vie des chaussées
Adaptée de Santero, Masanet et Horvath (2011)

Les normes les plus utilisées et recommandées pour l'ACV des produits et services sont les normes ISO (International Standard Organisation). Les étapes de l'ACV recommandées par les normes ISO sont les suivantes : la définition des objectifs et du champ de l'étude (ISO 14 041), l'inventaire et l'analyse de l'inventaire (ISO 14 041), l'évaluation des impacts (ISO 14 042) et l'interprétation des résultats (ISO 14 043) (ISO, 2006). En se basant sur ces étapes des normes ISO, les principaux facteurs dont il faut tenir compte dans une ACV des chaussées sont les suivants (Santero, Masanet et Horvath, 2011) : les émissions dues à l'extraction et à la fabrication, les émissions dues aux activités de construction, la consommation des ressources et les émissions dues aux retards engendrés par les travaux sur le site.

- **Émissions dues à l'extraction et à la fabrication :** L'estimation des impacts des matériaux lors de l'extraction et de la fabrication nécessite le choix des installations de fabrication (usines) et la formulation des mélanges. La formulation comprend le calcul des proportions de mélange des matériaux et des distances de transport de ces mélanges des sites d'extractions vers les usines de fabrication. Chaque usine et chaque matériau, sélectionnés pour la fabrication, possèdent leur coefficient d'émission ainsi que leur probabilité de distribution. Ainsi, les émissions relatives à l'extraction et à la fabrication des matériaux sont calculées en effectuant le produit des quantités des matériaux et des coefficients respectifs des émissions.
- **Les émissions dues aux activités de construction :** L'évaluation des émissions causées par les activités de construction est basée sur les distances entre les usines de fabrication et les sites de réalisation des projets comportant la préparation de l'emprise et les installations du chantier. Ces émissions sont calculées à l'aide d'une combinaison des distances de transport et du coefficient d'émission du projet, qui dépend du profil de la construction. Le profil de construction se réfère à un coefficient d'émission unique du projet ou à une série de coefficients relatifs à chaque activité de construction comprenant la préparation et l'installation du chantier.
- **Consommation des ressources :** La consommation des ressources devrait être analysée en considérant les facteurs tant environnementaux qu'économiques afin de justifier la réutilisation ou non des matériaux recyclés. Pour ce faire, les quantités en matériaux recyclés à prendre en considération dans la phase de conception (dimensionnement) peuvent être calculées approximativement pour un projet donné ; ensuite, les quantités de ces matériaux sont combinées avec des paramètres tels que les épaisseurs, les largeurs et les longueurs des couches des chaussées pour établir des tables d'utilisation de ressources. Ces tables peuvent être considérées comme des outils de comparaison des matériaux issus de différentes méthodes de dimensionnement et de différentes sources.

- **Consommation des ressources et les émissions dues aux retards engendrés par les travaux sur le site :** Les ralentissements de la circulation causés par les travaux de construction (construction, entretien, réhabilitation et reconstruction) peuvent constituer une importante source d'émissions (Huang, Bird et Bell, 2009). En effet, les ralentissements des véhicules et la capacité restreinte des sites des travaux routiers entraînent une amplification des décélérations des véhicules, provoquant ainsi des congestions de la circulation, qui peuvent s'étendre hors la zone d'influence du projet. Ces congestions génèrent une augmentation des coûts des usagers. Ces coûts aux usagers peuvent être calculés avec les données du trafic et la capacité du site pendant la phase normale des travaux. Les calculs sont très souvent effectués en utilisant des modèles d'émissions, qui permettent d'estimer les différentes émissions polluantes sous réserve d'un paramétrage adéquat de ces modèles.

1.4 Analyse économique des projets routiers

L'analyse économique consiste à déterminer les coûts et monétiser les avantages des projets routiers. Les coûts englobent les coûts d'administration (coûts initiaux de construction, coûts de réhabilitation et de reconstruction, coûts d'entretien courant et périodique, coût résiduel), les coûts des usagers (temps de trajet, coût d'exploitation des véhicules, coûts des accidents, coûts de l'inconfort et de retards causés par les travaux d'entretien) ainsi que les coûts des externalités environnementales (pollution atmosphérique et sonore) (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). Les avantages des projets routiers proviennent principalement de la réduction des coûts des usagers. Ces coûts des usagers sont influencés principalement par la performance des chaussées (évolution des dégradations des chaussées sous l'effet du trafic et de l'environnement en fonction du temps) et les stratégies d'interventions en ERR (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). Les méthodes d'évaluation économique des projets routiers les plus usuelles et recommandées sont l'analyse des coûts de cycle de vie (ACCV), l'analyse coût-avantage (ACA) et l'analyse coût-efficacité (ACE).

1.4.1 Analyse de coûts de cycle de vie (ACCV)

L'ACCV a pour objectif de comparer tous les coûts associés à une multitude d'options ou stratégies de travaux routiers (Gopalakrishnan, Harvey et Steyn, 2014). Elle consiste d'abord à établir une série d'options d'interventions routières (ERR), la période d'analyse, le calendrier des travaux et les critères d'intervention, suivis de la détermination des coûts d'administration et des usagers incluant les émissions polluantes et la consommation du carburant entre les différentes options, et enfin la mise en place des flux de dépenses comprenant les coûts actualisés sur la période d'analyse de chaque option (Walls et Smith, 1998). L'Équation 1.1 est l'équation conventionnelle pour les calculs des coûts actualisés sur le cycle de vie excluant des usagers (AASHTO, 1998; Kumar, 2014c).

$$VAC = VI + \sum_{j=1}^N E_j \times \left[\frac{1}{(1+i)^{n_j}} \right] + \sum_{j=1}^N R_j \times \left[\frac{1}{(1+i)^{n_j}} \right] \pm VR \times \left[\frac{1}{(1+i)^{n_j}} \right] \quad (1.1)$$

Où

VAC = Valeur actualisée des coûts de l'actif à l'année de référence

VI = Valeur actualisée de l'investissement principal composée de tous les coûts engagés pendant le développement et la préparation du projet incluant le coût de construction initial

E_j = Coûts d'entretien et de réhabilitation considérés comme des coûts récurrents

R_j = Coûts de réparations et de rapiéçage considérés comme des coûts récurrents

n = Nombre d'années depuis l'année de début du projet de construction

i = Taux d'intérêt ou d'actualisation

j = Nombre d'années depuis qu'une activité d'entretien a été planifiée

N = Durée de vie totale d'une chaussée considérée dans l'ACCV

VR = Valeur résiduelle du projet routier proposé

1.4.2 Analyse coût –avantage (ACA)

L'analyse coût-avantage est une analyse quantitative qui permet de vérifier si la valeur des avantages actualisés d'un projet est supérieure à la valeur de ses coûts actualisés. Dans cette analyse, les principaux indicateurs économiques tels que la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rendement interne (TRI) et le rapport avantage/coût (RBC) sont pris en considération (World Bank Group, 2010).

1.4.2.1 Valeur actuelle nette (VAN)

La valeur actuelle nette (VAN) compare les coûts et les avantages actualisés des projets routiers à l'année de référence. Le taux d'actualisation recommandé par Banque mondiale pour les projets routiers dans les pays en développement est généralement de 12 %. Pour vérifier la rentabilité des options ou des projets routiers, la VAN est calculée en comparant les coûts totaux actualisés d'une série préétablie d'options d'ERR (option avec projet) entre elles, et avec une option de base (option sans projet). Ces coûts totaux actualisés englobent les coûts d'administration, les coûts des usagers et les coûts des externalités environnementales actualisés. L'Équation 1.2 permet de calculer la VAN (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b).

$$VAN_{x1} = VAC_{x0,n} - VAC_{x1,n} \quad (1.2)$$

Où

VAN_{x1} est la valeur actuelle nette de l'option x_1

$VAC_{x0, n}$ est la valeur actuelle des coûts totaux de l'option x_0 (x_0 peut être l'option de base ou toute autre option mutuellement exclusives x_1, x_2, \dots, x_k) pour n années de la période d'analyse

$VAC_{x1, n}$ est la valeur actuelle des coûts totaux de l'option x_1 pour n années de la période d'analyse

Bien que la VAN comporte des défauts tels que son inapplicabilité à une option dont les avantages ne peuvent être calculés et l'expression du résultat sous forme de montant forfaitaire, elle demeure jusqu'à présent le seul critère de l'ACA à fournir toujours des résultats cohérents et à exprimer ses résultats sous forme de profit total d'un projet.

1.4.2.2 Taux de rendement interne (TRI)

Le taux de rendement interne (TRI) est le taux d'actualisation pour lequel les coûts et les avantages à l'année de référence de l'analyse économique sont égaux. Le TRI ne donne aucune indication sur les coûts ou les avantages ; il indique la rentabilité du projet. Le TRI est calculé à l'aide de l'Équation 1.3 (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). Le TRI n'est pas recommandé pour la comparaison des projets mutuellement exclusifs, car dans certains cas, les résultats peuvent être incohérents ou ne convergent pas.

$$VAC_{x1,n} = VAA_{x1,n} \quad (1.3)$$

Où

$VAC_{x1, n}$, est la valeur actuelle des coûts totaux de l'option x_1 pour n années de la période d'analyse

$VAA_{x1, n}$, est la valeur actuelle des avantages totaux de l'option x_1 pour n années de la période d'analyse

1.4.2.3 Rapport avantage-coût (RAC)

Le rapport coût-avantage (RAC) permet de comparer les avantages et les coûts actualisés de chaque projet et d'une option à une autre (Li, 2006). Ce critère permet de déterminer en premier lieu le rapport avantages-coûts d'une série d'options préétablies en les comparant avec l'option de base par l'Équation 1.4 (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). Par la suite, les options dont les RAC sont supérieurs à zéro peuvent être comparées par incrément.

$$RAC_{x_j, x_k, n} = \frac{(VAA_{x_j} - VAA_{x_k})}{(VAC_{x_j} - VAC_{x_k})} \quad (1.4)$$

Où

$RBC_{x_j, x_k, n}$ est le rapport B/C de l'option x_i comparée à l'option x_k pour n années de la période d'analyse

VAA_{x_j} , VAC_{x_j} sont respectivement les valeurs actuelles totales des avantages et des coûts de l'option x_j

VAA_{x_k} et VAC_{x_k} sont respectivement les valeurs actuelles totales des avantages et des coûts de l'option x_k

Cette méthode est populaire dans les administrations routières, notamment en raison de sa promulgation dans les législations de certains États (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). En revanche, elle est moins comprise par les décideurs.

1.4.3 Analyse coût-efficacité (ACE)

L'inconvénient majeur de l'ACA est la quantification des avantages non monétaires, l'analyse coût-efficacité (ACE) permettant ainsi de se combler de ce manque (World Bank Group, 2010). L'ACE considère les coûts actualisés des investissements routiers et évalue les avantages à l'aide d'un indicateur de l'efficacité de ces investissements (Torres-Mach et al., 2014). Cet indicateur est le rapport entre les coûts actualisés d'une option et son efficacité (RCE). Le but du RCE est de vérifier que l'infrastructure routière répond aux besoins pour lesquels il a été réalisé (Uddin, Hudson et Haas, 2013).

Le taux de dégradation des chaussées peut être représenté par des modèles. Ces modèles nommés courbes de performance présentent l'évolution de l'état de la chaussée et l'impact des travaux d'entretien en fonction du temps (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). L'efficacité de chaque option d'entretien est mesurée en calculant l'aire (ABPC) délimitée par la courbe de performance et un indicateur de performance minimum (IP_{\min}). Par la suite, le résultat est pondéré par le débit journalier moyen annuel (DJMA) et la longueur (L) pour trouver l'efficacité de l'option (voir Figure 1.3 et Équation 1.5) (Torres-Mach et al., 2014). Tels que présentés à la Figure 1.5, les avantages peuvent aussi être déterminés par la différence entre l'aire de l'option de base (option ne rien faire) et des autres options.

$$\text{Efficacité} = \text{ABPC} \times L \times \text{DJMA} \quad (1.5)$$

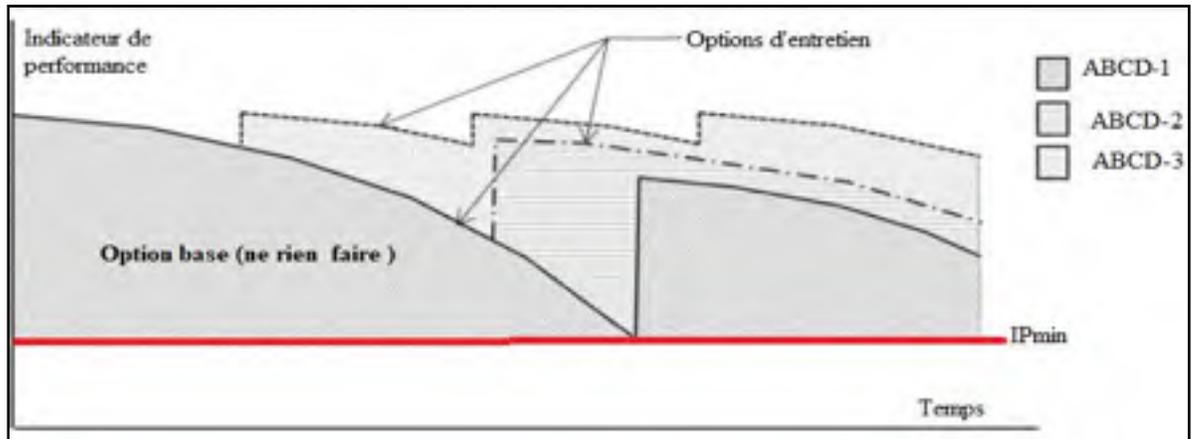


Figure 1.3: Aire délimitée par la courbe de performance et l'indicateur de performance minimum

Adaptée de Torres-Mach et al. (2014)

1.5 Méthode de priorisation des projets routiers

La priorisation est le processus par lequel différents scénarios, options ou plans sont comparés et hiérarchisés. Le processus de priorisation doit aussi inclure la participation des parties prenantes locales (Hine, 2014). Les principales méthodes de priorisation utilisées en gestion des chaussées sont la sélection basée sur le classement, l'optimisation mathématique, les méthodes heuristiques et d'autres méthodes non classifiées telles que l'optimisation de réseaux neurones, la logique floue, etc.

1.5.1 Sélection basée sur le classement

La sélection basée sur le classement consiste à énumérer et évaluer les différentes options d'investissements routiers en utilisant des indicateurs, qui sont le plus souvent basés sur les opinions d'experts, l'état de la chaussée et l'analyse économique (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a; Shah, Jain et Parida, 2012).

- **Classement basé sur les opinions :** Les projets routiers ou les options sont classés à partir des opinions recueillies auprès d'un panel d'experts. Les critères d'évaluation et de classement des options sont fournis par le panel d'experts qui s'appuient sur la pertinence de leur expérience pratique (Shah, Jain et Parida, 2012).
- **Classement basé sur l'état de la chaussée :** Le classement basé sur l'état permet de classer les sections des routes susceptibles de recevoir des interventions (entretien, réhabilitation, etc.) en se basant sur un ou plusieurs indicateurs d'état des chaussées. Ainsi, le classement peut être effectué à l'aide d'un indicateur unique tel que la rugosité (IRI) ou le nombre structural (SN). Les sections de route peuvent aussi être classées en fonction d'un indice ou indicateur composite, qui peut consister en une agrégation des indicateurs d'état de la chaussée et d'autres indicateurs tels que les dégradations de surface et le trafic (DJMA ou ÉCAS) (Torres-Mach et al., 2014). La revue de littérature du chapitre 2 du présent document traite de manière plus détaillée de la construction des indices composites.
- **Classement basé sur l'analyse économique :** Le classement basé sur l'analyse économique est plus rationnel et robuste comparativement aux techniques de classement mentionnées ci-dessus. En effet, cette technique permet de prendre en compte les coûts et les avantages dans la comparaison et le classement des options (Torres-Mach et al., 2014). Par conséquent, les options d'ERR peuvent être classées en se basant sur les indicateurs de l'analyse économique tels que le RAC et le RCE (Shah et al., 2013).

1.5.2 Optimisation mathématique

L'optimisation mathématique en gestion des chaussées est basée sur des méthodes de programmation mathématique dont le but est de déterminer l'option optimale qui satisfait la fonction-objectif sujette à certaines contraintes (Zimmerman et Eres Consultants, 1995b). La fonction-objectif peut être la minimisation des coûts totaux assumés par l'administration et les usagers sur l'ensemble du réseau routier sur une période donnée et pour un niveau de qualité

minimum désirée ou de façon duale, la maximisation de l'amélioration de la performance de l'ensemble du réseau routier pour un budget donné.

La fonction-objectif peut être également la maximisation des bénéfices résultant d'une intervention donnée versus ne rien faire sur une route donnée. Les modèles mathématiques de programmation linéaire, non linéaire, linéaire à nombre entier, dynamique, les méthodes heuristiques et les techniques d'optimisation non classifiées sont les plus communément utilisés en gestion des chaussées (AASHTO, 2012a; Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a; Zimmerman et ERES Consultants, 1995a).

- **Programmation linéaire et programmation non linéaire :** La programmation linéaire et non linéaire s'affaire à trouver la solution optimale à l'aide des variables continues. La principale différence entre ces programmations réside dans le fait que la première ne peut considérer que des fonctions linéaires corrélées avec le temps, alors que la deuxième peut prendre en compte des relations polynomiales (Zimmerman et ERES Consultants, 1995a).
- **Programmation linéaire à nombres entiers :** La programmation linéaire à nombres entiers permet la résolution des problèmes d'optimisation mathématique dans lesquels les variables sont des nombres entiers. Cette méthode est utilisée pour la résolution de systèmes d'équations linéaires dont les variables sont des nombres entiers non négatifs (Schrijver, 1998). Les variables à nombres entiers peuvent être réduites en deux variables de décision binaires : une variable de décision « ne rien faire » équivalente à 0, et une variable décision « faire quelque chose » qui se réfère à 1 (Torres-Mach et al., 2014). Cette méthode est utilisée dans le présent document, et l'algorithme général du modèle est exposé dans le chapitre 4.
- **Programmation dynamique :** La programmation dynamique est appliquée dans le cas d'un nombre de décisions séquentielles exerçant des influences les unes sur les autres. La procédure d'optimisation de cette programmation commence par la solution finale désirée et fonctionne de façon rétrograde pour la solution optimale des variables. Elle permet ainsi

de fractionner un problème complexe en des problèmes plus petits et plus simples (Zimmerman et ERES Consultants, 1995a).

- **Méthodes heuristiques :** Les méthodes heuristiques permettent de trouver des solutions proches des solutions optimales issues des méthodes d'optimisation mathématique. La manière de procéder de ces méthodes consiste à commencer par une solution initiale et à rechercher les meilleures solutions dans les contraintes (Torres-Mach et al., 2014). Les méthodes heuristiques en gestion des chaussées varient en fonction de leur façon de rechercher les meilleures solutions. Ainsi, les méthodes heuristiques se basent principalement sur l'analyse coût/avantage incrémentale, l'analyse heuristique de recherche locale et les algorithmes évolutionnaires (Torres-Mach et al., 2014)
 - **Analyse coût /avantage incrémentale :** L'analyse coût /avantage incrémentale, nommée frontière d'efficacité, permet de déterminer les avantages supplémentaires obtenus en sélectionnant des options avec des coûts plus élevés.
 - **Analyse heuristique de recherche locale :** Cette analyse débute par un choix aléatoire d'une solution initiale et explore l'espace d'interférence de la solution pour la recherche des meilleures solutions faisables. La recherche de meilleures solutions peut être réalisée à l'aide de la technique de recherche par gradient ou celle du seuil d'acceptabilité.
 - **Algorithmes évolutionnaires :** En gestion des chaussées, les algorithmes évolutionnaires (AE) les plus utilisés sont les algorithmes génétiques (AG). Toutefois, les AE sont fondés sur le mécanisme naturel de l'évaluation composé de l'apprentissage et l'adaptation. L'AG diffère des méthodes classiques d'optimisation sur les aspects suivants : plutôt que d'utiliser la méthode de recherche point à point comme dans les techniques classiques d'optimisation, l'AG cherche simultanément, à partir d'une population des points connus sous le nom de chromosomes, à explorer l'espace de la solution(i) ; l'AG utilise les règles de transition probabilistes (pour ses opérations) pour rechercher l'espace de solution avec une amélioration probable (ii). L'AG peut fonctionner aussi avec des paramètres continus et discrets, des fonctions différentiables ou non différentiables, des fonctions constituées d'un seul mode ou

multimodales, aussi bien qu'avec des régions admissibles convexes ou non convexes (iii) (Chootinan et al., 2006).

-

- **Les techniques d'optimisation non classifiées** : D'autres méthodes telles que l'optimisation de réseaux neurones et la logique floue sont aussi utilisées en gestion des chaussées, mais ne peuvent être classifiées dans les méthodes de priorisation mentionnées ci-dessus.
 - **Optimisation de réseaux neurones** : Les réseaux neurones sont capables d'apprendre des exemples, tout en permettant aux systèmes de faire des généralisations et de simuler des décisions.
 - **Logique floue (Fuzzy logic)** : La logique floue incorpore des données qualitatives imprécises dans le processus de prise de décision. Cette approche constitue une série avec des conditions limites confuses, et se présente sous la forme de degré d'appartenance. La valeur 0 ne correspond à aucune appartenance, alors que la valeur 1 correspond à une appartenance totale (Chandran, Isaac et Veeraragavan, 2007). Contrairement à la logique booléenne, la logique de Fuzzy est dotée de multiples valeurs. Ainsi, au lieu qu'une proposition soit entièrement vraie ou fausse, la logique de Fuzzy traite en degrés d'appartenance et en degrés de vérité, qui peuvent être partiellement vraies et partiellement fausses au même moment.

1.5.3 Choix des méthodes de priorisation

En général, le choix des méthodes de priorisation est effectué en fonction des conditions locales prévalentes et des contraintes d'implémentation dans les administrations routières (Kumar, 2014c). Toutefois, le choix des algorithmes des programmations mathématiques dépend des facteurs tels que le type de décision (ou niveau de décision), le nombre de variables dans les critères de décision, la forme de la fonction objective, les contraintes techniques et budgétaires et l'ordre de la séquence d'optimisation adopté dans le SGC. (Li et Kumar, 2003). Le Tableau 1.1 présente les principaux avantages et inconvénients des méthodes de priorisation.

Tableau 1.1 Avantages et inconvénients des méthodes de priorisation
Adaptée de Haas, Hudson et Zaniewski (1994b)

Type de priorisation	Avantages et inconvénients
Simple classement subjectif des projets basé sur les opinions	Rapide, simple; sujet à des biais et des incohérences; peut être très éloigné de la solution optimale
Classement basé sur les paramètres tels que la fonctionnalité, la déflexion, etc.	Simple et facile à utiliser; peut être très éloigné de la solution optimale
Classement basé sur les critères de l'analyse économique	Raisonnement simple; peut être plus proche de la solution optimale
Optimisation par des modèles de programmation mathématique sur une base annuelle sur la période d'analyse	Moins simple; peut être plus proche de la solution optimale; impact de l'échéancier non pris en compte
Méthodes heuristiques incluant le rapport avantage /coût et le rapport coût-efficacité	Raisonnement simple; approprié pour une intégration dans un micro-ordinateur; proche de la solution optimale
Optimisation complète par des modèles mathématiques considérant les impacts de programmation de l'entretien, la réhabilitation et la reconstruction	Plus complexe; processus de calculs très exigeant pouvant donner la solution optimale (maximisation des avantages)

1.6 Conclusion et recommandations

Bien qu'il existe plusieurs critères de priorisation de plus en plus intégrateurs, il est essentiel qu'ils reflètent la disposition à payer et le niveau de service désiré par la population. Cette revue de littérature fait ressortir l'importance d'intégrer des indicateurs de DD (économie, environnement et social) de concert avec les indicateurs de performance pour comparer les compromis des projets routiers (construction et entretien) en utilisant des outils de priorisation

adéquats. Outre les outils de priorisation adéquats, l'analyse conjointe des facteurs techniques, économiques, environnementaux et sociaux exige de la part des administrations routières des données assez précises et détaillées. Or, en raison de la complexité technique et financière d'obtention des données, notamment des données environnementales et sociales, les administrations routières ne prennent en compte que les aspects technico-économiques dans leurs processus de prise de décision. Les aspects environnementaux et sociaux sont très souvent considérés par des techniques de mitigation après la sélection des options d'interventions ou des projets routiers, ce qui engendre des choix qui sont assez éloignés de l'optimum.

Cette thèse s'appuie donc sur les principes de gestion durable des chaussées et les méthodes de priorisation présentées dans cette revue de littérature pour développer une méthodologie innovatrice, qui permet de classer et sélectionner des projets routiers candidats, en utilisant premièrement les méthodes de sélection basées sur le classement, et deuxièmement le modèle de programmation linéaire à nombres entiers pour le choix des interventions optimales des projets de préservation sélectionnés parmi les projets candidats.

CHAPITRE 2

ROAD FUNDING PRIORITY INDEX FOR SUB-SAHARAN AFRICA USING PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS

Kaba Emmanuel Kossè¹, Gabriel J. Assaf²

Département de génie de la construction, École de Technologie Supérieure,
1100, Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié en septembre 2019 à la revue *Case Studies on Transport Policy* (ELSEVIER).

2.1 Abstract

This article presents a new Road Funding Priority Index (RFPI) that simultaneously considers the technical, economic, social and environmental dimensions in order to assist decision makers in their selective processes of high-priority road construction and preservation projects. The RFPI is a decision support tool that was tested on 50 road projects, including 25 unpaved road construction projects and 25 paved road preservation projects. The stages of development of the RFPI are the following: the establishment of a theoretical framework (1), the selection of the relevant indicators (2), the transformation of indicators (3), the normalization of indicators (4), the correlation and significance test (5), the weighting using the principal component analysis (PCA) (6); and the aggregation and calculation of the RFPI (7). Ten (10) high-priority road projects were selected based on their respective RFPI values. Amongst them, 60% are preservation projects and 40% are construction projects, which depicts evidence of the importance of maintaining existing roads, but also the need to construct new ones, as long as they have an RFPI close to 100. The budget of the realization of the high-priority projects was estimated at 57.7 million US dollars. These conclusions prove that the RFPI is a useful tool for improving, in a rigorous scientific method, the process of prioritizing road infrastructure in Sub-Saharan Africa.

2.2 Introduction

Roads are crucial for the socioeconomic development of countries. They contribute to the well-being of local communities and to poverty alleviation in Sub-Saharan Africa (SSA). They connect people to markets, schools, hospitals and community centers. Moreover, in order to achieve the United Nations sustainable development goals of 2030 whose motto is "Transforming our World", governments and international financial institutions must invest wisely in strategic sectors such as road infrastructure (AIPCR, 2016).

Road construction is important because of its economic and socioeconomic impact on local communities. New or upgrading roads open up isolated areas and facilitate both national and international trades. It should be noted that the densities, both per square kilometer of land area and per capita, of most road networks in the countries of SSA are very low compared to the average density of other parts of the world. Africa's road network density totalizes 204 km per 1000 km² with only a quarter being paved, while the world's average tops 944 km per 1000 km², with more than half of the roads being paved (Ken, 2011). Furthermore, it is important to keep the existing roads in good condition to avoid accessibility and mobility restrictions throughout the year. If preventive maintenance work is not timely carried out, the road's condition will promptly deteriorate, which can lead to major rehabilitation or reconstruction work and expenses four times greater than those of simple maintenance work (Burningham et Stankevich, 2005).

The imbalance between the deterioration rate of existing infrastructure and the level of funding allocated to their maintenance, the tendency to give the priority to the news infrastructure construction, as well as the lack of quality maintenance timely performed are the main challenges being faced in the road infrastructure sector of developing countries (DFID, 2016). The road sector went through a consistent policy reform after the independence of sub-Saharan African countries. This policy reform was technically supported substantially by various funders. The most important policy reform has been the establishment of independent road funds called "second generation road funds." The latter are dedicated to funding routine and

periodic road maintenance exclusively from the road-user charges. The main criteria of this second generation road funds are the clear legal foundation, separation of functions, application of road-user charges, direct transfer of funds, representation of road users on the board, clear revenue allocation rules and independent auditing of accounts. Despite the relevance of this policy reform, out of the 35 countries of SSA members of Africa Transport Policy Program (ATPP), only 20 % met the seven criteria mentioned above. The major road user charges for road maintenance funding are withdrawn from fuel levies. However, the average fuel levies cost 0.03 US\$ per liter (Gwilliam et al., 2008a). These fees are far from the adequate fuel levies of the 0.16 US\$ per liter required to cover road maintenance needs. Moreover, the road maintenance has been neglected for a long time by SSA Road agencies, resulting in almost all the SSA countries having a huge maintenance backlog and not being able to cover the maintenance needs by themselves.

The road construction funds are allocated from the government general budget that is not enough to properly extend the road networks. Indeed, the budget allocated for road construction competes with other priority sectors such as education, health, agriculture, electricity, etc. (Benmaamar, 2006b). In the light of all the statements mentioned above, it is clear that SSA countries need support for both road construction and maintenance projects. This support is provided by funders who support the majority of SSA Road projects (for example, around 50 % of the road projects in Senegal and around 90 % of those in Rwanda) through development assistance programs. They try to favor roads construction over road maintenance (Gwilliam et al., 2008a), which is the most effective approach.

Another major issue of road management that SSA countries are facing is the lack of reliable data. Obtaining detailed road data is very expensive and requires huge efforts of collection, storing, processing and putting to use (Bennett et al., 2007). Therefore, it can get very expensive for funders to collect data of the entire road network or subnetwork on the site in order to choose the high priority road construction projects and road maintenance projects to be funded.

In SSA countries, the roads and highways funds are fed by two main sources. The first source of funding is allocated by the government through their general budget. This funding is exclusively dedicated to the roads investment projects such as construction, rehabilitation and upgrading. The second source of funding comes from road users' charges, which are supposed to be used strictly for routine and periodic road maintenance projects (BOAD, 2015a; Talvitie, 2000). Even combined, both sources are insufficient to adequately maintain and build roads. Thus, this present article suggests a new Road Funding Priority Index (RFPI) to, on the one hand, prioritize road construction and maintenance projects simultaneously and, on the other hand, select high-priority projects by aggregating technical, economic, social and environmental indicators according to the available resources (Funder or Road funds requirements). The data indicators were collected from available and accessible SSA Road agency database. The specificity of this study rests in the fact that RFPI was developed using Principal Components Analysis, which is a multivariate statistical analysis for indicators weighting. RFPI is a useful tool that decision makers, especially funders, can use either to relocate a portion of the budget originally dedicated to the road investments (road development and rehabilitation) towards road preventive maintenance projects, either to equitably distribute the roads support budget between the agency in charge of road investment projects and the one responsible for road preventive maintenance projects. The indicator data were collected directly from road agencies without much investigation on the site, which reduced the necessity of an intensive and expensive data collection. Therefore, the RPFPI acts as a springboard for the initial scrutiny of the road network or subnetwork in its selection of a small number of the two types of road projects (construction and maintenance). These road projects will subsequently be evaluated functionally and structurally to obtain the intensive and detailed data required for sophisticated analysis as cost-benefit (CBA) using the Highway Design and Management model (HDM-4).

This paper presents the literature review on the road prioritization tools, the methodology of RFPI development, as well as the relevant results and discusses these results. Finally, the paper concludes by summarizing the salient outcomes of the analyses.

2.3 Literature review

This literature review addresses the decision support tools commonly used in the sector of road infrastructure. The latter are a set of methods, analytical approaches, procedures and frameworks for road agencies projects and policies' evaluation (Healy et al., 2007). There are several tools that were developed by researchers to assist decision makers and road management agencies in their decision-making regarding transportation projects. These tools can be divided in two main categories: single criterion analysis tools (e.g. cost-benefit analysis) and multi-criteria analysis tools (e.g. analytical hierarchy process and mathematical optimization).

2.3.1 Cost-Benefit Analysis (CBA)

The cost-benefit analysis (CBA) is a major methodological framework widely adopted by road agencies, both in developed and developing countries, for the economic appraisal of roads and highways projects (Bhandari, Shahi et Shrestha, 2016). CBA is based on the life cycle concept to compare all the discounted costs and benefits during the useful service life of road projects or sections in order to determine the economic indicators (World Bank Group, 2010). The costs considered in roads projects evaluation go as follows : agency costs (construction, rehabilitation, maintenance, residual, management costs, etc.), user costs (travel time, vehicle operation and accident costs) and externality costs (air pollution, noise pollution and neighborhood disturbance) (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). The road projects benefits can be divided into monetarized quantifiable benefits and non-quantifiable benefits. The quantifiable benefits gain mainly from the reductions of user costs. The reduction of maintenance costs and the regional economic development generated by road projects implementation can also be considered as a quantifiable benefit. On the other hand, the non-quantifiable benefits are derived from the improvement of local population life standards such as health, education, social interaction and participation in political life (PIARC, 2013a). Although they are relevant, the non-quantifiable benefits are rarely included in CBA due to the complexity of their monetization. The internal rate of return (IRR), the benefit-cost ratio (BCR) and the net present value (NPV) are the prime economic indicators results of CBA and are

commonly used to verify the economic viability of road projects (Kumar, 2014c). However, when the road project sizes are very different, BCR is the most recommended and most useful indicator for comparing projects with each other.

Even though CBA is a robust tool for road projects economic viability assessment, the reliability of its results depends on the type and sources of the input data (Kaan et al., 2004). In fact, the input of CBA requires very detailed and precise pavement data. However, data collection can be very expensive and time consuming for developing countries whose funds are already scarce with the multitude of road projects in need of funding. Other considerations can also make CBA analysis less attractive to transport sector practitioners, such as its requirements for all costs and benefits to be expressed in monetary terms and road projects evaluation to be based exclusively on the economic dimension. According to Beria, Maltese et Mariotti (2012), CBA is a solid formal approach providing a rational framework for project evaluation and clear results that can easily be communicated and shared. However, the technical procedures application of CBA is very complex. Moreover, the process used to monetize some intangible environmental externalities is questionable. Their study concluded that joint use of CBA and multi-criteria analysis (MCA) could overcome their mutual weaknesses for assessing efficiently sustainable policies and projects. However, according to Kabir, Sadiq et Tesfamariam (2013), MCA appears beneficial to refine the quality of decision-making process for infrastructure management by incorporating transparency, analytic rigour, auditability and conflict resolution for multidimensional decision problems. Therefore, MCA is more suitable for this present article, given the fact that the main goal is the prioritization of road projects by considering the indicators of four dimensions simultaneously, which are technical, economic, social, and environmental dimensions.

2.3.2 Multi-criteria Analysis (MCA)

The approaches of MCA are increasingly used in infrastructure assessment and prioritization in meeting the need for a consensus among policy goals and lack of data (Marcelo et al., 2016). The decision-making process surrounding infrastructure funding is a complex issue requiring

the involvement of several stakeholders, which all have very divergent goals. In this context, MCA is an appropriate approach in finding a consensus among various goals. The MCA is defined by Beria, Maltese et Mariotti (2012) as a tool for selecting project alternatives with relevant social, economic and environmental impacts while considering various criteria and opinions of stakeholders. The MCA procedures are the following: establishment of goals, identification and measurement of indicators corresponding to these goals, weighting of these indicators and, finally, their aggregation. Indicator measurements are not only carried out in monetary (or quantitative) terms, but also in non-monetary (or qualitative) terms. Qualitative indicator measurements are based on points attribution (the Likert scale), ranking and weighting methods, which add intangible facets, such as social and environmental aspects, to the analysis (Beria, Maltese et Mariotti, 2012). The weighting stage of indicators is the fundamental step of MCA. Therefore, the determination process and indicators weighting are the main differences among the MCA methods. There are five (5) MCA methods appropriate for the transport projects assessment (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999): Analytical hierarchy process (1); Analytical network process; REGIME model; ELECTRE family; Multi-attribute utility approach; and ADAM type. In the present section, we will focus on Analytical Hierarchy Process (AHP), given the fact that this method is a relatively new evaluation tool adopted into infrastructure management. Moreover, this tool helps the decision makers to make the best decisions into the infrastructure prioritization process on the basis of a clear rationale (Smith et Tighe, 2006).

The AHP is a decision support tool based on mathematical and psychological principles. It has been developed by Saaty (1980) to help out the decision or policy makers in the complex selection of projects. AHP breaks down a complex decision-making process into a hierarchical framework composed of at least three levels. The first level is the ultimate goal of the analysis, followed by the main criteria at the second level and the sub-criteria at the third level (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999). The main stages of AHP are the hierarchical structuring, the pairwise comparison, establishment of priority vectors and the checking for the consistency of preference judgments (Farhan et Fwa, 2009). The structuring hierarchy consists in establishing a flowchart which specifies the ultimate goal, including the criteria, at the first

level and the sub-criteria at the next levels. The criteria may be further broken down into sub-criteria depending on the complexity of the study (Javed, 2011). The criteria and sub-criteria pairwise comparison is carried out using a scale of 9 points recommended by Saaty (1980). The preference of judgments is assigning a value of 1 to the element of same importance, 3 to weakly more important element, 5 to strongly more important element, 7 to a very strongly important element and 9 to an extremely important element. The intermediate points 2, 4, 6 and 8 can also be attributed to preference of judgments depending on the relative importance of one criterion or sub-criteria over another. The priority index is established for each criterion and sub-criterion by normalizing the principal eigenvector of the pairwise comparison matrix. To check the consistency of the preference judgments a consistency ratio (CR), consistency index (CIN) and random consistency index were developed by Saaty (1980). The CR, which is the ratio of CIN and RI, must be at most 10 %. CIN depends on the maximum eigenvalue of priority matrix and RI is related to the number of criteria or sub-criteria. The limit of 10 % represents the degree of inconsistency allowed by human preference judgments (Farhan et Fwa, 2009).

The MCA methods can be subdivided into two broad groups (Cafiso et al., 2002): the first one comprises a set of explicitly known alternatives (a finite number of alternatives) and the second one includes an implicitly known set of alternatives. The methods of the first group include the AHP described above. The alternatives for the second group are represented as vectors of decision variables and the criteria are the objective functions of these variables. The feasible solutions of these variables are the constraints, which are expressed in terms of equations and inequations (Cafiso et al., 2002). In the literature, the methods of the second group of MCA is named optimization methods (OM) or multi-criteria optimization methods (MOM). The mathematical optimization of road projects is a sophisticated tool with a very complex application. However, OM can be used to allocate the resources efficiently to ensure that the road projects benefits are maximized while the total cost is minimized (objective functions) and kept under the budget limit (constraints) (AASHTO, 2012b). Mathematical models such as linear, integer nonlinear, linear and dynamic programming are used to optimize road maintenance, construction and rehabilitation projects. However, linear and integer linear

programming are the most recommended by researchers because of its suitability to transportation projects. Moreover, these optimization methods can be adjusted and applied to the network level in order to determine the optimal solution (Javed, 2011). However, the linear programming cannot analyze a large number of decisions variable and involves issues related to linear combinations. These drawbacks may be solved by the model of genetic algorithms (GA).

The MCA methods primarily focus on the analysis of indicators relevance according to their weights. However, the different weights of indicators could be aggregated with indicators normalized values to determine the global score of each project in order to wisely prioritize them. These aggregated indicators are named composite index or indicators.

2.3.3 Composite Indicators (CI)

The composite indicator (CI) is a multi-criteria tool for measuring a complex phenomenon by simultaneously considering several dimensions. CI is an aggregation through many stages of various indicators or sub-indicators to highlight complex and often imperceptible dimensions such as environmental, economic, social or technological development. However, scientists are not unanimous about the use of CI which, of course, implies pros and cons (OECD, 2008). The pros argue that CI can synthesize complex problems to support decision-makers by granting them with a big picture, which facilitates interpretation more than if they were to seek trends on various individual indicators. Pros also advocate that the CI is more responsive to public interest since it may be used to compare projects performance as well as to monitor and evaluate projects over time. Pros also believe that CI can contribute to the reduction in size of a large number of indicators or to the incorporation of information into a limited size of pre-existing indicators. In contrast, the cons argue that CI can lead to the adoption of misleading or weak policies if the latter were poorly constructed or misinterpreted. This can also lead decision makers to make over-simplistic choices. In addition, the opponents of CI applications claim that each stage of CI construction requires many choices and acts of judgment, all subjective, which may lead to erroneous results. For instance, the selection and weighting

stages are often influenced by policy goals and different challenges stakeholders face. The requirement of intensive data for the CI construction is another argument used by the cons. Although the arguments of researchers against the use of CI could be justifiable, solutions were developed to fill these gaps in the indices' stages of construction. Thus, uncertainty and sensitivity analysis should be undertaken to check the robustness of CI (Mainali et Silveira, 2015; OECD, 2008; Saisana et Tarantola, 2002). Furthermore, a composite sub-index can be developed for each dimension to avoid simplistic decision-making. The judgments of opinion involved in each stage of the CI construction must be transparent and based on soundness statistical principles (Saisana, Saltelli et Tarantola, 2005).

Numerous types of composite indices have been developed around the world. The human development index (HDI) was first introduced in 1990 by United Nations Development Program (UNDP). This UNDP's index measures the level of national human development in order to compare and rank nations based on three main components: education, health and national income. HDI can also be used by decision makers to guide national policy choices such as education, health and economic growth policies. However, HDI captures only one part of human development because aspects such as inequality, poverty, and, human security or nations' empowerment have not been integrated in the development components of this index (UNDP, 2018). The Environmental Performance Index (ESI) was developed in 2000 by the universities of Columbia and Yale. They were looking to scale the ability of nations in protecting the environment over several decades. They relied upon a compilation of 21 indicators, themselves derived from five main components : environmental systems, reducing stresses, reducing human vulnerability, social and institutional capacity as well as global stewardship (Bandura, 2008). The ESI can be a useful tool for national decision makers when tracking expressions of national environmental performance such as natural resource endowments, environmental management efforts and pollution levels. However, it should be mentioned that the lack of information on many environmental issues, the incomplete data coverage, the conflicting data and the incomparability of data across countries altogether make environmental sustainability index measurement very challenging (Schmiedeknecht, 2013). The economic vulnerability index (EVI) was created in 2003 by Briguglio et Galea (2003) in

order to assess the extent to which a country's economy is exposed to external and uncontrollable forces. It is based on four main components: trade openness, export concentration, dependence on strategic imports and peripherality. EVI is an useful tool to assist funders in allocating aids to developing countries in effective and equitable ways. However, this index cannot be used as a sole criterion for identification of least developed countries if it doesn't also include other relevant criteria such as income per capita and human capital (Guillaumont, 2009). The road safety index (RSI) was developed in 2010 by aggregating traffic risks, personal risk, vehicle safety, road situations, road user behavior, socioeconomic background, road safety organization and enforcement indicators (Gitelman, Doveh et Hakkert, 2010). The road safety itself is a major social aim. In fact, the RSI is a scientific-based index that can be used by decision makers, especially those from transportation agency of a country to learn more about improving the road safety policies from their own experiences, and also to compare their own country road safety level with those of other countries (Bax et al., 2012). Despite the relevance of the RSI, it merely underlines the differences between the countries without any further explanation. Moreover, this index cannot be projected into the future due to the lack of current and reliable data, especially in developing countries. Although all the composite indicators mentioned above have been criticized by some scientists, they are now being used around the world to compare and measure the performance of countries.

The main construction stages of the CIs are the following (OECD, 2008): (1) theoretical framework (2) data selection (3) imputation of missing data (4) multivariate analysis (5) normalization (6) weighting and aggregation, and (7) uncertainty and sensibility analysis. These stages have been adapted for the establishment of the RFPI in this paper, which focuses on how the tool was developed using principal component analysis (PCA). The construction of CIs with PCA has been more widely explored in other fields than the road infrastructure one. Ouyang et al. (2006) analyze 16 physical and chemical parameters of surface water quality collected from 22 monitoring stations along the main stem of the lower St.-John River in Florida, using the principal component analysis (PCA) and the factor analysis (FA). The PCA analysis was used to assess the seasonal correlations of water quality, while FA were employed to extract the most relevant parameters in seasonal variations evaluation of water quality. Their

analysis results show that the latter differ from one season to another, except for dissolved organic carbon (DOC) and electrical conductance, which were the most relevant parameters contributing to the water quality variations all year around. Farhan et al. (2017) compared 43 sub-watersheds prioritized based morphometric and PCA in the aim of analyzing the effectiveness of morphometric parameters in watershed prioritization. The results of such comparison indicated that the prioritization based on morphometric analysis is more rational and useful in the process of decision-making than the prioritization using PCA approach would be. Fuquan, Lu et Xiang (2008) used PCA to condense subfactors from the influencing parameters of the models of safety level service. Their study results allowed the categorization of factors in three main groups: major influencing factors, minor influencing factors and traffic characteristics. Friesen, Seliske et Papadopoulos (2016) developed socioeconomic status (SES) indices based on PCA, in order to identify levels of area disparities in SES within Canadian communities. The main goal of their study was to determine the relevance of replacing census income information with tax filer data in neighborhoods SES index development. The data was extracted from income and non-income SES census data of Guelph's community, in Ontario. The results indicated that the substitution of tax filer variables produced the similar SES score distributions and neighborhood SES classifications when using only census variables. Moreover, the results of the combination of tax filer income variables with census non-income variables indicated clearer distinction of SES level distinctions. A thorough literature review showed that one single study was conducted on transportation infrastructure projects prioritizing the use of PCA (Marcelo et al., 2016) and developed two sub-indices using PCA to weight indicators. These two sub-indices as well as the social and environmental index (SEI) and the financial and economic index (FEI) were used to display projects on Cartesian plans and to identify high-priority projects, high social and environmental priority projects, high financial and economic priority projects and low-priority projects within the available budget. However, the study does not specify whether the assumptions of PCA have been satisfied or not. In addition, the four dimensions (financial, economic, environmental and social) were not aggregated and the identification of projects levels remained very subjective. All these shortcomings have been considered in the RFPI development.

2.4 Data source

The data used for the development of the RFPI were collected from a West African Road agency and a funder's consultant. However, the statistical sample hasn't been entirely included in this article for reasons of sample size and data confidentiality required by both the road agency and consultant. The funder is an International Financial Institution (IFI). More precisely, the data of 50 road projects is composed of 25 road construction (upgrading) and 25 preservation projects. It was collected from the Ministry of roads and highways of the country's area being studied and from the IFI's Consultant. The data of these two types of projects was classified according to the indicators selected and presented in Table 2.4, Section 2.6.2. The list of road sections, including 729 km of gravel roads and 812 km of double-surface dressing roads, was handed to the funder's consultant by the Ministry of Roads and Highways (MRH). This list mainly contains the primary structuring network of national and international roads located on the entire territory of the country. According to the ministry, this list was established to meet the goals of the agriculture value chain development and the preservation of the priority roads network. However, the main purpose of our study is to use a scientific approach in prioritizing and selecting around 330 km of roads, including both construction and maintenance projects from the list of road sections. The 330 km length of these two types of road sections (construction and maintenance) is a requirement (available resources) from the funder, and a is part of its program of funding road infrastructure in West Africa.

2.5 Study area

The study area is located in one of the members of the Economic community of West African States (ECOWAS). The latter is an African organization founded in 1962 whose member countries include Benin, Burkina Faso, Ivory Coast, Guinea-Bissau, Mali, Niger, Senegal and Togo (BOAD, 2015b). The map in Figure 2.1 shows West Africa, in which one of the yellow-colored regions represents the study area.

The road network in ECOWAS countries encompasses 247.311 km of classified roads, the majority of which are in poor condition (BOAD, 2015b). Generally, the road network is

composed of both classified and unclassified roads. The former includes interstate national roads (INRs) which connect the country's capital to rural or urban centers inside the country itself or neighboring ones, as well as national roads (RNs) connecting the different provinces to each other, all of which facilitate commercial exchanges of goods and human transportation. The latter include municipal roads (MR) and rural tracks (RT), which allow or widen access to basic infrastructure and services such as schools, hospitals and markets, on top of improving rural communities' socioeconomic activities. Surface pavement types are also used to classify roads. Hence, the road network can be subdivided into paved roads (PR), unpaved roads (UR), classified tracks (CT) and inventoried tracks (IT). The paved roads are built from asphalt concrete (AC), single or double surface dressings (SD) and concrete pavement (CP). The unpaved roads include earth roads (ER) and gravel roads (GR). The summary of road networks' lengths and road densities by state can be found in Table 2.1.



Figure 2.1 Member countries of ECOWAS

Adapted from BOAD (2015a)

Table 2.1 Road networks of ECOWAS countries

Adapted from BOAD (2015b)

Country	Land area	Primary Road network length (km)		Secondary Road network length (km)	Tertiary Road network (km)	Density of classified road network (km/100 square km)
		Paved road (PR)	Unpaved Road (UR)	Classified track (CT)	Inventoried track (IT)	
Benin	114,763	4,829	1,247	3,400	12,043	8.3
Burkina Faso	274,000	2,528	3,197	9,559	46,095	5.6
Ivory Coast	322,463	6,514	9,019	35,347	31,116	25.43
Guinea-Bissau	36,125	768	2,003	1,944	NA	13.05
Mali	1,241,238	5,220	8,860	16,249	58,735	7.17
Niger	1,267,000	4,332	5,285	3,122	4,597	1.54
Senegal	196,722	5,956	10,539	4,177	NA	10.85
Togo	56,600	1,732	2,703	892	5,910	10.18

NA: non-available data

As shown in Table 2.2, only 40% of the road network in all ECOWAS member countries is in good condition, while the remaining 60% is in fair and poor condition. Some countries as Burkina Faso and Mali strive to keep more than half of their road networks in good condition, but in countries such as Benin, Togo and Guinea-Bissau, more than 50% of the road networks is in poor condition. This may be due to funding shortage, non-implementation of appropriate maintenance policies and lack of prioritization given to road maintenance projects based on relevant indicators (Ranganathan et Foster, 2011).

Table 2.2 Road networks conditions and accessibility index of ECOWAS countries
Adapted from BOAD (2015a); Ranganathan et Foster (2011)

Country	Percentage (%) of roads according to the conditions			Rural accessibility index (RAI)
	Good	Fair	Poor	Percentage (%) of rural population within 2 km from all -season road
Bénin	36.0	2,0	62.0	28.0
Burkina Faso	58.2	33,6	8.2	23.7
Côte d'Ivoire	16.3	47,7	36.0	32.2
Guinée Bissau	22.2	20,7	57.1	na
Mali	66.6	21,7	11.7	16.7
Niger	31.2	31,0	37.8	15.0
Sénégal	39.8	15,1	45.1	25.7
Togo	49.7	0,0	50.3	na
Average	40.0	21.5	38.5	23.6

2.6 Methods

The composite indicator construction steps recommended by the Organization for Economic Co-operation and development was adapted for the development of Road Funding Priority Index (RFPI). The entire steps of composite indicators construction are described in *the handbook on Constructing Composite Indicators* (OECD, 2008). As seen in Figure 2.2, the construction stages of the RFPI are (1) the establishing of a theoretical framework (2) the selection of indicators (3) the transformation and (4) normalization of indicators (5) the correlation and signification testing (6) the weighting using PCA and (7) the aggregation and calculation of RFPI.

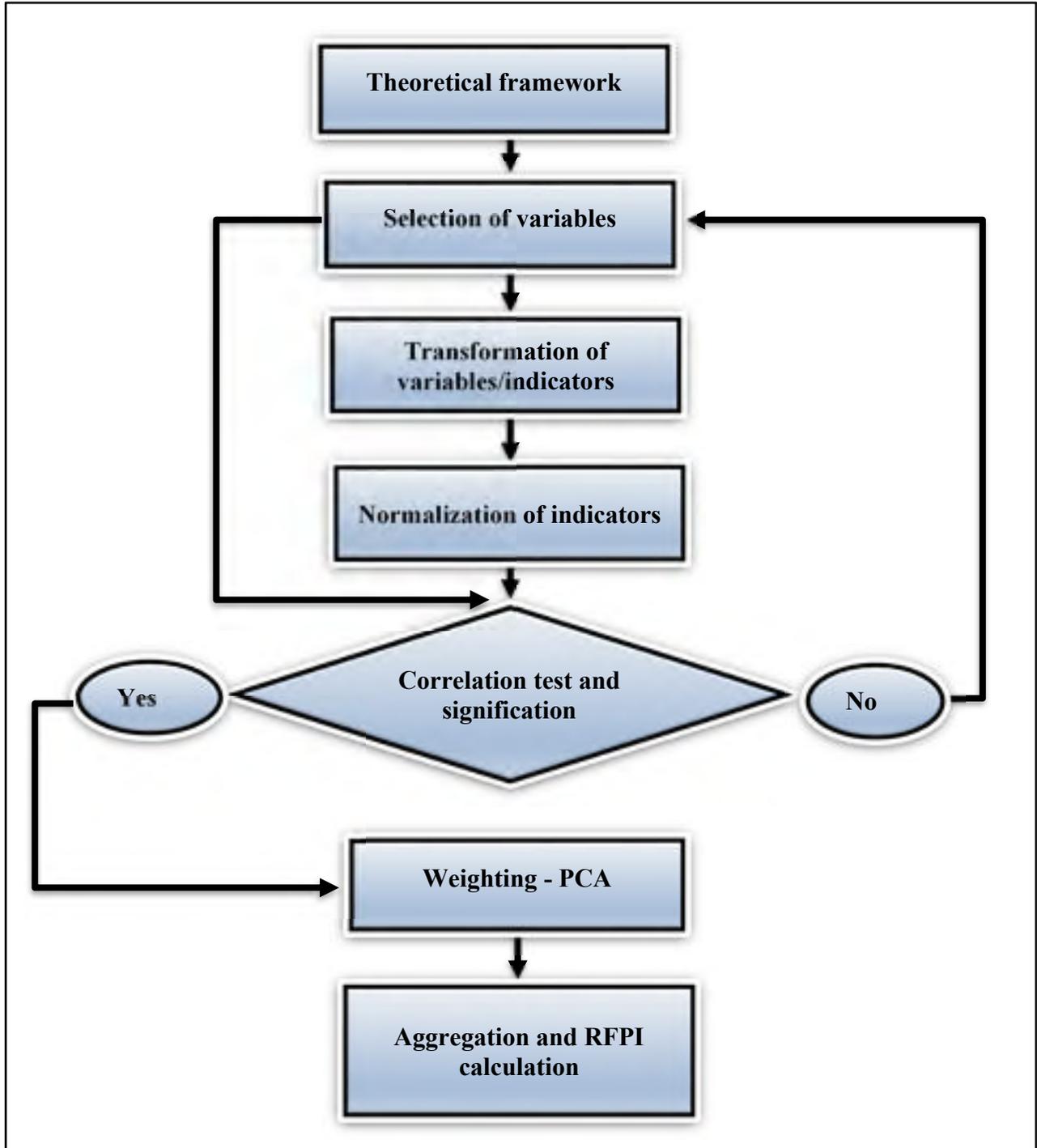


Figure 2.2 Stages of RFPI

2.6.1 Theoretical framework

An adequate theoretical framework encompasses the multidimensional phenomenon to be measured as well as its dimensions, and thus constitutes a benchmark in selecting indicators and weighting methods (OECD, 2008). The development of the RFPI is based on the sustainable infrastructure concept which has emerged with Brundtland in 1987 (Brundtland et al., 1987). According to the United Nations ESCAP (2006), a sustainable infrastructure is one which places itself in harmony with economic and environmental sustainability by designing and maintaining buildings, roads, structures and other facilities promoting an over the life cycle conservation of this infrastructure. The National Research Council of the National Academies (2009) defines “infrastructure sustainability” as a crucial concept which gives the opportunity to current and future generations to meet their needs through cost-effective, physically resilient, socially equitable and environmentally viable infrastructure.

Based on these definitions of sustainable infrastructure as well as the interviews (through emails and vocal communications) with the consultant expert panel and an intensive literature review, a theoretical framework was established. It is shown in Table 2.3. From this framework, four (4) essential road infrastructure sustainability sub-components have been defined, which may be categorized under technical, economic, social and environment.

The technical dimension refers to the pavements’ technical performance. It is measured using technical indicators which are key inputs to several decision-making processes (e.g. prioritization) and road infrastructure management (e.g. maintenance management) (Humplick et Paterson, 1994). The technical indicators are generally derived from traffic surveys or functional and structural pavement conditions assessments. The economic sub-component makes it possible to check whether road projects are economically viable or not. This dimension is measured by sustainable transportation economic indicators that should reflect the benefits and costs of the projects during their life cycle (Litman, 2019). The social dimension must be measured by social indicators regarding the population of the study area and the issues it is facing, such as equity, human health, community cohesion, impacts on historic and cultural resources, aesthetics or accessibility to basic infrastructure. The

environmental sub-component covers impacts related to water or air pollution, noise, depletion of non-renewable resources, landscape degradation, wetlands or fauna and flora, which are all measured with environmental indicators. The process of indicators selection as well as the weighting and the aggregating methods are illustrated in Table 2.3 and described in Sections 2.6.2, 2.6.3, 2.6.6 and 2.6.7.

Table 2.3 Theoretical framework

Dimension	Goal	Indicators selection	Weighting	Aggregation
Technical	Good performance	Technical indicators	Weights of relevant indicators (Principal Components Analysis)	RFPI (linear aggregation)
Economical	Justifiable and cost-effective	Economic indicators		
Social	High benefit	Social indicators		
Environmental	Low adverse effects	Environmental indicators		

2.6.2 Selection of indicators

The choice whether or not to include the indicators in the analysis is controlled by the underlying indicators selection criteria (OECD, 2008). After defining the four (4) main

dimensions (technical, economic, social and environmental), the indicators related to each dimension were identified based on intensive literature review on road infrastructure sustainability criteria such as articles on sustainable road prioritization indicators, pavement design handbooks, social and environmental assessment reports from the World Bank, the developing countries' road agencies and the funder's consultant's investigation. We identified a total of 17 indicators including 4 technical indicators, 8 social indicators and 5 environmental indicators. For each set of indicators, the consultant's experts are asked to approve or offer suggestions in the aim of adding or removing relevant or irrelevant indicators. This process is performed by applying the technique of Delphi and an in-depth interview with the experts. Through the literature review, the analysis of Delphi technique outcomes and the interviews, 15 indicators were retained for this study (see Table 2.4).

The references of indicators stemmed from the extensive literature can be found in Table 2.4. It should be mentioned that the expert panel including road design and management engineers, environmentalists, sociologists and senior academic researchers in the pavement field, are all members of the consultant team, as expressed in Appendix I (Annexe I). These members were selected based on contacts of each member and screened to include relevant experience spanning over many years in either road planning, definition of road policies, road environmental and/or social impact assessment, road maintenance and design and agricultural logistics related to roads.

As mentioned earlier, 15 indicators were selected for the present study. Each one is described as follows.

- **Length of road section (L)**

The lengths of the road sections expressed in linear meters (lm) were obtained by subdividing the road network into homogeneous sections based on criteria such as road functional classification (national road, interstate roads, etc.), pavement surface class (bituminous, concrete, block and unsealed), traffic (AADT) and road condition (IRI).

- **International roughness index (IRI)**

The IRI expressed in meters per kilometer (m/km) characterizes the regularity of the pavement surface related to the users' comfort and security. The IRI is assessed from measuring the longitudinal profile on the pavement using a virtual model-response simulator of a quart-wheel car traveling at 80 km/h (COST, 2007). A flat road in good condition is commonly characterized by a low IRI value (e.g. IRI < 2 m/km), while the highest value of IRI (e.g. IRI > 4 m/km) indicates the highest pavement deterioration rate. For this study, the IRI values of unpaved road sections (gravel road sections) are comprised between 8 and 20 m/km (good to worst condition), while the values of paved roads (asphalt concrete and double-surface dressing) are comprised between 3.4 and 6 (good to fair condition). It should be noted that paved roads are those which are likely to receive preventive interventions such as periodic maintenance. However, pavement prevention is more cost-effective when the pavement is still effective, hence the need to include road sections with good to fair conditions in the road projects selection process.

- **Annual average of the daily traffic for light and heavy vehicles (AADT-LV and AADT-HV)**

The main types of traffic commonly considered in transportation engineering are normal traffic, induced traffic and diverted traffic. Normal traffic is defined by the number of vehicles traveling on an existing road in the absence of any expected new road project. Induced traffic stands for the number of vehicles attracted from other roads to the project road due to an increased local economic development caused by the implementation of the road project. Diverted traffic has to do with the number of vehicles diverted from alternative roads to the road project, all sharing the same origin and destination (Archondo-Callao, 2004a). Traffic data are generally derived from road traffic analysis, traffic volume and axle load surveys. However, for this study, it is the existing data of normal traffic for each road sections, expressed in terms of annual average daily traffic (AADT) for both the light and heavy vehicles, which was collected by the ministry of road infrastructure and the funder's consultant. A vehicle is considered heavy (AADT-HV) when motorized and topping a load greater than

3.5 tonnes, while a light vehicle (AADT-LV) carries a total load of less than 3.5 tonnes (Kerali et Odoki, 2006).

- **Weighted Life Cycle Cost of Vehicle Operation (WLCCVO)**

WLCCVO consists in vehicles operating costs (VOC) weighted by expected traffic over 20 years at a 4% growth traffic rate. The fuel, lubricant, oil change, spare parts, tire, maintenance, depreciation and crew costs of VOC all vary accordingly to geometric characteristics of the road (roughness, altitude, slope, etc.). In this study, WLCCVO was estimated using a model of road economic decision (RED-VOC HDM-4) developed by the World Bank (World Bank, 2006). RED-VOC HDM-4 is a module of the Road Economic Model (RED) using the Highway Design and Management model relationship for the vehicle operating cost estimate including the traffic characterization during dry and wet seasons independently, the budget constraint optimization and the multi-criteria analysis (World Bank, 2006).

- **Weighted Life Cycle Cost of Travel Time (WLCCTT)**

WLCCTT is produced by weighing the travel time and cost with the expected traffic over 20 years at a 4% growth traffic rate. In addition to road conditions (IRI), the estimated travel time considers both working and non-working time and time needed for transportation of goods. In this study, the cost of travel time was estimated using the World Bank's road user costs model (HDM-4 -RUC), considering the IRI value of sections. The inputs of the model originate from the World Bank tools file user costs study in Africa (World Bank, 2006).

- **Reduction of Users Life Cycle Costs (RULCC)**

RULCC is a major benefit for road projects. These costs include vehicles operating costs, travel time costs and accident costs (although not considered in this particular case) and were estimated by comparing the base alternative, without project, to the alternative, with project. For this study, RULCC was calculated using the model HDM-4 – RUC, assuming that with base alternative, the IRI values were those collected from the road agency. As for the alternative with the project, the IRI value is set to 2 m/km and results of either road construction or preventive interventions.

- **Population (POP)**

The population is related to demographics. However, the population encompasses issues stemmed from its characteristics and dynamics (size, density, gender, age, urban/rural migration, etc.), education, health, economic growth, agriculture and natural resources (ADB, 2003). In this study, the POP indicator is the number of inhabitants benefiting from the road within the road sections influence area.

- **Basic Social Service (BSS)**

Basic social services are essentially basic community infrastructure such as schools, markets, health centers, etc. Roads construction and preservation can provide better accessibility to such basic infrastructure by consistently allowing the transportation of goods and people between villages and provinces as well as facilitating local trade development. In this study, the BSS indicator was qualitatively assessed based on the number of basic infrastructure along the road sections.

- **Market (M)**

Markets are included in basic infrastructure but the experts found it relevant to add a market indicator that would consider only the number of agricultural markets crossed by the road sections in order to promote local agriculture. In this study, the indicator M was qualitatively determined based on the number of agricultural markets crossed by the road sections.

- **Processing Unit (PU)**

The UT indicator was chosen in order to promote the area with the highest agricultural potential. In this study, the indicator M was determined according to the processing units (factories, mills, etc.) near the road sections.

- **Ecologically Sensitive Area (ESA)**

Ecologically sensitive areas (ESA) are the critical area of the ecosystem protection composed of wetlands, protected areas, fauna and flora. In this study, the ESA indicator was determined based on sensitive areas crossed by the road sections.

- **Place of Water Passage (PWP)**

Water passages locations are watercourses in or near the influence area of the road project. They are crucial to consider because if the drainage of pavement becomes defective and generates a flood, the layers will be weakened and in some cases the road can completely be destroyed. In this study, the indicator PWP was determined based on the number of watercourses places near or crossed by road sections.

- **Water Source (WS)**

Water sources include standpipes, livestock waterers, water wells, ponds and any water retention structures located alongside and nearby the road sections. In this study, the indicator WS was determined based on the amount of water sources located near the road sections.

- **Erosion Area (EA)**

The erosion of soil occurs most often when the road's draining system is defective. Thus, road collapse can occur if some water is retained on the road and if there is no lateral drains to withstand heavy rainfall and flooding (USAID, 2014). In this section, the indicator EA was determined by considering the amount of erosion area near the road sections

Table 2.4 Selected indicators

Variable/indicator	Unit	Measurement	Data source	References
L	km	Quantitative	Consultant/MRI	(Haas et al., 2009);
IRI	m/km		Consultant/MRI	(COST, 2007);(PIARC,
AADT-LV	veh/h		Consultant/MRI	2004b); (PIARC, 2012);
AADT-HV	veh/h		Consultant/MRI	(Haas, Hudson et
WLCCVO	\$US/km		Calculated	Zaniewski,
WLCCTT	\$US/km		Calculated	1994c);(Kumar, 2014b);
RULCC	\$US/km		Calculated	(Amiril et al., 2014);
POP	Capita		Consultant	(Bhandari, Shahi et
BSS	n/a	Proxy	Consultant	Shrestha, 2016); (Mata et
M	n/a		Consultant	al., 2013); (Mazziotta et
PU	n/a		Consultant	Pareto, 2013); (Shen, Wu
ESA	n/a		Consultant	et Zhang, 2011); (Wirehn,
PWP	n/a		Consultant	Danielsson et Neset,
WS	n/a		Consultant	2015); (ADB,
EA	n/a		Consultant	2003);(BAFD, 2015);
			Consultant	(FAD, 2001); (Lantran,
			Consultant	Baillon et Pagès, 1994);
			Consultant	(MCC, 2007); (World
			Consultant	Bank, 2017)

The strengths and weaknesses of composite indicators are closely related to the quality of the underlying indicators. In order to maximize the final overall results' quality, the selection should be based on the relevance, accuracy, availability, accessibility, consistency and interpretability of the indicators (OECD, 2008). Choosing the set of indicators related to each dimension is based on the theoretical framework. However, the choice of these indicators is not definitive: it also relies on the type of data and the processing method of this data. For the purpose of this study, the indicators were selected based on criteria of coherence,

interpretability, accuracy, accessibility and assumptions of weighting methods. The accessibility implies the affordability, availability and accessibility of the road agency's data for analysts. The weighting method used in this study is PCA, for which the correlation is a fundamental assumption. The use of PCA to weight the indicators by analyzing indicators underlying structure can increase both accuracy and interpretability of final results. In addition, to meet this fundamental assumption, the selected indicators must show signs of a high correlation between one another. As Table 2.4 demonstrates, the consultant panel expert team and the ministry of the study area's road infrastructure (MRI) adopted two types of measurements for the road data collection in each section. The first one is the quantitative measurement of the technical indicators such as the length (L), the internal roughness index (IRI) and the traffic (AADT-LV and AADT-HV). The second one is the measurement of social and environmental indicators such as POP, BSS, M, PU, ESA, PWP, WS, EA, which is done by using a proxy measure. The latter defines as an indirect measure of the desired outcome, which is commonly used when a more direct measure isn't observable or available (GovEx, 2019). For instance, it may be difficult to attribute a unit of measure for a processing unit, but it is very well possible to enumerate the number of processing units along each side of road sections. The economic indicators were calculated based on certain assumptions, which are listed in the description of each indicator.

It must be mentioned either before, that means at the stage of indicators selection, or during the data collection, namely the social and environmental data, that the consultant expert panel was associated to other stakeholders through the regulatory process of public consultation. Such public consultations are essential in considering the needs and expectations in terms of participation as well as the priorities and objectives of stakeholders regarding road projects. As Appendix I (Annexe I) shows, the stakeholders gathered government authorities, communities and individuals affected by road projects, people or companies with commercial interests in the road projects industry, as well as the wider public and civil society.

2.6.3 Transformation of indicators

The SPSS (Statistical Package of Social Sciences) software was used to perform PCA. Measurements of indicators in primary scales are essential for multivariate statistical analysis using SPSS software. Primary scales encompass nominal, ordinal, interval and proportional scales (Malhotra, 2011). However, the PCA requires that indicators be measured in ordinal or interval scales. Therefore, the BSS, M, PU, ESA, PWP, WS and EA qualitative indicators of the nominal scale were transformed into ordinal scale using the Likert scale (featured in table 2.5)

Table 2.5 Transformation of indicators

Indicator	Ordinal scale	Priority	Description
BSS	3	High	The number of basic social services close to the section is greater than four.
	2	Medium	The number of basic social services close to the section is between two and four.
	1	Low	The number of basic social services close to the section is less than two.
M	3	High	The number of markets crossed by the section is greater than two.
	2	Medium	The number of markets crossed by the section is between one and two.
	1	Low	The section does not cross any market.
PU	3	High	The number of processing units close to the section is greater than two.
	2	Medium	The number of processing units close to the section is between one and two.
	1	Low	No processing units close to the section
ESA	1	High	Greater than or equal to one area
	2	Low	Zero area
LPE	1	Very high	Greater than three places
	2	High	Between two and three places
	3	Medium	one place
	4	Low	Zero place
WS	1	High	Greater than three sources
	2	Medium	Between two and three sources
	3	Low	one source
	4	Very low	Zero source
EA	1	High	Greater than three areas
	2	Medium	Between two and three areas
	3	Low	one area
	4	Very low	Zero area

2.6.4 Normalization of Indicators

All the selected indicators are heterogeneous because of the variations in their units and measurement scales. Therefore, it is important to establish an appropriate common comparison structure between them before applying PCA. In this study, the values of the selected indicators were normalized using z-score method, as expressed in Equation 2.1. The z-score normalization method consists in converting all indicators to the same scales according to normal distribution with mean 0 and standard deviation 1 (OECD, 2008).

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (2.1)$$

Where Z_{ij} is the normalized value of indicator j for project i , X_{ij} is the initial indicators value j for project i , μ_j is the mean value of indicator j and σ_j is the standard deviation of indicator j .

2.6.5 Correlation and signification

This study aims to develop RPFPI using PCA. However, the application of PCA requires the validation of certain hypotheses. The indicators must be quantitative, highly correlated, linear, normally distributed, and the sample size must be large enough. In this study, Kaiser-Meyer-Olkin adequacy (KMO) index and Barlett's test of sphericity (p-value) were used to confirm the hypotheses of PCA (Costello et Osborne, 2005; Kaiser et Rice, 1974). These hypotheses can only be confirmed if the KMO index is at least 0.5 and the p-value is no more than 5% (Malhotra, 2011). The confirmation of these hypotheses implies that PCA can be used as a weighting method and that its results are interpretable.

Regarding the size of data, there is no clear consensus. We do know, however, that using a large data size minimizes the probability of errors, maximizes the accuracy of the statistical probability evaluation and increases the generality of results (Osborne et Costello, 2004). Typically, the sample size is based on a good thumb rules. However, the analysts can rely on the current practice in factor analysis to choose the sample size, as shown in Table 2.6 (Costello et Osborne, 2005). In this study, the ratio of road projects to indicators is 3.33: 1. This ratio is

between the range 2:1 and 5:1, which is the most applied in the current factorial analysis studies.

Table 2.6: Current practice in factor analysis
Adapted from Costello et Osborne (2005)

Subject to item ratio	Percentage of studies (%)
2:1 or less	14.7
> 2:1, ≤ 5:1	25.8
> 5:1, ≤ 10:1	22.7
> 10:1, ≤ 20:1	15.4
> 20:1, ≤ 100:1	18.4
> 100:1	3.0

2.6.6 Weighting using PCA

The PCA was used for indicators weighting mainly because of its abilities to explore the underlying properties of data through the use of rigorous statistical technic and to confirm the multidimensionality of the phenomenon to be measured. In addition, PCA assigns different weights to each indicator, which is more appropriate and recommended than to arbitrary weigh each indicator individually (WDGPH, 2013).

2.6.6.1 A brief description of PCA

The PCA is a technic used for simplifying or reducing a large number of correlated quantitative indicators into a smaller size of uncorrelated indicators called *principal components*, which are linear combinations of the initial indicators. The principal components are partitions of the initial indicators' total variance. The first component, C_1 (Equation 2.2), is the linear combination of the initial indicators with the highest contribution to total variance. The second

uncorrelated principal component, C_2 (Equation 2.3), is set so that it counts for the second-highest contribution to total variance, and so on for the other components C_p (Equation 2.4) until the limit number p is reached (Jambu, 1991; Li et al., 2012; Malhotra, 2011; OECD, 2008; Pituch et Stevens, 2016).

$$C_1 = W_{11}Z_1 + W_{12}Z_2 + \dots + W_{1p}Z_p \quad (2.2)$$

$$C_2 = W_{21}Z_1 + W_{22}Z_2 + \dots + W_{2p}Z_p \quad (2.3)$$

$$C_p = W_{n1}Z_1 + W_{n2}Z_2 + \dots + W_{pp}Z_p \quad (2.4)$$

While C_1 , C_2 and C_p are the principal components retained, p is the number of principal components retained constituting the greater part of initial normalized indicators total variance Z_1 , Z_2 and Z_p ; n is the number of initial indicators; and W_{11} , W_{21} and W_{n1} are all weighting coefficients or factorial scores. The establishment of a matrix in which $W_1^T W_1 = 1$, with $W_1 = W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1p}$ makes the C_1 variance the higher eigenvalue of sample covariance matrix. Therefore, the highest eigenvalue of eigenvector matrix amounts to the factorial score of C_1 , and so on, is for C_n . In this case, SPSS were used to perform the PCA.

2.6.6.2 Number of principal components to be retained and principal components rotation

The Kaiser criterion, the explained variance and the scree plot are commonly used to choose the number of principal components to be retained. For this study, however, only the first two criteria were used. The Kaiser criterion suggests retaining as principal components all the components whose eigenvalues are greater than or equal to 1 (OECD, 2008). According to the explained variance criterion, the components that contribute for more than 60% to the total variance are considered as principal components (Malhotra, 2011).

A rotation of the retained principal components helps the interpretation of the PCA results. In this study, varimax rotation was performed after the extraction of principal components. Varimax is an orthogonal rotation method which minimizes the number of indicators highly

correlated with each of the principal components to simplify the interpretation of the retained principal components (Pituch et Stevens, 2016). The correlation coefficient between principal components and the initial indicators after rotation is named loading.

2.6.6.3 Selection of explicative indicators and determination of indicators

Explicative indicators are initial indicators with higher loading after principal components rotation (Malhotra, 2011). The rules for selecting explicative indicators are based on empirical considerations and may be adjusted accordingly to the analysis' goal. In this study, the loading of indicators equals to or is greater than 0.5, after varimax rotation is considered an explicative indicator.

The weights deliver information on each indicator's influence in the composition of RFPI. The weight of each indicator was determined by calculating the product of the explicative indicators' factorial score (weighting coefficient of explicative indicators) for each principal component after rotation, as well as its variance (Equations 2.5 and 2.6).

$$N_p = \frac{V_p}{\sum_{n=1}^p V_p}; p < n \text{ et } \forall j \quad (2.5)$$

$$A_j = W_{jp} N_p \quad (2.6)$$

Where A_j is the weight of indicator j ; n is the number of indicators; p is the number of retained principal components; j is the number of explicative indicators; W_{jp} is the weight coefficient of explicative indicator j of principal component p ; N_p is a proportion of normalized principal components explained variance; and V_p is the proportion of principal components p 's explained variance.

2.6.7 Aggregation and determination of RFPI

2.6.7.1 Aggregation and total scores of projects

Through aggregation, we combine indicators and their weights using linear or geometric methods in order to determine the total score of each project. In this study, linear aggregation was chosen since it was assumed that the total scores of projects were proportional to the weight of indicators and that the indicators could balance each other out. Equation 2.7 was used to determine each project's total score.

$$IC_i = \sum_{j=1}^n A_j Z_{ij} \quad (2.7)$$

Where IC_i is the total score of projects i , A_j is the weight of indicator j and Z_{ij} is the normalized value of indicator j for project i .

2.6.7.2 Determination of RFPI

The RFPI was established by standardizing the total score from 0 to 100. Equation 2.8 was used in the RFPI establishment process.

$$RFPI_i = \frac{IC_i - IC_{i\min}}{IC_i - IC_{i\max}} \times 100 \quad (2.8)$$

Where $IPFR_i$ is the road funding priority index of project i ; IC_i is the total score of projects i ; $IC_{i\min}$ is the minimum total score of projects i ; and $IC_{i\max}$ is the maximum total score of projects i .

2.7 Results and discussion

2.7.1 Limitations of study

The development methodology of the Road Funding Priority Index (RFPI) was adapted from the main stages of the composite indicators construction described in the Organization for Economic Co-operation and development handbook, which are the development of a theoretical framework, the selection of variables, the imputation of missing data, the multivariate analysis, the normalization of data as well as the uncertainty and sensitivity analysis (OECD, 2008). This study, however, is limited in potential. In fact, the step of uncertainty and sensitivity analysis were not included in this study. The purpose of uncertainty analysis is to check the robustness of the composite index ranks, while the sensitivity analysis disintegrates the uncertainty in order to determine which stage of the composite construction process that most influenced the variability of the index ranks. (Tate, 2012). This means that the robustness of the RFPI and the stage of construction that has the greatest impact on the variability of road projects ranks due to the uncertainty was not considered in this study. However, the future research will be focused on the uncertainty and sensitivity of the Road Funding Priority Index (RFPI) by considering the uncertainty stems from the choice of the methods of each stage of the RFPI development such as the selection, the normalization, the weighting and the aggregation of indicators. Several methods are applicable to each construction step of the index. This requires decision-making on the most relevant methods to be used, which introduces uncertainties into the study. For example, two methods can be used for the step normalization such as standardization (z-scores) and Min-Max, three methods for the step of weighting such as principal component analysis, equal weights and analytic hierarchy process (AHP), and two methods for the step aggregation such as additive aggregation methods and geometric aggregation.

2.7.2 Correlation of indicators

The KMO index and Bartlett's test of sphericity are common criteria used to check the degree of correlation and the multicollinearity of indicators. As featured in table 2.7 , the KMO index

is 0.637, which is greater than 0.5 (Malhotra, 2011). The null hypothesis is rejected since the Bartlett's sphericity test gives a chi-square of 464.946 with 6 degrees of freedom significant at 5% (p-value less than 5%). We can therefore agree that PCA is appropriate for this study. Some analysts recommend the application of PCA only in cases where the KMO is at least 0.6 (Antony et Rao, 2007). This hypothesis is satisfied with KMO index equal to 0.637. In addition to the correlation and multicollinearity, all the indicators of this study were normalized to satisfy the quantitative data requirement of PCA. The sample of this study was composed of 50 road projects and 15 indicators, all of which the ratios between the number of road projects and the number of indicators were greater than 3:1, as suggested by (OECD, 2008). Hence, the size requirement is satisfied as well. We may conclude that all the hypotheses of PCA are satisfied and the results, interpretable.

Table 2.7 KMO index and Bartlett's sphericity test

KMO Measure of sampling adequacy		0,637
Bartlett's test of sphericity	Chi-square	464.976
	Degree of freedom	105
	Significance	0.000

2.7.3 Number of retained principal components and explicative indicators

The interpretation of the PCA results begins by selecting the number of principal components to be retained. Given that there are as many components as indicators, some criteria were applied to extract the number of principal components relevant to the study. The table 2.8 shows the results of components extraction with varimax rotation method to facilitate the interpretation. The first five (5) components stand for the principal ones accordingly to the Kaiser criterion, which requires that their eigenvalues be greater than 1. According to this criterion, an eigenvalue depicts the total variance explained by each component, and each indicator has a variance of 1 due to the normalization. Therefore, the components with variances fewer than 1 are only unique indicators. The contribution to the total variance of

principal components PC1, PC2, PC3, PC4 and PC5 is respectively 21.75%, 17%, 12.79%, 11.65% and 10.45 %. Thus, the first five (5) components contribute to 73.64% of the total variance, which is greater than 60% of total variance according to explained variance criteria (Malhotra, 2011). Hence, this criterion confirms that the first five (5) components can be considered as principal ones. According to this second criterion, the determination of the number of principal components is based on a threshold value (percentage), the sum of the fractions of the explained variances (expressed as a percentage) of the components must reach. This threshold depends on the purpose of the analysis. As a rule of thumb and considering best practices of PCA, the threshold is set at 60 % (Malhotra, 2011). It is very rare that the number of retained principal components equals the number of dimensions specified in the theoretical framework: the number of principal components to be retained is solely based on statistical technic while the number of dimensions depends on multidisciplinary experts and decision-makers' considerations. However, based on the highest loading values form varimax rotation (Table 2. 9) of each the principal components, **1 can be described as economic, 2 as environmental, 4 as technical, 3 and 5 as social**. However, based on the highest loading values form varimax rotation (Table 2.9) of each the principal components, 1 and 4 can be described as technical, 2 as environmental and 3 and 5 as social. In addition, finding various principal components gives clear indication on the multidimensionality of measured phenomenon. Therefore, the use of a single principal component for weighting of indicators is not recommended.

Table 2.8 Extraction of principal components

Component	Initial eigenvalues			Extraction sums of squared loadings			Rotation sums of squared loadings		
	Total	% of var	Cvar %	Total	% of var	Cvar %	Total	% of var	Cvar %
PC1	4.290	28.599	28.599	4.290	28.599	28.599	3.263	21.750	21.750
PC2	2.452	16.347	44.946	2.452	16.347	44.946	2.550	16.999	38.750
PC3	1.863	12.421	57.367	1.863	12.421	57.367	1.918	12.789	51.538
PC4	1.409	9.396	66.762	1.409	9.396	66.762	1.748	11.650	63.188
PC5	1.031	6.873	73.635	1.031	6.873	73.635	1.567	10.447	73.635

Var: variance

Cvar : cumulative of variance

Table 2.9 Loading's matrix: rotation varimax

Indicator	Components				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
L	-0.226	-0.229	-0.060	0.262	<u>0.754</u>
IRI	-0.308	<u>0.627</u>	0.168	-0.502	0.074
AADT-LV	<u>0.875</u>	-0.094	0.208	0.240	0.026
AADT-HV	0.319	-0.163	-0.058	<u>0.873</u>	-0.009
WLCCVO	<u>0.905</u>	0.035	0.269	0.332	0.041
WLCCTT	0.495	0.129	0.425	<u>0.595</u>	0.287
RULCC	0.256	<u>0.641</u>	0.515	-0.029	0.200
POP	0.205	0.133	0.030	-0.148	<u>0.842</u>
BSS	0.244	<u>-0.647</u>	0.292	0.012	0.057
M	-0.075	-0.178	<u>0.842</u>	-0.091	0.133
PU	0.192	-0.122	<u>0.634</u>	0.081	-0.225
ESA	-0.047	<u>0.733</u>	-0.032	-0.071	0.008
PWP	-0.452	<u>0.531</u>	-0.263	0.304	-0.284
WS	<u>-0.844</u>	0.021	0.158	-0.086	0.051
EA	0.239	<u>0.581</u>	-0.176	-0.045	-0.060

The explicative indicators are initial indicators whose loading is greater than 0.5. As a reminder, loadings are correlation coefficients between the initial indicators and each principal component, and their values navigate between 1 and -1. The loading matrix, as featured in Table 2.9, shows the explicative indicators (italic, bold and underlined value) whose loadings are greater than 0.5 in absolute value. Some researchers recommend to the consideration of the initial indicators as explicative indicators with a loading greater than or equal to 0.8 (Doukas et al., 2012; Keeley et McDonald, 2015; Ouyang et al., 2006; Shrestha et Kazama, 2007). However, according to Freudenberg (2003); Jambu (1991), the criterion of loading at least equal to 0.5 is the mostly recommended. It should be mentioned that when applying varimax

rotation, each explicative indicator exclusively belongs to one principal component; this implies that a principal component might have several explicative indicators but that the five components can never have the same explicative indicators simultaneously. It is understandable that interpretation and determination of weighing coefficient can become complex tasks. Thus, as presented in Table 2.9, the explicative indicators of the principal component PC1 (economic) are the average annual daily traffic for light vehicles (AADT-LV), the weighted life cycle cost of the vehicle operation (WLCCVO) and the water source (WS); the explicative indicators of the principal component PC2 (environmental) are the international roughness index (IRI), the reduction of the user's life cycle costs (RULCC), the basic social services (BSS), the ecologically sensitive area (ESA) and the place of water passage (PWP); the explicative indicators of the principal component PC3 (social) are the market (M) and the processing unit (PU); the explicative indicators of the principal component PC4(technical) are the average annual daily traffic for heavy vehicles (AADT-HV) and the weighting life cycle cost of travel time (WLCCTT); and, finally, the explicative indicators of the principal component PC5 (social) are the length of the road section (L) and the population served by the road section (POP).

2.7.4 Weighting coefficients

After identifying the explicative indicators of Table 2.9, the weighting coefficients or factorial scores of each principal component (*italic, bold and underlined value*) were identified in a matrix of components coefficients, which are featured in Table 2.10. Thus, each principal component can be estimated by the equation 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13.

$$PC_1 = 0.250 Z_{AADT-LV} + 0.250 Z_{WLCCVO} - 0.370 Z_{WS} \quad (2.9)$$

$$PC_2 = 0.215 Z_{IRI} + 0.276 Z_{RULCC} - 0.255 Z_{BSS} + 0.293 Z_{ESA} + 0.237 Z_{PWP} + 0.228 Z_{EA} \quad (2.10)$$

$$PC_3 = 0.493 Z_M + 0.374 Z_{PU} \quad (2.11)$$

$$PC_4 = 0.554 Z_{AADT-HV} + 0.358 Z_{WLCCTT} \quad (2.12)$$

$$PC_5 = 0.507 Z_L + 0.553 Z_{POP} \quad (2.13)$$

The purpose of this study is to establish a composite indicator, therefore, these weighting coefficients of explicative indicators of each component is combined with the corresponding explained variance of each component to determine the weight of the indicators.

Table 2.10 Components weighting coefficient matrix

Indicators	Components				
	PC1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5
L	-0.175	-0.068	-0.061	0.220	<u>0.507</u>
IRI	-0.032	<u>0.215</u>	0.125	-0.228	0.050
AADT-LV	<u>0.250</u>	-0.009	-0.007	-0.048	-0.029
AADT-HV	-0.078	0.013	-0.027	<u>0.554</u>	-0.020
WLCCVO	<u>0.297</u>	0.054	0.043	0.045	-0.025
WLCCTT	-0.014	0.122	0.195	<u>0.358</u>	0.129
RULCC	0.032	<u>0.276</u>	0.266	0.006	0.079
POP	0.102	0.045	-0.103	-0.161	<u>0.553</u>
BSS	0.054	<u>-0.255</u>	0.113	-0.094	0.001
M	-0.146	-0.056	<u>0.493</u>	-0.008	0.009
PU	-0.033	-0.024	<u>0.374</u>	0.048	-0.217
ESA	0.003	<u>0.293</u>	0.004	0.025	0.013
PWP	-0.225	<u>0.237</u>	-0.021	0.380	-0.153
WS	<u>-0.370</u>	0.005	0.218	0.166	0.041
EA	0.145	<u>0.228</u>	-0.124	-0.053	-0.025

2.7.5 Weights of indicators

The weight of each indicator represents its relative importance compared to the other indicators in the construction of the RFPI. Thus, positive indicators with the higher weights influence the RFPI more than those with lower weights. For example, AADT-HV has the highest weight, therefore it will influence more the value of RFPI of a given project than lowest weight of IRI

(0.049). The individual contributions of the five (5) principal components to the total variance are presented in Table 2. 8. As then depicted in table 2.11, these variances are normalized by using Equation 5 (% of total variance of each principal component divided by the sum of % of total variances of principal components), and the weight presented in Table 2.12 is determined by using Equation 6 (weighting coefficient of an explicative indicator of a principal component multiply by the normalized value of % of total variance corresponding of this principal component). For an example the weight of the indicator length (L) is 0.507 (Table 2.10) * 0.3 (Table 2.12) = 0.071

Researchers as Antony et Rao (2007) and Krishnan (2010) have already used a similar procedure to determine indicators' weights for the establishment of the Human Development Index (HDI) and Human Poverty Index (HPI) of Indian states: they concluded that this method was relevant and appropriate in assessing the importance of indicators.

Table 2.11 Normalized explained principal components

Normalized principal components					
PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	% of total variance
0.30	0.23	0.17	0.16	0.14	1.00

Table 2.12 Weights of indicators

Indicator	Weight
L	0.071
IRI	0.049
AADT-LV	0.075
AADT-HV	0.089
WLCCVO	0.089
WLCCTT	0.057
RULCC	0.063
POP	0.077
BSS	-0.059
M	0.084
PU	0.064
ESA	0.067
PEP	0.055
WS	-0.111
EA	0.052

2.7.6 Total scores of projects

The projects' scores, which is to say the linear combination of indicators weights and normalized indicator values, were determined by using Equation 2.7. The total of projects' scores is proportional to the weight of the indicators: consequently, the most positive and high weights of indicators make for the highest projects' total scores. On the contrary, negative weights of indicators lower the projects' total scores. As shown in Table 2.13, the weights of traffic indicators (AADT-LV and AADT-HV), of the population indicator (POP), of the vehicle operating costs (CPCVEV) and of the length indicator (L) are all higher (> 0.07). They will therefore positively impact the total scores of the projects. The weights of the IRI, WLCCTT, RULCC, PU, ESA, PEP and EA indicators are defined as medium and positive (between 0.05 and 0.07), thus they will have an average positive influence on the total scores. Since the weights of BSS and WS are negative, they will significantly reduce the total scores of projects. In other studies, indicators with very low weights are excluded from the evaluation of total scores of projects (Farhan et al., 2017). In this particular study, the difference between

the weights of indicators not being considerably high, all of them were used to determine the projects' total scores.

2.7.7 RFPI and road projects ranking

The RFPI of each project is simply a standardization of its total score generated by using Equation 2.8. In Table 2.14, projects are grouped by their priority levels. Similarly, Figures 2.3, 2.4 and 2.5 list the road projects ranked by priority levels. In these diagrams, the letter A stands for construction projects and the letter P for preservation projects. Thus, the very high to medium priority projects are featured in Figure 2.3, the low-priority projects in Figure 2.4 and very low priority projects in Figure 2.5. It should be stressed upon that the RFPI doesn't favor a specific type of project, either construction or preservation, but rather projects with a high sum of performances in all four dimensions, which is to say technical, economic, social and environmental. As pictured in Figure 2.4, the preservation project P1 (RFPI = 100) is the highest priority project, followed by the construction project A10 (RFPI = 82.24 %) and the preservation project P2 (RFPI = 75.73 %).

Table 2.13 Road projects priority levels

Priority level	Range of RFPI
Very high	85-100
High	60-84
Medium	40-59
Low	15-39
Very low	0-14

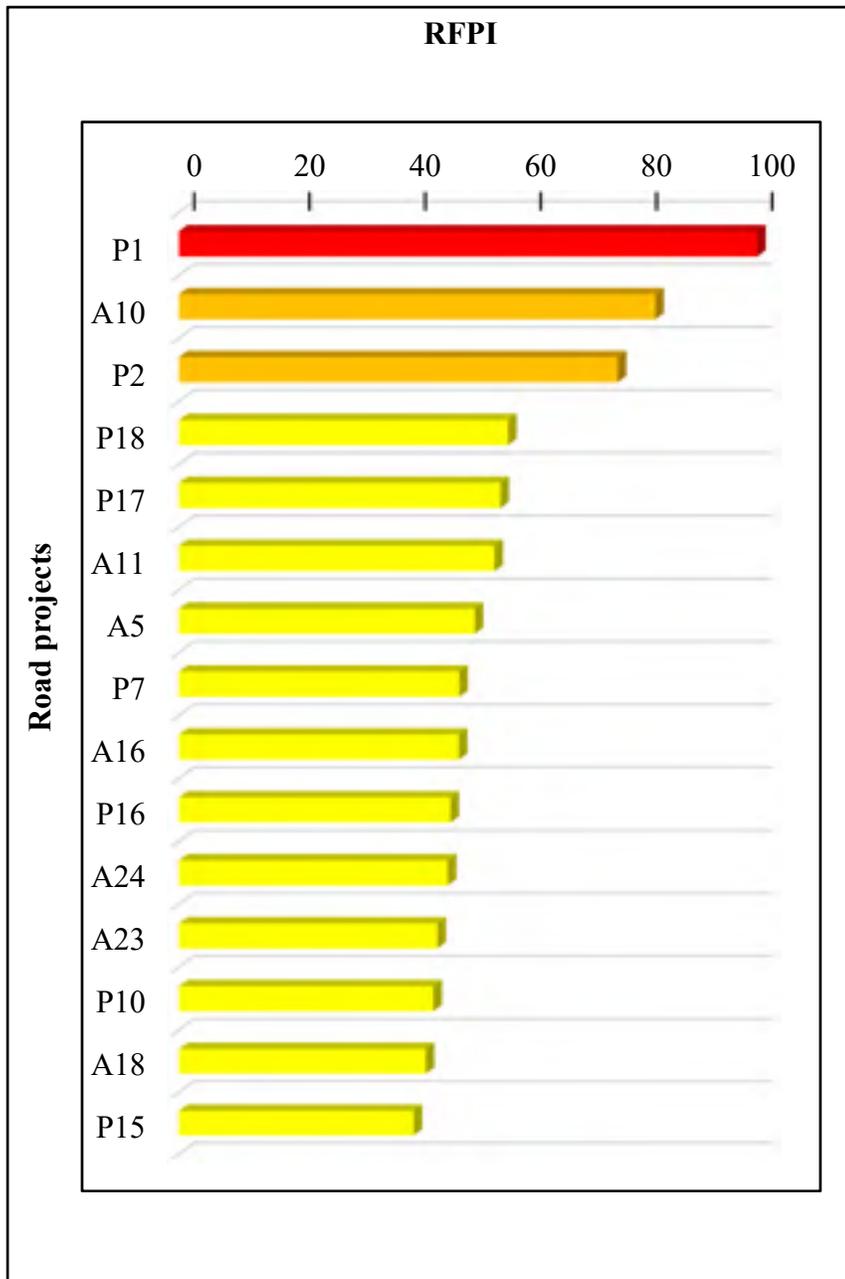


Figure 2.3 RFPI of projects - very high to medium

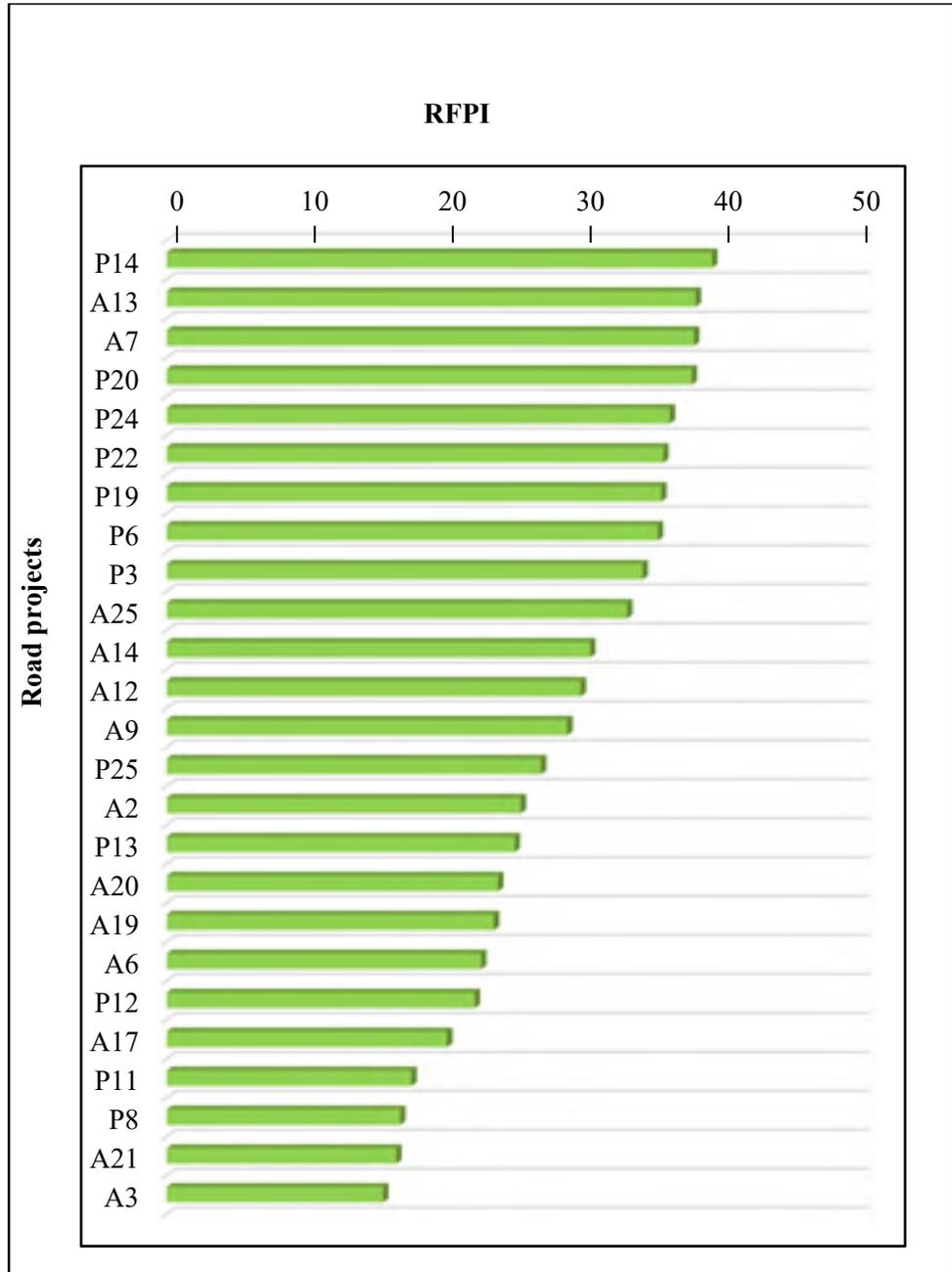


Figure 2.4 RFPI of projects - low

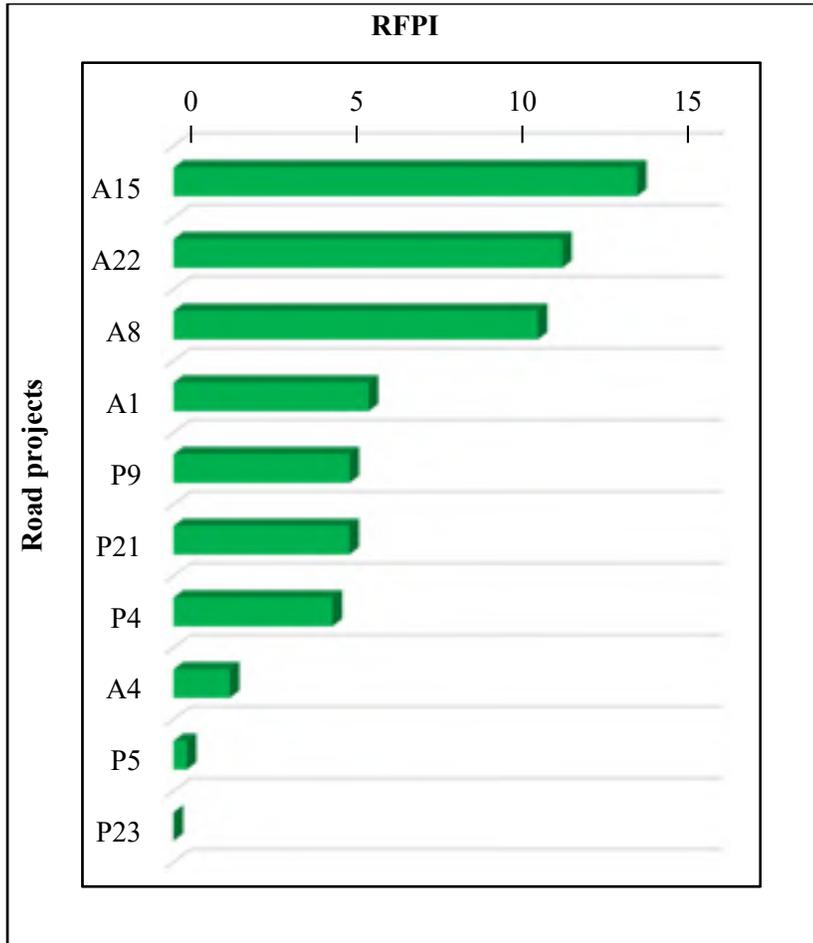


Figure 2.5 RFPI of projects - very low

Figure 2.6 shows the partitions of projects by priority levels and by types of projects (construction or preservation). The diagram reveals that by considering partitions and lengths of road projects, the very high priority projects cover 2% and 9.77 km (P1); the high-priority projects, 4% and 48.6 km (A10 and P2); the medium priority projects, 24% and 487.84 km (P18, P17, A11, A5, P7, A16, P16, A24, A23, A18 and P15); the low-priority projects, 50% and 846 km (P14, A13, A7, P20, P24, P22, P1, P6, P3, A25, A14, A12, A9, P25, A2, P13, A20, A19, A6, P12, A17, P11, P8 and A21); and the very low priority projects, 20% and 149 km (A15, A22, A8, A1, P9, P21, P4, A4, P5 and P23). In addition, Figure 2.7 depicts how the very high to medium priority construction and preservation projects both cover partitions of 47% and 53% and respective lengths of 274.76 km and 297.85 km (Chart A of Figure 2.7).

Low priority projects account for 52% of all construction projects and 48% of preservation projects, with respectively 393.36 km and 452.82 km (Chart B of Figure 2.7). As for the very low priority projects, half are construction projects and the other half belong to preservation projects (Chart C of figure 2.7).

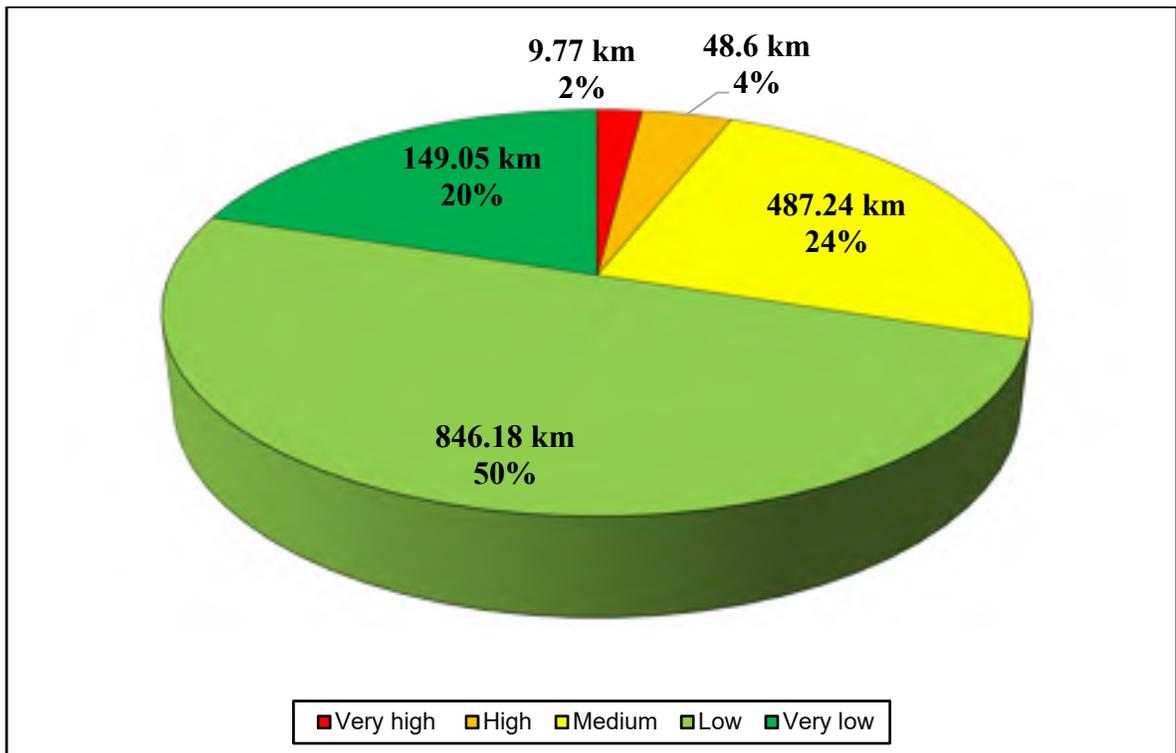


Figure 2.6 Partition by priority level

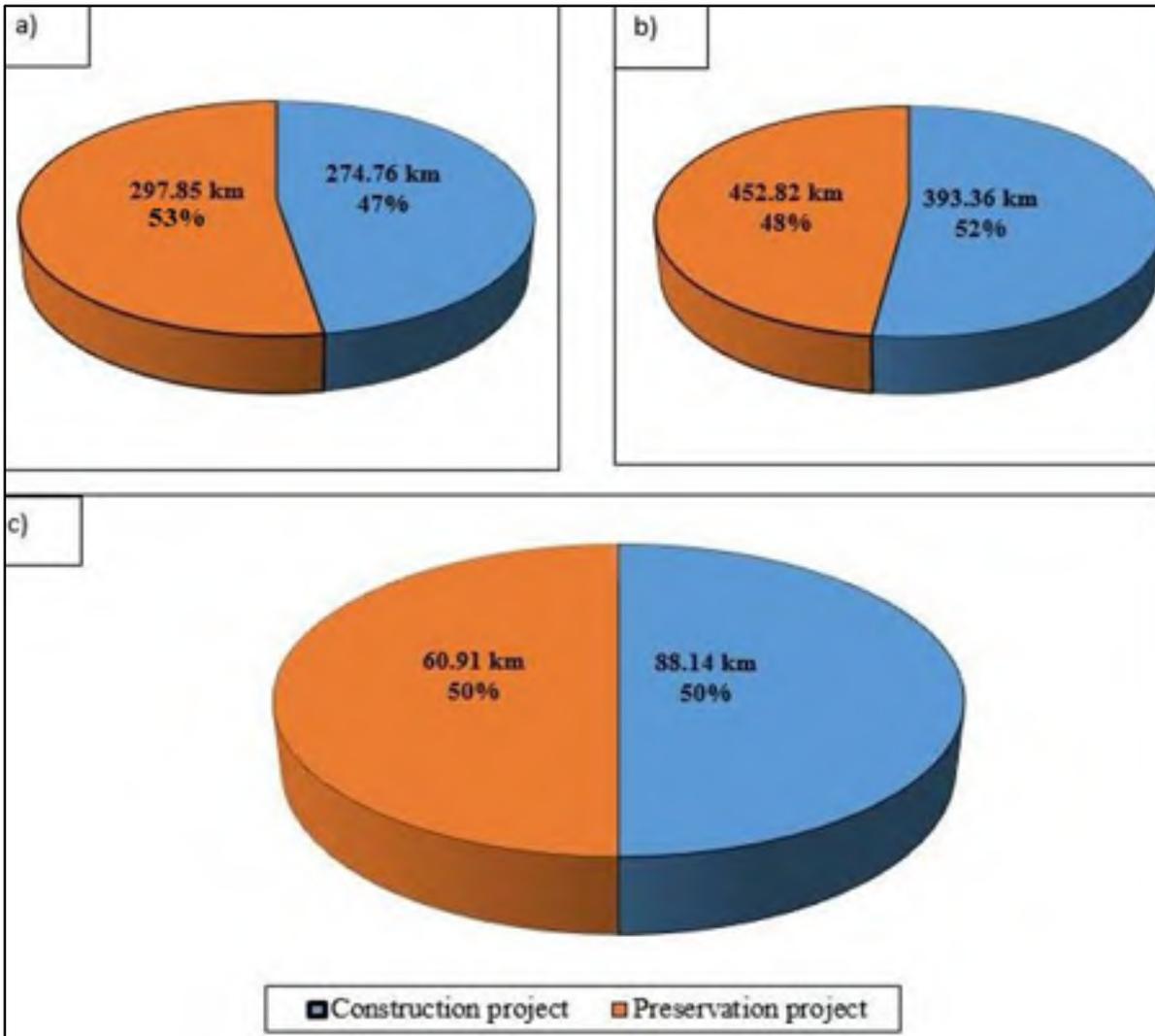


Figure 2.7 Partitions of road projects

- a) Partition of very high to medium priority projects
- b) Partition of low-priority projects
- c) Partition of very low priority projects

It should be noted that the RFPI is a decision-making support tool and its purpose is not to decide on behalf of decision makers. However, developing countries' road agencies and funders financing the majority of road projects can screen or select preliminary high-priority road projects eligible for funding according to their policies and goals based on the reliable mathematical tool that is RFPI. These high-priority projects will then be investigated to get

intensive input for technical and economic analysis with HDM-4. The selection of high-priority road projects based on RFPI significantly reduce the time-consuming and wide expenditure required to conduct a detailed evaluation of the entire roads network. This approach distances itself from the more traditional one, which cared to prioritize funding for construction projects without any reliable evidence, often for the underlying political prestige, and in doing so neglecting road preservation projects or only considering them as last resort. As shown in Figure 2.8, the first ten (10) projects were defined as high-priority road projects. They totalized a length of 322.63 km, including six (6) preservation projects with a length of 240.73 km and four (4) construction projects with a length of 81.9 km. Assuming that it would cost 576,204 USD/km to upgrade a gravel road to a double-surface dressing and that the unit cost of road preservation is 43,460 USD/km, the budget of these high-priority road projects reaches approximately 57.7 million USD with a shared budget of 47.2 million USD for construction projects and 10.5 million USD for preventive work. This unit estimated cost was fetched in the World Bank's Africa Road Project Cost Database (World Bank, 2008).

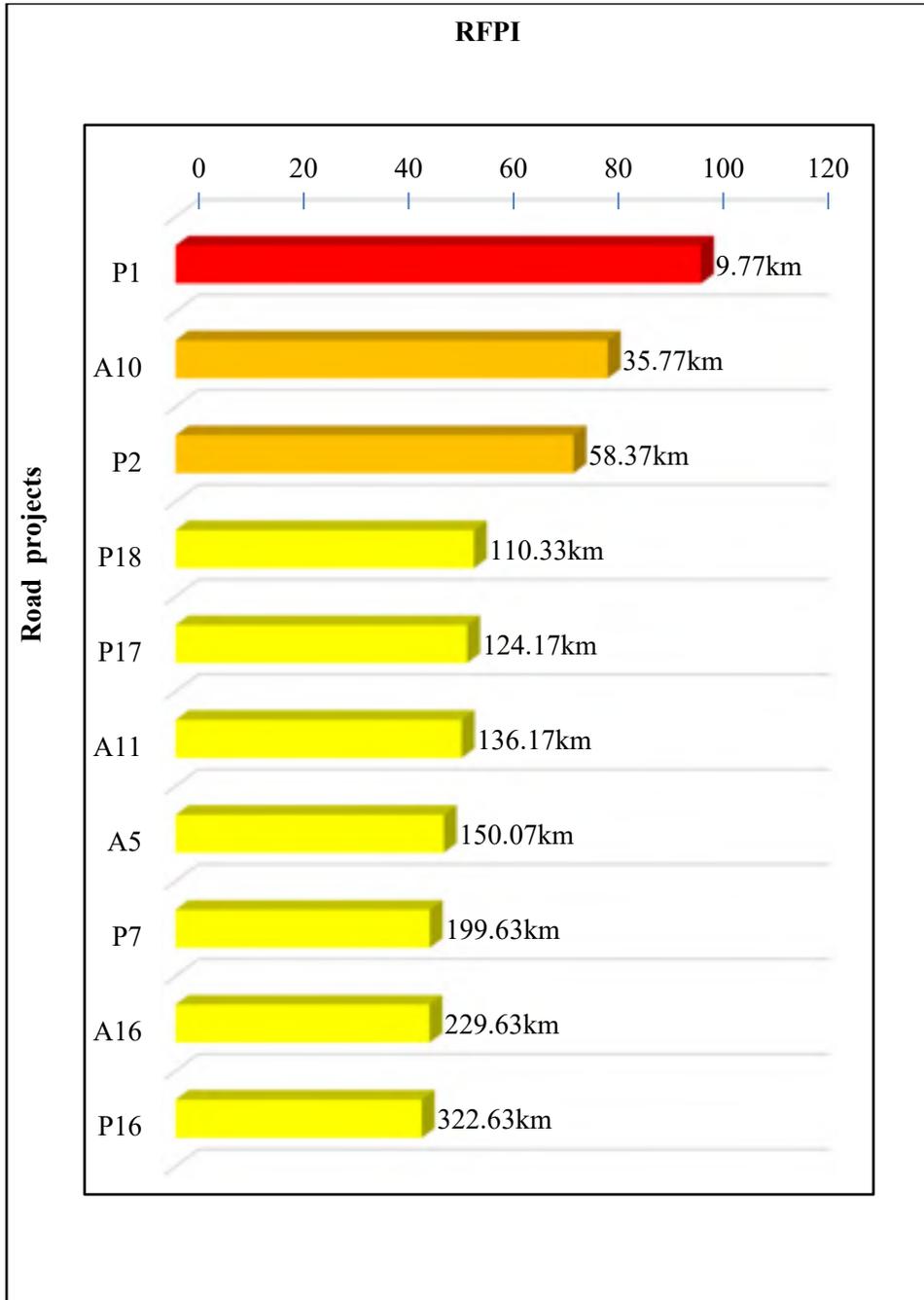


Figure 2.8 High-priority projects

2.8 Conclusion and recommendations

When considering the technical, economic, social and environmental aspects, the assessment of road projects becomes a multidimensional phenomenon. The Road Funding Priority Index (RFPI) developed in this article is based on the composite index-construction stages which uses PCA for weighting indicators. The RFPI is a decision-making support tool and its main purpose is to help select high-priority road construction and preservation projects for West Africa Road agencies. Road construction and maintenance projects are ranked in descending order according to the values of the RFPI. Since funds allocated to both types of projects (construction and maintenance) are generally very limited in West Africa countries, the funding is generally granted in priority to road projects with the highest RFPI values until the exhausting of the planned earmarked for this issue. It is also possible for decision makers and road managers to set a RPFPI threshold value and to summarily determine the realization costs of all road sections or projects above this threshold in order to establish an approximate budget.

Although the PCA may be used in order to choose the right weights of indicators or to develop the RFPI, the analysts must pay attention to its fundamental assumptions. The KMO adequacy index and Bartlett's sphericity test justify the PCA applicability and the interpretation of its results. The latter show evidence of the measured phenomenon's multidimensionality: five (5) main components were retained, accounting a total variance of 75.635%. The RFPIs allowed a selection of the top ten (10) highest priority road projects, with priority levels ranging from very high to medium.

The results also indicate that as much as we must preserve roads, we also need to build new ones if, of course, they are justified by high RFPIs. Preservation project P1, being the highest priority project with a RFPI reaching 100, demonstrates the importance of preserving existing roads, which is not being done for a majority of West Africa Road agencies. Moreover, if funders and road agencies face scarce budgets, which is still a reality in many cases, it is recommended that they select high-priority sections or road projects based on RFPI developed in this article, using available and accessible data from road agencies, rather than proceeding

with further intensive investigation to obtain more detailed projects data in order to conduct traditional cost-benefit analysis. Because this study does not take into consideration sensitivity and uncertainty analysis, it is essential to do so while determining the RFPI variation range for each project. However, if the various stakeholders reach a consensus regarding selection, normalization and weighting methods, the developed tool will gain in efficiency. Implementing the RFPI will be more profitable if road agencies or the West African governments replace the actual cycle of building-neglecting-rebuilding by a more innovative vision which would promote building-maintenance and rehabilitating-maintaining.

CHAPITRE 3

MÉTHODE RATIONNELLE INTÉGRÉE DE DIMENSIONNEMENT ET D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE BITUMAGE DE ROUTE NON REVÊTUES DE « HAUTE PRIORITÉ » INCLUANT LES ASPECTS SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Kaba Emmanuel Kossè¹, Gabriel J. Assaf²

Département de génie de la construction, École de Technologie Supérieure,

1100, Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis en juin 2019 à la revue les « Annales du Bâtiment et des Travaux Publics »

3.1 Résumé

Cet article présente une méthode rationnelle intégrée permettant la sélection d'une intervention de bitumage adaptée pour des routes non revêtues dites de « haute priorité », c'est-à-dire avec un indice de priorité de financement des routes important. Le choix de l'intervention optimale est basé sur la méthode de dimensionnement mécaniste-empirique, l'analyse économique et la prise en compte des facteurs sociaux et environnementaux. Les jalons de la méthode intégrée introduite dans cet article sont la sélection des tronçons en fonction de l'indice de priorité de financement des routes (IPFR), la collecte des données pertinentes, le dimensionnement, la configuration et le calage du logiciel HDM-4, l'analyse économique à l'aide de ce logiciel, l'analyse de la sensibilité de la simulation et l'intégration des aspects sociaux et environnementaux et enfin le choix de la meilleure option de bitumage. La méthode démontre que l'option de bitumage en enduit superficiel bicouche de 2016 des routes sélectionnées en prenant en compte exclusivement le niveau de priorité économique constitue l'option optimale de reclassement. Cependant, l'option de bitumage en enrobé dense de 2016 est la plus recommandée en intégrant les aspects sociaux et environnementaux dans l'analyse technico-économique. Les résultats de l'étude de cas réalisée sur quatre routes non revêtues indiquent que la méthode développée est efficace pour la prise en compte des aspects techniques, économiques, sociaux et environnementaux dans les projets de bitumage en Afrique subsaharienne.

3.2 Introduction

Les réseaux routiers des pays en développement et plus particulièrement ceux des régions rurales d'Afrique subsaharienne sont en majorité composés de routes non revêtues, couramment appelées « routes en terre ». En effet, environ 83 % des routes classifiées des réseaux routiers des pays de l'Afrique subsaharienne sont non revêtues (Ken, 2011). Le développement du réseau routier requiert la construction de nouvelles routes, la réhabilitation et l'entretien des routes existantes, en particulier dans le contexte de l'Afrique subsaharienne qui nécessite des interventions modifiant les classes de surface des routes non revêtues existantes (Odoki et Kerali, 2000b). Le bitumage est défini comme un reclassement des routes non revêtues en routes revêtues. Les couches de surface sont en enduit superficiel (ES) ou en enrobé bitumineux (EB). En Afrique de l'Ouest, les routes non revêtues sont très souvent construites en graveleux latéritiques (GL) et sont très sensibles aux aléas environnementaux. Ces routes ont tendance à devenir impraticables pendant les saisons des pluies, restreignant ainsi la mobilité des communautés rurales (Done, Ford et Edwards, 2001). Cependant, la décision de bitumer ou de modifier la classe de surface d'une route en GL dépend de plusieurs facteurs tels que l'état de la surface existante, la capacité portante de la chaussée, le trafic, la qualité et la disponibilité des matériaux de construction, la géométrie de la route et les conditions climatiques locales (Done, Ford et Edwards, 2001; TRL, 2000). La majorité des facteurs cités ci-dessus relèvent de la performance technique des routes et la justification d'une intervention sur une route existante ne peut se faire sans la prise en compte des facteurs économiques, environnementaux et sociaux.

D'autres méthodes intégrées ont été déjà développées pour le dimensionnement et l'évaluation économique des routes, telles que l'approche rationnelle de dimensionnement utilisant les principes de cycle de vie pour les pays tropicaux développés par Koranteng-Yorke, Ghataora et Odoki (2014). Cette approche a permis l'application de la méthode de dimensionnement mécaniste-empirique pour dimensionner soixante (60) structures-types de chaussées et en sélectionner trente-trois (33) pour une évaluation économique avec le logiciel Highway design and Management (HDM-4). Cependant, l'approche ne considère pas les aspects sociaux et

environnementaux de la zone d'étude et le choix des différentes structures-types de chaussées n'est pas basé sur un catalogue de structures de chaussées d'un guide de référence de dimensionnement des routes pour les pays tropicaux tel que le guide du Transport Research Laboratory (TRL, 1993a). Adiguna, Dewanti et Odoki (2017a), dans leurs travaux de recherches, se sont basés sur l'analyse multicritère (AMC) pour intégrer les aspects sociaux et environnementaux dans le cadre de l'établissement d'un programme pluriannuel de l'entretien routier sous une contrainte budgétaire. Les résultats de leurs travaux de recherche ont permis d'inclure, outre les paramètres techniques, des paramètres économiques, sociaux et environnementaux dans la programmation des travaux de préservation des chaussées et d'en déduire le budget adéquat. Bien que leur méthode soit pertinente, elle a été développée pour la gestion de l'entretien routier dont certains aspects sont différents des projets de bitumage des routes. Par conséquent, il est donc adéquat de l'ajuster pour sélectionner l'intervention optimale de bitumage des routes.

Dans la présente étude, l'objectif est le développement d'une méthode rationnelle intégrée de dimensionnement des chaussées et d'évaluation économique intégrant les aspects sociaux et environnementaux des tronçons de route situés en Afrique de l'Ouest. Les principaux intrants de cette étude sont issus d'investigations détaillées et approfondies sur le terrain. Cette méthode intégrée a permis de sélectionner la meilleure option de bitumage de telle sorte qu'elle soit techniquement fiable, économiquement viable, avec une faible pollution de l'air et répondant aux besoins sociaux des communautés rurales. Une revue de littérature approfondie montre qu'il existe très peu d'études combinant de manière aussi détaillée le dimensionnement mécaniste empirique des chaussées, l'analyse économique et l'intégration des facteurs sociaux et environnementaux pour l'évaluation des projets de bitumage des routes dans le contexte des pays de l'UEMOA (Union Économique et Monétaire Ouest Africaine), d'où la pertinence du présent article.

Cet article présente d'abord la revue de littérature sur les méthodes de dimensionnement des chaussées et l'évaluation économique des projets routiers. Il décrit ensuite la zone d'étude et relate en détail la méthodologie composée des étapes du développement de la méthode. Il présente aussi les résultats et la discussion du dimensionnement mécaniste-empirique des

chaussées, de l'analyse économique, de l'analyse de sensibilité et de l'intégration des paramètres environnementaux et sociaux.

3.3 Revue de littérature

Cette revue de littérature expose les classes et les catégories de chaussées en fonction des types de revêtement, les méthodes de dimensionnement des chaussées utilisées en Afrique francophone, l'évaluation économique et les impacts sociaux et environnementaux des projets routiers dans les pays en développement.

3.3.1 Types de revêtement de surface des routes

Les types de revêtement de surface des chaussées permettent d'identifier quatre classes de chaussées : les chaussées bitumineuses, les chaussées en béton de ciment, les chaussées en pavés et les chaussées non revêtues.

Une chaussée bitumineuse est une chaussée dont la couche de surface est en ES ou en EB; une chaussée en béton de ciment est une chaussée dont la couche de surface est en dalle de béton non armé, en dalle de béton armé ou en béton armé continu; une chaussée en pavés est une chaussée dont la couche de surface est en béton, en briques ou en pavés; et finalement une chaussée non revêtue est une chaussée dont la couche de surface est en terre, en grave ou en sable (Odoki et Kerali, 2000g). Dans les pays francophones de l'Afrique de l'Ouest, les routes non revêtues sont généralement qualifiées de « chaussées en terre ». C'est un abus de langage, car en réalité les routes non revêtues peuvent être regroupées en trois (3) types : les routes non aménagées ou routes en terre, les routes aménagées et les routes en grave (graveleux latéritique) (Henning, Kadar et Bennett, 2006).

- **Les routes non aménagées ou en terre**

Les routes en terre ne comportent aucun système de drainage ni de dévers. Elles sont très souvent constituées de matériaux granulaires permettant d'assurer une accessibilité pendant toute l'année.

- **Les routes aménagées**

Les routes aménagées ont des sections transversales bien définies avec un système de drainage approprié. Elles sont très souvent constituées de matériaux des sols locaux sans aucune couche de roulement.

- **Les routes en graves ou en graveleux latéritique (GL)**

Les routes en graves (GL) sont des routes conçues et dimensionnées suivant les principes d'ingénierie en vigueur dans le pays concerné, y compris des installations et une couche de roulement. Les sections transversales de ces routes sont bien élaborées avec un système de drainage adéquat et des ouvrages d'art (dalots, caniveaux et ponts).

Les classes de chaussées peuvent être regroupées en deux (2) grandes catégories de chaussées: les chaussées revêtues qui regroupent les chaussées bitumineuses, en béton et en pavés, et les chaussées non revêtues (Autret, 1997). En l'Afrique de l'Ouest, la structure-type des chaussées revêtues est constituée d'une couche de revêtement, d'une couche de base, d'une couche de fondation, d'une couche de forme et du sol support (voir Figure 3.1). Les revêtements bitumineux peuvent aussi être regroupés en deux (2) catégories : les enduits superficiels (ES) et les enrobés bitumineux (EB).

- **Les enduits superficiels (ES)**

L'ES, très souvent utilisé comme une couche de roulement des routes à faible volume de trafic, est une stratification alternée de liant bitumineux et des gravillons. Il existe trois (3) types d'ES en fonction du nombre de couches de gravillons et de liant bitumineux : l'enduit superficiel monocouche (Esm) est constitué d'une couche de liant bitumineux surmontée d'une couche de

gravillons; l'enduit superficiel bicouche (ESB) est composé d'une alternance de deux (2) couches de liant bitumineux et de deux (2) couches de gravillons; et finalement l'enduit superficiel tricouche est composé d'une alternance de trois (3) couches de liant bitumineux et de trois(3) couches de gravillons (AUTRET et REQUIRAND, 1989). Les couches de roulement en ES, bien que supportant de faibles volumes de trafic, présentent des avantages techniques et économiques élevés comparativement à celles en EB classique. En effet, l'ES est moins consommateur d'énergie et permet d'effectuer un aménagement progressif en reportant de quelques années la réalisation d'une couche de surface en EB. Cependant, la formulation des ES doit être basée sur des paramètres pertinents comme le trafic journalier moyen annuel (TJMA) des véhicules lourds, l'état de la couche à recouvrir, le type de granulats, les conditions climatiques et le type de bitume pour le choix des dosages en gravillons et en liants bitumineux appropriés.

- **Les enrobés bitumineux (EB)**

Les EB sont des mélanges de liant bitumineux (bitume), de granulats et, le cas échéant, d'additifs, dosés et malaxés à chaud dans une centrale d'enrobage et transportés sur le chantier pour leurs mises en place (Perraton et Olard, 2013). En général, une couche de surface (ou de roulement) en EB est plus durable et offre un meilleur uni, une grande rigidité et une résistance à l'orniérage plus élevée que celle en ES. Les types d'EB dépendent de l'épaisseur, des formulations et des caractéristiques de surface. Les EB utilisés fréquemment pour le bitumage des routes dans les pays francophones de l'Afrique de l'Ouest sont les suivants : le micro-enrobé (Sand-asphalt) supportant des trafics faibles (T1 et T2) est recommandé dans les régions sableuses; l'enrobé dense (ED) supportant des trafics faibles à moyens (T1 à T3) est constitué de matériaux de faibles volumes de vides et est le plus répandu dans les pays tropicaux; et le béton bitumineux (BB) est un EB de haute qualité supportant des trafics très élevés (T4 et T5) et n'est réalisé que si le sol de support de la chaussée est en excellente qualité avec une couche de base peu déformable (CEBTP, 1984). Dans ce présent article, le revêtement des couches de surface des tronçons de route sera soit en ES ou en ED.



Figure 3.1 Structure-type d'une chaussée

Tiré de WikiTP (2016)

Les critères tels que le climat, la géographie et la topographie, les impacts sociaux et environnementaux, la sécurité, les principes techniques adéquats, la durabilité du revêtement, les modes de défaillance des traitements, les normes de conception et de dimensionnement ainsi que les questions politiques et organisationnelles sont recommandés par la Banque mondiale pour le choix du type de revêtement approprié des chaussées non revêtues (Henning, Kadar et Bennett, 2006) dans les pays en développement. Cependant, dans le présent article, les facteurs tels que les normes de conception et de dimensionnement, les critères économiques et les impacts sociaux et environnementaux ont été utilisés pour choisir la meilleure option de revêtement des tronçons de route.

3.3.2 Méthodes de dimensionnement des chaussées

Le dimensionnement des chaussées est un processus par lequel les différentes couches composant la structure de la chaussée sont déterminées de manière à ce qu'elles soient capables de supporter le volume et les charges du trafic actuel et futur (Kimbonguila, Abriak et Becquart, 2015). Dans le domaine routier, les méthodes de dimensionnement usuelles des chaussées sont : la méthode empirique, la méthode mécaniste et la méthode mécaniste-empirique.

1) La méthode empirique

La méthode empirique est une approche par laquelle différentes relations statistiques ont été établies entre les caractéristiques structurales et le comportement de la chaussée par des observations systématiques. Ces observations relèvent de l'expérimentation ou de l'expérience. En d'autres termes, ces observations empiriques permettent d'établir des relations entre les variables et les résultats. L'application de ces relations en dehors de l'environnement où elles ont été établies doit se faire avec beaucoup de prudence puisque les résultats des expérimentations peuvent varier significativement d'un environnement à l'autre. De ce fait, l'inconvénient majeur de cette méthode est son applicabilité qui se limite à des matériaux et des charges du trafic dans un environnement bien déterminé. L'approche empirique de dimensionnement des chaussées peut être simple ou complexe. L'approche est simple quand le dimensionnement des chaussées est basé sur des expériences passées qui ont bien fonctionné. L'approche empirique devient complexe quand le dimensionnement des chaussées est basé sur des équations empiriques dérivées des expérimentations (Interactive, 2018). La méthode de dimensionnement des chaussées la plus connue est l'AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials) road test dont l'approche de dimensionnement des chaussées est basée sur des expériences et des expérimentations sur un réseau routier réel construit en Ontario à cet effet (AASHTO, 1993; Huang, 2004).

Dans les pays en développement, des approches de dimensionnement empiriques, des chaussées ou méthodes des catalogues ont été aussi développées sous forme de guides de dimensionnement. « *Le Guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux* » (CEBTP, 1984) et le guide « *a guide to structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries* » (TRL et ODA, 1993) sont les deux principales approches de dimensionnement empiriques des chaussées flexibles (souples) utilisées respectivement dans les pays francophones et anglophones d'Afrique. Dans le présent article, la procédure de dimensionnement du guide de dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux a été suivie pour le dimensionnement des tronçons de route. Ce guide permet de déterminer les épaisseurs des différentes couches de la chaussée en utilisant deux paramètres d'entrée : l'indice de portance du sol de support composé de cinq (5) classes de sols en fonction du CBR

(California Bearing Ratio) de la plateforme (S1 : $CBR \leq 5$; S2 : $5 < CBR \leq 10$; S3 : $10 < CBR \leq 15$; S4 : $15 < CBR \leq 30$ et S5 : $CBR > 30$); le trafic est composé de cinq (5) classes de trafic en fonction du nombre de véhicules par jour, du nombre cumulé de poids lourds et du nombre de passages d'un essieu standard (13 tonnes ou 8 tonnes). En considérant l'ÉCAS (équivalent de charge axiale standard) de l'essieu standard de 13 tonnes qui est l'essieu le plus fréquent dans le pays de la zone d'étude, les cinq (5) classes de trafic sont : T1, T2, T3, T4, et T5 (T1 : $ÉCAS \leq 3.10^6$; T2 : $3.10^6 < ÉCAS \leq 10^7$; T3 : $10^7 < ÉCAS \leq 2,5.10^7$; T4 : $2,5.10^7 < ÉCAS \leq 6.10^7$ et T5 : $6.10^7 < ÉCAS \leq 10^8$) (CEBTP, 1984). En plus du catalogue de structures de chaussées, le guide mentionne aussi les conditions de mise en œuvre ainsi que la procédure de calcul des sollicitations internes dans le corps de la chaussée qui relève plutôt de l'approche mécaniste de dimensionnement des chaussées.

2) Méthode mécaniste

La méthode mécaniste de dimensionnement consiste en la détermination des sollicitations internes fondée sur les théories élastique linéaire, élastique non linéaire, viscoélastique et plastique (Haas et al., 2007). La théorie élastique multicouche est la plus couramment utilisée en pratique. Toutefois, la détermination des sollicitations internes dans les couches de la chaussée par la théorie élastique multicouche nécessite la formulation de certaines hypothèses telles que l'homogénéité et l'isotropie des propriétés des matériaux, des épaisseurs de couches finies sauf l'épaisseur du substratum qui est infinie; aucune contrainte de cisaillement à surface et des matériaux linéaires et élastiques selon la loi de Hooke (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). Le modèle mécaniste permet de calculer les différentes sollicitations internes (contraintes et déformations) dans les différentes couches de la structure de la chaussée en fonction des propriétés de leurs matériaux comme les modules d'élasticité (E) et les coefficients de poisson (ν) ainsi qu'en fonction des épaisseurs (h) et des charges du trafic. Comme présenté sur la Figure 3.2, les principales sollicitations internes dans le corps de la chaussée sont : la contrainte ou déformation de traction à la base de la couche de surface bitumineuse, la contrainte ou déformation de traction à la base de la couche de base et la contrainte ou déformation verticale (compression) à la surface du sol de support ou de la plateforme. En général, dans le dimensionnement des chaussées, les contraintes et

déformations à la base de la couche de surface (revêtement) et à la surface du sol de support ou de la plateforme sont calculées, sauf dans le cas où la couche de base doit être traitée au ciment (structure semi-rigide), nécessitant ainsi le calcul de la contrainte ou déformation à sa base en plus des autres sollicitations internes des autres couches. Dans le présent document, il a été considéré que la couche de base sera améliorée avec un faible pourcentage de ciment, d'où la considération des deux principales contraintes et déformations puisque le comportement de la structure de la chaussée demeure flexible (souple). Des programmes informatiques ont été réalisés pour le calcul des sollicitations internes des chaussées, par exemple le logiciel Alize Lcpc. Le logiciel Alize-Lcpc est un modèle mécaniste développé par le département matériaux et structures de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) pour la mise en œuvre de la méthode rationnelle française de dimensionnement du service d'étude sur les transports, les routes et leurs aménagements (SÉTRA) et du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC). En se basant sur la charge de trafic (13 tonnes), l'épaisseur (h), le module d'élasticité (E) et le coefficient de poisson (ν) de couche de la chaussée, Alize-Lcpc permet de calculer les contraintes et déformations à différents points critiques de la structure de la chaussée (IFSTTAR, 2016). Bien qu'Alize-Lcpc utilise un modèle mécaniste, il permet aussi de calculer les contraintes et déformations admissibles en considérant les performances des matériaux des couches de la chaussée.

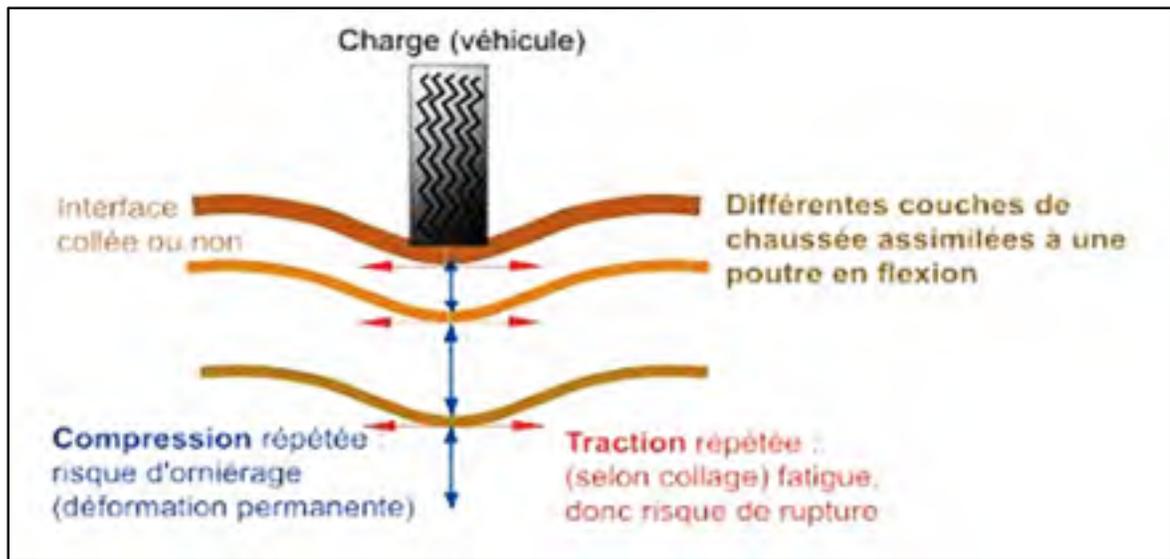


Figure 3.2 Sollicitations internes dans la structure de la chaussée

Tirée de WikiTP (2016)

3) Méthode mécaniste-empirique

La performance de la chaussée est déterminée empiriquement et dépend de plusieurs modes de rupture de la chaussée dont les plus importants sont la fissuration par fatigue et par l'orniérage. La fissuration par fatigue est l'initiation et la progression de la fissuration à la surface de la chaussée, généralement sous forme de fissures de mailles (faïençage) sur les traces des roues des véhicules qui sont causées par la répétition des charges du trafic. L'orniérage est une déformation plastique (permanente) de la surface de la chaussée qui est causée par l'application répétitive des charges du trafic le long des traces des roues des véhicules sur la chaussée. Les ornières apparaissent à la surface de la chaussée sous forme d'affaissements localisés le long des traces des roues des véhicules (Kumar, 2014a). La méthode de dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées consiste à relier les sollicitations internes calculées par la méthode de dimensionnement mécaniste aux performances observées, telles que la fissuration par fatigue et l'orniérage (Haas et al., 2007). Telle que présentée à la Figure 3.2, la contrainte ou la déformation horizontale de traction à la base de couche de surface bitumineuse est le paramètre qui influence le plus la fissuration par fatigue et la déformation verticale de

compression à la surface du sol de support qui gouverne l'orniérage. La déflexion mesurée à la surface de la couche de surface bitumineuse peut aussi être reliée à l'orniérage. La meilleure méthode de dimensionnement est la méthode mécaniste-empirique, car elle permet de combler les manques des deux méthodes, même si l'établissement de ses relations pour une large variété de matériaux, de charges et d'environnements demeure un défi énorme avec lequel doivent composer les ingénieurs routiers. Dans cet article, la méthode de dimensionnement mécaniste empirique a été appliquée pour le dimensionnement des tronçons de route en s'appuyant sur le guide de CEBTP, le logiciel Alize Lcpc. Bien qu'il soit mécaniste, le logiciel Alize Lcpc peut être considéré comme mécaniste empirique puisqu'il comporte deux modèles d'endommagement sur lesquels est basée la méthode rationnelle française pour la détermination des contraintes et déformations admissibles. Il s'agit du modèle d'endommagement par fatigue sous les sollicitations répétées de traction exercées par le trafic et du modèle d'endommagement par accumulation des déformations plastiques irréversibles issues des sollicitations verticales (compression) exercées par le trafic (IFSTTAR, 2016).

3.3.3 Évaluation économique des projets routiers

L'évaluation économique permet de vérifier la viabilité économique des projets routiers. Les organismes de financement et les administrations locales de gestion des routes utilisent une diversité de méthodes d'évaluation économique pour la budgétisation et la comparaison des différentes options ou stratégies des projets routiers. Les différentes méthodes appliquées dans les pays membres de l'Association mondiale de la route (AICPR) sont (PIARC, 2004a) : l'analyse coûts-avantages (ACA), l'analyse coût-efficacité (ACE), l'analyse multicritère (AMC) et l'analyse risques-avantages (ARA). Dans le présent document, les méthodes de l'ACA et de l'AMC sont utilisées. L'ACA consiste à comparer les coûts et les avantages en termes monétaires sous les conditions sans projet et avec projet et à en déduire les critères économiques comme la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rendement interne (TRI) et le rapport coûts-avantages (C/A) (Mohapatra, 2015). Les coûts des projets routiers sont composés des coûts d'administration, des coûts usagers et des coûts des externalités (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). Les coûts d'administration comprennent le coût de construction, le coût d'entretien, le coût de réhabilitation, le coût résiduel et le coût de gestion. Les coûts usagers

sont composés principalement du coût d'exploitation des véhicules (CEV), du coût de temps de trajet (CTT) et du coût des accidents (CA). En l'absence de données fiables sur les accidents, les coûts des usagers considérés dans le présent document sont les CEV et CTT. Les coûts des externalités sont les coûts associés à la pollution de l'air, à la nuisance sonore et à la perturbation du voisinage. Les coûts des externalités n'ont pas été inclus dans l'analyse économique des tronçons de route. Les avantages des projets routiers sont monétisables et non monétisables. Les avantages monétisables sont générés par la réduction des coûts usagers. Cependant, il existe aussi les avantages non monétisables qui sont très souvent des avantages sociaux tels que l'accessibilité aux infrastructures de bases (écoles, hôpitaux, etc.). L'AMC permet d'intégrer ces avantages sociaux dans l'analyse économique (PIARC, 2013a). En ce qui concerne les critères économiques, la VAN est la différence entre les coûts et les avantages actualisés; le TRI est le taux auquel les coûts équivalent aux avantages et le rapport C/A est le rapport entre les coûts et les avantages actualisés (The World Bank, 2005). Le choix des critères économiques dépend de la comparaison entre le capital initial et les dépenses futures, de la complexité des critères, des exigences particulières des administrations de gestion des routes et de la prise en compte ou non des avantages dans l'évaluation économique. Bien que les autres critères économiques soient tous importants, la VAN demeure le seul critère à toujours donner une réponse correcte sous forme de profit total du projet routier (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). L'AMC est une méthode quantitative et qualitative d'évaluation des projets routiers qui permet de considérer les avantages non quantifiables en termes monétaires. L'AMC est un outil d'aide à la décision qui permet de sélectionner les options des projets routiers dont les impacts, économiques, sociaux et environnementaux sont les plus influents en considérant les objectifs des administrations de gestion de routes et les opinions des différents intervenants de ces projets (Beria, Maltese et Mariotti, 2012).

3.3.4 Impacts sociaux et environnementaux des projets routiers

Les impacts environnementaux doivent être quantifiés dans la mesure du possible et inclus dans l'analyse économique comme des coûts ou avantages des projets. L'évaluation des coûts ou des avantages environnementaux se fait en deux étapes : premièrement, il faut déterminer

la relation fonctionnelle entre le projet et l'impact environnemental et deuxièmement, il faut assigner une valeur monétaire à l'impact environnemental (Belli et al., 1998a). Cependant, il existe très peu de méthodes permettant de monétiser de manière précise les externalités environnementales, d'où le recours à l'AMC.

La déforestation, la perte de fertilité des sols, l'appauvrissement de la flore et de la faune, la pollution de l'air, le bruit, les vibrations, l'érosion des sols et les effets sur la santé sont autant de paramètres environnementaux à prendre en compte (USAID, 2014).

Dans ce document, seule la pollution de l'air générée par les émissions des véhicules a été considérée, car les polluants issus de ces émissions peuvent être quantifiés dans le modèle HDM-4. Les principaux polluants considérés sont les hydrocarbures, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone, les particules et le plomb (Odoki et Kerali, 2000h). Les impacts sociaux sont très souvent non monétisables, d'où leur intégration dans l'analyse économique à travers l'AMC. Les avantages sociaux des projets routiers se constatent par l'augmentation des revenus des populations dans la zone d'influence du projet, une meilleure d'accessibilité des services sociaux (hôpitaux, écoles, marchés, etc.) et l'amélioration de l'interaction sociale et politique (PIARC, 2013a). Dans ce document, seule l'accessibilité aux services sociaux est prise en compte, car elle constitue d'une part une des préoccupations majeures des communautés locales et elle est d'autre part le principal critère social considéré dans le sous-modèle AMC du logiciel HDM-4 (Odoki et Kerali, 2000e).

3.4 Zone d'étude

Les tronçons de route existants en GL de la présente étude sont situés dans un pays de l'Afrique de l'Ouest. Le nom du pays n'est pas mentionné pour des raisons de confidentialité exigées par le consultant et l'administration de gestion de routière auprès desquels les données ont été collectées et analysées. La zone d'étude présentée à la Figure 3.3 comporte quatre (4) projets de bitumage de routes (tronçons) en GL totalisant une longueur d'environ 82 km. Le sud du pays où se situent les quatre (4) tronçons de route est caractérisé par un climat de type subéquatorial avec une forte humidité. Bien qu'il existe dans la zone d'étude des sols sableux et argileux à des proportions très variables, les sols latéritiques demeurent les plus répandus.

Les zones d'influence de ces projets de bitumage sont des lieux de haute potentialité agricole avec une concentration assez élevée de population dans les villes reliées par les tronçons de route.



Figure 3.3 Zone d'étude des projets de bitumage

3.5 Méthodologie

Le développement de la méthode rationnelle intégrée de dimensionnement et d'évaluation des quatre (4) projets de bitumage de tronçons de route en GL repose sur six (6) principales étapes : la sélection des tronçons en fonction de l'IPFR, les investigations et la collecte des données, le dimensionnement des tronçons, la configuration et le calage du modèle HDM-4, l'analyse économique, l'analyse de sensibilité et l'intégration des critères sociaux et environnementaux et enfin le choix de l'intervention la mieux adaptée de bitumage (voir Figure 3.4).

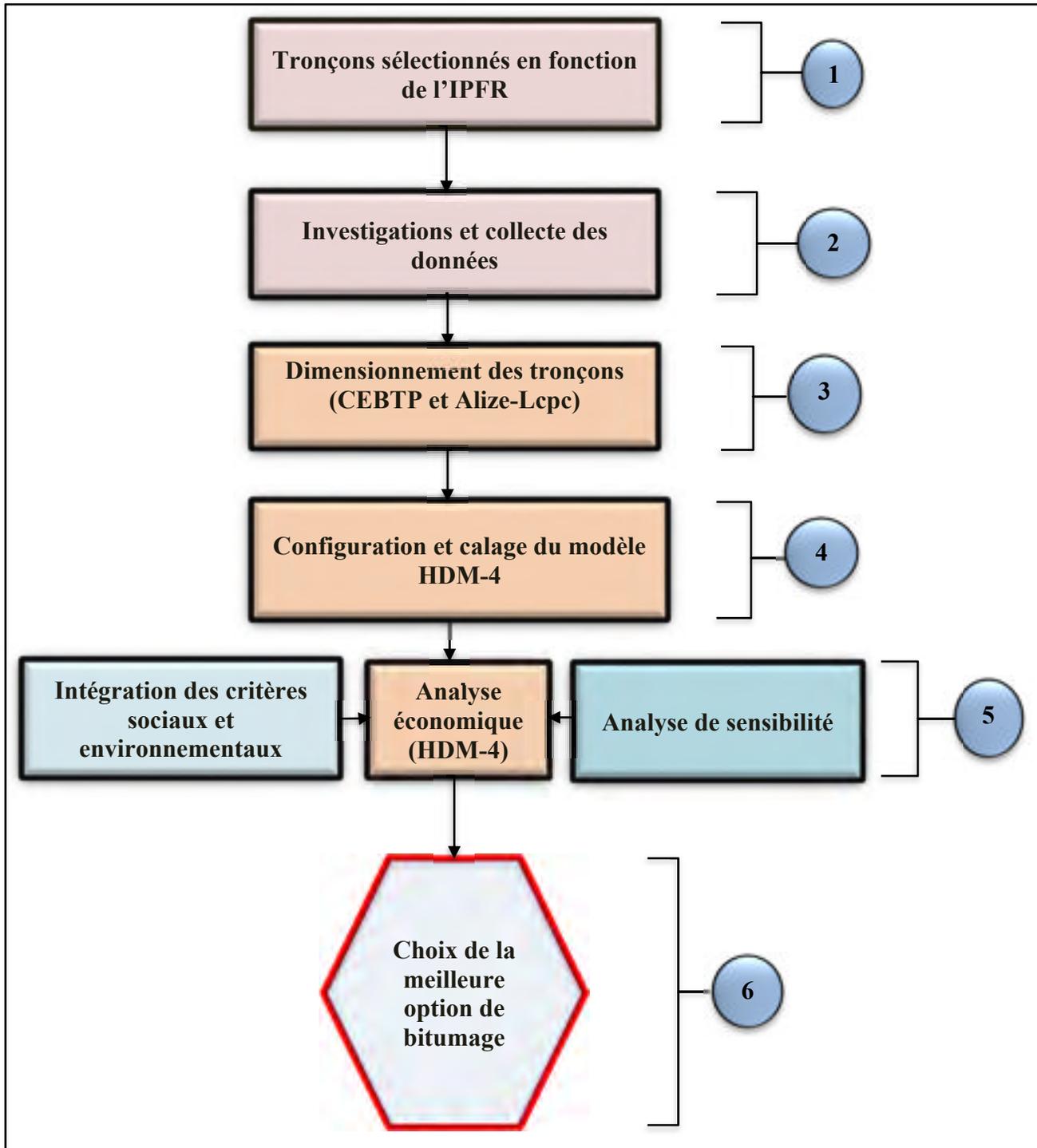


Figure 3.4 Étape de développement de la méthode rationnelle intégrée pour le choix des options de bitumage des routes de « haute priorité »

3.5.1 Sélection des tronçons en fonction de l'IPFR

L'indice de priorité de financement des routes (IPFR) est un nouvel outil de prise de décision qui permet de prioriser conjointement des projets de construction (bitumage) et de préservation d'un réseau routier sur une échelle de 0 à 100. Un IPFR de 100 indique un projet de haute priorité tandis qu'un projet de très faible priorité est représenté par un IFPR de 0. La particularité de cet indice composite réside dans le fait qu'il est obtenu en agrégeant des indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux dont les données sont issues des données accessibles et disponibles d'une administration routière de l'Afrique de l'Ouest (Kaba et Assaf, 2018). De plus, l'IPFR n'est applicable qu'au niveau réseau. Cela signifie que le développement d'un tel indice n'implique pas des investigations très approfondies sur le terrain. En effet, les données utilisées pour les analyses au niveau réseau ne nécessitent pas des données très détaillées comme celles requises pour la conception, le dimensionnement et l'analyse économique (niveau projet), mais plutôt des données représentant les indicateurs généraux (Gopalakrishnan, Steyn et Harvey, 2014).

Les étapes de construction de l'IPFR sont le développement d'un cadre théorique, suivi de la sélection des indicateurs pertinents, la normalisation des indicateurs, le test de corrélation et de signification, la pondération avec l'analyse en composantes principales (ACP) et enfin l'agrégation et le calcul de l'IPFR. Quatre (4) projets de construction de route en GL et six (6) projets de préservation de routes bitumineuses existantes de «haute priorité» ont été sélectionnés en fonction de l'IPFR (Kaba et Assaf, 2018). Ces projets routiers étant en plus petit nombre et admissibles au financement des bailleurs de fonds, des investigations plus approfondies ont été menées sur les tronçons de route pour trouver les intrants nécessaires pour le développement de ce document.

Comme présenté à la Figure 3.5, les projets de construction de « haute priorité » qui ont été sélectionnés pour le développement de cette méthode intégrée sont des tronçons de route existants en GL dont les IPFR sont élevés.

Les quatre (4) tronçons qui ont été sélectionnés pour le développement de la méthode rationnelle intégrée sont des sections homogènes (ou tronçons homogènes). Les sections homogènes sont des subdivisions d'une route en fonction des caractéristiques semblables. Les critères de subdivisions sont le trafic (TJMA, ÉCAS), la géométrie (vitesse, alignement horizontal et vertical, largeur de la chaussée, etc.), le type de chaussée (revêtue ou non revêtue), l'âge et l'état (IRI, fissures, profondeur des ornières, textures, etc.) (Čutura et al., 2016). Comme cela a déjà été spécifié, l'analyse économique des tronçons de route a été effectuée en utilisant le logiciel HDM-4. Cependant, l'homogénéité des tronçons de route est l'une des importantes exigences du logiciel HDM-4. Par conséquent, les tronçons de route de la présente étude ont été obtenus par des subdivisions en se basant sur les critères techniques tels que le TJMA, la géométrie, l'état et certains paramètres géotechniques

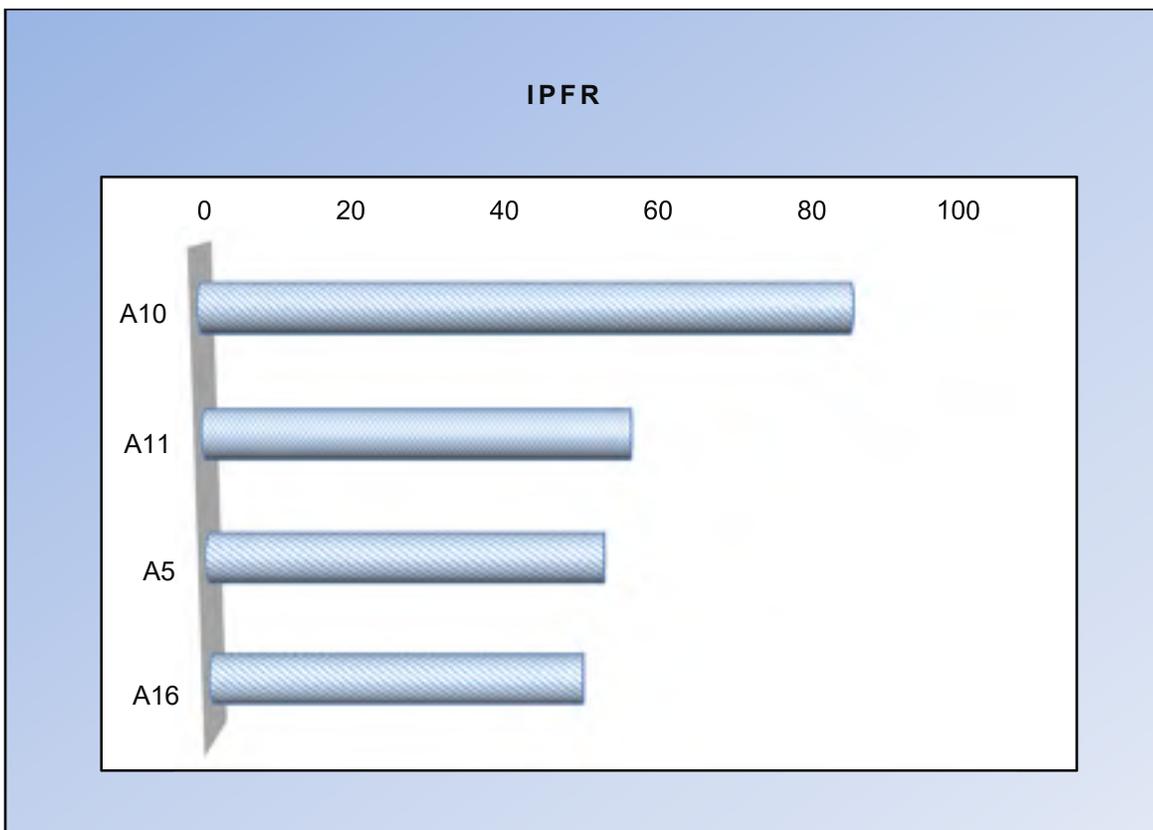


Figure 3.5 Projet de construction de routes de «haute priorité»

Le logiciel HDM-4 qui a été utilisé pour l'analyse économique est un modèle d'évaluation technico-économique des projets routiers se basant sur des interactions entre les conditions environnementales, les caractéristiques géométriques et structurales, les normes d'entretien et d'aménagement, les coûts aux usagers pour déterminer les principaux indicateurs économiques. Ces indicateurs économiques tels que la valeur actuelle nette, le taux de rendement interne (TRI) et le rapport avantage-coût sont utilisés pour vérifier la viabilité économique des projets routiers (Kerali, Odoki et Stannard, 2006).

Le logiciel Alize-Lcpc a été utilisé pour le calcul des sollicitations internes et des contraintes et déformations admissibles dans les couches de la chaussée. Ce logiciel a été décrit dans la section « revue de littérature ».

3.5.2 Investigations et collecte des données

Les investigations approfondies sur les quatre (4) projets ou tronçons de route en GL de « haute priorité » ont été financées par les bailleurs de fonds. Toutefois, les études techniques ont été réalisées par un consultant agréé qui a travaillé en étroite collaboration avec le ministère des Infrastructures routières du pays de la zone d'étude pour mener à bien leur mandat. Les données utilisées dans le présent article ont été principalement collectées à l'issue des études effectuées sur le terrain et au laboratoire. Les investigations comportent quatre (4) grandes catégories qui sont : inventaire, évaluation et vérification des caractéristiques géométriques, étude et prévision du trafic, étude géotechnique ainsi qu'évaluation des impacts sociaux et environnementaux. Les investigations et collectes de données visent à la détermination des intrants pour le choix des structures des chaussées dans le « *guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux* » (CEBTP, 1984) et des intrants des logiciels HDM-4 et Alize-Lcpc. Par conséquent, des données des investigations et de la collecte ont été analysées et présentées selon les exigences du guide et des deux logiciels mentionnés ci-dessus.

3.5.2.1 Inventaire, évaluation et vérification des caractéristiques physiques

Les données d'inventaire routier sont très importantes pour la gestion des routes. En outre, elles permettent d'identifier, de classer et de quantifier plusieurs aspects d'un réseau routier. Le niveau de détail de l'inventaire routier dépend des objectifs de l'administration de gestion des routes et du type d'analyse (planification, conception, dimensionnement, entretien et construction) (AASHTO, 2012d). Dans le présent document, les quatre (4) projets de bitumage sont des tronçons de route existants en GL dont les caractéristiques physiques (géométriques) sont des paramètres très importants tant pour le dimensionnement que pour l'évaluation économique. À cet effet, les données de l'inventaire routier ont été collectées de manière à ce qu'elles soient suffisantes pour réaliser le dimensionnement et l'analyse économique. Pour ce faire, les données déjà existantes sur la géométrie, l'état et le trafic dans la base des données de l'administration de gestion de routes du pays de la zone d'étude ont été analysées avant d'effectuer des relevés complémentaires ou de vérification sur le terrain. Les caractéristiques géométriques doivent respecter les critères définis par l'UEMOA. Le cas échéant, elles ont été ajustées avant de procéder aux autres étapes de la présente étude. En effet, l'annexe I du règlement 8 de l'Union Économique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) portant sur l'adoption du réseau routier communautaire et de ses modalités de gestion (UEMOA, 2009b) fixe certaines règles sur les caractéristiques techniques fondamentales, la signalisation et le niveau de service que les routes de la sous-région doivent satisfaire. Les règles concernent aussi les valeurs minimums des paramètres géométriques des routes. Les caractéristiques géométriques des tronçons de route de la présente étude qui ont été validées ou ajustées en fonction de la réglementation de l'UEMOA sont : les généralités (largeur de l'emprise, largeur de la chaussée et largeur de l'accotement), le tracé en plan, le profil en long, et le profil à travers.

Dans le présent article, les paramètres géométriques qui ont été collectés dans la base des données déjà existantes de l'inventaire routier, relevés sur le terrain, vérifiés et ajustés sont : la largeur de la plateforme, la largeur de la chaussée, la largeur des accotements, l'altitude, la sinuosité, la déclivité, le nombre de voies, les dégradations (Uni exprimée en IRI) et l'année

du dernier rechargement. Les ouvrages d'art et de drainage de même que leurs états ont été aussi inventoriés.

L'ampleur des dégradations permet d'apprécier les états des tronçons de route. Dans le présent document, les états ont été déterminés à partir des mesures de rugosité sur les tronçons et exprimés en indice de rugosité international (IRI). L'IRI est un paramètre technique très important des tronçons de route parce qu'il permet de caractériser la régularité (UNI) de la surface de la chaussée liée au confort de roulement et à la sécurité des usagers. Une chaussée en bon état est caractérisée par un IRI faible alors que l'IRI d'une chaussée en mauvais état est élevé (Kaba et Assaf, 2018).

3.5.2.2 Étude du trafic

L'étude de trafic consiste à évaluer le volume de trafic actuel et futur sur les tronçons de route ainsi que les charges exercées par ce trafic pendant le cycle de vie de la chaussée (période d'analyse). Le trafic est un paramètre technique primordial. En effet, il est utilisé à la fois comme intrant de conception géométrique, de dimensionnement des chaussées et d'analyse économique. En ce qui concerne la conception géométrique et l'évaluation des avantages des projets routiers (analyse économique), le volume et la composition du trafic actuel et futur de trafic doivent être connus. Cependant, pour le dimensionnement des chaussées, le volume et les charges des essieux des véhicules lourds sont indispensables (TRL, 2005). Dans ce document, l'étude de trafic a été réalisée en deux campagnes : la campagne de comptage du trafic et la campagne de pesage.

1) Comptage de trafic

Le comptage a été effectué manuellement par des équipes affectées par le consultant dans les deux (2) directions de quatre tronçons de route. En amont de l'affectation des équipes sur le terrain pour le comptage du trafic, les différents véhicules composant le trafic ont été identifiés. Le Tableau 3.1 présente la composition du trafic de la zone d'étude. Comme indiqué dans le Tableau 1, les véhicules lourds et les véhicules légers sont les deux types de véhicules

motorisés constituant le trafic. Un véhicule lourd est un véhicule dont la charge totale est supérieure à trois (3) tonnes (CEBTP, 1984). Il est important de mentionner que dans les pays de l’Afrique de l’Ouest et plus précisément dans la zone d’étude, il existe aussi un afflux d’engins motorisés à deux roues (motocyclettes) dont le trafic n’a pas été pris en compte dans la présente étude.

Tableau 3.1 Composition du trafic

Catégorie de véhicule	Type de véhicule
1- Véhicules légers	Voiture particulière
	Camionnette
	Minibus
2- Véhicules lourds	Autobus
	Véhicules à 2 essieux
	Véhicules à 3 essieux
	Véhicules à 4 essieux
	Véhicules à 5 essieux
	Véhicules à 6 essieux

Le comptage de trafic par type de véhicule (voir Tableau 3.1) a été effectué au mois de janvier pendant trois (3) jours, dont deux (2) jours de 14 heures et un (1) jour de 24 heures à plusieurs endroits des deux directions des tronçons homogènes. Pour être plus représentatifs du trafic local, les jours sans marché et avec marché ont été inclus dans la période de comptage du trafic. Les données qui ont été collectées par les équipes à l’issue de la campagne de comptage du trafic sont les trafics totaux et leurs compositions par type de véhicule de chaque direction des tronçons de route. Le comptage du trafic a été réalisé pendant une période relativement courte et peut être assujéti à des erreurs dues aux variations horaires, hebdomadaires, mensuelles et saisonnières. Ainsi, après le comptage du trafic classifié pendant 12 heures, un coefficient a été utilisé pour convertir ce trafic de moins de 24 heures à un trafic de 24 heures. La moyenne des 3 jours de comptage de trafic a permis d’obtenir le trafic journalier moyen (TJM). Ce coefficient de conversion est le rapport entre le flux de circulation compté pendant la journée de 24 heures et le flux de circulation de 12 heures. Comme déjà spécifié, dans les régions rurales de la zone d’étude, le trafic est généralement plus élevé les week-ends et les jours de marché. Ainsi, un comptage d’une telle courte durée (12h) sans inclure les jours de marché ou les week-ends peut être sujet à des marges d’erreur dans l’établissement TJM. Toutefois, une

attention particulière doit être portée aux variations mensuelles et saisonnières pour le calcul débit moyen journalier annuel (TJMA). Ces variations saisonnières peuvent être causées par des facteurs comme la période de récolte et la saison pluvieuse (TRL, 2004). La prise en compte des variations saisonnières et mensuelles a été faite en appliquant un coefficient d'ajustement saisonnier (CAS) sur le TJM. Le CAS n'est autre que le rapport du TJM du mois de comptage et TJM de l'année (Gastaldi et al., 2013). De ce fait, le TJMA de chacune des directions de chaque tronçon de route a été calculé en faisant le produit du TJM et du CAS.

2) Pesage des véhicules lourds

Le nombre d'applications des charges des essieux des véhicules lourds sur la chaussée est un facteur crucial dans le dimensionnement des chaussées, d'où l'importance d'effectuer une campagne de pesage des véhicules lourds dans chacune des deux directions des quatre tronçons en minimisant le plus possible les sources d'erreurs. Les données issues de cette campagne ont permis de calculer les coefficients d'agressivité moyens (CAM) de chaque type de véhicule lourd qui ont été combinés avec les TJMA et le taux de croissance du trafic pour trouver les charges de trafic prévues sur la période d'analyse des projets routiers et exprimés en millions d'équivalent de charge axiale standard (ÉCAS) pour chacune des deux directions des tronçons de route (TRL, 2004). Bien que l'ÉCAS ait été calculé pour chacune des deux directions des tronçons de route, les chaussées ont été dimensionnées avec les ÉCAS des directions les plus achalandées des tronçons de route.

Le pesage des essieux a été réalisé pendant une période de 10 jours sur des postes installés à des endroits stratégiques de chaque tronçon. Bien que l'essieu standard soit de 13 tonnes dans le pays de la zone d'étude, le coefficient d'agressivité (CAM) de chaque véhicule lourd a été calculé conformément à la méthode de Liddle (équation 3.1) décrit dans le «guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux» (CEBTP, 1984) qui utilise plutôt un essieu standard de 8,2 tonnes.

$$CA = \left(\frac{P}{8,2} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

Où

$\alpha = 4$ pour les chaussées souples et comprises entre 4 et 8 pour les chaussées rigides.

P = le poids de l'essieu simple à deux roues jumelées.

Environ 20 % des véhicules lourds de chaque type et par direction de chaque tronçon ont été échantillonnés aléatoirement et pesés à partir des postes de pesage. Les coefficients d'agressivité moyens (CAM) par type de véhicule lourd ont été calculés en fonction des étapes suivantes (TRL, 2004):

- Calcul du CA de chaque essieu ou ensemble d'essieux de chaque type de véhicule lourd
- Calcul du CA total de chaque type de véhicule lourd en faisant la somme des CA des essieux ou ensemble d'essieux de chaque type de véhicule lourd
- Calcul CAM de chaque type de véhicule lourd en faisant la moyenne des CA de tous les véhicules pesés par type.

Il est important de mentionner que l'essieu standard de 8,2 tonnes ou de 13 tonnes ne concerne que l'essieu simple à 2 roues jumelées, qui peut varier en fonction de la configuration des essieux des véhicules lourds (essieu double, essieu triple). De plus, la répartition du poids total de chaque véhicule lourd sur ses essieux dépend de son gabarit. Par conséquent, la répartition du poids total de chaque type de véhicule lourd sur ses essieux ou ensemble d'essieux dans la présente étude a été basée sur les poids limites prescrits par la feuille route de l'UEMOA pour les véhicules lourds de transport de marchandises (UEMOA, 2005). Le poids (P) de chaque essieu ou ensemble d'essieux a été majoré de 10% pour tenir compte des surcharges des véhicules lourds. En effet, la surcharge des véhicules lourds est l'un des problèmes chroniques auxquels les administrations de gestion des routes de l'Afrique de l'Ouest sont confrontées. Ce problème majeur a été confirmé dans cette étude de trafic puisque plus de la moitié (60 %) des

véhicules lourds qui ont été pesés avaient des essieux dont le poids total était supérieur aux charges limites autorisées.

Comme mentionné ci-dessus, le but de la campagne de pesage est le calcul de l'ÉCAS dans la direction la plus achalandée de chaque tronçon de route pour le dimensionnement des chaussées. Ainsi, pour la détermination du nombre d'ÉCAS et du trafic pendant la période d'analyse, la connaissance de la période d'analyse et du taux de croissance est indispensable. La période d'analyse devrait être choisie de manière à ce qu'elle ne soit pas supérieure à la période des prévisions fiables. Généralement, pour le trafic, cette période ne devrait pas excéder 20 ans (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994c). En l'absence de données fiables pour la prévision du trafic dans le pays de la zone d'étude, une période d'analyse de 20 ans a été adoptée pour la présente étude. Le taux de croissance peut être extrapolé des tendances passées. La meilleure manière d'évaluer le taux de croissance est de l'associer à la croissance du produit intérieur brut (PIB), à la croissance de population et au prix du carburant (Cafiso et Di Graziano, 2012). À la suite de consultation des rapports de l'Institut national de la statistique et l'analyse de l'évolution de l'économie du pays de la zone d'étude, des taux de croissance variant en fonction des plages d'années de la période d'analyse ont été établis en se basant sur le produit intérieur brut (PIB) et la croissance de la population. Ces taux de croissances du trafic sont présentés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Taux de croissance en fonction de la période d'analyse

Période	Durée (ans)	Taux de croissance (%)
2016-2017	2	4
2018-2020	3	3,5
2021-2025	5	3
2026-2035	10	2,5

Les taux de croissance et la période d'analyse étant connus, les étapes qui ont été suivies pour le calcul du nombre d'ÉCAS de la direction la plus échelonnée de chaque tronçon sont les suivantes: (TRL, 2004) :

- Calcul du nombre d'ÉCAS moyen par jour par type de véhicule lourd : le nombre d'ÉCAS/jour de chaque direction des tronçons a été calculé en faisant le produit du CAM et du TJMA par type de véhicule lourd de chacune des deux directions ;
- Calcul du nombre d'ÉCAS moyen /jour par tronçon en faisant la somme du nombre d'ÉCAS moyen/jour de tous les types de véhicules lourds par direction de chacun des tronçons ;
- Calcul du nombre d'ÉCAS annuel : le nombre ÉCAS/an a été calculé en multipliant l'ÉCAS/ jour de chaque direction de chacun des tronçons par 365 jours. Le nombre d'ÉCAS/an a été exprimé en millions d'ÉCAS
- Calcul du nombre d'ÉCAS total des tronçons sur la période d'analyse : l'équation 2 a permis de calculer le nombre d'ÉCAS sur la période d'analyse du projet en utilisant le nombre d'ÉCAS/an de la direction la plus achalandée, les taux de croissance et les durées tels que présentés dans le Tableau 2.

$$ÉCAS_{cumulé\ total} = \left(\frac{a \times 365 \times 100}{b} \right) \times \left[\left(1 + \frac{b}{100} \right)^{c+d} - \left(1 + \frac{b}{100} \right)^d \right] \quad (3.2)$$

Où :

a = nombre d'ÉCAS/ jour de la direction la plus achalandée

b = le taux de croissance (%)

c = la période d'analyse (ans)

d = le nombre d'années avant le début de la période d'analyse

3) Enquête Origine - Destination (O-D) et temps de trajet

Une enquête O-D sur des itinéraires situés à proximité de la zone d'étude et sur les quatre tronçons a été réalisée afin d'identifier s'il existe d'autres types de trafic (détourné et généré) en plus du trafic normal, et en déduire les paramètres d'évaluation des coûts de durée de trajet.

En effet, il existe trois (3) types de trafic : le trafic normal qui est le trafic existant sur la route en l'absence d'un projet d'investissement; le trafic détourné qui est le trafic dévié d'autres itinéraires routiers (ou modes) avec la même origine et destination que le projet d'investissement routier et enfin le trafic généré ou de développement, qui est le trafic supplémentaire qui survient à la suite de l'accroissement des activités économiques initiées par le nouveau projet dû au fait que certains véhicules choisissent de changer d'origine et de destination pour emprunter la route du projet (Archondo-Callao, 2004b). Dans la présente étude, le trafic dévié et le trafic généré n'ont pas été pris en compte dans l'analyse économique pour les raisons suivantes :

- La détermination du trafic détourné doit se faire en considérant des routes alternatives de même origine et destination que les tronçons considérés. Ce trafic n'a pas été considéré parce qu'il existe très peu de routes alternatives aux projets, et même s'il en existe, l'obtention de leurs données est complexe. Par conséquent, ce trafic est négligeable.
- Le trafic généré ou de développement induit par le projet d'investissement routier est causé par la réduction des coûts de transport. Ce trafic est le plus souvent déterminé en se basant sur des fonctions de demande élaborées avec des données empiriques existantes (Belli et al., 1998b). En l'absence de ces données empiriques, ce trafic n'a pas été inclus dans l'analyse économique.

Outre ces deux trafics qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude, les données issues de l'enquête O-D ont été utilisées pour identifier les paramètres pertinents pour le calcul du coût de temps de trajet avec le logiciel HDM-4. En effet, la réduction du temps de trajet représente une partie assez importante des avantages des projets routiers. Par conséquent, le temps de trajet doit être inclus dans toute analyse coût-avantage des projets routiers (World Bank, 2005d). Environ 20 % du DJMA de chaque type de véhicule circulant sur les tronçons ont été interviewés aléatoirement et les informations suivantes ont été collectées :

- Origine et destination du trajet
- But du trajet
- Durée du trajet
- Distance du trajet

- Type de véhicule
- Nombre de passagers par type de véhicule
- Occupation des passagers
- Équipage pour les véhicules lourds
- Type et poids de la cargaison transportée

Les paramètres de calcul du coût de temps du trajet par type de véhicule qui ont été déterminés à partir des informations de l'enquête O-D sont :

- Le coût horaire des trajets pour des raisons professionnelles
- Le coût horaire des trajets pour des raisons non professionnelles
- Le coût horaire de transport des marchandises

4) Enquête sur les coûts d'exploitation des véhicules (CEV)

La réduction des CEV constitue la proportion la plus élevée des avantages des projets routiers dans les pays en développement. Les CEV sont influencés par les caractéristiques réglementaires et institutionnelles existant dans l'environnement du secteur des transports du pays de la zone d'étude et par les stratégies d'entretien, notamment pendant les saisons pluvieuses (World Bank, 2005c). Les CEV varient en fonction du type de véhicule, de l'état de la surface de la route, et de la vitesse des véhicules. Pour la présente étude, une enquête a été réalisée sur chaque type de véhicule auprès des compagnies de transports de personnes et de marchandises agréées dans la zone du projet et à l'échelle du pays pour déterminer les paramètres de calculs des CEV. Ces paramètres ont été subdivisés en trois (3) catégories : les caractéristiques des véhicules, les caractéristiques géométriques et le climat (World Bank, 2005c). Les caractéristiques des véhicules sont composées du nombre de roues, du nombre d'essieux, de la longueur de véhicules, du type de pneus (radial/biais), du poids nominal en kg, de la distance annuelle parcourue, des heures de travail annuelles, de la durée de vie moyenne du véhicule, du prix du véhicule (neuf), du prix des pneus, du type de carburant, du prix du carburant, du prix de lubrifiant, du coût de la main-d'œuvre, des frais généraux annuels et du

taux d'intérêt bancaire annuel moyen. Les caractéristiques climatiques ont été obtenues à partir des données météorologiques issues du ministère de l'Environnement du pays de la zone d'étude. Les caractéristiques géométriques proviennent de l'inventaire routier.

3.5.3 Étude géotechnique

Les investigations géotechniques sont indispensables et cruciales pour la détermination des caractéristiques géotechniques des différentes couches de la structure et du sol support de la chaussée qui influencent considérablement les paramètres de dimensionnement, de construction et d'analyse économique des projets routier (TRL, 2005).

Dans le cadre de la présente étude, des sondages ont été réalisés au centre de la largeur de la chaussée et à 0,5 m des extrémités de la largeur de chaque tronçon de route. Les sondages ont été aussi répartis sur la longueur de chaque tronçon avec des espacements de 5 m entre eux. À la suite de la réalisation des sondages, les différentes couches de la structure de la chaussée existante en GL de chaque tronçon de route ont été identifiées et des échantillons et des carottes ont été prélevés à partir de la couche de surface jusqu'à la partie supérieure du terrassement (environ 30 cm en dessous de la surface du sol support). Les échantillons prélevés ont été acheminés au laboratoire pour être soumis à des essais de géotechnique routière. Ces essais sont : l'analyse granulométrique, les limites de plasticité (Atterberg), le Protor modifié, le California Bearing Ratio (CBR) et l'équivalent de sable (ES). Les résultats de ces essais tels que présentés dans le Tableau 3 ont permis de classifier les sols des différentes couches de la chaussée selon le système de classification LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) et de déterminer les caractéristiques géotechniques pertinentes. Le système de classification LCP est identique au système de classification U.S.C.S (Unified Soil Classification System) établi par Casagrande. Ce système consiste à utiliser les résultats de la granulométrie et des limites de plasticité (Atterberg) pour nommer le type de sol et le rattacher à un groupe de sols ayant des caractéristiques semblables (Berthaud, Buhon et Nicolas, 2013).

Les caractéristiques géotechniques ainsi que les épaisseurs des différentes couches des chaussées existantes des tronçons présentés dans le Tableau 3.3 ont été comparées aux épaisseurs et aux caractéristiques appropriées définies dans le *Guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux* (CEBTP, 1984). Dans le cas où les caractéristiques géotechniques et les épaisseurs des couches de la structure des chaussées existantes respectent les conditions minimales recommandées par le guide, la vérification des contraintes et déformations admissibles et l'analyse économique peuvent être effectuées. Le cas échéant, il faut remplacer la structure de la chaussée existante par des matériaux et des épaisseurs de couches adéquates. Il peut être vu dans le Tableau 3.3 que les caractéristiques de la couche de roulement des tronçons en GL ne sont pas spécifiées. La principale raison réside dans le fait qu'il est prévu que la couche de roulement de la chaussée existante de chaque tronçon soit remplacée par une couche de base appropriée avant le bitumage.

dimensionnement des tronçons dans cette étude s'est appuyé sur le Guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984) et le logiciel Alizé-Lcpc (IFSTTAR, 2016). Les étapes qui ont été suivies pour le dimensionnement des quatre (4) tronçons sont énumérées comme suit :

- Choisir le type de structure de chaussée pour chaque tronçon dans le catalogue des structures du guide du CEBTP : la structure est composée des épaisseurs et du type de matériaux des différentes couches de la chaussée. Les paramètres d'entrée pour le choix de la structure de la chaussée sont la classe de portance du sol de support (CBR) et le trafic cumulé (ÉCAS) ; ceux-ci proviennent de l'étude de trafic et de l'étude géotechnique.
- Comparer des structures de chaussées des tronçons obtenues par la méthode du catalogue (guide) et des structures de chaussées existantes issues des investigations géotechniques. Plus spécifiquement, il s'agit de vérifier si les épaisseurs et les caractéristiques géotechniques de la couche de fondation et de la couche de forme des chaussées existantes en GL sont conformes à celles qui ont été déterminées par la méthode du catalogue et de déduire leurs adéquations.
- Il importe de vérifier si les sollicitations internes des différentes couches de la chaussée sont inférieures aux contraintes et déformations admissibles. Les sollicitations internes qui ont été calculées sont : la contrainte de traction à la base de la couche bitumineuse (ESB ou ED) et la déformation à surface du sol de support (plateforme). Les équations utilisées pour le calcul des contraintes et des déformations admissibles ainsi que les différentes hypothèses sont présentées à l'annexe II.

3.5.5 Configuration et calage du modèle HDM-4

La configuration et le calage du logiciel HDM-4 permettent de mieux refléter les conditions locales de la zone de localisation des projets routiers afin d'obtenir des résultats d'analyse économique et d'AMC fiables. La configuration consiste principalement à adapter le système de fonctionnement du modèle HDM-4 en ajustant ses données de configuration par défaut de telle sorte qu'elles soient adéquates et compatibles aux conditions climatiques locales prévalentes, aux normes et aux pratiques en vigueur dans la zone d'étude des projets de

bitumage. Les informations pertinentes de la zone d'étude qui ont été collectées ou déterminées pour la configuration du modèle HDM-4 sont composées du débit classé, du type débit-vitesse, des classes d'accident, de la zone climatique, des unités monétaires et des données agrégées des sections (Stannard, Dakin et Wightman, 2000).

Le modèle HDM-4 comporte quatre sous-modèles (Kerali, Odoki et Stannard, 2006) : le sous-modèle de détérioration des routes (RD), le sous-modèle des effets des travaux (WE), le sous-modèle des effets des usagers de la route (RUE) et le sous-modèle des impacts sociaux et environnementaux (SEE). Le calage du logiciel HDM-4 consiste principalement à ajuster les paramètres des sous-modèles RD, WE et RUE dans la perspective d'améliorer la prédiction de la performance de la chaussée et des ressources consommées par l'exploitation des véhicules. Il est important de bien caler le modèle HDM-4 pour ne pas aboutir à des résultats biaisés et complexes à interpréter. Il existe trois (3) niveaux de calage qui dépendent du type d'analyse et des ressources disponibles. Dans le cadre de cette présente étude, le logiciel HDM-4 a été calé conformément au niveau 1. Le niveau 1 correspond à une application de base et implique les tâches suivantes (Bennett et Paterson, 2000) :

- La détermination des paramètres d'entrée de bases nécessaires ;
- L'adaptation de plusieurs valeurs par défaut ;
- Le calage des paramètres les plus sensibles avec des valeurs estimées à partir de revue de littérature et des enquêtes de moindre envergure sur le terrain.

La sensibilité des paramètres des sous-modèles est déterminée en fonction de leurs influences sur les résultats et varie de la classe 1 à 5. La classe de sensibilité 1 indique un impact élevé et la classe 5 indique un impact négligeable sur les résultats. Dans le cadre de cette présente étude, le modèle HDM-4 a été calé au niveau 1 en accordant une attention particulière aux paramètres de classes de sensibilité 1 (impact élevé) et 2 (impact modéré).

3.5.6 Analyse économique, analyse de sensibilité et intégration des critères sociaux et environnementaux

L'analyse économique, l'analyse de sensibilité et l'intégration des critères sociaux et environnementaux ont permis d'obtenir des résultats pertinents dont les interprétations appropriées mènent au choix d'une option optimum (meilleure) de bitumage. Toutes ces analyses ont été réalisées avec le logiciel HDM-4.

3.5.6.1 Analyse économique

L'analyse économique, comme cela a déjà été spécifié dans la section « revue de littérature », consiste à comparer les coûts et les avantages des projets routiers en termes monétaires des options sans projet et avec projet et d'en déduire les critères économiques comme la VAN, le TRI et le rapport C/A (Mohapatra, 2015). L'option sans projet est l'option de base qui consiste à continuer l'entretien des tronçons de route existants en GL. Les options avec projet sont composées des options de bitumage qui seront comparées à l'option de base. L'analyse économique avec le logiciel HDM-4 nécessite un grand nombre de données dont une partie a déjà été spécifiée dans la sous-section « investigations et collecte de données ». Dans le présent document, les données ont été regroupées en 4 catégories : les données sur les paramètres généraux, les données sur les caractéristiques des tronçons de route, les données sur le parc de véhicules, les données sur les normes des travaux et les données sur les coûts des travaux. Pour des raisons de confidentialité et de taille, certaines données n'ont pas été présentées dans ce document, mais plutôt décrites.

1) Les données sur les paramètres généraux

Les paramètres généraux sont des hypothèses qui ont été adoptées pour l'analyse économique des quatre (4) tronçons. Telles que présentées dans le Tableau 3.4, ces hypothèses sont : le début du projet, la période d'analyse, la durée de construction l'unité monétaire, le coefficient de conversion des coûts, la valeur résiduelle, le taux d'actualisation et le taux de croissance du trafic.

Tableau 3.4 Paramètres généraux

Paramètre	Valeur
Début du projet	2016
Période d'analyse	20 ans
Durée de construction	1 an (tronçons A5 et A11)
	2 ans (tronçons A10 et A16)
Coefficient de conversion des coûts	0,84
Unité monétaire	Dollar USD
Valeur résiduelle	20 % des coûts totaux
Taux d'actualisation	10%
Taux de croissance du trafic	4% (2016 -2017)
	3,5 % (2018- 2020)
	3% (2021-2025)
	2,5 % (2026-2035)

2) Les données sur les caractéristiques des tronçons de route

Les caractéristiques des tronçons sont principalement issues de l'inventaire routier, des mesures de la rugosité et de l'étude de trafic. Ces caractéristiques comprennent l'identifiant, le nom, la largeur de la chaussée, le nombre de voies, le TJMA, la déclivité, la sinuosité, l'altitude, l'année du dernier rechargement, l'épaisseur de la couche de roulement et l'IRI de chaque tronçon homogène (voir Tableau 3.5).

3) Les données sur le parc des véhicules

Les données sur le parc de véhicules sont composées des caractéristiques de base et des coûts unitaires économiques des types de véhicules circulant sur chaque tronçon homogène. Les caractéristiques de base sont composées des caractéristiques physiques comme le facteur d'équivalence de véhicule de transport (PCSE), le nombre de roues et le nombre d'essieux, des caractéristiques d'utilisation comme le nombre de kilomètres annuels parcourus, le nombre d'heures annuelles parcourues et la durée de vie du véhicule, des caractéristiques pneumatiques et de la charge utile du véhicule. Les coûts unitaires économiques sont composés du coût

d'acquisition d'un nouveau véhicule, des coûts de carburant et de lubrifiants, du coût de la pneumatique, du coût d'équipage, des frais généraux annuels, du taux d'intérêt et des coûts du temps des trajets professionnels, non professionnels et d'immobilisation des marchandises. Les données sur le parc de véhicules sont issues des enquêtes sur le temps de trajet et sur les coûts d'exploitation des véhicules. Ces données ont été incorporées dans le logiciel HDM-4 pour l'analyse économique. Toutefois, pour des raisons de confidentialité, elles n'ont été présentées dans le présent document.

Tableau 3.5 Les caractéristiques des tronçons homogènes

ID	A5	A10	A11	A16
Nom	Ville 1 - Ville 2	Ville 3 - Ville 4	Ville 5 - Ville 6	Ville 7 - Ville 8
Longueur (km)	13,9	26	12	30
Largeur (m)	7	7	7	7
Accotement (m)	1,5	1,5	1,5	1,5
Nombre de voies (m)	2	2	2	2
Déclivité(m/km)	3,1	7,8	4,2	18,3
TJMA (2005) (véh/j)	659	2153	1498	816
Sinuosité (dég/km)	28	22	6	20
Dévers (%)	2,5	2,5	2,5	2,5
Altitude (m)	200	200	10	300
Vitesse limite (km/h)	80	80	80	80
IRI (2015) (m/km)	20	11,28	16	14,4
Épaisseur de la couche de roulement (2015) (cm)	80	150	100	120
Année du dernier rechargement	2010	2010	2010	2010

4) Les normes des travaux

Les normes des travaux sont composées des normes d'entretien et des normes d'aménagement. Les normes d'entretien sont mises en place par l'administration de gestion des routes en fonction du niveau de service désiré. Ces interventions préventives sont très souvent appliquées

à chaque tronçon homogène pour l'atteinte des objectifs spécifiques liés à l'état fonctionnel du réseau routier (Kerali, Odoki et Stannard, 2006). Les normes d'entretien comprennent les travaux d'entretien courant et périodique ainsi que les coûts unitaires et leurs critères d'intervention de ces travaux. Les normes d'aménagement sont constituées des travaux d'amélioration (bitumage, élargissement, ajout de voies) en raison de l'importance de la route et son TJMA. Les travaux d'aménagement sont généralement appliqués pour ramener une route à un bon état avec une largeur adéquate. Le Tableau 3.6 présente les normes des travaux qui ont été appliquées à chaque tronçon homogène de la présente étude. L'analyse économique ne peut être effectuée sans l'établissement des options sans et avec bitumage. À cet effet, telles que présentées dans le Tableau 3.7, les différentes options sans projet et avec projet ont été établies à partir des normes de travaux. Les coûts des différents travaux n'ont pas été inclus dans le Tableau 6 pour des raisons de confidentialité.

Le Tableau 3.7 présente les sept (7) options (sans et avec projet) qui ont été assignées à chacun des quatre tronçons sélectionnés. Ainsi, en se basant sur les paramètres généraux, les données sur les caractéristiques des tronçons, les données sur le parc de véhicules, les données sur les normes des travaux et les données sur les coûts des travaux, le logiciel HMD-4 a été utilisé pour calculer les coûts, les avantages et les principaux critères économiques (VAN, TRI, VAN/C) de chaque projet routier en comparant les options de bitumage avec l'option de base.

Tableau 3.6 Normes des travaux d'entretien et d'aménagement

Normes	Critères d'intervention	Type de travaux
Entretien préventif des routes en graveleux latéritique	Épais couche de roulement ≤ 100 Chaque 3 ans	Rechargement 50 mm
	IRI ≥ 12 et TJMA ≥ 59 véh/j Chaque 3 mois	Reprofilage lourd
	Passes trafic > 9000 Passes (AADT)	Reprofilage léger
	Épais couche de roulement ≤ 100 Chaque année Quantité ≤ 100 m ³ /km/an	Point à temps
	Chaque année	Travaux de dépendances
Entretien préventif des routes bitumineuses	Dégradation $\geq 20\%$ Chaque année	Enduit Bicouche de 25 mm
	Nids de poule ≥ 20 nb/km	Réparation de nid de poule
	50 m ² /km chaque année	Réparation des dentelles de rive
	Fissuration large $\geq 5\%$ Chaque année	Colmatage des fissures
	Chaque année	Travaux de dépendance
Aménagement (Bitumage)	Durée de construction variant de 1 à 2 ans selon les tronçons considérés	Enduit superficiel bicouche 20 mm - 25mm Couche de base stabilisée 150 mm
	Durée de construction variant de 1 à 2 ans selon les tronçons considérés	Enrobé dense 90 mm - 120 mm Couche de base stabilisée 150 mm

Tableau 3.7 Les options sans et avec projet

Option	Norme des travaux	Année
0 (base)	Entretien préventif des tronçons en GL	2016
1	Bitumage en ESB + entretien préventif après bitumage	2016
2	Entretien préventif des tronçons en GL	2016
	Bitumage en ESB + entretien préventif après bitumage	2018
3	Entretien préventif des tronçons en GL	2016
	Bitumage en ESBESB + entretien préventif après bitumage	2020
4	Bitumage en ED + entretien préventif après bitumage	2016
5	Entretien préventif des tronçons en GL	2016
	Bitumage en ED + entretien préventif après bitumage	2018
6	Entretien préventif des tronçons en GL	2016
	Bitumage en ED + entretien préventif après bitumage	2020

3.5.6.2 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a pour but de vérifier la robustesse de l'analyse économique en variant certains des paramètres d'entrée importants. De manière plus large, l'analyse de sensibilité fait partie de la gestion des risques et des incertitudes des projets routiers. En effet, l'analyse des risques et des incertitudes des projets routiers est composée de l'analyse de sensibilité, de la permutation des valeurs (switching values) et de la simulation Monte-Carlo (World Bank, 2005b). Dans le cadre de la présente étude, l'analyse de sensibilité a été effectuée en variant les paramètres importants comme le trafic, la croissance du trafic et le coût d'investissement dans le but de vérifier la robustesse de la VAN et du TRI à la suite de ces variations. Les scénarios de l'analyse de sensibilité qui ont été supposés dans cette étude sont présentés au Tableau 3.8.

Tableau 3.8 Scénarios de l'analyse de sensibilité

Paramètre	Plage de variation
Trafic	+ /- 20%
Croissance du trafic	+ /- 20%
Coût d'investissement	+ /- 20%

3.5.7 Intégration des critères environnementaux et sociaux

L'analyse économique des tronçons de route n'inclut pas explicitement les aspects environnementaux et sociaux. Ainsi, le choix de la meilleure alternative (option) basé uniquement sur le critère économique ne reflète pas les priorités de toutes les parties prenantes intervenant dans les projets routiers. Même s'il existe certaines méthodes pour effectuer une estimation monétaire des aspects environnementaux et sociaux, ces méthodes ne sont pas précises. En plus, très souvent, ces aspects ne peuvent être exprimés en termes monétaires, d'où la nécessité de recourir à l'AMC. L'AMC est une méthode de priorisation des projets routiers permettant d'établir un cadre systématique afin de dissocier un problème en sous-problèmes dans la perspective d'une meilleure analyse de chacun de ses sous-problèmes pour en déduire une solution globale. L'AMC permet plus précisément d'analyser plusieurs variantes souvent contradictoires et de prendre en compte les préférences établies par toutes les parties prenantes du projet pour atteindre des objectifs préétablis (Kerali, Odoki et Stannard, 2006).

En ce qui concerne cette présente étude, l'intégration des aspects sociaux et environnementaux a été effectuée en utilisant le modèle de AMC du logiciel HDM-4. L'AMC du logiciel HDM-4 est fondée sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP). Les intrants et l'AMC du modèle HDM-4 sont composés des critères ou objectifs, de l'importance relative de chaque critère et des paramètres de calcul de l'indice de performance de chaque option (Odoki et Kerali, 2000e). Les intrants de l'AMC qui ont été établis pour cette présente étude sont décrits comme suit :

1) Objectifs et critères

Les critères sont reliés aux objectifs et constituent les éléments les plus influents de l'AMC. Les objectifs peuvent être économiques, sociaux, politiques et environnementaux. Dans le logiciel HDM-4, l'utilisateur a le choix entre sept (7) catégories de critères : économique, sécurité, niveau de service, environnement, consommation d'énergie, impacts sociaux et impacts politiques. Le Tableau 3.9 présente les catégories de critères et objectifs qui ont été sélectionnées pour la présente étude.

Tableau 3.9 Critères et objectifs de l'AMC

Adapté de Odoki et Kerali (2000e)

Catégorie	Critères/objectifs	Attributs
Économie	Maximiser la valeur actuelle nette	Les avantages économiques sont déterminés pour chaque option par HDM-4.
Niveau de service	Procurer un bon confort	Le confort au roulement des usagers est déterminé par HDM-4 en calculant l'IRI moyen de chaque option.
Environnement	Réduire la pollution atmosphérique	La pollution atmosphérique est évaluée par HDM-4 en quantifiant les polluants émis par les véhicules.
Social	Maximiser les avantages sociaux	Les avantages sociaux consistent en l'amélioration des services de base (écoles, marchés, hôpitaux, etc.). Les préférences sont fournies par un panel d'experts pour chaque option.

2) L'importance relative de chaque critère

L'importance relative est l'attribution d'un poids relatif à chaque critère. Le poids relatif à chaque critère est attribué par un panel d'experts multidimensionnels. Ce panel d'experts est constitué d'ingénieurs et de gestionnaires des routes, d'environnementalistes et de sociologues qui sont issus de l'administration de gestion des routes du pays concerné, du bailleur de fonds et du consultant. Les poids sont les valeurs numériques comprises entre 1 et 9. La valeur 1 est définie comme « sans préférence », la 2 comme « très légère préférence », la 3 comme « légère

préférence », la 4 comme « légère à nette préférence », la 5 comme « nette préférence », la 6 comme « nette à très nette préférence », la 7 comme « très nette préférence », la 8 comme « forte préférence », la 9 comme « très forte préférence ». Le Tableau 3.10 présente les poids qui ont été attribués à chaque option par le panel d'experts. L'analyse des poids relatifs attribués par ce panel d'expert indique une nette préférence pour la maximisation des avantages sociaux, ce qui est logique, car la majorité des tronçons traverse des zones rurales où les préoccupations rurales sont une priorité pour le bailleur de fonds.

Tableau 3.10 Poids relatifs aux critères

Critères	Poids relatifs
Valeur actuelle nette (VAN)	1
Confort au roulement	2
Pollution atmosphérique	3
Maximiser les avantages sociaux	5

3) Les paramètres de calcul des indices de performance

Les indices de performance donnent une indication pour le choix d'une meilleure option en la comparant aux autres options pour un critère donné. Dans la présente étude, les indices de performance qui ont été calculés sont les suivants (Odoki et Kerali, 2000e) :

- L'indice de performance du critère économique ($VANINDEX_j$)
- L'indice de performance du critère de niveau de service ($RNINDEX_j$)
- L'indice de performance du critère environnemental ($AQINDEX_j$)
- L'indice de performance du critère social.

Il est important de mentionner que pour le critère environnemental, les émissions de sept (7) principaux polluants atmosphériques des véhicules ont été prises en compte. Il s'agit des hydrocarbures, du monoxyde de carbone, des oxydes d'azote, du dioxyde de carbone, du

dioxyde de soufre, des particules et du plomb. La quantité de ces polluants a été générée automatiquement avec le logiciel HDM-4.

Les indices de performance (IP) des critères économiques, environnementaux et de niveau de service ont été calculés par HDM-4 en utilisant les équations présentées à l'annexe III. Cependant, les indices de performance du critère social ne peuvent pas être estimés par HDM-4. De ce fait, les valeurs des indices de performance ont été évaluées qualitativement en fonction des préoccupations sociales des populations locales par un panel d'experts en se basant sur les valeurs empiriques suivantes (Odoki et Kerali, 2000e): 0 pour «insatisfaction majeure», 0,25 pour «insatisfaction mineure», 0,5 pour «Indifférence», 0,75 pour «satisfaction mineure et 1 pour «satisfaction majeure». Le Tableau 3.11 présente les indices de performance du critère social qui ont été évalués par le panel d'experts. Cette étape est très critique et nécessite que les experts (sociologues) intègrent les préoccupations de toutes les couches sociales de la population locale à travers des audiences publiques. Certaines informations et hypothèses des projets ont été suggérées aux experts à travers le principe de la méthode Delphi pour faciliter l'établissement des indices de performance sociale. Ces informations et hypothèses sont décrites comme suit :

- Pour établir les IP sociaux des options de base (route non revêtue en GL), le nombre de services sociaux de base (IB) (écoles, dispensaires, marchés, etc.) situés à proximité de chaque tronçon, l'état (IRI) et la population ont été fournis aux experts par communication personnelle et par courriel. En se basant sur ces informations, un consensus des opinions des experts révèle qu'il y a une insatisfaction mineure (voir Tableau 3.11 : indice de préférence = 0,25) quant à l'accessibilité aux infrastructures de bases à proximité des tronçons A5 et A16. Toutefois, l'insatisfaction est majeure pour les tronçons A10 et A11. Cette insatisfaction majeure se justifie par le fait que les effets néfastes combinés du nombre de SSB, de l'IRI et du nombre d'habitants sont plus prononcés pour les tronçons A10 et A11 comparativement aux tronçons A5 et A16.

- Pour établir l'indice de performance des autres options, deux hypothèses ont été suggérées aux experts. La première hypothèse concerne le comportement à long terme du type de revêtement : il est assumé que l'état moyen pendant le cycle de vie de l'ED est meilleur que celui d'ESB. La deuxième hypothèse est relative aux années d'application des options : il est assumé que le report d'un bitumage peut dans certains cas réduire la satisfaction en matière d'accessibilité aux SSB). Ainsi, il peut être vu dans le Tableau 3.11 (consensus des opinions des experts) qu'en bitumant les tronçons en ESB en 2016, la satisfaction serait mineure tandis qu'en les bitumant en ED en 2016, la satisfaction serait majeure. De plus, en reportant le bitumage en ED en 2018, la satisfaction serait mineure alors qu'elle était majeure en 2016.

Les poids relatifs des critères des catégories économiques, environnementales et sociales et les indices de performance sociale des tronçons collectés auprès des experts ont été utilisés pour établir les poids relatifs des critères et les indices de performance sociale définitifs (voir tableaux 3.10 et 3.11) en se basant sur le principe de la méthode Delphi.

La méthode Delphi est un outil d'aide à la décision permettant de dégager un consensus sur des opinions divergentes par l'interrogation d'un panel d'experts. Cette technique permet d'une part d'éviter la confrontation directe et l'influence des experts entre eux en collectant leurs opinions par une communication personnelle avec eux (email, téléphone, rencontre personnelle). Les résultats finaux de la méthode Delphi consistent en une série d'opinions (poids ou indices) représentant un consensus entre les experts. Ce consensus peut être utilisé pour établir des priorités (TRL, 1993b). Les sept (7) principales étapes de méthode de Delphi sont l'élaboration des critères de sélection des experts (1), l'élaboration de la liste d'experts potentiels (2), le contact avec les experts listés et référés (3), l'invitation des experts à participer à l'étude (4), l'administration des questions (5), la consolidation de réponses (6) et la classification des réponses (7) (Ekionea, Bernard et Plaisent, 2011; Loo, 2002).

Dans le présent article, la méthode de Delphi a été ajustée puisqu'un seul tour de questionnaires (basés sur les informations des projets et les hypothèses mentionnées ci-dessus) a été envoyé au panel d'experts pour faciliter l'établissement des poids et des indices. Par la suite, leurs

valeurs médianes des poids relatifs des critères et des indices de performance sociale telles que présentées dans les tableaux 3.10 et 3.11 ont été utilisées dans les analyses de la présente étude.

Tableau 3.11 Indice de performance du critère social

ID tronçon	Option 0	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Option 6
A5	0,25	0,75	0,75	0,5	1	0,75	0,75
A10	0	0,75	0,75	0,5	1	0,75	0,75
A11	0	0,75	0,75	0,5	1	0,75	0,75
A16	0,25	0,75	0,75	0,5	1	0,75	0,75

Les étapes de l'AMC qui ont été suivies pour l'intégration des aspects sociaux et environnementaux dans l'analyse technico-économique en utilisant le modèle HDM-4 sont les suivantes (Odoki et Kerali, 2000e) :

- Définir les intrants et les options sans projet et avec projet d'une analyse économique classique avec le logiciel HDM-4.
- Lancer le logiciel HDM-4 pour obtenir les extrants comme la valeur moyenne de l'uni, les quantités d'émission et la VAN qui serviront d'attributs de chaque option de tronçon.
- Définir les intrants de l'AMC (voir ci-dessus).
- Établir une matrice des hiérarchies (MH) de chaque critère, en déduire la matrice des hiérarchies normalisées (MHN), calculer le vecteur total des priorités (VTP) et vérifier la cohérence de MHN.
- Déterminer l'indice de performance de chaque critère comme mentionné ci-dessus et calculer le vecteur de performance (VP).
- Établir la matrice des comparaisons (MC) à partir des vecteurs des VP.
- Déterminer le vecteur de classement de l'ensemble des options de l'étude qui est le produit de MC et du VTP.

Toutes les étapes pour la détermination du vecteur de classement permettant de choisir les meilleures options de bitumages en considérant conjointement les aspects économiques, sociaux et environnementaux à travers l'AMC sont présentées à l'annexe III. Ces étapes ne concernent qu'un seul tronçon.

3.5.8 Choix de la meilleure alternative de bitumage

Le choix de la meilleure (optimum) option est basé sur les critères techniques, économiques, sociaux et environnementaux. L'analyse économique a permis de trouver l'option économiquement viable. Si cette option reste inchangée après l'intégration des aspects sociaux et environnementaux, elle constitue la meilleure option de bitumage. Le cas échéant, l'option obtenue après l'intégration des aspects sociaux et environnementaux est la meilleure option de bitumage. Cette dernière étape constitue aussi une validation de l'outil d'aide à la prise de décision l'IPFR.

3.6 Résultats et discussion

3.6.1 Structures des chaussées et vérification des contraintes admissibles

3.6.1.1 Structures des chaussées des tronçons de route - Méthode CEBTP

Les structures des chaussées des quatre (4) tronçons de route sont composées des différentes couches dont les caractéristiques sont obtenues par dimensionnement. Le Tableau 3.12 présente les structures des chaussées des tronçons qui ont été sélectionnés dans le *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP, 1984)* en se basant sur les paramètres d'entrée comme les classes de portance du sol de support (plateforme) et les classes de trafic. Les classes de trafic des tronçons sont T1 et T2. Ces classes de trafic dépendent du nombre d'ÉCAS de chaque tronçon sur la période d'analyse. La classe T1 indique un nombre d'ÉCAS qui est inférieur à 3 millions et T2 indique un nombre d'ÉCAS compris entre 3 millions et 10 millions (*CEBTP, 1984*). Les classes de portance du sol de support des tronçons de route sont S3 et S4. Ces classes de portance dépendent des valeurs du

CBR de la plateforme de chaque tronçon de route. Les classes de portance S3 et S4 représentent les sols de support dont les CBR sont respectivement compris entre 10 et 15 et entre 15 et 30. Les épaisseurs des couches de fondation et des couches de forme présentées dans le Tableau 12 varient respectivement entre 150 cm et 250 cm et entre 450 et 500 cm.

Les épaisseurs des couches de fondation et de forme existantes des tronçons de route qui ont été dérivées des investigations géotechniques présentées dans le Tableau 3.3 varient respectivement entre 220 cm et 280 cm et entre 590 cm et 640 cm. Il peut être constaté que les épaisseurs des couches de fondation et de formes existantes des tronçons de route sont supérieures à celles obtenues par le dimensionnement (Tableau 3.12) ; partant de ce constat, les épaisseurs des couches de fondation et formes existantes des tronçons de route sont adéquates et ne doivent pas être remplacées par celles obtenues par le dimensionnement, sauf dans le cas où les caractéristiques géotechniques des matériaux de ces couches existantes sont faibles. Telles que présentées dans le Tableau 3.13, les caractéristiques géotechniques telles que le diamètre nominal maximal des granulats (D_{max}), la limite de liquidité (LL), la limite de plasticité (IP), la portance de la plateforme (CBR) et le gonflement linéaire sont toutes inférieures aux valeurs limites fixées par le guide. Par conséquent, ces caractéristiques géotechniques sont conformes aux exigences minimales de qualité décrites dans le guide (*CEBTP, 1984*). En somme, les couches de fondation et de forme existante des tronçons sont appropriées et ne doivent pas être remplacées. Il est important de mentionner que les tronçons existants sont en GL ne comportant pas de couches de base ni de revêtements. Ces deux couches seront mises en place avec des épaisseurs et des caractéristiques géotechniques appropriées issues du guide (voir Tableau 3.15). La structure-type de chaussée retenue pour les quatre (4) tronçons de route comporte quatre (4) couches.

Telles que présentées dans le Tableau 3.14, les deux premières couches sont composées de la couche de surface (ESB ou ED) obtenue par le dimensionnement et les deux dernières couches sont les couches existantes de fondation et de forme des tronçons de route dont les épaisseurs et les caractéristiques géotechniques proviennent de l'étude géotechnique.

Tableau 3.12 Structures des chaussées –CEBTP

ID tronçon	Paramètres d'entrée		Matériaux des couches				Épaisseurs des couches (mm)			
	Classe du sol	Classe de trafic	R	B	F	Fm	R	B	F	Fm
A5	S4	T1	ESB/ED	GL/GN	SA	SA	25/ 90	150	150	500
A10	S4	T2	ESB/ED	GL/GN	SA	SA	120/25	150	200	500
A11	S3	T1	ESB/ED	GL/GN	GL	GL	25/ 90	150	250	450
A16	S4	T2	ESB/ED	GL/GN	GL	GL	120/25	150	200	500

ESB : enduit superficiel bicouche

ED : enrobé dense

S, T : sol et trafic

B : couche de base

GL/GN : graveleux latéritique/ grave naturelle

SA : Sable argileux

R : revêtement de surface

F, Fm: couche de fondation et couche de forme

Tableau 3.13 Comparaison des caractéristiques géotechniques avec les valeurs recommandées par le Guide CEBTP

ID tronçon	Couche de forme						Couche de fondation					
	Dmax (mm)	< 80 µm (%)	LL (%)	IP (%)	CBR (%)	GL (%)	Dmax (mm)	< 80 µm (%)	LL (%)	IP (%)	CBR (%)	GL (%)
A5	20	39	42	17	18	0,21	20	50	40	15	34	0,25
A10	13	37	46	19	21	0,26	5	49	44	17	33	0,23
A11	6,3	39	60	29	14	0,59	4	23	59	27	30	0,53
A16	25	27	59	28	25	0,6	16	23	57	27	32	0,59
Guide - CEBTP	< 150	< 35 ou 45	< 70	< 20 ou 30	>= 10	< 2	< 60	< 35	< 70	< 30	>= 30	< 2

Tableau 3.14 Structures des chaussées retenues

ID tronçon	Matériaux des couches				Épaisseurs des couches (mm)			
	R	B	F	Fm	R	B	F	Fm
A5	ESB/ED	GL/GN	SFA	SA	25/ 90	150	280	640
A10	ESB/ED	GL/GN	SFA	SA	120/25	150	250	600
A11	ESB/ED	GL/GN	SA	GL	25/ 90	150	220	590
A16	ESB/ED	GL/GN	GQ	GL	120/25	150	250	640

Tableau 3.15 Hypothèses couche de base et couche de surface

Structure -type	CBR (%)	E (MPa)	Référence
Couche de base amélioré au ciment	160	800	(CEBTP, 1984)
Couche de surface en ESB	300	3000	(CEBTP, 1984)
Couche de surface en ED	540	5400	(IFSTTAR, 2016)

3.6.1.2 Vérification des contraintes dans les structures de chaussées

La vérification des contraintes et déformations dans la structure des chaussées consiste à valider que les sollicitations internes agissant dans les différentes couches sont inférieures aux contraintes ou déformations admissibles définies par les performances des matériaux. Les différentes caractéristiques géotechniques et les épaisseurs présentées dans les tableaux 3.13, 3.14 et 3.15 ont permis de déterminer les paramètres d'entrée pour le calcul des contraintes et déformations dans les couches et de leurs valeurs admissibles en utilisant le logiciel Alizé-Lcpc. Ces paramètres d'entrée sont : l'épaisseur (h), le module d'élasticité (E), le coefficient de poisson (ν). La structure-type des chaussées est composée d'une couche de surface en ESB ou ED, d'une couche de base améliorée au ciment, d'une couche de fondation non traitée et d'une plateforme. En se référant au guide (CEBTP, 1984), les contraintes et déformations dans les couches de la chaussée sont : la déformation de traction à la base de couche de surface et la déformation au-dessus de la plateforme. Comme cela est indiqué dans les tableaux 3.16 et 3.17, les valeurs de ces sollicitations internes sont toutes inférieures aux déformations et contraintes admissibles, respectant ainsi les conditions de fissuration à la base de la couche de

surface et d'orniérage à la surface de la plateforme. Par conséquent, les épaisseurs des couches et les caractéristiques géotechniques des matériaux les constituant sont adéquates. Dans le cas où les contraintes et les déformations dans les couches de la chaussée sont supérieures à leurs valeurs admissibles, les différentes épaisseurs seront augmentées en conséquence (Kimbonguila, Abriak et Becquart, 2015). À la suite de cette validation, l'analyse économique peut être effectuée pour vérifier la viabilité économique du bitumage des tronçons de route en considérant les structures de chaussée indiquées dans le Tableau 3.14 et les caractéristiques géotechniques des couches de base et revêtements dans le Tableau 3.15.

Tableau 3.16 Vérifications des contraintes et déformations - Enduit superficiel bicouche

Structure Sollicitations	A5		A10		A11		A16	
	R-ESB	Fm	R-ESB	Fm	R-ESB	Fm	R-ESB	Fm
Eps T (micro-def)	41,3		37,9		54,3		33,1	
sigmaT (MPa)								
EpsZ (micro-def)		457,5		485,7		594,4		480,5
Valeurs admissibles	137,2	801,5	86,8	535,5	100	626,5	62,3	570,3

Tableau 3.17 Vérifications des contraintes et déformations -Enrobé dense

Structure Sollicitations	A5		A10		A11		A16	
	R-ED	Fm	R-ED	Fm	R-ED	Fm	R-ED	Fm
Eps (micro-def) T	147,8		-136		-152		135,5	
sigmaT (MPa)								
EpsZ (micro-def)		308,5		274,9		389		272,4
Valeurs admissibles	155,9	801,5	173,4	535,5	203,8	626,5	136,7	570,3

3.6.2 Analyse économique

3.6.2.1 Trafic

Le volume du trafic sur la période d'analyse est étroitement lié aux résultats de l'analyse économique, d'où l'importance de s'assurer de sa cohérence avant toute interprétation. Comme présenté à la Figure 3.6, le tronçon A10 (ville 3- ville4) comporte le trafic le plus élevé sur la période d'analyse (20 ans) avec un TJMA d'environ 4000 véh/j suivi du tronçon A11 (ville 5 – ville 6) avec un TJMA 2750 véh/j. Les tronçons A16 (ville 7 -ville 8) et A5 (ville1-ville2) ont les trafics les plus faibles qui sont respectivement de 1500 véh/j et de 1250 véh/j. De plus, il peut être constaté sur la Figure 6 que la croissance des courbes est faible sur les 10 dernières années. Par conséquent, l'allure des courbes est cohérente avec les données du trafic étant donné que les taux de croissance du trafic varient de 4 à 2.5 % sur la période d'analyse, dont 2,5 % représentent la croissance du trafic sur les 10 dernières années.

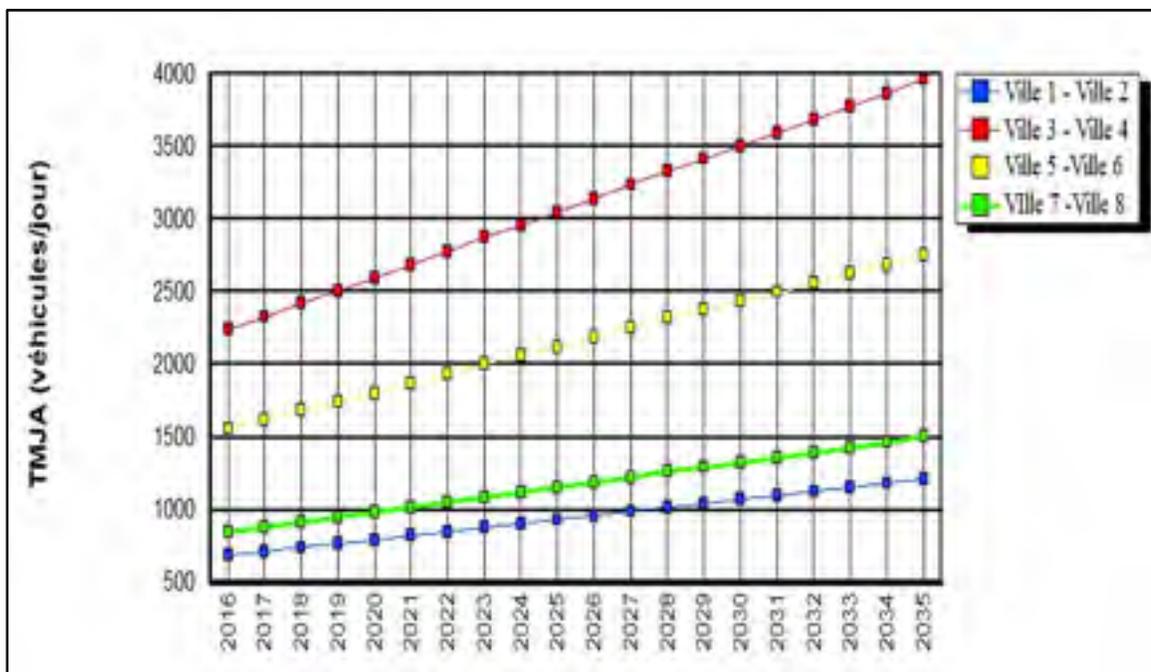


Figure 3.6 TJMA sur la période d'analyse

3.6.2.2 État (IRI) des tronçons avant et après le bitumage

L'état des routes dépend des différentes formes de dégradation (uni, fissures, orniérage, etc.). Les états avant et après le bitumage des tronçons sont représentés dans la présente étude par les valeurs de l'IRI (uni). Les IRI permettent d'apprécier l'impact des différentes normes d'entretien et d'aménagement qui ont été appliquées aux tronçons. Comme indiqué à la Figure 3.7, l'option de base (Aucun bitumage) maintient les tronçons dans un état «mauvais» ($IRI > 8$), alors que les options de bitumage (Bitumage ESB 2016, Bitumage ED 2016, Bitumage ESB 2018, Bitumage ED 2018, Bitumage ESB 2020, Bitumage ED 2020) permettent de réduire les valeurs de l'IRI en dessous de 4 m/km correspondant à un état «bon» d'après les spécifications du règlement 8 de l'UEMOA sur la gestion des routes communautaires (UEMOA, 2009b). De ce fait, les options de bitumage définies par les normes des travaux sont adéquates. Ainsi, il est maintenant possible de calculer les coûts, les avantages et les critères économiques de chaque option de bitumage en la comparant à l'option de base. Il est important de mentionner que sans l'application des normes d'entretien préventif avec les normes d'aménagement, il serait impossible de maintenir les valeurs de l'IRI moyen en dessous de 4 après le bitumage pendant toute la période d'analyse.

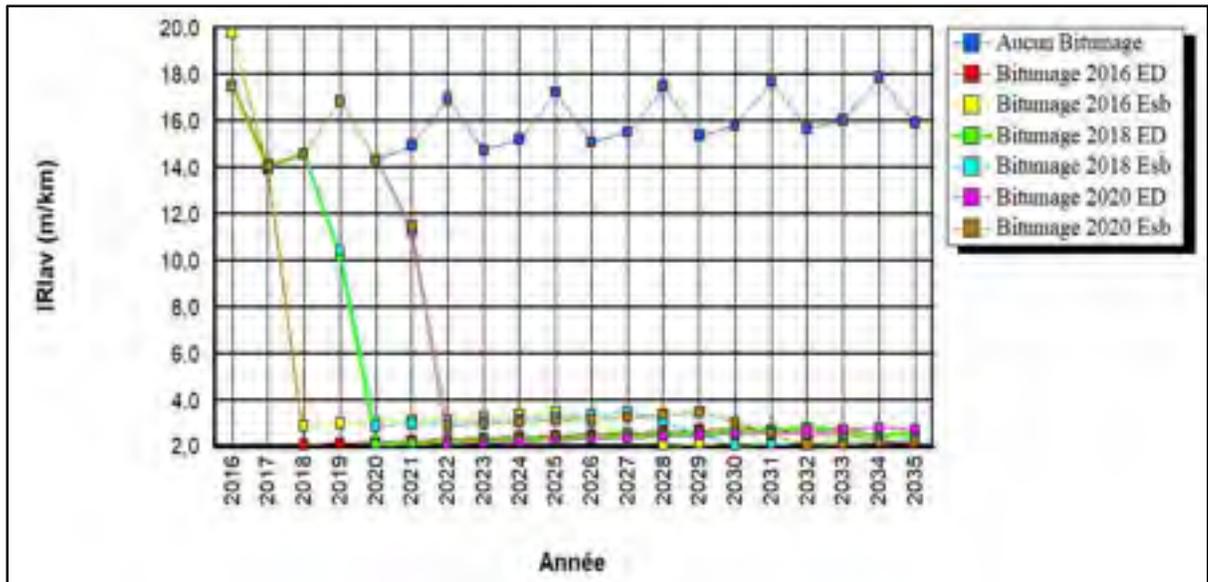


Figure 3.7 TJMA sur la période d'analyse

3.6.2.3 Synthèse de l'analyse économique

L'analyse économique a pour but principal d'effectuer la comparaison des coûts et avantages actualisés des projets routiers et d'en déduire les critères économiques tels que la VAN, TRI. Le Tableau 3.18 présente une synthèse de l'analyse économique composée des coûts actualisés, des avantages actualisés, de la VAN et du TRI de l'option de bitumage le plus économiquement rentable de chaque tronçon de route. Le choix de l'option la plus viable sur le plan économique de chaque tronçon est basé sur la VAN la plus élevée des options de bitumage (voir Tableau 3.7) qui ont été comparées à l'option de base (entretien des chaussées en GL). En effet, la VAN est le meilleur critère économique pour la comparaison des options mutuellement exclusives et son résultat exprime le profit total de l'option (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b). Les profits totaux des options sont aussi équivalents aux profits totaux des projets. Les VAN de l'option « bitumage ESB – 2016 » qui sont de 96,411 M\$USD pour le tronçon A10, 29.878 M\$USD pour le tronçon A16, 30.927, M\$USD pour le tronçon A11 et 13.804 M\$USD pour le tronçon A5 constituent chacune la VAN la plus élevée de toutes les options de bitumage de chaque tronçon. De plus, ces VAN sont toutes positives et les taux de rendement qui sont définis comme étant les taux auxquels les VAN sont égales à zéro sont tous

supérieurs au taux d'actualisation (10%) des projets, satisfaisant ainsi les critères d'acceptabilité économique des projets financés par la Banque mondiale (World Bank, 2005e). Par conséquent, le bitumage des quatre tronçons de route en enduit superficiel bicouche en 2016 est le plus recommandé parce que les profits totaux seront plus grands durant le cycle de vie (20 ans).

Tableau 3.18 Synthèse de l'analyse économique

ID	Nom du tronçon	Option de bitumage Choisie	ECAA (M\$USD)	EAA (M\$USD)	VAN (M\$USD)	TRI (%)
A10	Ville 3 - Ville 4	Bitumage ESB -2016	8,199	104,61	96,411	63,1
A16	Ville 7 - Ville 8	Bitumage ESB -2016	9,665	39,543	29,878	28,5
A11	Ville 5 - Ville 6	Bitumage ESB -2016	4,075	30,927	26,852	55,6
A5	Ville 1 - Ville 2	Bitumage ESB -2016	5,009	13,804	8,795	24,8

ECAA : Économie des coûts d'administration actualisés

EAA : Économie des avantages actualisés

3.6.3 Analyse de sensibilité

L'analyse économique des projets routiers nécessite plusieurs paramètres qui peuvent induire des incertitudes dans l'évaluation des coûts et des avantages. L'analyse de sensibilité permet de tenir compte de ces incertitudes et de vérifier la robustesse de l'analyse économique en variant les paramètres pertinents. Les scénarios de l'analyse de sensibilité sont définis dans le Tableau 8 de la sous-section « analyse de sensibilité » de la section « méthodologie ». Comme présenté dans les tableaux 3.19, 3.20 et 3.21, nonobstant la variation de +/- des taux de croissance, du trafic et des coûts d'investissement, les VAN et les TRI sont respectivement supérieurs à zéro et à 10 % (taux d'actualisation), satisfaisant ainsi les exigences de la Banque mondiale pour le financement des projets routiers dans les pays en développement (World Bank, 2005a). En outre, les résultats de l'analyse de sensibilité indiquent que dans des cas de scénario optimiste (+20 %) et pessimiste (-20 %) de réduction et d'augmentation des croissances du trafic, des coûts d'investissement et du trafic normal, les projets routiers demeurent rentables. Cette constatation constitue une preuve de viabilité économique des projets et de la robustesse de l'analyse économique.

Tableau 3.19 Sensibilité - croissance du trafic +/- 20%

ID	Nom	Croissance du trafic +20%		Croissance du trafic -20%	
		TRI (%)	VAN (M\$USD)	TRI (%)	VAN (M\$USD)
A5	Ville 1 - Ville 2	30,80	13,12	18,60	4,76
A10	Ville 3 - Ville 4	64,70	104,38	61,50	88,99
A11	Ville 5 - Ville 6	57,00	29,14	54,10	24,73
A16	Ville 7 - Ville 8	29,90	33,70	27,20	26,36

Tableau 3.20 Sensibilité - Coût d'investissement +/-20%

ID	Nom	Coût d'investissement + 20%		Coût d'investissement -20%	
		TRI (%)	VAN (M\$USD)	TRI (%)	VAN (M\$USD)
A5	Ville 1 - Ville 2	29,60	9,96	21,20	7,64
A10	Ville 3 - Ville 4	71,10	98,70	56,90	94,47
A11	Ville 5 - Ville 6	66,50	4,88	47,90	25,89
A16	Ville 7 - Ville 8	32,80	32,18	25,30	27,78

Tableau 3.21 Sensibilité - Trafic normal +/-20%

ID	Nom	Trafic normal + 20%		Trafic -normal -20%	
		TRI (%)	VAN (M\$USD)	TRI (%)	VAN (M\$USD)
A5	Ville 1 - Ville 2	30,80	13,12	18,60	4,76
A10	Ville 3 - Ville 4	74,30	123,08	54,80	6,13
A11	Ville 5 - Ville 6	68,50	34,91	43,10	18,87
A16	Ville 7 - Ville 8	34,50	42,31	22,60	18,44

3.6.4 Intégration des aspects sociaux et environnementaux

L'intégration des aspects sociaux et environnementaux en utilisant l'AMC permet de trouver la meilleure option considérant toutes les préférences et tous les objectifs de toutes les parties prenantes des projets. Les parties prenantes dans la présente étude ont été composées avec un panel d'experts multidisciplinaires. Les résultats de l'AMC sont des vecteurs de classement qui sont le produit de la matrice de comparaison (MC) et de vecteur total des priorités (VTP). Par conséquent, pour chaque section, la valeur du vecteur de classement la plus élevée représente la meilleure option (voir vecteur en jaune du Tableau 3.22. Ces résultats présentés dans le Tableau 3.22 indiquent que l'option 4 « bitumage ED-2016 » est la meilleure option du bitumage des quatre tronçons en prenant en compte conjointement les facteurs (critères) techniques, économiques, environnementaux et sociaux sur tout le cycle de vie. À l'opposé, si l'option ne changeait pas après l'intégration des aspects sociaux et environnementaux, l'option sélectionnée en considérant exclusivement le niveau de priorité économique (Option 1 - Bitumage ESB 2016) demeurerait l'intervention optimale de bitumage. Un exemple des étapes de calcul du vecteur de classement pour un seul tronçon est présenté à l'annexe III.

Tableau 3.22 Résultats de l'AMC

ID	Nom tronçons	Option 0	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Option 6
A10	Ville 3 - Ville 4	0,0000	0,8672	0,8249	0,6561	0,9987	0,8311	0,6620
A11	Ville 5 - Ville 6	0,1250	0,8676	0,8295	0,6573	0,9975	0,8339	0,6611
A5	Ville1 - Ville 2	0,1250	0,8709	0,8504	0,6772	0,9947	0,8475	0,6803
A16	Ville 5 - Ville 6	0,0000	0,8668	0,8618	0,6543	0,9919	0,8615	0,6585

Le tableau 3.23 présente les indicateurs économiques des meilleures options de bitumages des tronçons. Les VAN et les TRI des tronçons sont tous respectivement supérieurs à 0 et 12 % satisfaisant ainsi les critères de financement de la Banque mondiale. Toutefois, ces VAN sont inférieures à ceux des meilleures options de bitumage choisies en prenant en compte la

dimension économique. Cela indique clairement que ces meilleures options bitumage sont les plus appropriées en prenant en compte conjointement les dimensions économiques, sociales et environnementales. De plus, les coûts d'administration actualisés (CAA) qui représentent les coûts économiques de réalisation des travaux de bitumage sont estimés à 42,154 Millions USD (voir tableau 3.23).

Tableau 3.23 Indicateurs économiques des meilleures options de bitumage en ED -2016

ID	Nom du tronçon	Option de bitumage Choisie	CAA (M\$USD)	ECA (M\$USD)	EAA (M\$USD)	VAN (M\$USD)	TRI (%)
A10	Ville 3-Ville 4	Bitumage ED -2016	13,364	9,842	105,023	95,181	57,0
A16	Ville 7-Ville 8	Bitumage ED -2016	15,278	11,441	39,743	28,301	25,7
A11	Ville 5-Ville 6	Bitumage ED -2016	6,482	4,861	31,033	26,172	48,3
A5	Ville 1 -Ville 2	Bitumage ED -2016	7,390	5,534	13,862	8,328	22,0
Total			42,514	31,678	189,661		

Les quantités des émissions polluantes sur les quatre tronçons telles qu'illustrées aux figures 8, 9, 10 et 11 indiquent que la meilleure option de bitumage (option4 – bitumage ED 2016) comporte les plus faibles impacts environnementaux comparativement aux autres options, y compris l'option de base. En effet, les réductions des émissions polluantes des meilleures options (option 4) des tronçons A5, A10, A11 et A16 sont respectivement égales à 21,06 %, 33,05%, 33,47 % et 31,52 %. L'analyse des résultats des émissions polluantes permet de mettre en évidence les tendances suivantes :

- La réduction des émissions polluantes des options de bitumage en ESB est inférieure à celle des options de bitumage en ED. Par exemple, les réductions des émissions polluantes sur le tronçon A5 des options 1 (bitumage ESB - 2016) et 4 (bitumage ED -2016) sont respectivement égales à 18,08 % et 21,06 %. La différence entre ces réductions peut être

attribuée au comportement à long terme du type de revêtement. En effet, sous les mêmes conditions de trafic et du climat, les chaussées en ESB se dégradent plus rapidement que les chaussées en ED) (voir Figure 7 - courbe de performance) (SMAEG, 2011). De plus, les principaux objectifs des ESB sont d'imperméabiliser la surface de chaussée (y compris colmatage des fissures en cas d'entretien périodique) et d'améliorer l'adhérence de la chaussée. Cependant, l'ESB n'apporte pas de résistance supplémentaire à la structure de chaussée (corps de la chaussée).

- En considérant les options avec le même type de revêtement, la réduction des émissions polluantes varie en fonction de l'année d'application des options. En effet, les réductions des émissions polluantes des options 1 (bitumage en ESB en 2016) et 3 (bitumage en ESB en 2020) du tronçon A5 sont respectivement égales à 18,08 % et 16,31 %. Cette différence peut se justifier par le fait qu'en reportant le bitumage des routes à des années ultérieures, la dégradation des routes devient plus prononcée, ce qui favorise des émissions polluantes plus élevées que si les routes étaient bitumées antérieurement.

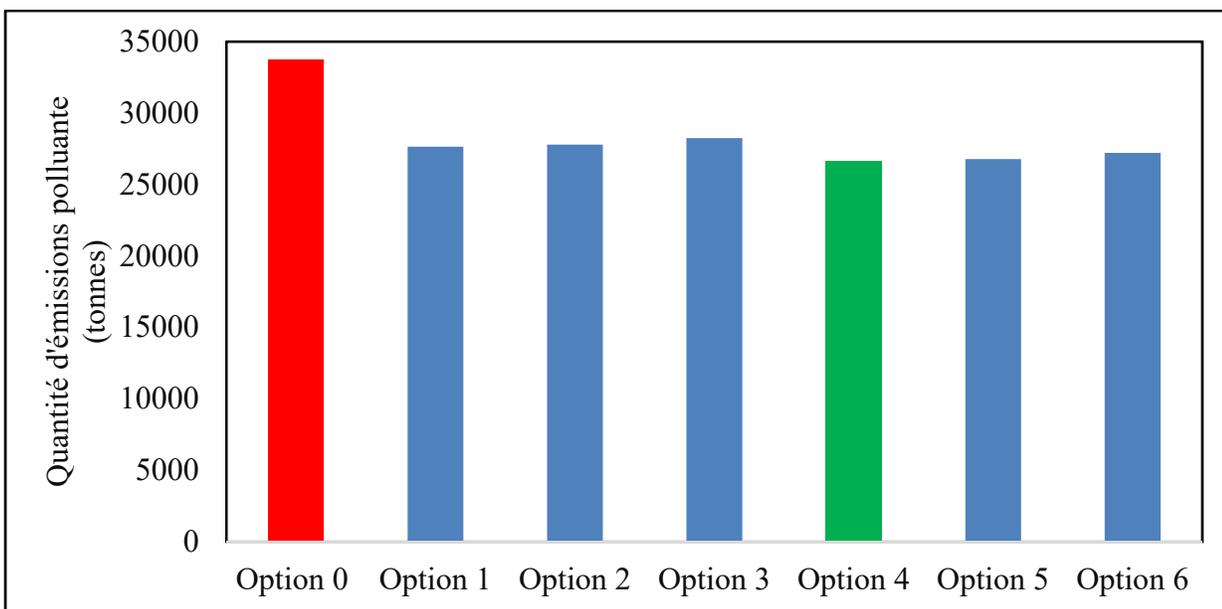


Figure 3.8 Quantités d'émissions polluantes des options du tronçon A5

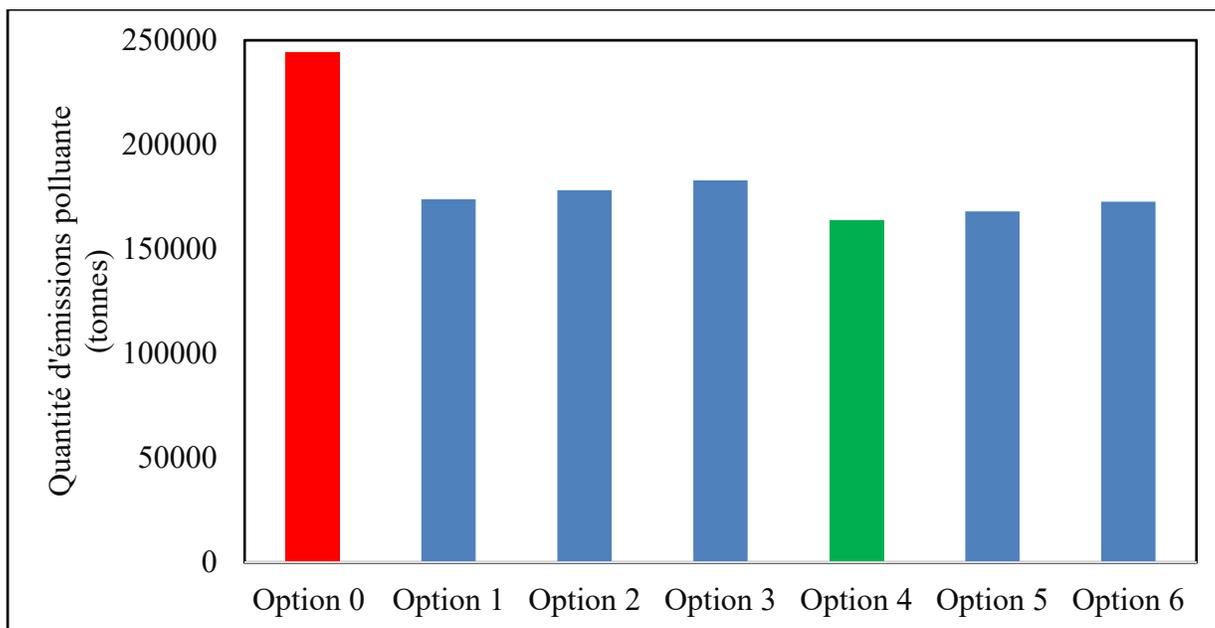


Figure 3.9 Quantités d'émissions polluantes des options du tronçon A10

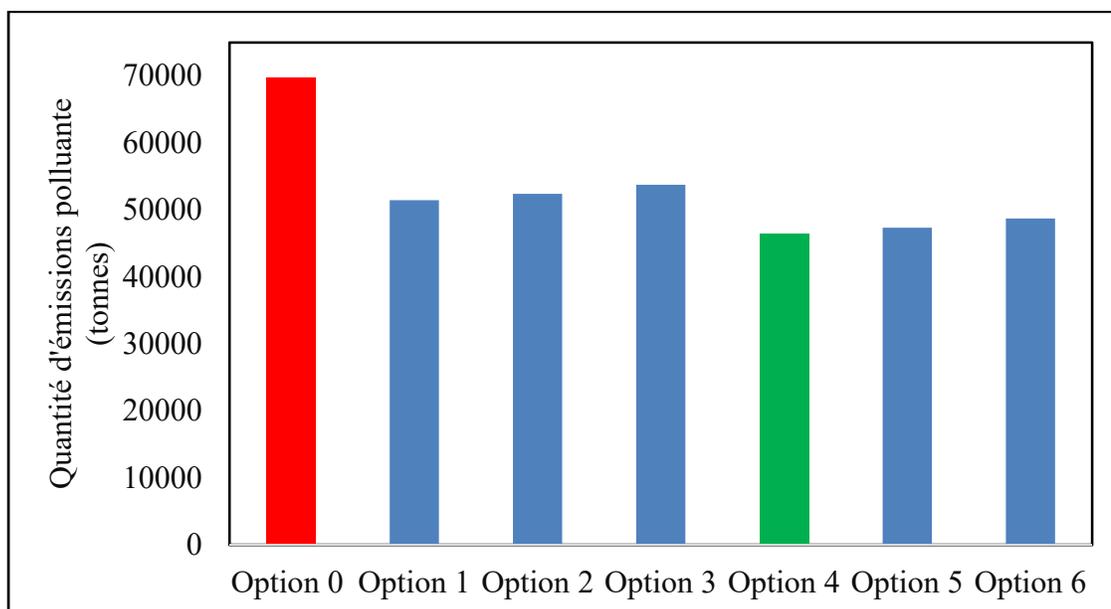


Figure 3.10 Quantité d'émissions polluantes des options du tronçon A11

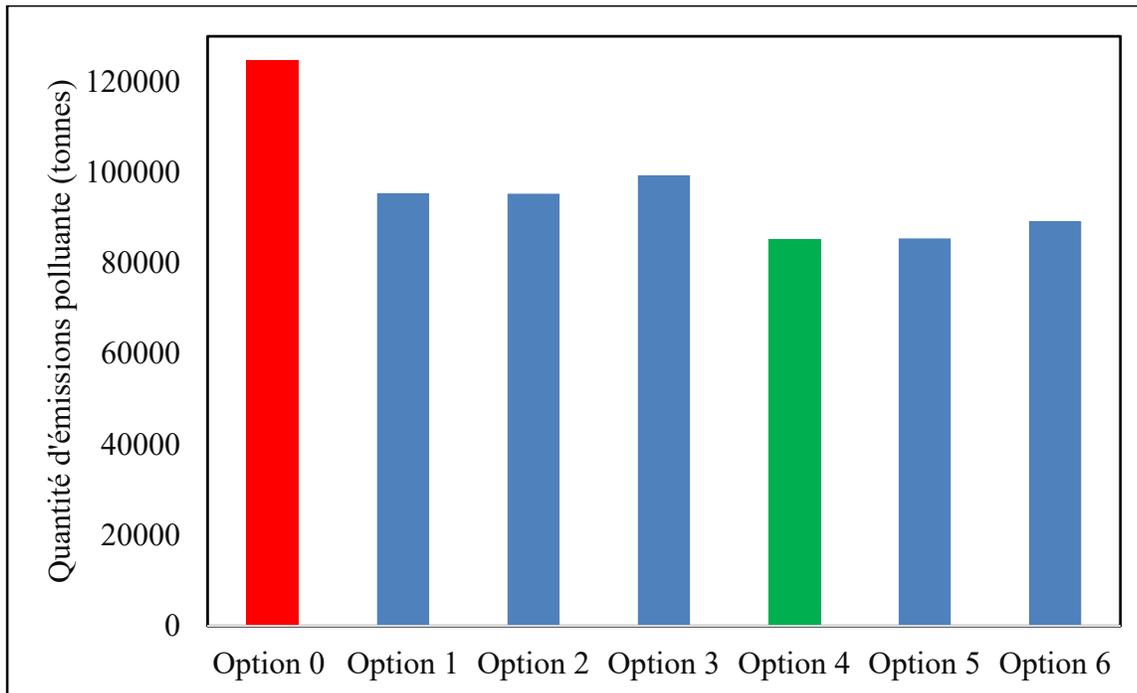


Figure 3.11 Quantité d'émissions polluantes des options du tronçon A16

3.6.5 Meilleure option de bitumage

À la lumière de l'analyse économique et de l'analyse de sensibilité de l'intégration des aspects sociaux et environnementaux, la meilleure option est de bitumer les tronçons de route en enrobé dense (ED) durant l'année 2016 et d'assurer un entretien préventif après les travaux de bitumage. En d'autres termes, les projets de bitumage doivent être réalisés en enrobé dense en 2016, si le bailleur de fonds et l'administration de gestion des routes du pays concerné ont pour objectif l'obtention de tronçons de route bitumés qui soient en même temps solides techniquement, économiquement rentable avec des impacts environnementaux minimes et des avantages sociaux élevés. Ces résultats valident l'outil d'aide à la décision, l'IPFR, dont le but est de sélectionner les projets routiers de «haute priorité» considérant simultanément les critères techniques, économiques, sociaux et environnementaux (Kaba et Assaf, 2018).

3.7 Conclusion et recommandations

Le bitumage des routes consiste à resurfacier des routes non revêtues à l'aide d'un enduit superficiel (monocouche, bicouche et tricouche) ou d'un enrobé bitumineux (enrobé dense ou béton bitumineux). La décision de bitumage des tronçons dépend de plusieurs facteurs nécessitant des investigations approfondies pour la détermination des paramètres techniques, économiques, sociaux et environnementaux pertinents qui sont impératifs au choix de la meilleure intervention.

La méthode rationnelle intégrée développée dans le présent article s'est basée sur des étapes rationnelles et fondamentales de dimensionnement, d'analyse économique et d'analyse multicritère pour choisir l'option de bitumage la plus appropriée pour quatre (4) projets routiers situés en Afrique de l'Ouest. Cette méthode rationnelle a permis de conclure que l'entretien des tronçons existants en graveleux latéritique n'est pas rentable économiquement et que les impacts sociaux et environnementaux s'accroîtront négativement si aucune action n'est prise le plus tôt possible pour bitumer ces tronçons de route.

Les investigations et les collectes des données ont permis de dimensionner les tronçons selon les règles de l'art. Tout porte à croire que le dimensionnement de ces tronçons de route existants en graveleux latéritique avait été effectué pour être bitumé ultérieurement puisque les épaisseurs et les caractéristiques géotechniques satisfont les exigences minimales fixées par le guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. La structure-type des chaussées des tronçons sélectionnés est composée d'une couche de surface en ESB ou ED, d'une couche de base en GL amélioré au ciment, d'une couche fondation et d'une couche de forme (plateforme). La vérification des contraintes et déformations admissibles des couches de la structure type de chaque tronçon montre qu'elles sont supérieures aux sollicitations internes des couches, ce qui constitue la preuve que les épaisseurs sont adéquates. Par conséquent, les chaussées sont capables de supporter le volume et les charges de trafic durant la période d'analyse de 20 ans et les tronçons peuvent être maintenant analysés économiquement pour vérifier leurs viabilités.

Les normes des travaux sont très importantes pour l'analyse économique puisqu'elles permettent de définir les différentes options de base et options de bitumage. L'application des options de bitumage a permis de maintenir les tronçons à un état « bon » (caractérisé par un IRI moyen inférieur à 4) durant toute la période d'analyse et d'en déduire les critères économiques. L'option la plus rentable économiquement de chaque tronçon est celle de bitumage en ESB en 2016. Cette rentabilité est justifiée par une VAN plus élevée et un TRI supérieur au taux d'actualisation de cette option par rapport à toutes les autres options de bitumage comparées à l'option de base.

L'analyse de sensibilité a permis de valider la robustesse de l'analyse économique, étant donné que les VAN et les TRI des tronçons restent respectivement supérieurs à 0 et au taux d'actualisation (10%), bien que les taux de croissance, le trafic normal et les coûts d'investissement aient été variés à +/-20 %. L'AMC a permis l'intégration des aspects sociaux et environnementaux dans l'analyse économique et de choisir la meilleure option de bitumage en prenant en compte concomitamment les critères économiques, environnementaux et sociaux. Cette meilleure option est l'option de bitumage en ED en 2016 (option 4).

En considérant les conditions locales, les recommandations pour une meilleure applicabilité de la méthode rationnelle développée sont les suivantes :

- Des auscultations régulières doivent être effectuées par les administrations de gestion de routes pour enrichir leur base de données et faire des mises à jour.
- Le logiciel HDM-4 doit être calé au moins au niveau 2 pour l'obtention des résultats fiables.
- Des essais au laboratoire doivent être effectués sur les matériaux des couches de surface bitumineuses et des couches de bases et comparés aux exigences du guide avant leur application.
- Une mise à jour du guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux doit être effectuée étant donné que celui-ci date de 1984.
- Il serait aussi utile aux pays de l'Afrique de l'Ouest d'unir leurs expertises avec l'appui des bailleurs des fonds pour développer des relations empiriques à partir des expérimentations

réelles sur un réseau routier comme à l'image de l'AASTHO et de les corroborer avec des relations mécanistes existantes dans le domaine routier.

CHAPITRE 4

ÉVALUATION ÉCONOMIQUE SUR LE CYCLE DE VIE, ANALYSE ENVIRONNEMENTALE ET PROGRAMMATION SOUS CONTRAINTE BUDGÉTAIRE DES INTERVENTIONS D'ENTRETIEN POUR LES CHAUSSÉES FLEXIBLES STRUCTURELLES DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Kaba Emmanuel Kossè¹, Gabriel J. Assaf²

Département de génie de la construction, École de Technologie Supérieure,

1100, Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié en Mai 2019 à la revue les « Annales du Bâtiment et des Travaux Publics »

4.1 Résumé

Cet article présente une méthode intégrée pour choisir les meilleures interventions d'entretien d'une série de routes candidates à l'entretien périodique en se basant sur la consommation de carburant et la monétisation des émissions polluantes durant la phase d'utilisation de la route, les coûts totaux de transport et les contraintes budgétaires sur une période d'analyse de 20 ans. La démarche de sélection des interventions d'entretien sont les suivantes : l'identification des tronçons candidats à l'entretien, l'inventaire et la collecte des données, la détermination des niveaux de service, l'établissement des interventions d'entretien réalisables dans le secteur routier, le calcul des émissions polluantes et l'analyse technico-économique avec le modèle Highway Development and Management (HDM-4). Les interventions les plus rentables qui découlent des analyses, sont principalement des travaux d'entretien périodique (entretien préventif) tels que le resurfacement mince en enrobé bitumineux et la pose d'un enduit superficiel. Il en ressort également que la réduction des émissions polluantes et de la consommation de carburant sur le cycle de vie est importante en appliquant ces meilleures interventions sur les tronçons. À ce titre, les résultats obtenus démontrent qu'il est possible d'intégrer les impacts environnementaux dans l'analyse économique des projets d'entretien malgré les insuffisances de l'état de l'art pour les monétiser adéquatement.

4.2 Introduction

Le réseau routier constitue un patrimoine national majeur pour les pays de l'Afrique subsaharienne (PIARC, 2005). La préservation de ce patrimoine, qui implique de le maintenir dans un état relativement « bon » durant tout son cycle de vie, permet d'améliorer la mobilité et de réduire les coûts d'exploitation des véhicules, les taux d'accidents, les coûts de temps de trajet, les coûts de réhabilitation et de reconstruction, l'isolement et la pauvreté des communautés rurales. De plus, des routes en bon état contribuent au développement socio-économique ainsi qu'à l'émergence de ces pays (Mostafa et M, 2018). Les sections en bon état sont des sections dont les valeurs de l'indice de rugosité international (IRI) sont comprises entre 3 et 4 m/km (UEMOA, 2009c).

Ces dernières années, des efforts considérables ont été faits par les administrations routières des pays en développement et plus spécifiquement ceux de l'Afrique de l'Ouest, pour rehausser le niveau de financement des programmes d'entretien des routes dans le but de réduire les problèmes d'entretien chroniques des routes auxquels ils sont confrontés (Heggie, 2003). Toutefois, ces fonds ne permettent pas de couvrir adéquatement les besoins en entretien des routes de l'Afrique de l'Ouest, car une grande partie du réseau routier se trouve déjà en mauvais état en raison du manque d'entretien préventif. En effet, le taux de couverture moyen des besoins en entretien des routes dans la plupart des pays de la zone l'Union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA) est en deçà de 50 % (BOAD, 2015a). De plus, les facteurs environnementaux sont très rarement considérés dans l'évaluation économique des projets d'entretien. Outre l'insuffisance des fonds et l'inclusion plutôt rare des impacts environnementaux, les principaux problèmes tels que le fait d'accorder de manière quasi systématique la priorité du financement routier aux projets de construction de nouvelles routes (AIPCR, 2014; 2016), le manque de « culture d'entretien préventif » ainsi que le manque ou la mauvaise qualité des données routières (BOAD, 2015a; Mostafa et M, 2018) entravent la lutte contre la détérioration des routes dans les pays africains.

Les principes de l'analyse du cycle de vie (ACV) et de l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) ont été utilisés dans des travaux de recherche pour évaluer et optimiser les options d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction des routes en incluant ou non les impacts environnementaux. Adiguna, Dewanti et Odoki (2017b) ont comparé deux programmes d'entretien quinquennal d'un sous-réseau routier du Kenya. Le premier a été établi en utilisant l'analyse économique, le second en se basant sur l'analyse multicritère pour intégrer les impacts environnementaux dans l'analyse économique. Les résultats de leur comparaison indiquent que la synergie de l'analyse économique et de l'analyse multicritère permet d'obtenir un programme d'entretien quinquennal des routes plus efficient. Cependant, l'analyse multicritère a recours très souvent à des données qualitatives qui peuvent introduire des subjectivités dans les programmes d'entretien. Khan et al. (2017) ont utilisé l'ACCV pour évaluer 32 options d'entretien d'un réseau routier. Les résultats obtenus ont permis d'établir des normes « idéales » de travaux d'entretien préventif et de déterminer les options d'entretien rentables et le budget optimum d'entretien du réseau routier sur un cycle de vie de 20 ans. Les impacts environnementaux tels que la pollution de l'air et la consommation d'énergie sur le cycle de vie par les véhicules et pour la réalisation des travaux d'entretien qui sont des facteurs importants de tout projet n'ont cependant pas été considérés dans leur étude. Le principe de cycle de vie a été aussi utilisé par Labi et Sinha (2005) pour évaluer l'efficacité économique des options d'entretien préventif des sections de routes en les comparant avec une option de base composée des travaux de l'entretien courant minimum. Leurs résultats démontrent que l'état fonctionnel des sections influence leur rentabilité économique. Cette influence se manifeste par une augmentation de la rentabilité économique des options d'entretien préventif jusqu'à un certain niveau au-delà duquel la rentabilité économique régresse. En plus de négliger les impacts environnementaux, cette étude ne tient pas compte du budget disponible ni de l'ordre de priorité de réalisation des interventions en entretien des sections. Par ailleurs, Han, Ling et Zhao (2016) ont comparé une stratégie classique et une stratégie active d'entretien des chaussées en béton bitumineux sur un cycle de vie de 40 ans. La stratégie classique est composée des travaux de réhabilitation et de reconstruction qui sont déclenchés lorsque l'évolution de la dégradation des chaussées atteint un niveau d'état inacceptable. Les travaux d'entretien préventif tels que le resurfaçage et le rechargement en béton bitumineux sont inclus

dans la stratégie active et sont déclenchés à des intervalles réguliers de manière à retarder les travaux de réhabilitation et de reconstruction. Les résultats de leur étude indiquent que les charges environnementales telles que la consommation d'énergie et les émissions du carbone de la stratégie d'entretien active sont beaucoup plus faibles. Quoique cette étude considère les aspects environnementaux, il n'en demeure pas moins qu'elle se limite à la consommation d'énergie et à l'émission d'un seul polluant (carbone) pendant la phase de réalisation des travaux d'entretien.

Wang et al. (2012) se sont basés sur l'ACV pour comparer la consommation d'énergie et les émissions des gaz à effets de serre d'une option de réhabilitation et d'une option d'entretien courant appliquées sur des chaussées flexibles. Il ressort de leur analyse que la consommation d'énergie et les émissions des gaz à effets de serre sur des tronçons de route à volume de trafic élevé sont plus faibles pendant la phase d'exploitation de la route en raison de l'amélioration de l'uni. Cependant, cette tendance est inversée pendant la phase de construction étant donné la quantité d'énergie et la quantité élevée de carbone nécessaires à la production des matériaux et à la réalisation des travaux de réhabilitation. Ces travaux de recherche ne comparent que l'entretien courant avec la réhabilitation et ne considèrent pas l'entretien préventif (périodique) qui est le plus rentable pour des routes relativement en bon état. De plus, l'accent a été mis sur le gaz carbonique comme gaz à effet de serre et aucune valeur monétaire des émissions polluantes n'a été incluse dans l'étude. Pellecuer (2016); (Pellecuer, Assaf et St-Jacques, 2014) ont développé un outil en adaptant l'approche déductive d'impact (*Impact pathway approach*) pour évaluer les impacts environnementaux tels que l'émission, la dispersion et les impacts du bruit, la pollution de l'air et les gaz à effets de serre qui peuvent être inclus dans le modèle économique des administrations de gestion des routes. Il ressort que cet outil permet de considérer certains coûts environnementaux pour faire un choix optimal des options d'entretien des routes. Ces travaux de recherche n'intègrent toutefois pas la consommation d'énergie, ni les contraintes budgétaires. En effet, une préservation adéquate d'une chaussée dépend de sa performance sous le trafic et l'environnement (Assaf, 1993). Par ailleurs, la validation de l'outil se limite à une seule section située dans une zone urbaine.

Malgré leur pertinence, aucune de ces études ne couvre un éventail large d'interventions de type préventif, de réhabilitation et de reconstruction en fonction du niveau de service des chaussées existantes en considérant successivement la consommation d'énergie des ressources des véhicules (carburant, huile, pneus, pièces détachées), les coûts des principales émissions polluantes des véhicules (hydrocarbures, monoxyde de carbone, oxyde d'azote, dioxyde de soufre, dioxyde de carbone, particules et plomb), les coûts totaux de transport et les contraintes budgétaires. De plus, la majorité de ces études ont été réalisées hors du contexte de l'Afrique de l'Ouest et nécessitent d'être ajustées aux conditions locales qui prévalent dans la zone de l'Union économique et monétaire des États de l'Afrique de l'Ouest.

Le présent article a pour objectif de fournir aux administrations routières de l'Afrique de l'Ouest et aux bailleurs de fonds une méthode intégrée pour déterminer le niveau de service des routes prioritaires d'un sous-réseau routier, de valider les normes des travaux d'entretien et de choisir les meilleures interventions d'entretien, surtout d'entretien préventif, en fonction de l'état fonctionnel et structural des routes et de leurs objectifs. Les objectifs peuvent être la réduction de la consommation d'énergie et des coûts de la pollution de l'air, la minimisation des coûts totaux de transport et la maximisation des avantages ou du rapport valeur actuelle nette-coûts d'investissement (VAN/Cinvest) avec ou sans contrainte budgétaire. Il est très important de mentionner que la méthode intégrée développée dans la présente étude ne s'applique qu'aux sections de routes dont les états sont « bons » et « moyens ».

Cet article présente d'abord la méthodologie pour la détermination des meilleures options en fonction des quantités minimales de la consommation d'énergie, des coûts minimaux d'émissions polluantes, des coûts totaux de transport et des contraintes budgétaires, suivie des résultats et discussion présentant toutes leurs meilleures options et leurs pertinences et enfin d'une conclusion récapitulant les principaux résultats de toute l'analyse.

4.3 Méthodologie

L'évaluation du cycle de vie et la programmation sous contrainte budgétaire des interventions en entretien des tronçons de chaussées bitumineuses existantes intégrant les coûts environnementaux et la consommation d'énergie sont composées de six (7) principales étapes. Comme présenté à la figure 4.1, ces étapes sont la description de la zone d'étude et l'identification des tronçons, suivies de l'inventaire et la collection des données de l'état des tronçons, de la détermination et la validation des niveaux de services, de l'établissement des options d'entretien, du calcul des coûts unitaires des émissions polluantes et de l'analyse technico-économique avec le modèle Highway design and Management (HDM-4)

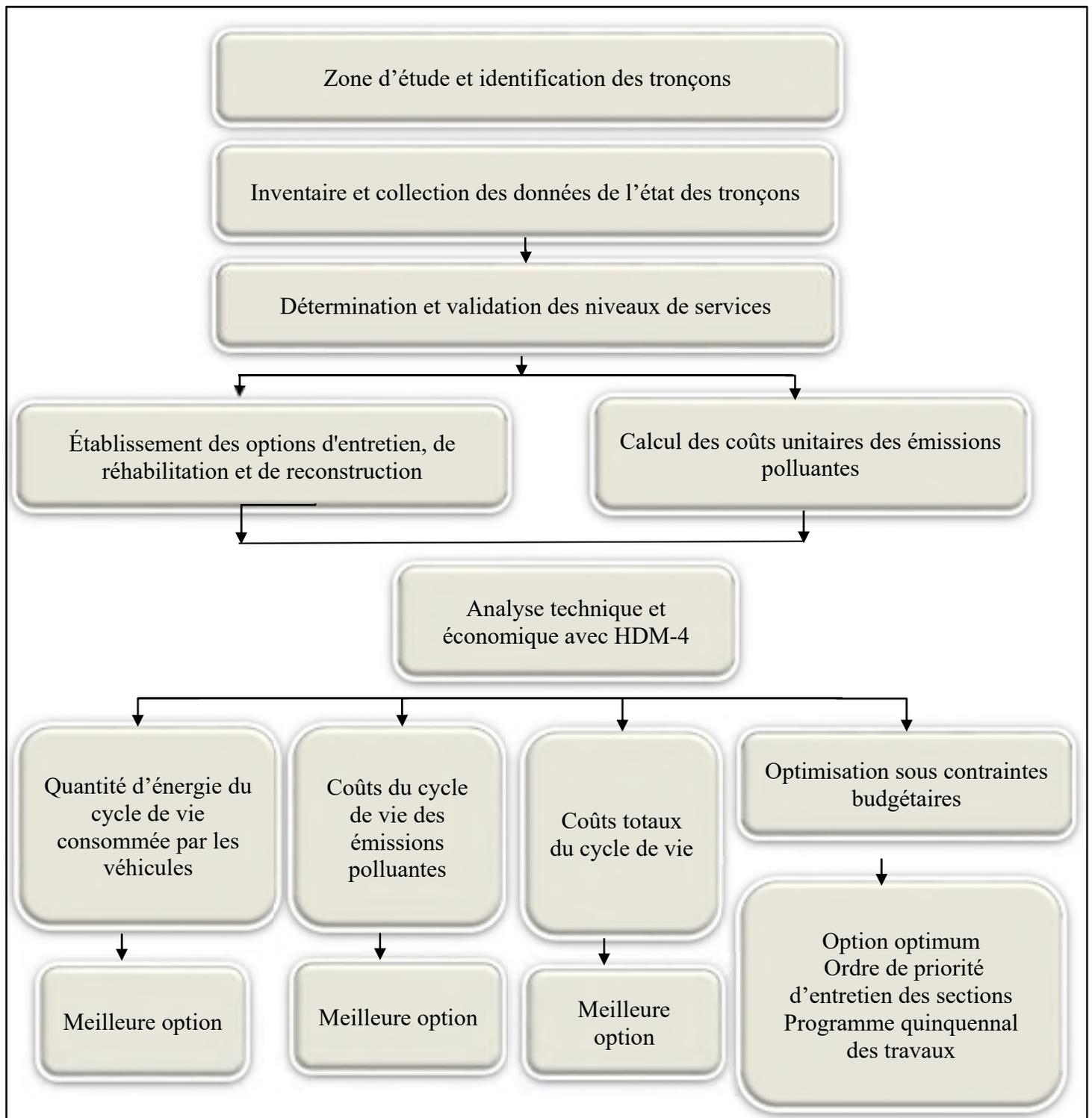


Figure 4.1 Méthodologie d'évaluation de cycle de vie et programmation sous contrainte budgétaire des interventions d'entretien de chaussées flexibles de « haute priorité » intégrant les coûts des émissions polluantes et la consommation d'énergie

4.3.1 Zone d'étude et identification des tronçons

La zone d'étude est située dans un pays de l'Afrique de l'Ouest membre de l'Union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA). Les tronçons de chaussées de la zone d'étude ont été sélectionnés en fonction des valeurs de l'indice de priorité de financement des routes (IPFR) développé par Kaba et Assaf (2018). L'IPFR est un nouvel indice qui permet de sélectionner conjointement des projets de construction et des projets d'entretien des routes dites de « haute priorité » en agrégeant des indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux communs aux deux types de projets en utilisant l'analyse en composantes principales. Ces projets prioritaires sont les dix (10) premiers projets constitués de quatre (4) projets de construction et de six (6) projets d'entretien des routes ayant des IPFR comprises entre 100 et 47 correspondant à des niveaux « très élevé » à « moyen » (Kaba et Assaf, 2018). Comme présenté à la figure 4.2, six (6) tronçons de route nationale inter-état (RNIE) bitumées dont les IPFR sont compris entre 100 et 47 et totalisant une longueur 240,73 km ont été sélectionnés pour cette présente étude.

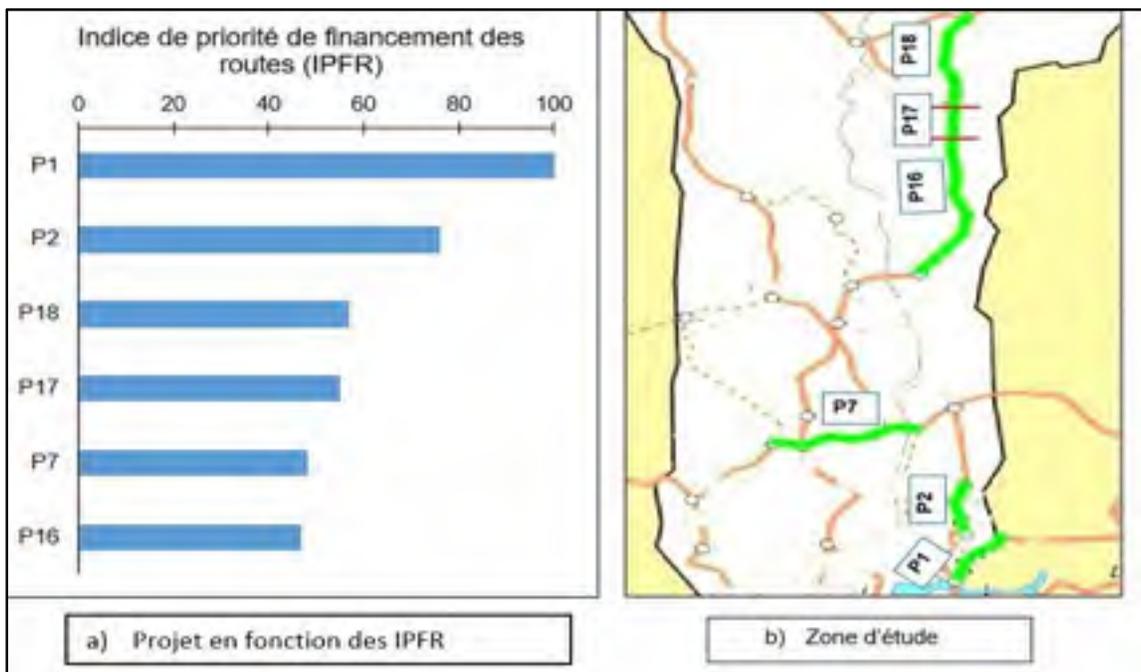


Figure 4.2 Zone d'étude et Projets d'entretien de « haute priorité »

4.3.2 Inventaire et collection des données

Les données de l'inventaire routier ainsi que celles de l'état (fonctionnel et structurel), du trafic et des coûts unitaires des travaux d'entretien des tronçons dans cette présente étude ont été recueillies auprès de l'administration de gestion des routes du pays concerné et du consultant mandaté par le bailleur de fonds pour l'étude. Des hypothèses basées sur une revue de littérature pertinente ont été aussi émises pour certaines données. L'inventaire routier est composé des éléments suivants de chaque tronçon de route : nom du tronçon, classe fonctionnelle, les caractéristiques géométriques (longueur, largeur, altitude, déclivité, etc.), le type de revêtement, l'historique de construction et d'entretien (dernière année de réhabilitation et la dernière année de surfacage, etc.). Les données du trafic, de l'état et des coûts unitaires d'entretien des tronçons ont été collectées à l'issue d'une étude de trafic, d'une évaluation fonctionnelle, d'une évaluation structurelle sur chaque tronçon et d'une enquête sur les coûts des travaux d'entretien.

4.3.2.1 Étude de trafic

Les données du trafic sont indispensables dans la gestion des routes pour la prédiction de la performance des chaussées et pour l'attribution des priorités aux projets d'entretien et de réhabilitation des routes. Les paramètres pertinents du trafic sont le volume du trafic exprimé en débit journalier moyen annuel (DJMA), les sollicitations des véhicules sur la chaussée exprimées en équivalent de charge axiale standard (ÉCAS) et le taux de croissance (Haas, Hudson et Falls, 2015; Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). Les données du trafic de cette présente étude ont été collectées à l'issue d'une campagne de comptage du trafic et d'une campagne de pesage des essieux sur chacun des tronçons. Le comptage du trafic a été réalisé pendant 3 jours consécutifs, dont 2 jours de 14 heures, et 1 jour de 24 h pour la détermination de la composition du trafic et du DJMA. Les essieux de chaque véhicule du parc ont été pesés pendant 10 jours pour la détermination du coefficient d'agressivité moyen (CAM). Le comptage du trafic a été effectué manuellement et le pesage des essieux à l'aide d'une balance mobile installée sur les tronçons sélectionnés. Les taux de croissance ont été obtenus en faisant une corrélation du trafic avec l'évolution du produit intérieur brut (PIB) du pays afin de

déterminer le trafic actuel et future ainsi que l'ÉCAS. Le choix de cette corrélation réside dans le fait qu'en cas de manque de données historiques pour prédire avec précision le trafic, il est fortement recommandé d'associer la croissance du trafic à l'évolution du PIB, à la croissance de la population et à l'évolution du prix du carburant (Cafiso et Di Graziano, 2012).

4.3.2.2 Évaluation fonctionnelle

L'évaluation fonctionnelle des routes est étroitement liée à la qualité de roulement qui est le plus souvent mesurée à l'aide des paramètres de rugosité, d'adhérence et de dégradation. L'évaluation de cette qualité de roulement peut être effectuée en déterminant les types de dégradation (étendue et gravité) le long de la surface de la chaussée de chaque tronçon à l'aide d'une inspection visuelle préliminaire manuelle et par la suite en utilisant des équipements non destructifs (END) pour une inspection plus détaillée (Kumar, 2014c). Dans le présent document, les données de l'évaluation fonctionnelle ont été obtenues en mesurant la rugosité et les dégradations par inspection visuelle manuellement et en utilisant des appareils appropriés.

- **Les mesures de rugosité**

La rugosité a été mesurée en termes d'indice de rugosité international (IRI exprimé m/km). L'IRI est l'unité de mesure de l'uni (irrégularités géométriques) de la route. Ce dernier est le principal indicateur utilisé pour caractériser le confort au roulement et la sécurité des usagers de la route (UEMOA, 2009c). L'IRI exprime en unité de dénivelé vertical la réponse dynamique d'un véhicule en roulement sur une certaine distance. Ainsi, l'IRI représente les vibrations du véhicule causées par la rugosité du profil le long de la route qui est proportionnelle à la rugosité de la chaussée. Une route en bon état est caractérisée par un IRI faible (2 m/km par exemple), tandis qu'un IRI élevé caractérise une route dans un piètre état (au-dessus de 8 par exemple) (Park, Thomas et Lee, 2007). Selon les états de l'UEMOA, plusieurs appareils sont utilisés pour les mesures de l'IRI. Dans cette présente étude, l'appareil miniROMDAS Bump integrator (BI) a été utilisé pour les mesures de l'IRI. L'appareil

miniROMDAS est doté de capteurs nommés BI unit qui peuvent être installés sur les deux côtés (droit et gauche) de l'essieu arrière d'un véhicule et d'un odomètre digital. Ces deux dispositifs permettent de collecter respectivement les données de rugosité et de mesurer la vitesse et la distance à une vitesse pouvant aller jusqu'à 100 km/h. Un mini-ordinateur muni d'un logiciel approprié permet d'enregistrer les données de rugosité tous les 100 m et de les convertir en IRI (m/km) (Kumar, 2014c). L'IRI moyen par tronçon ou par sections homogènes peut être ainsi déterminé en faisant la moyenne de tous les IRI enregistrés à chaque 100 m. Avant de procéder aux mesures de l'IRI, l'appareil miniROMDAS BI a été calibré en utilisant un autre équipement de type statique comme le profilomètre manuel (walking profilometer). De plus, l'odomètre a été calibré par rapport aux distances le long des tronçons.

- **Les mesures des dégradations**

Les relevés des dégradations ont été réalisés conformément aux méthodes d'inspection visuelle spécifiées dans la directive 11 de UEMOA (2009a), le manuel de suivi des routes pour la gestion de l'entretien dans les pays en développement (OECD, 1990) et le guide d'estimation des besoins d'un réseau routier (méthode VIZIR) (IFSTTAR, 2009). La méthode d'inspection visuelle préconisée dans ces trois documents consiste à parcourir le long de chaque tronçon à inspecter en relevant le type, la gravité et l'étendue des dégradations. Pour la présente étude, chaque tronçon a été subdivisé à des intervalles de 50 m sur sa longueur totale afin de collecter les données de dégradations (type, gravité, étendue). Cet intervalle de 50 m est recommandé par Autret et Brousse (1991) pour avoir un niveau de précision plus important pour ce qui est des données de dégradation collectées.

Dans cette étape 2 de la méthodologie, il est plutôt question de la gravité des dégradations relevées en fonction de l'intervalle mentionné ci-dessus et exprimée en unités de mesure de dégradation du modèle HDM-4. Le tableau 4.1 présente les types de dégradation qui ont été considérés dans cette présente étude ainsi leurs unités correspondantes. L'état du drainage est exprimé qualitativement par les niveaux bon, moyen et élevé des valeurs d'autres paramètres influençant l'état des routes qui ont été définis par des hypothèses. Ces hypothèses concernent

la profondeur du sable (texture) et l'adhérence dont les valeurs qui ont été assumées sont respectivement 0,90 mm et 0,5.

Tableau 4.1 Type de dégradation et unités de mesure

Type de dégradation	Unité de mesure
Orniérage	mm
Fissuration	%
Nid de poule	nb/km
Arrachement	%
Dentelles de rive	m ² /km
Drainage	bon, moyen, mauvais

4.3.2.3 Évaluation structurale

L'évaluation structurale consiste à déterminer la capacité structurale des différentes couches de la chaussée ou de la structure de la chaussée dans son ensemble à supporter les charges du trafic actuel et futur. La capacité structurale peut être déterminée utilisant des méthodes destructives ou non destructives ou en combinant les deux. La méthode destructive permet d'effectuer des sondages à une profondeur allant de la couche de surface jusqu'au sol de support et de prélever des échantillons de chaque couche de la structure de la chaussée pour la détermination de leurs rigidités ou de leurs résistances au laboratoire. La réalisation des soudages fragilise la chaussée et dans certains cas occasionne des dommages énormes sur la chaussée, d'où le recours à la méthode non destructive. La méthode non destructive permet de déterminer les paramètres de la capacité portante de la chaussée sans perturber la structure existante de la chaussée (Kumar, 2014c). Il est toujours nécessaire d'effectuer des sondages sur la chaussée pour l'étalonnage des appareils de la méthode non destructive. Cependant, le nombre de ces sondages est très faible.

Dans la présente étude, les états structurels des six tronçons ont été déterminés par des mesures de déflexion en utilisant la poutre de Benkelman (BB). La poutre de Benkelman est un équipement relativement simple, fiable et moins dispendieux utilisé pour évaluer la capacité

portante des chaussées dans la majorité des pays en développement en se basant sur des mesures de déflexion à la surface de la chaussée (Kumar, 2014c; Subramanyam, Aravind et Prasanna 2017). En outre, des sondages ont été réalisés jusqu'à une profondeur de 50 cm en dessous de la couche de forme et la température de couche bitumineuse a été prélevée au tiers de son épaisseur pour étalonner la poutre BB et déterminer les épaisseurs des différentes couches de la chaussée. Les caractéristiques géotechniques des échantillons issus de ces sondages ainsi que les différentes épaisseurs des couches ont été utilisées pour déterminer le CBR (California bearing ratio) du sol de support et le nombre structurel (SN). En somme, les paramètres de la capacité structurale qui ont été mesurés par l'évaluation structurale dans le présent document sont : la déflexion (mm), le nombre structurel et le CBR du sol de support (%).

4.3.2.4 Les données sur les coûts

Les coûts unitaires des travaux d'entretien sont pertinents pour comparer les différentes options d'intervention du point de vue économique. Les coûts unitaires des travaux ont été collectés auprès de l'administration de gestion du pays de la zone d'étude. Ces coûts unitaires sont les coûts en vigueur à l'année du début de l'analyse, soit 2016. Comme présenté dans le tableau 4.2, les coûts unitaires sont en dollar américain (US) et un facteur de conversion de 0,84 a été utilisé pour convertir ces coûts financiers en coûts économiques.

Tableau 4.2 Coûts unitaires des travaux d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction

Adaptée de (BOAD, 2015a; Kebre, 2013; MIDT, 2012)

Description des travaux	Coût unitaire
Drainage	174,4 \$USD/km
Réparation de nids de poule	34,88 \$USD/m ²
Colmatage des fissures	8,72 \$USD/m ²
Travaux de dépendance	174,4 \$USD/km
Resurfaçage mince en BB 30 mm	21,75 \$USD/m ²
Resurfaçage mince en BB 50 mm	36 \$USD/m ²
Resurfaçage structurel en BB 80 mm	58 \$USD/m ²
Reconstruction en BB	528 192 \$USD/km

Rechargement en ESMSG	13 \$USD/m ²
Rechargement en ESB	26 \$USD/m ²
ESB avec reprofilage	31,39 \$USD/m ²
Reconstruction en ESB	443 922\$USD/km

BB : Béton bitumineux

ESB : Enduit superficiel bicouche

ESMSG : Enduit superficiel monocouche simple gravillonnage

4.3.2.5 Division des tronçons en sections homogènes

Un tronçon de route peut être subdivisé en plusieurs sections, appelés « sections homogènes », en se basant sur la similarité des caractéristiques techniques. Cette subdivision peut être basée sur des paramètres de techniques tels que l'IRI, le CBR du sol de support, la gravité et l'étendue des dégradations, le trafic, le type de sol, etc. Les sections homogènes sont souvent nécessaires pour assurer un dimensionnement et une gestion fiable et économique des routes (Misra et Das, 2003). Les méthodes de subdivision des routes en tronçons ou en sections homogènes recommandées par la Banque mondiale sont (Bennett et al., 2007) : la méthode de segmentation de longueur fixe, la méthode de segmentation dynamique et la méthode de segmentation statique. La segmentation dynamique, qui consiste à analyser les attributs d'un réseau routier dans son ensemble et à créer des sections d'analyse en se basant sur ces attributs, est la méthode utilisée dans le présent document pour subdiviser les six (6) tronçons sélectionnés en dix (10) sections homogènes. Ainsi, chaque tronçon a été subdivisé de telle sorte qu'une nouvelle section débute à l'endroit où un changement d'un ou plusieurs paramètres (attributs) est observé. La segmentation dynamique de chaque tronçon a été effectuée en se basant sur des paramètres de déflexion, du sol de support et de dégradation de la couche de surface tels que présentés dans le tableau 4.3.

4.3.2.6 Résumé des données routières de l'étude

Le résumé des données routières utilisées dans le présent document est présenté au tableau 4.3. Ces données sont principalement composées des données de l'inventaire routier, des paramètres qui ont été déterminés à partir des évaluations fonctionnelles et structurelles et de l'étude de trafic.

Tableau 4.3 Résumé des données de l'inventaire, de l'évaluation fonctionnelle, de l'évaluation structurelle et de l'étude du trafic

Paramètres géométriques	Sections homogènes									
	P1	P2	P7		P16			P17		P18
Nom tronçon	SH1	SH2	SH3	SH4	SH5	SH6	SH7	SH8	SH9	SH10
Classe fonctionnelle	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI	RNEI
Type de revêtement	EB	EB	ESB	ESB	EB	EB	EB	EB	EB	EB
Longueur (km)	9,77	22,6	20,2	29,36	25,92	32,08	35	13,84	28,05	23,91
Largeur (m)	7	6,5	7	7	7	7	7	7	7	7
CBR du sol de support (%)	25,00	22,83	21,00	21,00	48,00	17,00	40,00	21,50	28,50	36,00
Épaisseur couche de surface (mm)	51	54	26	27	72	71	70	62	71,5	68,5
Nombre structural	5,06	3,25	3,07	3,18	6,08	3,79	6,39	4,09	5,02	5,44
Âge construction /dernière reconstruction (ans)	16	20	11	11	7	7	7	11	7	7
DJMA- 2015 (véh/jour)	7625	2955	1806	1806	1554	1554	1554	1952	1952	1952
Taux de croissance trafic (%)	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5	4; 3,5; 3; 2,5
Déflexion- poutre Benkelman (mm)	0,16	0,26	0,28	0,27	0,10	0,24	0,10	0,21	0,16	0,14
Prof moyenne d'ornière (mm)	4,3	4,17	1,57	1,8	2,1	2,5	2,75	3,55	5,15	3,05
Nombre de nids de poule (nb./km)	27	26	15	11	13	11,25	30	27	15	3,75
Uni (IRI - m/km)	4,625	4,83	4	3	4	4,6	5,28	5,035	3,8	4,61
Fissuration (%)	16,5	20	8,5	6,5	13,5	16	22,5	18,5	7,25	15
Arrachement (%)	21,5	21	14	11,5	12,5	20,5	26	22,5	12,75	25
Dentelle de rives (m ² /km)	21	25	9,5	5	7	28	35	30	10	15
Drainage	Moyen	Moyen	Bon	Bon	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Bon	Bon

RNEI : route nationale inter-états

EB : enrobé bitumineux

ESB : enduit superficiel bicouche

4.3.3 Détermination et validation des niveaux de service

La performance technique des interventions en entretien des chaussées en bon état est meilleure que la performance technique des chaussées se trouvant dans un état moyen. Ces dernières performant mieux que les chaussées en mauvais état. En effet, l'entretien périodique n'est pas très économique pour une chaussée en très bon état ; l'entretien courant est suffisant. À l'opposé, il n'est pas rentable d'appliquer l'entretien préventif (entretien courant et entretien périodique) sur une route en mauvais état; cette route doit plutôt être réhabilitée ou reconstruite au préalable avant l'application de ces deux types d'interventions préventives (Freeman, Pinchott et Spiegelman, 2003; Kumar, 2014c). Il s'avère donc important de déterminer le niveau de service de chaque section homogène pour valider que leurs états sont de niveaux « bon » à « moyen » avant l'application de toute option d'entretien préventif. Dans le présent document, les niveaux de service ont été déterminés en se basant sur le règlement 8 de l'UEMOA portant sur l'adoption du statut du réseau routier communautaire et de ses modalités de gestion (UEMOA, 2009c). Le niveau de service est un outil qui permet d'apprécier l'état d'une route en se basant sur deux paramètres : le confort des usagers et la fluidité du transit. Chaque paramètre est composé de quatre niveaux d'état : 0 (mauvais), 1 (moyen), 2 (bon) et 3 (très bon). Le paramètre confort de l'utilisateur est composé des valeurs de l'IRI, de la fissuration, de l'arrachement, du nombre de nids de poule, de la profondeur des ornières et de l'état de la signalisation. Le paramètre de fluidité de transit est constitué de la vitesse moyenne d'un véhicule de type 4x4 circulant sur la route (UEMOA, 2009c). La combinaison des niveaux d'état de ces deux paramètres telle que présentée au tableau 4.4 a permis de déterminer les niveaux de service de chaque section homogène.

Tableau 4.4 Niveaux de service
Adapté de(UEMOA, 2009a; 2009c)

Niveau de service	IRI (m/km)	Vitesse moyenne (km/h)	Profondeur ornière (mm)	Nids de poule (nbre/km)	Fissuration (%)	Arrachement (%)	Signalisation
0 (mauvais)	$IRI \geq 6$	$V < 50$	$P > 40$	$NDP > 50$	$F > 25$	$A > 30$	Aucune
1 (moyen)	$5 \leq IRI < 6$	$50 \leq V < 70$	$20 < P \leq 40$	$25 < NDP \leq 50$	$15 < F \leq 25$	$20 < A \leq 30$	Mauvais
2 (bon)	$2 < IRI \leq 4$	$70 \leq V \leq 90$	$10 \leq P \leq 20$	$10 < NDP \leq 25$	$5 < F \leq 15$	$10 < A \leq 20$	Acceptable sauf points singuliers
3 (très bon)	$IRI \leq 2$	$V > 90$	$P < 10$	$NDP = 0$	$F = 0$	$A = 0$	Acceptable en tous points

La comparaison des valeurs de l'IRI, de la vitesse moyenne, de la profondeur des ornières, de la fissuration, des arrachements et de la signalisation avec les valeurs de ces mêmes paramètres issus de l'étude de trafic, des évaluations fonctionnelles et structurelles a permis de choisir le niveau de service de chaque section au tableau 4. Comme présenté dans la figure 4.3, les niveaux de service des sections sont égaux à 2 et 1, correspondant respectivement à des états « bon » et « moyen ». Les états des sections « bon » et « moyen » sont acceptables pour l'application des travaux de préventions, comme cela a déjà été mentionné ci-dessus.

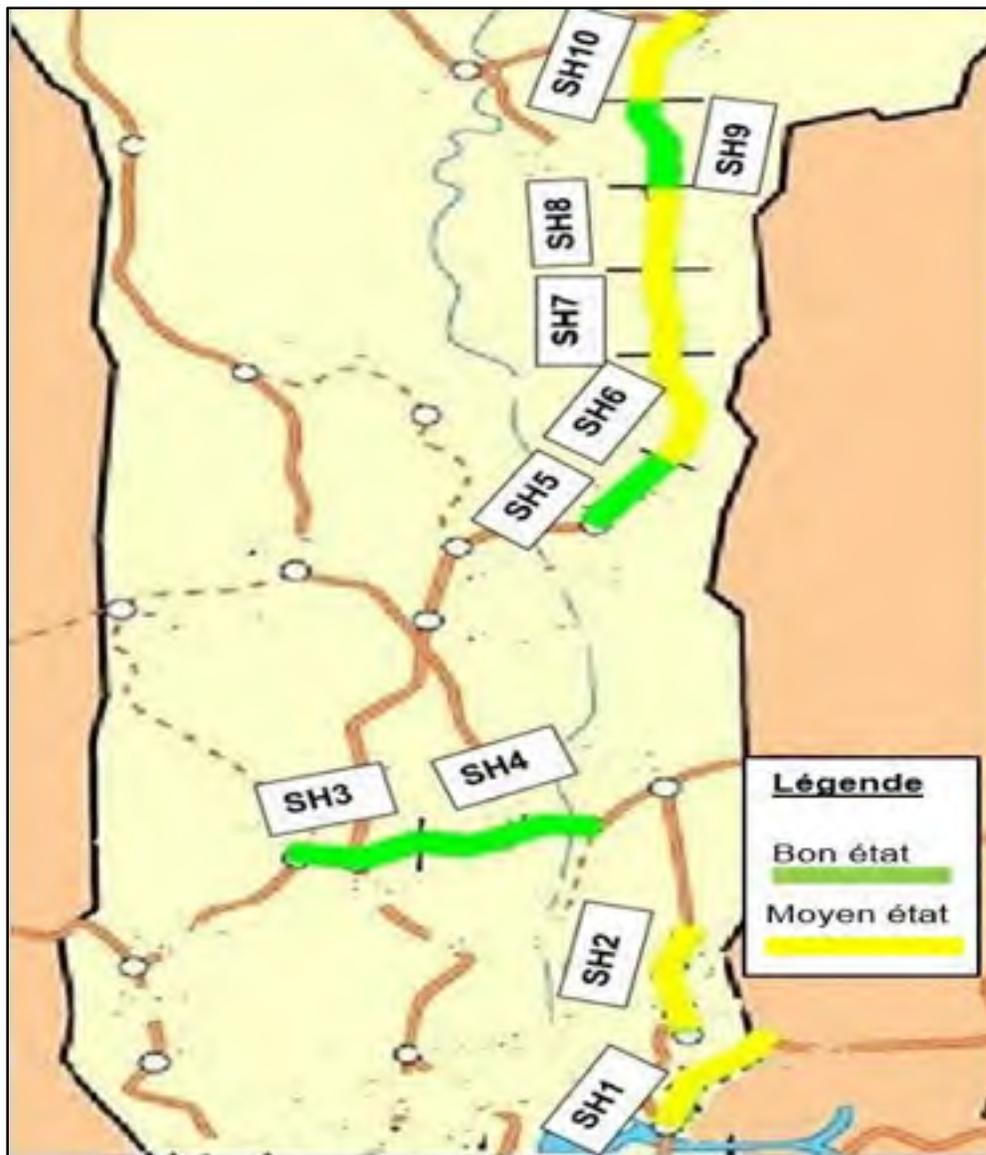


Figure 4.3 Sections homogènes par niveau de service

4.3.4 Établissement des options d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction

L'établissement des options ou stratégies d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction (ERR) est généralement basé sur des normes de travaux récentes d'ERR, la classe et la rugosité de la couche de surface, les caractéristiques du trafic, etc. Les normes des travaux varient considérablement en raison des nouvelles techniques et des innovations en ERR des routes et

de l'expérience acquise par les administrations routières par l'application de ces normes. Cette variation indique la nécessité de rassembler toutes les normes des travaux d'ERR disponibles et applicables tant au niveau réseau qu'au niveau projet afin d'évaluer leurs performances techniques et économiques à long terme avant d'établir des options d'ERR (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a; Odoki et Kerali, 2000c). Dans ce présent article, les dix options d'ERR telles que présentées dans les tableaux 4.6 et 4.7 ont été établies en s'appuyant sur une revue de littérature approfondie concernant les stratégies d'entretien fréquemment utilisées en Afrique de l'Ouest (BOAD, 2015a; MIDT, 2012) et les interventions en entretien utilisées dans les pays en développement (Adiguna, Dewanti et Odoki, 2017b; Burningham et Stankevich, 2005; Odoki et Kerali, 2000c). Ces stratégies et interventions en entretien ont été ajustées dans ce présent article en variant les seuils des IRI et des fréquences d'applications.

Il existe certains travaux d'ERR qui ne peuvent pas s'appliquer au même type de chaussée. Par conséquent, il est recommandé de définir les types travaux d'ERR à inclure en fonction des classes de surface des chaussées (Odoki et Kerali, 2000c). Le tableau 7 présente les options d'ERR qui ont été appliquées aux sections en ESB (SH3 et SH4) et le tableau 6 présente celles qui ont été appliquées aux sections en EB (SH1, SH2, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10). Toutes les options, y compris l'option de base, peuvent être regroupées en trois catégories de travaux d'ERR : l'entretien préventif, la réhabilitation et la reconstruction. L'entretien préventif est composé de l'entretien courant et de l'entretien périodique. L'entretien courant englobe les travaux de moindre envergure (voir tableau 4.5) qui sont réalisés très tôt et manière récurrente pour retarder les besoins d'entretien périodique et de réhabilitation (PIARC, 2013b).

L'entretien périodique est l'ensemble des opérations programmables pour préserver l'intégrité structurale des routes. Les travaux d'entretien périodique composés du resurfage mince en BB et du rechargement en ESMSG (voir tableaux 4.6 et 4.7) ont pour but d'améliorer l'adhérence et la rugosité de la couche de surface sans aucun apport significatif à la structure de la chaussée (Burningham et Stankevich, 2005). La réhabilitation composée des travaux tels que le resurfage structurel en BB et le rechargement en ESB avec reprofilage (voir tableaux 4.6 et 4.7) consiste à réparer ou à renforcer la structure de la chaussée. Dans certains

cas, une partie des matériaux des couches de la chaussée est extraite et remplacée par des matériaux plus performants dans le but d'augmenter la capacité portante et d'améliorer les caractéristiques de surface de la chaussée (PIARC, 2013b). La reconstruction consiste à reconstruire complètement la chaussée incluant des modifications du système de drainage et de la géométrie (PIARC, 2005). Il est important de différencier l'entretien courant minimum de l'entretien courant.

L'entretien courant minimum (voir tableaux 4.6 et 4.7) a été considéré dans ce présent article comme l'option de base. Celle-ci a été établie en fixant des seuils d'interventions minimums de telle sorte que le déclenchement des travaux de l'entretien courant minimum accentue la détérioration des sections. L'option de base équivaut au scénario « ne rien faire » qui, une fois appliqué, générera des coûts totaux de transport plus élevés que les autres options en raison de la détérioration de la route plus importante. Les options 1 à 7 sont composées des travaux d'entretien préventif, l'option 8 des travaux de réhabilitation et l'option 9 des travaux de reconstruction (voir tableaux 4.6 et 4.7). L'entretien courant (voir tableau 4.5) a été inclus dans les options 1 et 9 pour deux principales raisons. La première raison est de s'assurer qu'un entretien de routine est effectué continuellement après l'application de l'entretien périodique, la réhabilitation et la reconstruction. La deuxième raison est d'appliquer l'entretien courant seul sur certaines sections en cas de restriction budgétaire ne permettant pas d'appliquer l'entretien préventif.

Étant donné que les niveaux de service des sections sélectionnées dans cette présente étude sont « bon » et « moyen », les travaux de reconstruction de l'option 9 peuvent ne pas être applicables à certaines sections parce que ces sections performeront toujours en dessous des seuils d'intervention de l'option 9. Dans un tel cas, seul l'entretien courant de cette option est appliqué aux sections. Il est évident que pour des sections qui se trouvent relativement en bon état comme c'est le cas des sections sélectionnées pour la présente étude, il n'était pas nécessaire d'inclure les travaux de reconstruction. Cependant, les options avec les travaux de reconstruction et réhabilitation ont été établies dans le présent article pour prouver scientifiquement la rentabilité, l'efficacité des travaux d'entretien préventif par rapport aux

travaux de réhabilitation et de reconstruction réalisés sur des sections dont les états sont « bon » et « moyen ».

Le déclenchement des travaux d'ERR sur chaque section dépend des critères d'intervention. Les critères d'intervention sont des seuils qui peuvent être établis en se basant sur le paramètre de temps (année), les indicateurs du trafic (ÉCAS, DJMA) et les types des travaux (Odoki et Kerali, 2000c). La rugosité des chaussées est causée par les dégradations de la couche de surface, des inadéquations de la capacité portante et du système de drainage. Une relation directe existe entre la rugosité, les coûts d'exploitation des véhicules, les accidents et le confort (Khan et al., 2017; Morosiuk, Riley et Toole, 2006; Odoki et Kerali, 2000c). Il a été aussi prouvé que le vieillissement des matériaux contribue à la dégradation des chaussées affectant ainsi la rugosité (Khan et al., 2017). Par conséquent, l'IRI est l'indicateur d'état primordial des chaussées. Dans le présent document, les critères d'intervention des options d'ERR ont été fixés en fonction de la rugosité et de la fréquence d'application des travaux d'ERR sur les sections. La rugosité a été exprimée en termes d'IRI et la fréquence d'application en année.

Tableau 4.5 Normes des travaux d'entretien courant

Type d'entretien	Description des travaux	Critères d'intervention
Entretien courant	Drainage	Chaque année
	Réparation de nids de poule	≥ 20 ndp/km
	Colmatage des fissures	Fissures structurelles ≥ 5 %

Tableau 4.6 Options d'entretien des sections en enrobé bitumineux

Options	Type d'entretien	Description des travaux	Critères d'intervention
Base	Entretien courant minimum	Drainage	Chaque année
		Réparation de nids de poule	≥ 100 ndp/km
		Colmatage des fissures	Fissures structurelles $\geq 10\%$
		Travaux de dépendance	Chaque année
1	Entretien périodique + entretien courant	Resurfçage mince BB 30 mm	IRI ≥ 3
		Entretien courant	Chaque 5 ans
2	Entretien périodique + entretien courant	Resurfçage mince BB 50 mm	IRI ≥ 3
		Entretien courant	Chaque 7 ans
3	Entretien périodique + entretien courant	Resurfçage mince BB 30 mm	IRI ≥ 4
		Entretien courant	Chaque 5 ans
4	Entretien périodique + entretien courant	Resurfçage mince BB 50 mm	IRI ≥ 4
		Entretien courant	Chaque 7 ans
5	Entretien périodique + entretien courant	Resurfçage mince BB 30 mm	IRI ≥ 5
		Entretien courant	Chaque 5 ans
6	Entretien périodique + entretien courant	Resurfçage mince BB 50 mm	IRI ≥ 5
		Entretien courant	Chaque 7 ans
7	Entretien périodique + entretien courant	Resurfçage mince BB 50 mm	IRI ≥ 6
		Entretien courant	Chaque 7 ans
8	Réhabilitation + entretien courant	Resurfçage structurel BB 80 mm	$5 \leq \text{IRI} \leq 7$
		Entretien courant	Chaque 7 ans
9	Reconstruction + entretien courant	Reconstruction BB 150 mm	IRI ≥ 8
		Entretien courant	Chaque 10 ans

Tableau 4.7 Option d'entretien des chaussées en enduit superficiel bicouche

Options	Type d'entretien	Description des travaux	Critères d'intervention
Base	Entretien courant minimum	Drainage	Chaque année
		Réparation de nids de poule	≥ 100 ndp/km
		Colmatage des fissures	Fissures structurelles $\geq 10\%$
		Travaux de dépendance	Chaque année
1	Entretien périodique + entretien courant	Rechargement ESMSG	IRI ≥ 3
		Entretien courant	Chaque 3 ans
2	Entretien périodique + entretien courant	Rechargement ESB	IRI ≥ 3
		Entretien courant	Chaque 5 ans
3	Entretien périodique + entretien courant	Rechargement ESMSG	IRI ≥ 4
		Entretien courant	Chaque 3 ans
4	Entretien périodique + entretien courant	Rechargement ESB	IRI ≥ 4
		Entretien courant	Chaque 5 ans
5	Entretien périodique + entretien courant	Rechargement ESMSG	IRI ≥ 5
		Entretien courant	Chaque 3 ans
6	Entretien périodique + entretien courant	Rechargement ESB	IRI ≥ 5
		Entretien courant	Chaque 5 ans
7	Entretien périodique + entretien courant	Rechargement ESB	IRI ≥ 6
		Entretien courant	Chaque 5 ans
8	Réhabilitation + entretien courant	ESB avec reprofilage	$5 \leq \text{IRI} \leq 7$
		Entretien courant	Chaque 5 ans
9	Reconstruction + entretien courant	Reconstruction ESB	IRI ≥ 8
		Entretien courant	Chaque 8 ans

4.3.5 Calcul des coûts unitaires des émissions polluantes

Les coûts découlant des dommages environnementaux sont des coûts externes qui englobent les coûts de la pollution de l'air, de la nuisance sonore et de la perturbation du voisinage (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a) qui ne peuvent pas être incorporés directement dans l'ACCV

avec le modèle HDM-4. Cependant, les quantités en tonnes métriques des principaux polluants tels que l'hydrocarbure (HC), le monoxyde de carbone (CO), l'oxyde d'azote (NO_x), l'oxyde de soufre (SO₂), le dioxyde de carbone (CO₂), les particules fines (PM_{2,5}) et le plomb (Pb) émis par les véhicules de chaque option pendant le cycle de vie peuvent être calculées avec le modèle HDM-4 (Odoki et Kerali, 2000d).

En effet, un sous-modèle des effets sociaux et environnementaux incorporé dans le modèle HDM-4 permet de quantifier les émissions polluantes. Dans ce présent article, les sept polluants cités ci-dessus ont été considérés parce qu'ils représentent les principaux gaz rejetés par les échappements des véhicules qui sont les plus nocifs tant pour la santé humaine que pour l'environnement (Odoki et Kerali, 2000a). L'approche des coûts résultant des dommages et l'approche des coûts de réduction sont les deux principales approches pour monétiser la pollution de l'air. L'approche des coûts découlant de dommages consiste à évaluer les coûts de l'impact des émissions polluantes sur la santé humaine, l'environnement, l'activité économique, etc. (RICARDO-AEA, 2014). En ce qui concerne l'approche des coûts de réduction, elle permet d'évaluer les coûts d'atténuation des émissions polluantes. Cependant, cette dernière n'est solide que si les objectifs de réduction ne reflètent pas clairement les préférences de la société où l'évaluation est réalisée (CPCS, 2018). L'approche recommandée est l'approche des coûts résultant des dommages, communément utilisée dans les organisations pour évaluer les coûts des effets de la pollution de l'air. L'approche des coûts des dommages est composée de (5) principales étapes: la détermination des quantités des polluants (basée sur des coefficients d'émission des véhicules du trafic), l'évaluation de l'expansion de la pollution autour de la source et de sa transformation chimique dans l'atmosphère, l'évaluation de l'étendue du risque d'exposition de la population à inhaler ces quantités de polluants, l'évaluation des impacts sur la mortalité, la santé, la perte de production des cultures, des risques écologiques, etc., et enfin l'évaluation de l'équivalent monétaire de ces impacts (RICARDO-AEA, 2014). En l'absence de données au sujet de la zone à l'étude (pays de l'Afrique de l'Ouest) permettant d'estimer les coûts des dommages des sept principaux polluants, les coûts unitaires des principaux polluants sont issus d'une revue de littérature approfondie et ont été ajustés pour l'analyse.

En effet, les coûts unitaires des polluants de chaque année du cycle de vie (20 ans) ont été calculés en se basant sur les coûts de pollution de l'air du Québec (MTMDET, 2016), du Canada (TC, 2008), de l'Europe (France, Allemagne, Grande-Bretagne) (RICARDO-AEA, 2014) et des États-Unis d'Amérique (TIGER, 2016). Il est évident que les coûts unitaires des polluants de la province et des pays cités ci-dessus diffèrent les uns des autres ainsi que du pays de la zone à l'étude. Ces écarts de coûts unitaires se justifient par le fait que les systèmes de santé, la démographie, la production de richesse (PIB) et la réglementation environnementale sont tous différents d'un pays à l'autre. Les coûts unitaires des polluants peuvent même diverger dans un même pays selon que la zone d'étude se situe dans une zone rurale ou urbaine (CPCS, 2018).

Dans le présent document, les coûts unitaires des émissions polluantes issus de la revue de littérature qui remontent à 2010, 2013 et 2015 ont d'abord été adaptés proportionnellement au PIB du pays situé dans la zone à l'étude. Le PIB s'avère l'indicateur économique le plus utilisé pour la comparaison de la parité des pouvoirs d'achat et du bien-être économique des pays selon l'organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (Schreyer et Koechlin, 2002). Par conséquent, il constitue l'indicateur par excellence pour adapter les coûts unitaires des émissions polluantes d'un pays à ceux d'un autre pays. Ensuite, les coûts unitaires des émissions polluantes estimés précédemment ont été extrapolés à l'année 2016 (année du début de l'analyse) en dollar US en utilisant les taux d'inflation de la zone d'étude publiés par la Banque mondiale (Banque mondiale, 2019). Enfin, le coût unitaire de chaque émission polluante de chaque année du cycle de vie (20 ans) a été calculé en utilisant l'équation 1 (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a) et un taux d'actualisation de 10%.

Les coûts unitaires de chaque année du cycle de vie des principaux polluants qui ont été calculés et utilisés dans cette présente étude sont présentés à l'annexe VI.

$$F_n = \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (4.1)$$

Où

F_n : facteur d'actualisation de l'année n

i : le taux d'actualisation (%)

n : le nombre d'années

La même méthodologie a été utilisée par (Ghibaudo, 2018) pour l'évaluation des coûts des émissions polluantes des projets d'entretien routier situés dans un pays de l'Afrique de l'Ouest. Cependant, les résultats sont différents des coûts unitaires des émissions polluantes calculés dans cette présente étude parce que les hypothèses de calcul sous-jacentes telles que les sources de référence des coûts unitaires, le PIB et les taux d'inflation utilisés sont différentes. De plus, cette présente étude est basée sur les valeurs moyennes des coûts unitaires des émissions polluantes des pays cités ci-dessus.

4.3.6 Analyse technique et économique avec le logiciel HDM-4

Le logiciel HDM-4 est un modèle basé sur les principes de l'analyse du cycle de vie qui a été développé par la Banque mondiale pour évaluer la performance technique et la viabilité économique des projets routiers ainsi qu'analyser les stratégies, les programmes et les normes des normes de travaux d'entretien, de réhabilitation et de construction à moyen et long terme. En outre, ce modèle permet d'effectuer une analyse comparative des options de gestion et d'investissement routier en se basant sur trois principales analyses : l'analyse de projet, l'analyse de programme et l'analyse de stratégie. L'analyse de projet permet d'évaluer un ou plusieurs projets ou options. Cette évaluation consiste en la détermination des coûts, des avantages et des indicateurs des projets routiers en analysant un groupe de sections homogènes auxquelles sont appliquées des options de travaux d'entretien, de réhabilitation ou de construction neuve. L'analyse de programme permet d'élaborer un programme pluriannuel ou de cycle de vie en identifiant les sections susceptibles de recevoir des travaux d'ERR sous contraintes budgétaires. L'analyse de stratégie permet d'évaluer le réseau routier dans son

ensemble dans la perspective d'estimer les besoins budgétaires prévisionnels à long terme pour différents scénarios d'entretien et de développement du réseau routier (Morosiuk, Riley et Toole, 2006). Dans le présent article, l'analyse de programme a été utilisée pour stimuler l'évolution des états des sections homogènes sur une période d'analyse de 20 ans en fonction des dix (10) options appliquées aux sections et des contraintes budgétaires. Les résultats de l'analyse de programme ont permis de déterminer les coûts d'administration (fonctionnement et investissement), les coûts des usagers (exploitation des véhicules et temps de trajet), les coûts des émissions polluantes et la consommation d'énergie de chaque option appliquée aux sections.

La prédiction de la performance de la chaussée et la cohérence des résultats obtenus de l'analyse de programme dépendent de l'effort consenti pour adapter les valeurs par défaut du modèle HDM-4 aux conditions locales (Haas, Hudson et Falls, 2015). Par conséquent, le modèle HDM-4 a été calé et paramétré conformément aux conditions prévalentes localement dans la zone d'étude. Le calage a été effectué conformément au niveau 1 qui correspond à une application de base. Le calage au niveau 1 implique les tâches suivantes (Bennett et Paterson, 2000) : la détermination des paramètres d'entrée de base nécessaires, l'adaptation de plusieurs valeurs par défaut et le calage des paramètres les plus sensibles avec des valeurs estimées à partir d'une revue de littérature et des enquêtes de moindre envergure réalisées sur le terrain.

4.3.6.1 Détermination de la quantité totale de cycle de vie de consommation d'énergie

La consommation totale d'énergie des projets routiers provient principalement de l'énergie consommée par les véhicules motorisés et les véhicules non motorisés ainsi que de l'énergie consommée pendant les travaux de construction, d'entretien et de réhabilitation des routes (Bennett et Greenwood, 2000). La consommation d'énergie par les véhicules motorisés dépend de la taille de véhicule, de son poids, de sa conception, de son âge, des caractéristiques de la route et de son état et des caractéristiques du trafic. De plus, cette catégorie d'énergie est générée par la consommation des ressources non renouvelables telles que le carburant, l'huile, les pneus et les pièces détachées lors de l'utilisation des véhicules (Odoki et Kerali, 2000d). La consommation d'énergie des véhicules non motorisés est composée de la consommation

d'énergie des véhicules à traction animale et des véhicules à traction humaine qui sont beaucoup plus répandus dans les pays en développement. La consommation des véhicules à traction animale est fondée sur l'énergie utilisée pour nourrir et garder les animaux de telle sorte qu'ils puissent assurer le service de transport prévu. La consommation d'énergie des véhicules à traction humaine tels que le cyclisme et la marche est liée à la quantité de calories supplémentaires consommées pendant le transport par les personnes. L'énergie consommée pour les travaux de construction, d'entretien et de réhabilitation provient de l'énergie utilisée pour la production des matériaux (bitume, ciment, pierres concassées, etc.), le transport des matériaux sur le chantier et le fonctionnement des équipements utilisés pour la réalisation des travaux (ETSU, 1997).

L'énergie consommée par les véhicules non motorisés est d'emblée exclue étant donné que dans le présent article, le trafic des véhicules non motorisé n'a été inclus dans l'analyse. L'énergie consommée par les travaux d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction est une constituante importante pour l'évaluation et la comparaison des implications énergétiques des options appliquées à chaque section homogène. Cependant, il existe très peu de données pour déterminer de façon précise cette catégorie de consommation d'énergie. Certaines organisations internationales telles que le Panel intergouvernemental sur le changement climatique (IPCC), l'Agence de protection environnementale des États-Unis d'Amérique (EPA) et l'Association européenne de bitume (EBA), et des chercheurs tels que Chappat et Bilal (2003), Dorchie (2005) et de Chehovits et Galehouse (2010) ont établi des valeurs typiques de consommation d'énergie des travaux de construction, d'entretien et de réhabilitation en mégajoules (MJ) par unité des quantités des travaux (m^2 et km). L'établissement de ces valeurs typiques de consommation est basé sur de nombreuses hypothèses étant donné que l'état d'art ne permet pas d'évaluer de manière plus précise la consommation d'énergie par les travaux de construction, d'entretien et de réhabilitation. De plus, les hypothèses sont plus adaptées à l'Europe et aux États-Unis d'Amérique (USA) où elles ont été établies qu'aux pays de l'Afrique de l'Ouest. Par conséquent, la consommation d'énergie par les travaux d'entretien, de réhabilitation et de reconstruction n'a pas été incluse dans l'analyse HDM-4. Dans le présent article, seule la consommation d'énergie par les véhicules motorisés a été incluse dans l'analyse.

La quantité totale du cycle de vie de la consommation d'énergie par les véhicules motorisés de chaque option des travaux a été déterminée par les équations présentées à l'annexe V de ce document.

La meilleure option est celle dont la quantité de consommation d'énergie par les véhicules sur tout le cycle de vie (EGLOB) est minimale.

4.3.6.2 Coûts du cycle de vie des émissions polluantes

Le coût du cycle de vie des émissions, aussi nommé « coûts du cycle de vie des externalités environnementales (CCVEE) de chaque option d'ERR des sections », est le produit des quantités totales des émissions polluantes de chaque option (en tonne métrique) et des coûts unitaires (\$US/ tonne) sur la période d'analyse. Les quantités totales des émissions ont été déterminées avec HDM-4 et les coûts unitaires ont été déterminés à la section 4.3.5. Les principales étapes qui ont permis de déterminer les CCVEE ainsi que les équations sont présentées à l'annexe VI de ce présent document (Odoki et Kerali, 2000d).

La meilleure option j de chaque section est l'option dont le CCVEE est minimal comparativement aux autres options.

4.3.6.3 Coûts totaux du cycle de vie de transport (CTCV)

Les coûts de cycle de vie des projets routiers ou les coûts totaux de transport sont composés des coûts d'administration, des coûts des usagers et des coûts des externalités sur toute la période d'analyse (20 ans) (Haas, Hudson et Zaniwski, 1994a; Kumar, 2014c). Dans le présent article, les coûts totaux de cycle de vie de chaque option j (CTCV $_j$) ont été calculés par l'équation 4.2.

$$CTCV_j = CCVA_j + CCVU_j + CCVEE_j \quad (4.2)$$

Où

CCVA_j : coût du cycle de vie d'administration de l'option j de chaque section

CCVU_j : coût du cycle de vie des usagers de l'option j de chaque section

La meilleure option de chaque section est l'option dont le CTCV est faible comparativement aux autres options.

4.3.6.4 Optimisation sous contrainte budgétaire

La comparaison des différentes options d'ERR des routes tant au niveau réseau qu'au niveau projet est une des principales fonctions de la gestion des routes pour établir les priorités des interventions en entretien courant et périodique sur des sections de routes données en considérant le niveau de financement ou le budget disponible. Les méthodes de programmation des priorités d'intervention en ERR sont composées des méthodes subjectives, par exemple la méthode worst-first, et des méthodes de programmation mathématique plus sophistiquées telles que la méthode d'optimisation. La méthode de Worst-first consiste à établir en ordre séquentiel une liste des sections en fonction de leurs états et de financer à partir de la section se trouvant dans un état de dégradation très avancé jusqu'à l'épuisement des fonds ou du budget disponible. Cette méthode n'est pas recommandée parce qu'elle ne tient pas compte des avantages, des coûts et de la performance technique prévue de la chaussée (AASHTO, 2012c). Les modèles de programmation mathématique sont basés sur la formulation d'une fonction objective pour maximiser les avantages ou minimiser les coûts des projets routiers sous certaines contraintes budgétaires (Haas, Hudson et Falls, 2015). Il existe plusieurs méthodes de programmation qui peuvent être utilisées pour optimiser les projets routiers, tels que la programmation linéaire à nombre entier, la programmation linéaire, la programmation dynamique et l'algorithme génétique (Zimmerman et ERES Consultants, 1995a). Le modèle de la programmation linéaire à nombre entier est approprié pour l'optimisation des projets d'entretien routier parce qu'il est ajustable en fonction du niveau de complexité de l'analyse et applicable au niveau réseau (Frerreira et Picado-Santos, 2002; Fwa et Sinha, 1988; Garcia-

Diaz et Liebman, 1980; Karan et Haas, 1976; Li, Haas et Huot, 1998; Mahoney, Ahmed et Lytton, 1978; Wang, Zhang et Machemehl, 2003). Dans le présent article, le modèle de programmation linéaire à nombre entier représenté par les équations 4.3 à 4.6 (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a) a été utilisé pour déterminer l'option optimale de chaque section homogène sur un cycle de vie de 20 ans en maximisant le rapport valeur actuelle nette-coûts d'investissement. Le problème d'optimisation a été résolu en utilisant le logiciel HDM-4. En effet, le modèle de programmation linéaire à nombre entier intégré dans le logiciel HDM-4 permet de faire des analyses de programme et de stratégies en considérant les restrictions budgétaires. Par conséquent, les équations 4.3 à 4.6 sont incorporées dans ce logiciel et l'exécution de l'analyse de programme a permis la résolution du problème d'optimisation mathématique dans la présente étude.

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{ijt} \cdot E_{ijt} \quad (4.3)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ijt} \cdot P_{ijt} \leq B_t \quad \text{pour } t = 1, 2, \dots, T \quad (4.4)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n X_{ijt} \leq 1 \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

$$X_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4.6)$$

Où :

z : fonction-objectif

X_{ijt} : option j appliquée à la section i à l'année t

E_{ijt} : rapport valeur actuelle nette-coût d'investissement de l'option j appliquée à la section i à l'année t

P_{ijt} : coût d'entretien actualisé de l'option j appliquée à la section i à l'année t .

B_t : budget pour l'année t

X_{ijt} est une variable binaire (discrète) qui est égale à 1 si l'option j est sectionnée pour la section i à l'année t et égale à 0 sinon .

L'équation 4.3 représente la fonction-objectif, qui dans cette présente étude consiste à maximiser la valeur actuelle nette-coût d'investissement (VAN/Cinvest). Cela signifie que l'option dont le rapport VAN/Cinvest est le plus élevé serait la plus prioritaire pour une section donnée sous condition que les contraintes budgétaires soient satisfaites.

L'inéquation 4.4 représente la contrainte budgétaire de chaque année de la période de la programmation qui ne peut être excédée. Cela indique que la somme des coûts des travaux d'entretien sur tout le cycle de vie de toutes les options sélectionnées pour toutes les sections doit être inférieure ou égale au budget disponible pour entretenir les sections de routes pendant 20 ans. Cependant, cette inéquation ne tient pas compte du report du budget à la prochaine année dans le cas où tout le budget n'a pas été totalement consommé à une année t donnée.

L'équation 4.5 représente la contrainte d'exclusion mutuelle. Cela indique que pour une section i donnée, au plus une option j peut être choisie pour la même section pendant toute la période d'analyse.

L'équation 4.6 est la contrainte binaire qui permet à la variable X_{ijt} de prendre la valeur 1 si une option j d'entretien est choisie pour une section i à l'année t et la valeur 0 si cette option n'a pas été sélectionnée.

- **Options optimums**

Les options optimums des sections ont été sélectionnées après deux (2) principales étapes : une première analyse de programme de cycle de vie sans aucune contrainte a été exécutée en ne considérant pas la contrainte budgétaire pour trouver les options optimums et en déduire les coûts totaux de cycle de vie des travaux d'investissement (entretien périodique) et de fonctionnement (entretien courant) correspondant à un scénario 100 % du budget; ensuite, une

deuxième analyse de programme du cycle de vie sous contraintes budgétaires a été exécutée en considérant la contrainte budgétaire pour trouver les options optimums des sections, mais en assumant successivement des scénarios de 75 %, 50% et 25 % du budget total déterminé précédemment. Il est important de mentionner que les contraintes budgétaires n'ont été appliquées que sur les travaux d'investissements (entretien périodique). De plus, le logiciel HDM-4 qui a été utilisé pour l'optimisation permet de calculer les coûts et les avantages actualisés ainsi que les indicateurs économiques comme la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rendement interne (TRI) des options d'entretien à chaque simulation.

- **Ordre de priorité d'interventions en ERR des sections**

Comme cela a déjà été mentionné ci-dessus la fonction-objectif qui a été maximisée dans cette présente étude est le rapport avantages/coût investissement représenté par l'équation 4.7 (Odoki et Kerali, 2000f) :

$$E_{ijt} = \frac{VAN_{ijt} - VAN_{ibt}}{C_{inves_{ijt}}} \quad (4.7)$$

Où

VAN_{ijt} = valeur actuelle nette de l'option j appliquée sur la section i à l'année t

VAN_{ibt} = valeur actuelle nette de l'option de base b appliquée sur la section i à l'année t

$C_{inves_{ijt}}$ = coût marginal ou coût d'investissement de l'option j appliquée sur la section i à l'année t.

Pour chaque section, l'option optimum est l'option dont le rapport E_{ijt} est le plus le plus élevés L'orde de priorité d'intervention en ERR a été établi en classant par ordre décroissante les rapports E_{ijt} de toutes les sections

- **Programme quinquennal**

Il est généralement recommandé aux administrations routières d'établir une programmation des travaux d'ERR de leurs réseaux ou sous-réseaux routiers pour une période pouvant varier entre 1 et 5 ans (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). C'est dans cette perspective qu'une programmation quinquennale comprenant l'année, les sections, les types de travaux ainsi que leurs coûts a été établie en supposant que tous les fonds sont disponibles pour entretenir adéquatement les dix (10) sections pendant 5 ans

4.4 Résultats et discussion

4.4.1 États des sections homogènes en fonction des options

Les figures 4.4 à 4.13 présentent l'évolution des états en fonction des options d'entretien appliquées à chacune des dix (10) sections sur un cycle de vie de 20 ans. Il est observé sur ces figures que l'option de base appliquée aux sections engendre une croissance abrupte des états des sections sur le cycle de vie atteignant des IRI très élevés variant de 10,5 à 16 m/km avant la fin de la période d'analyse. Un IRI supérieur à 10,5 m/km) correspond à une détérioration très avancée des sections. L'état de la route qui était préalablement « bon » et « moyen » se dégrade rapidement et atteint à un état « mauvais » voire « médiocre » si aucune action d'entretien n'est entreprise au moment opportun. Ainsi, l'évolution des dégradations est étroitement liée aux normes des travaux d'ERR appliquées aux sections pour préserver leurs états fonctionnels. De plus, les travaux issus de ces normes réalisés au moment opportun permettent de maintenir leurs capacités structurales suffisantes pour continuer à supporter adéquatement les charges du trafic pour lesquelles elles ont été conçues (Kerali, Odoki et Stannard, 2000).

Telle que présentée aux tableaux 4.6 et 4.7, chaque option, à l'exception de l'option de base, est composée d'un entretien périodique qui est primordial et d'un entretien courant qui est appliqué systématiquement à chaque fois que les critères d'intervention ne sont pas satisfaits. Ainsi, il peut être observé aux figures 4.4, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.12 et 4.13 que l'entretien

périodique de l'option 9, qui est la reconstruction, n'est pas applicable aux sections SH1, SH3, SH4, SH5, SH6, SH9 et SH10. En effet, les travaux de reconstruction ne peuvent être déclenchés que si les valeurs de l'IRI des sections sont supérieures à 8 m/km et à des intervalles de 10 ans et 8 ans respectivement pour les sections en EB et en ESB. Ces valeurs limites ne sont pas atteintes pour les sections mentionnées ci-dessus. Par conséquent, seul l'entretien courant de l'option 9 est appliqué à ces sections.

À l'opposé des sections SH1, SH3, SH4, SH5, SH6, SH9 et SH10, l'entretien courant et l'entretien périodique de l'option 9 sont appliqués conjointement aux sections SH2, SH7 et SH8 (voir les figures 4.6, 4.10 et 4.11). Cela est dû au fait que l'évolution de la détérioration de ces sections sur le cycle de vie atteint les seuils de déclenchement des travaux de reconstruction. Il est important de mentionner que l'entretien courant des options est toujours appliqué jusqu'à ce qu'il devienne inefficace pour remédier à la détérioration avancée des sections. De plus, les sections SH2, SH7 et SH8 dont les travaux de reconstruction sont réalisables ont toutes un état service 1 correspondant à un état « moyen » d'après les spécifications de l'UEMOA (2009a) et comportent respectivement des valeurs d'IRI de 4,83, 5,28, 5,04 m/km. Ces IRI sont plus élevés comparativement à ceux des autres sections. Cela indique que les travaux d'entretien préventif sont plus efficaces sur les sections en bon état que sur celles en moyen état. Ces dernières nécessiteront des opérations de reconstruction plus tôt à un moment donné du cycle de vie, même avec la réalisation des travaux de l'entretien de courant, d'où l'importance d'entretenir les routes lorsqu'elles sont toujours relativement en bon état.

L'application des options 1 à 8 et plus spécifiquement des options 1 à 7 (entretien préventif) comme cela est illustré aux figures 4 à 13 permet d'améliorer considérablement les états des sections en maintenant les valeurs de leurs IRI entre 2 et 4,5 m/km sur tout le cycle de vie tandis qu'avec l'option de base ces valeurs atteignent 10,5 à 16 m/km avant la fin du cycle de vie. Cette tendance permet de valider la pertinence des normes des travaux ERR utilisées dans cette étude puisque l'application des options 1 à 9 permet d'améliorer les IRI des sections d'environ de 72 à 81 % par rapport à l'application de l'option de base. Il peut être observé sur les figures 4 à 13 que l'évolution de la rugosité des sections sur le cycle de vie sous les options

d'ERR correspond à ce qui était prévu en fixant les critères d'intervention présentés dans la colonne 4 des tableaux 4.6 et 4.7. En effet, il était prévu que l'option de base mènerait les sections à état « médiocre » et que les options 1 à 9 amélioreraient la qualité de roulement des sections pendant la période d'analyse en fonction des critères d'intervention. La validation de cette tendance s'avère indispensable avant toute interprétation des résultats (Morosiuk, Riley et Toole, 2006). Puisque cette tendance est validée dans la présente analyse, les meilleures options ou options optimums de chaque section en considérant la consommation d'énergie, les coûts des émissions polluantes des véhicules, les coûts totaux de transport et les contraintes budgétaires peuvent être maintenant déterminées. Ces analyses sont présentées dans les prochaines sections du présent document.

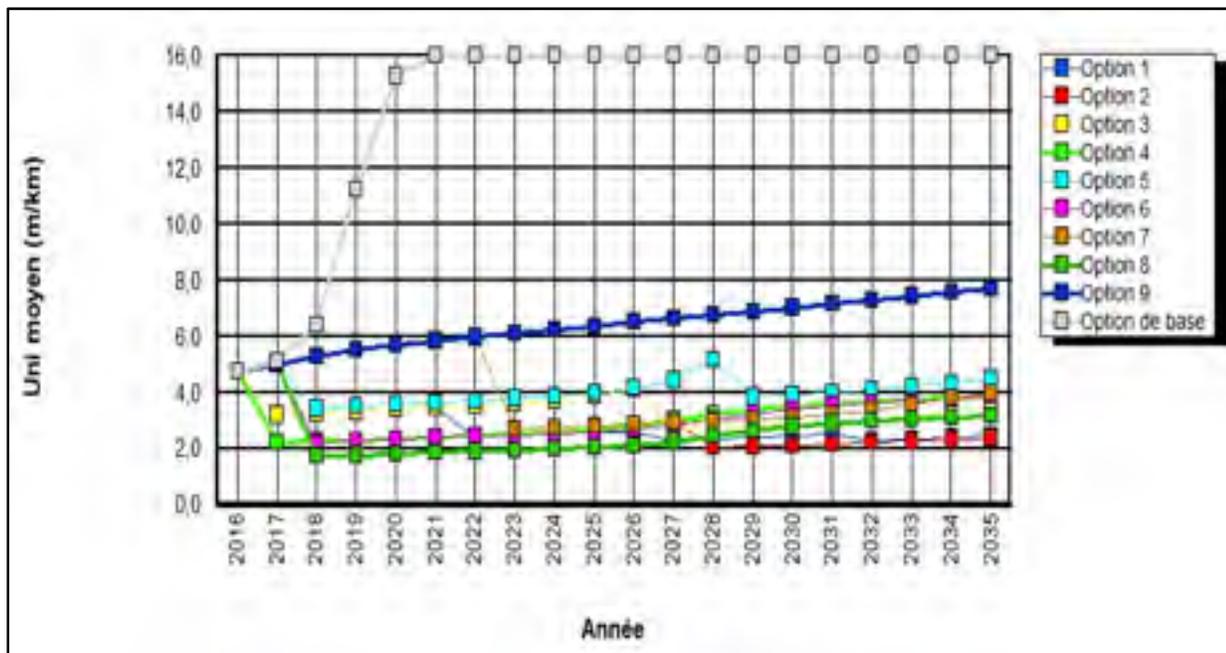


Figure 4.4 Évolution de l'uni de la section homogène SH1 en fonction des différentes options

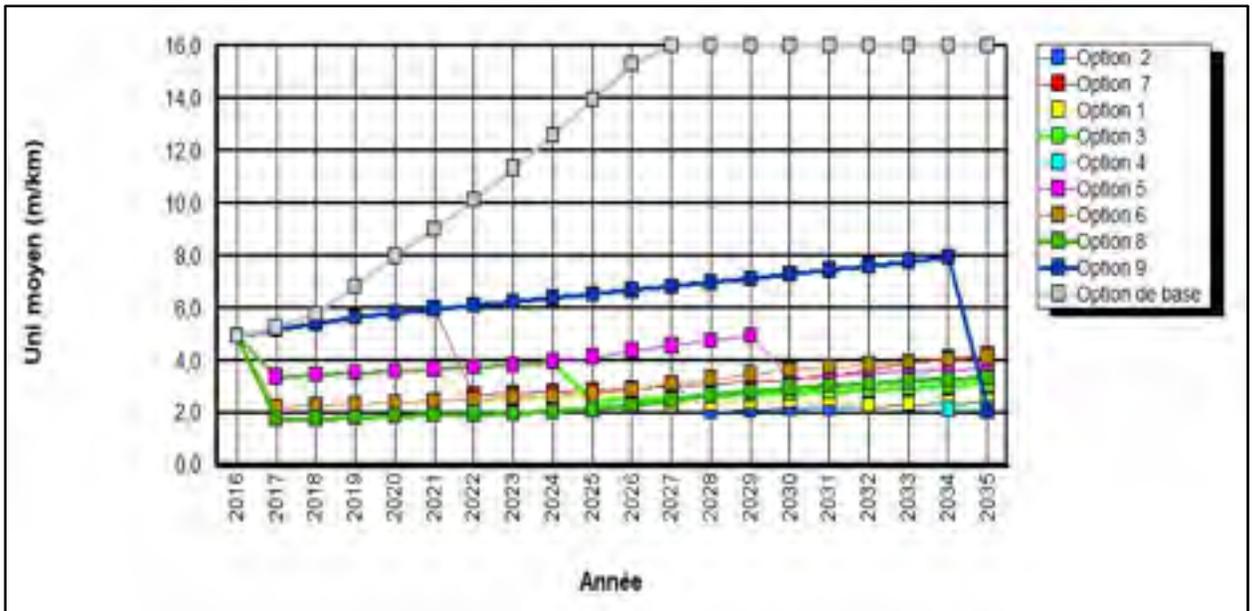


Figure 4.5 Évolution de l'uni de la section homogène SH2 en fonction des différentes options

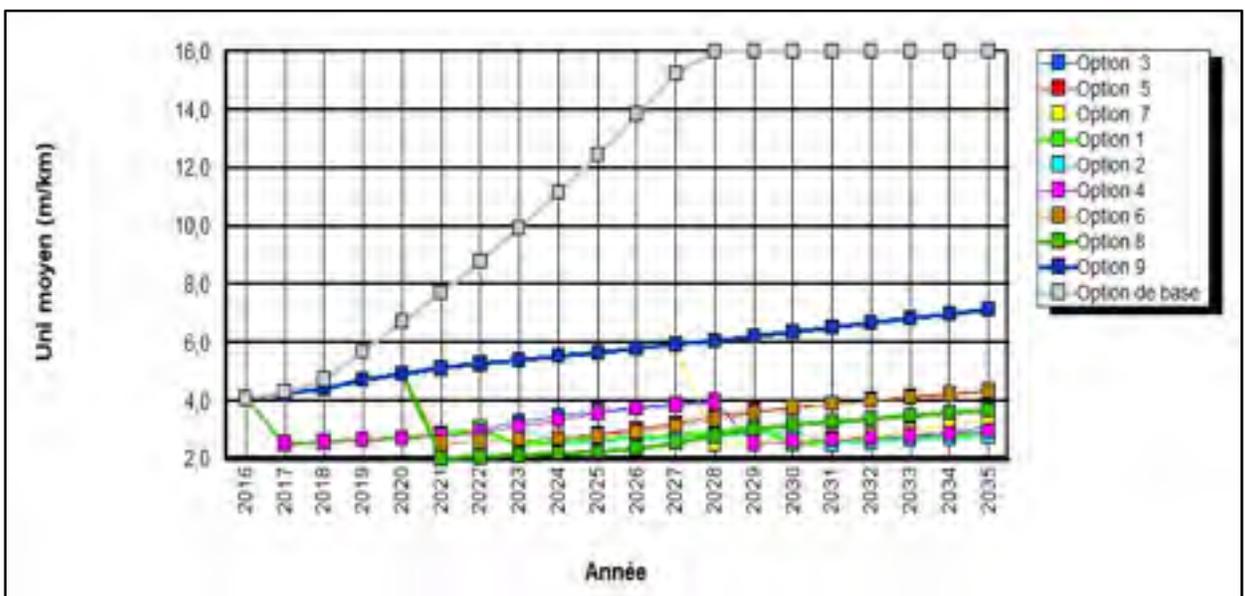


Figure 4.6 Évolution de l'uni de la section homogène SH3 en fonction des différentes options

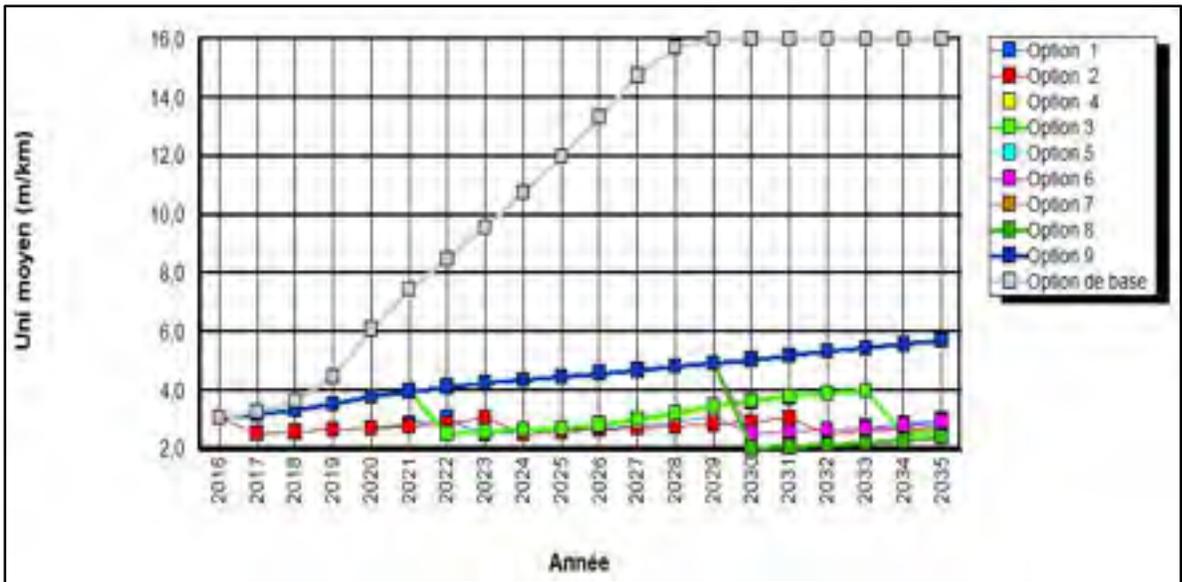


Figure 4.7 Évolution de l'uni de la section homogène SH4 en fonction des différentes options

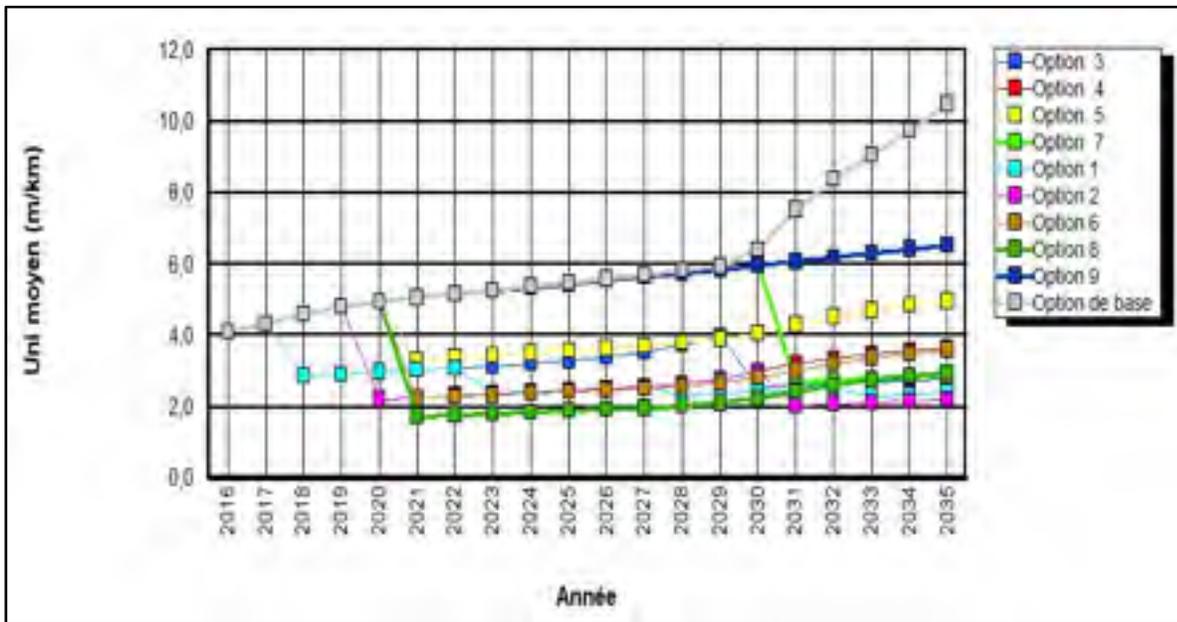


Figure 4.8 Évolution de l'uni de la section homogène SH5 en fonction des différentes options

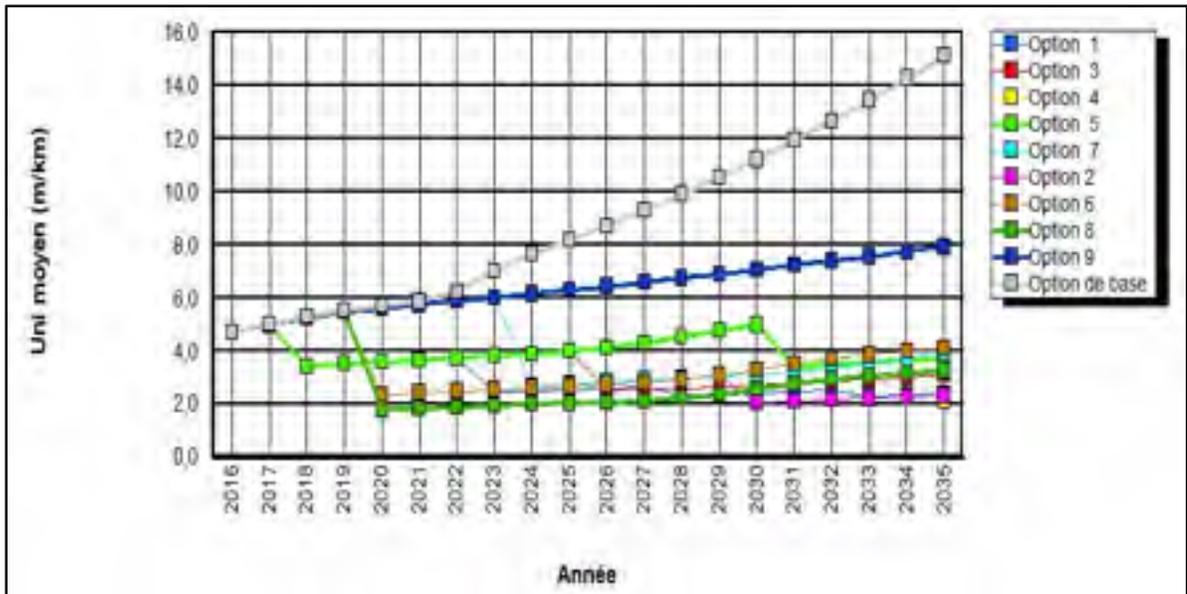


Figure 4.9 Évolution de l'uni de la section homogène SH6 en fonction des différentes options

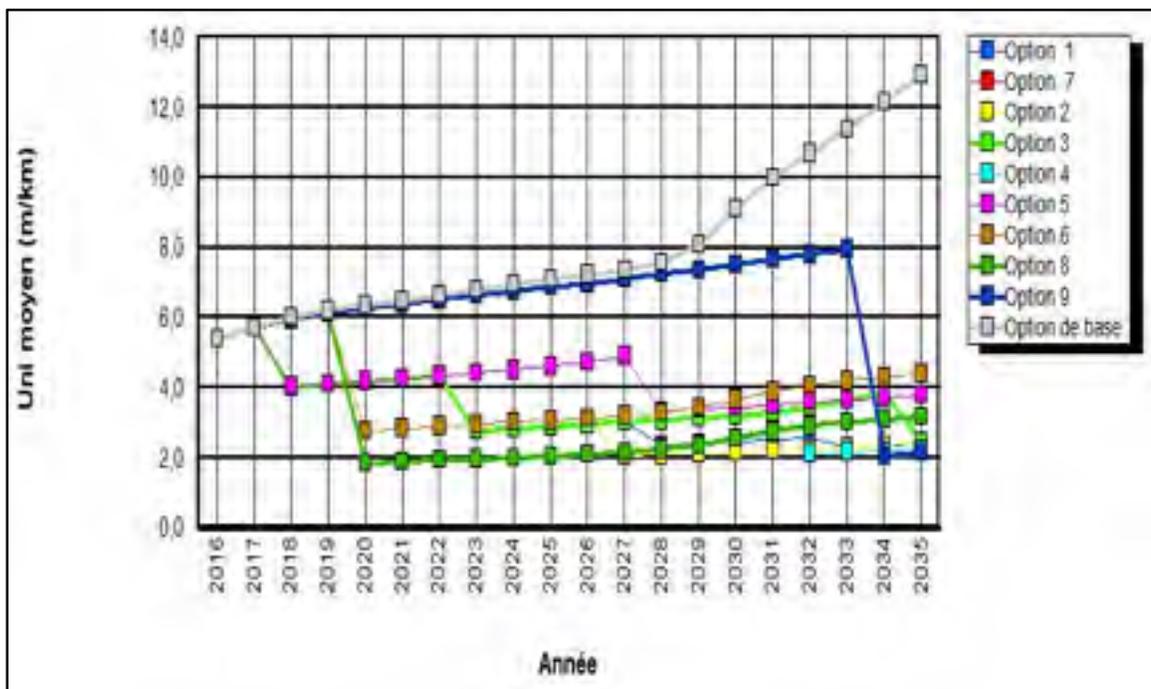


Figure 4.10:Évolution de l'uni de la section homogène SH7 en fonction des différentes options

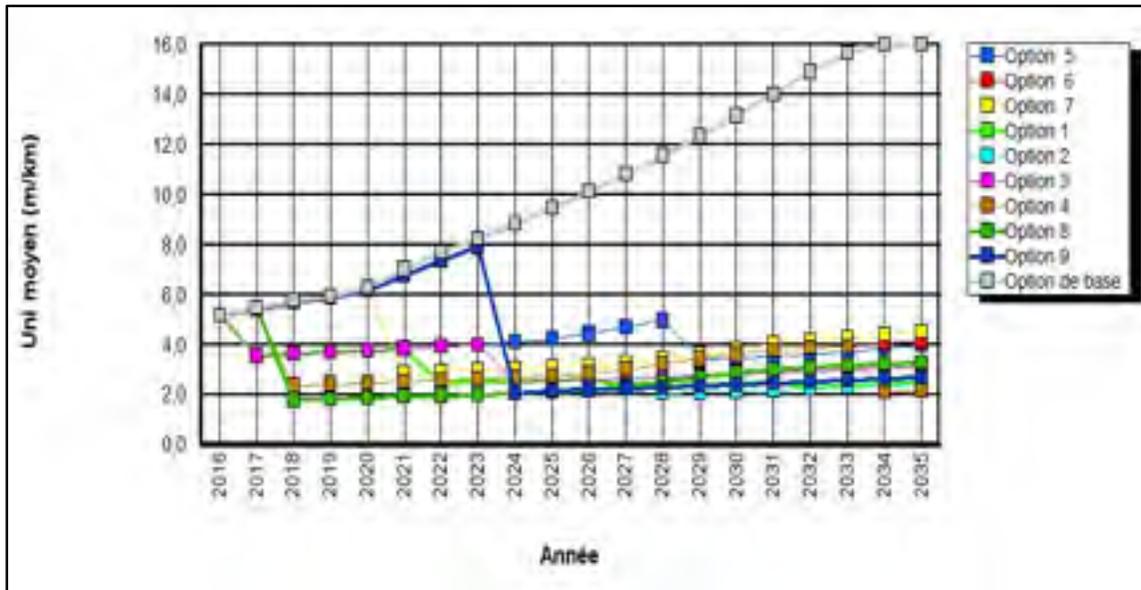


Figure 4.11 Évolution de l'uni de la section homogène SH8 en fonction des différentes options

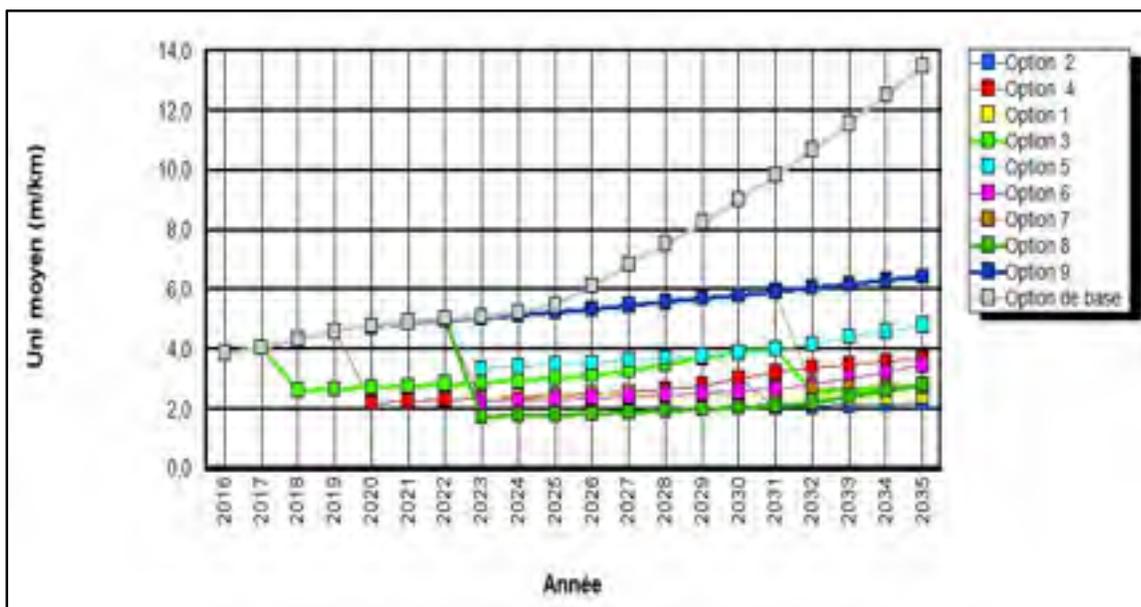


Figure 4.12 Évolution de l'uni de la section homogène SH9 en fonction des différentes options

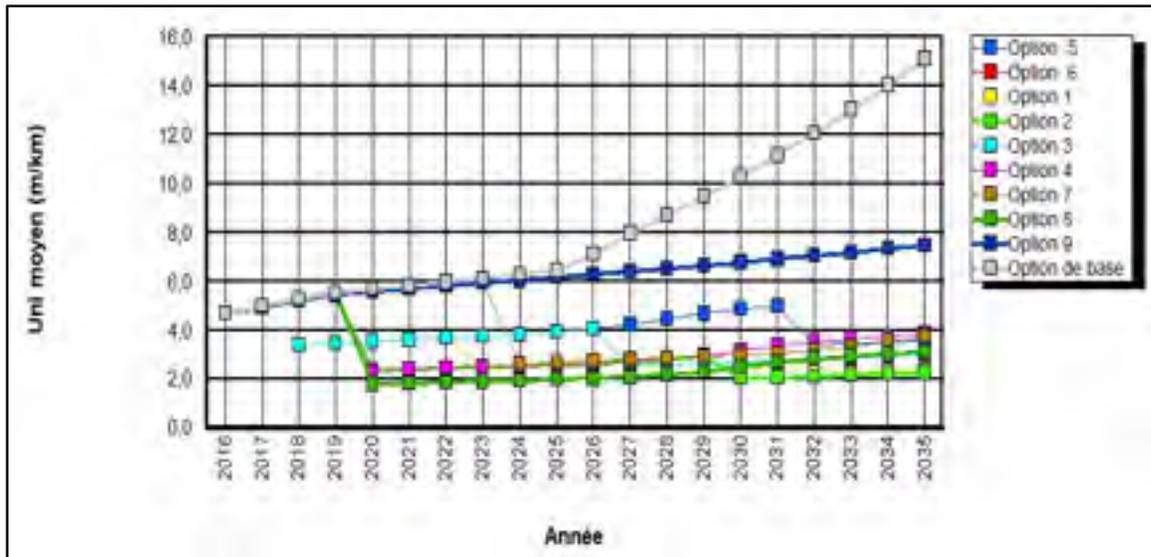


Figure 4.13 Évolution de l'uni de la section homogène SH10 en fonction des différentes options

4.4.2 Meilleure option en considérant la consommation d'énergie par les véhicules (EGLOB)

Les figures 4.14 à 4.33 présentent les quantités totales d'énergie consommée par les véhicules pendant toute la période d'analyse des options appliquées aux sections. Les quantités totales d'énergie de cycle de vie consommée par les véhicules (EGLOB) de l'option de base des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égales à 17 176 GJ, 15 048 GJ, 9 451 GJ, 13 715 GJ, 15 858 GJ, 19 997 GJ, 21 246 GJ, 6 851 GJ, 18 232 GJ et 15 292 GJ. Il peut être constaté sur les figures 14 à 33 que les quantités d'EGLOB de l'option de base sont les plus élevées comparativement aux options 1 à 9. Il s'avère que l'option de base est la plus consommatrice d'énergie étant donné qu'au lieu d'améliorer l'état des sections, elle entraîne une augmentation brusque du taux de détérioration des sections en modifiant leurs états qui étaient préalablement « bon » et « moyen » et passent désormais à un état « mauvais » voire même « médiocre ». Un tel piètre état nécessite plus de consommation des ressources telles que le carburant, l'huile, les pneumatiques et les pièces détachées (Odoki et Kerali, 2000d) par les véhicules circulant sur ces sections, justifiant ainsi les quantités élevées d'EGLOB de l'option de base.

Les quantités minimales d'EGLOB des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égales à 11 270 GJ, 11 230 GJ, 6 928 GJ, 10 754 GJ, 12 893 GJ, 15 548 GJ, 17 091 GJ, 5 278 GJ, 14 838 GJ et 12 360 GJ, étant donné que ces quantités minimales d'EGLOB correspondent à celles des options 4, 2, 4, 2, 1, 1, 2, 2, 1 et 2 appliquées respectivement aux sections SH1 à SH10. Les pourcentages de réduction de la consommation d'énergie des options correspondants aux quantités minimales d'EGLOB mentionnées ci-dessus dont les valeurs sont respectivement de 34,39%, 25,37%, 26,70%, 21,59%, 18,7%, 22,25%, 19,55%, 22,96%, 19,00% et 21 % pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont les plus élevés comparativement aux options de base des sections. Par conséquent, ces options sont les meilleures options d'entretien périodique pour la réduction de la consommation d'énergie par les véhicules motorisés sur un cycle de vie de 20 ans. De plus, l'application de ces options aux sections réduira considérablement la quantité d'énergie consommée par les véhicules pour les transports des personnes et des marchandises. Les meilleures options sont des options d'entretien préventif déclenchées à partir des IRI de 3 et 4 m/km et chaque 3 et 7 ans. Aucune meilleure option ne comprend ni les travaux de réhabilitation ni ceux de reconstruction étant donné que l'évolution des dégradations n'a pas atteint les seuils nécessitant le déclenchement d'une telle intervention. Les dégradations de surface des chaussées dues à l'orniérage, à la fissuration, aux nids de poule, aux arrachements, aux dentelles de rives, au système de drainage, à l'adhérence, à la texture ou à toutes autres imperfections de surface influencent considérablement la consommation d'énergie des véhicules (Haider et Conter, 2012). L'entretien préventif dont le but est d'améliorer l'état fonctionnel des chaussées sans apport significatif sur la structure des chaussées (AASTHO, 2012) permet de contrôler ou de réparer ces dégradations de surface (EC, 2006; Haider et Conter, 2012). Par conséquent, les meilleures options déterminées dans cette étude en considérant les quantités minimales d'EGLOB sont cohérentes et pertinentes étant donné qu'elles sont principalement composées de resurfaçages minces en BB de 30 mm et 50 mm et de rechargements en ESMSG et ES qui sont des travaux d'entretien préventif.

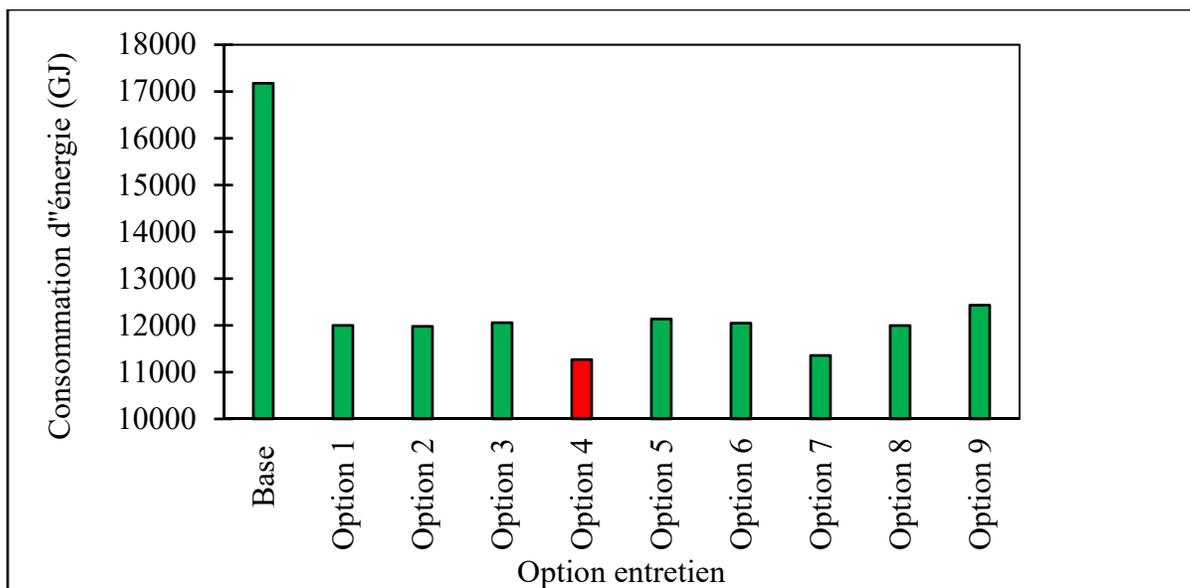


Figure 4.14 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH1

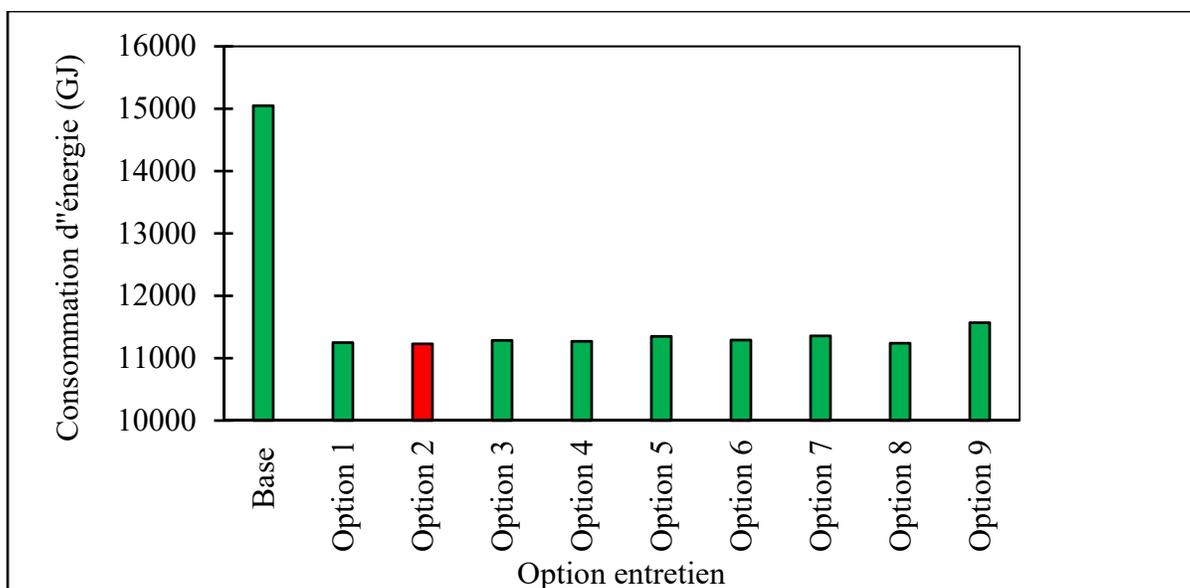


Figure 4.15 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH2

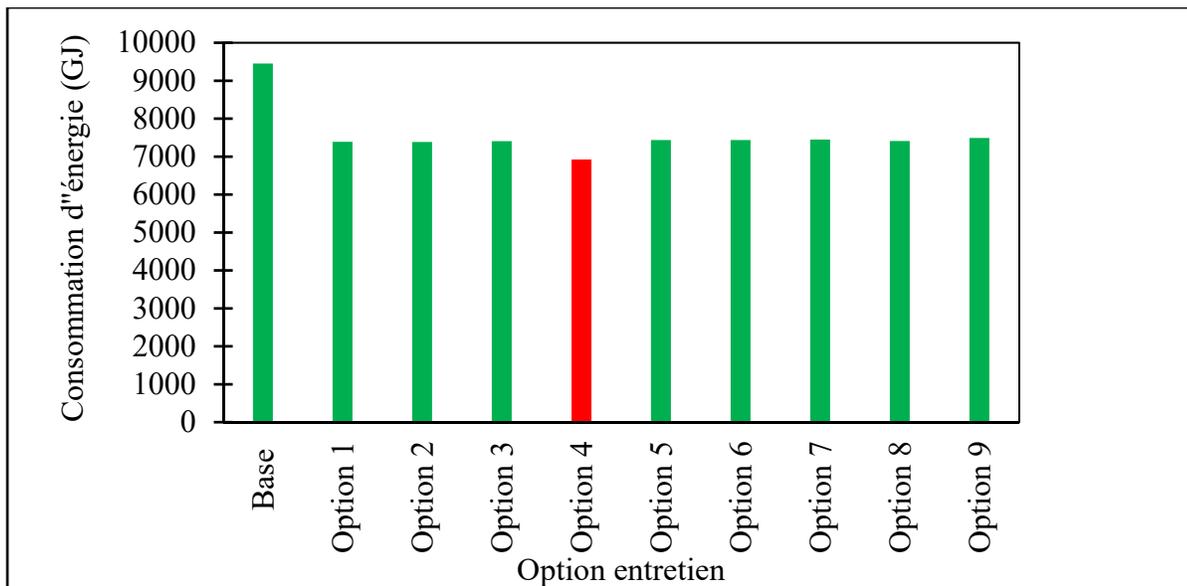


Figure 4.16 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH3

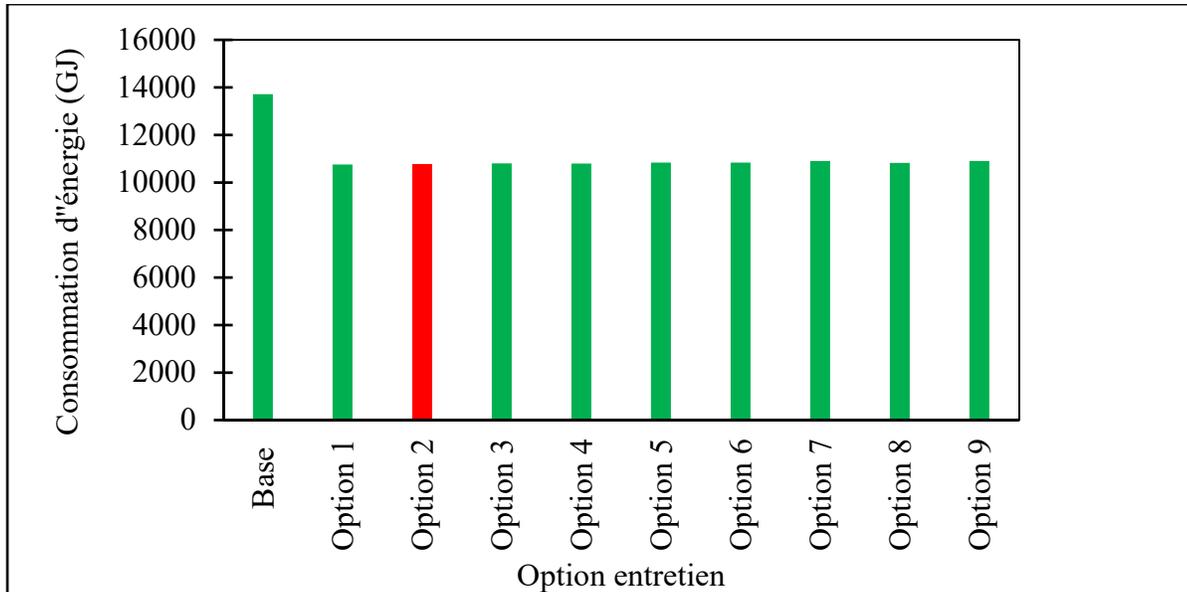


Figure 4.17 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH4

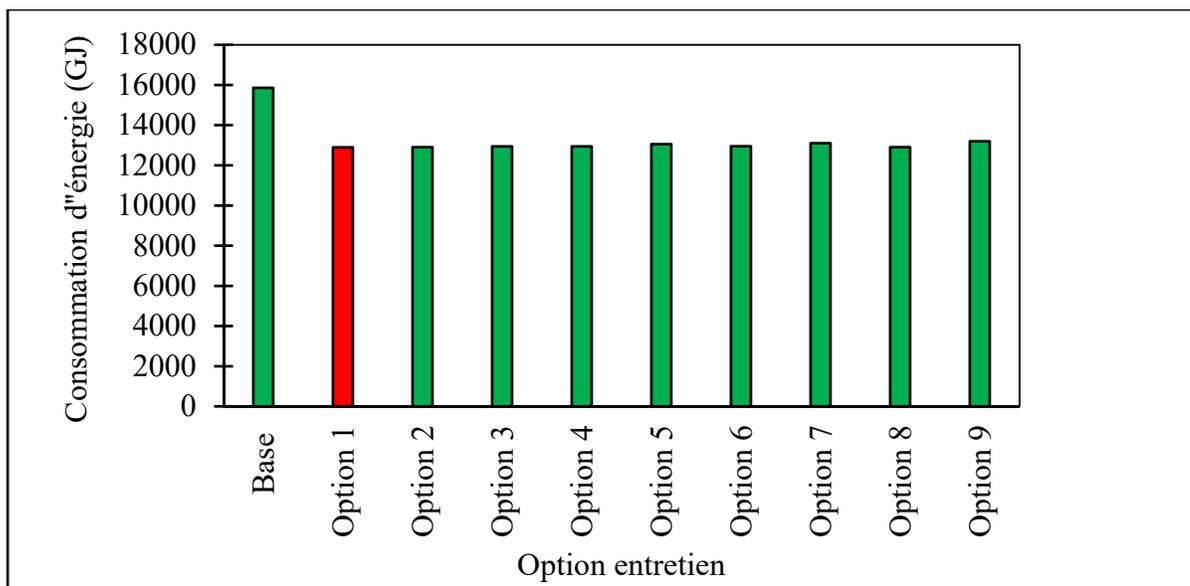


Figure 4.18 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH5

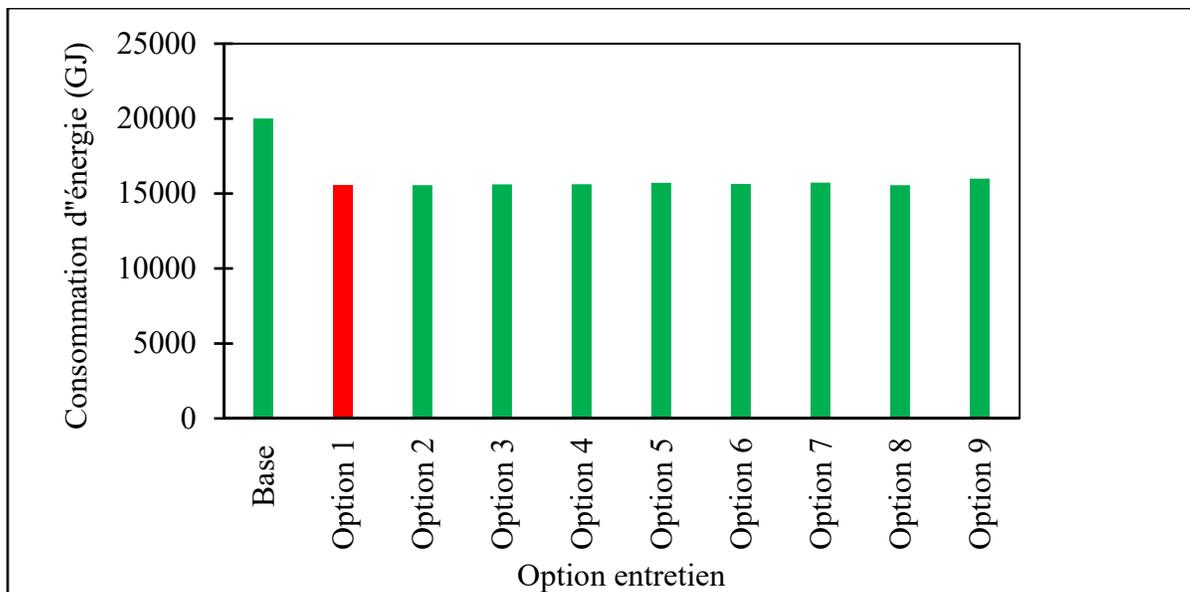


Figure 4.19 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH6

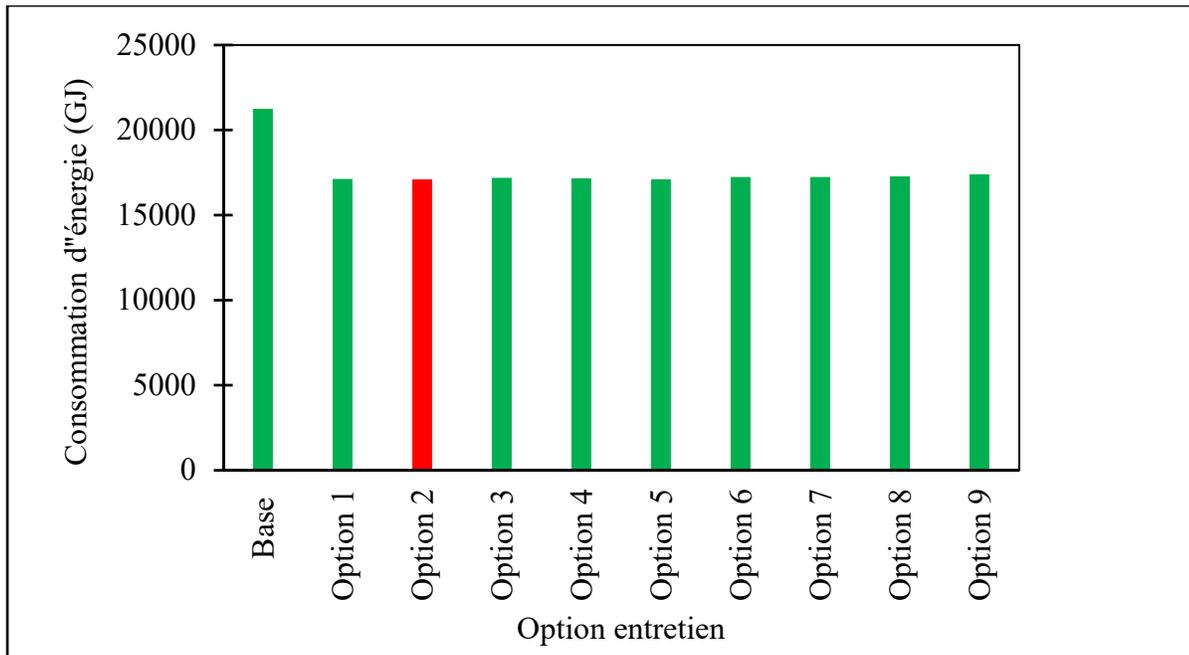


Figure 4.20 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH7

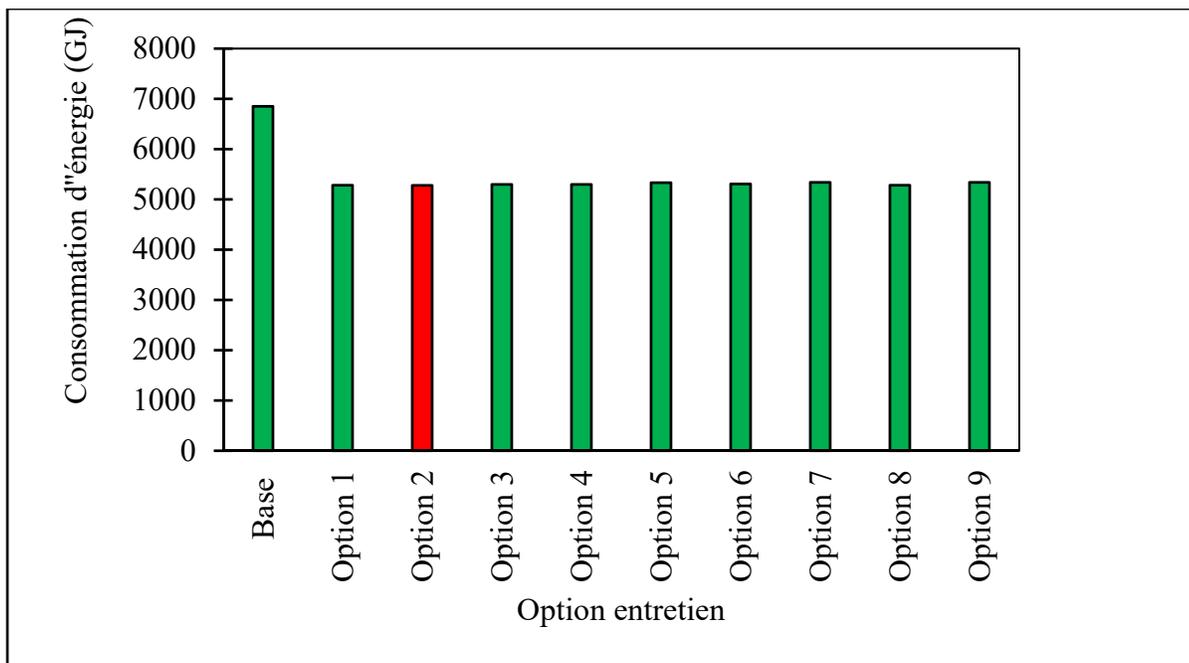


Figure 4.21 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH8

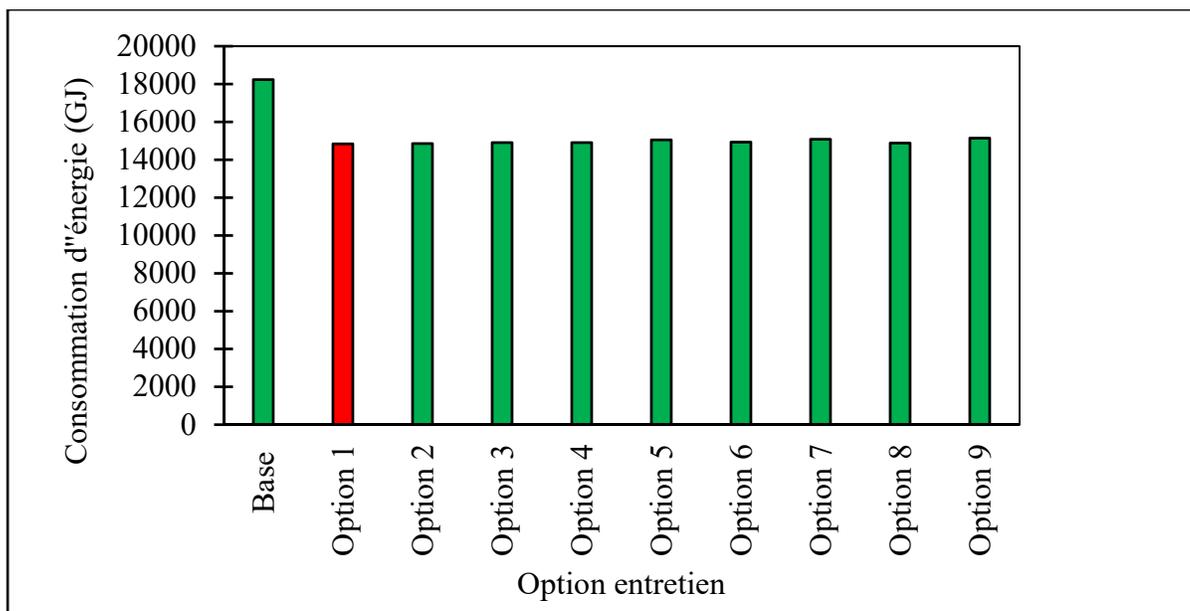


Figure 4.22 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH9

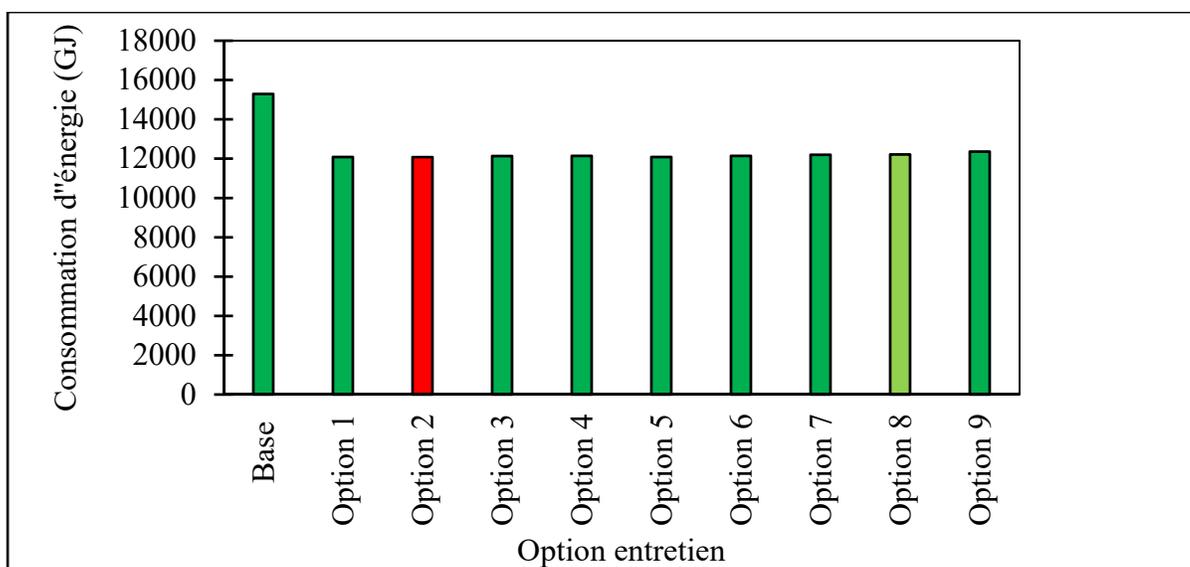


Figure 4.23 Consommation d'énergie de cycle de vie sur la section SH10

4.4.3 Meilleures options en considérant les coûts du cycle de vie des émissions polluantes

Les figures 4.24 à 4.33 présentent les coûts du cycle de vie des émissions polluantes des véhicules des options appliquées à chaque section (CCVEE). Les CCVEE de l'option de base des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égaux à 2,92 M\$USD, 3,38 M\$USD, 2,76 M\$USD, 3,74 M\$USD, 6,13 M\$USD, 7,17 M\$USD, 8,19 M\$USD, 1,94 M\$USD, 5,91 M\$USD et 4,96 M\$USD. Comparativement aux options 1 à 9, les coûts de cycle de vie des émissions polluantes de l'option de base sont les plus élevés, ce qui est conforme aux résultats attendus, puisque l'option de base consiste en la réalisation des travaux d'entretien courant minimum qui sont inefficients pour faire régresser la détérioration des chaussées.

Les CCVEE minimaux des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égaux à 2,05 M\$USD, 2,48 M\$USD, 2,10 M\$USD, 3,06 M\$USD, 4,58 M\$USD, 5,66 M\$USD, 6,23 M\$USD, 1,54 M\$USD, 4,85 M\$USD et 3,96 M\$USD correspondant respectivement aux options 1, 4, 5, 5, 2,1, 2, 2, 1 et 2. Les économies sur les coûts de cycle de vie des émissions polluantes des meilleures options comparativement aux options de base de chaque section sont respectivement de 29,38%, 26,65%, 23,82%, 18,21%, 23,69%, 21,00%, 23,86 %, 20,64%, 17,95% et 20,04% pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 . Ces options sont considérées comme les meilleures options de chaque section étant donné que leurs économies sur les coûts de cycle de vie des émissions polluantes sont les plus élevées comparativement aux options de base des sections. Les meilleures options mentionnées ci-dessus sont composées des travaux d'entretien préventif (options 1, 2, 4 et 5) tels que le resurfacement mince en BB de 30 et 50 mm et les rechargements en ESMSG et en ESB. Ces meilleures options d'intervention sont appliquées lorsque les IRI atteignent des valeurs comprises entre 2 et 5.

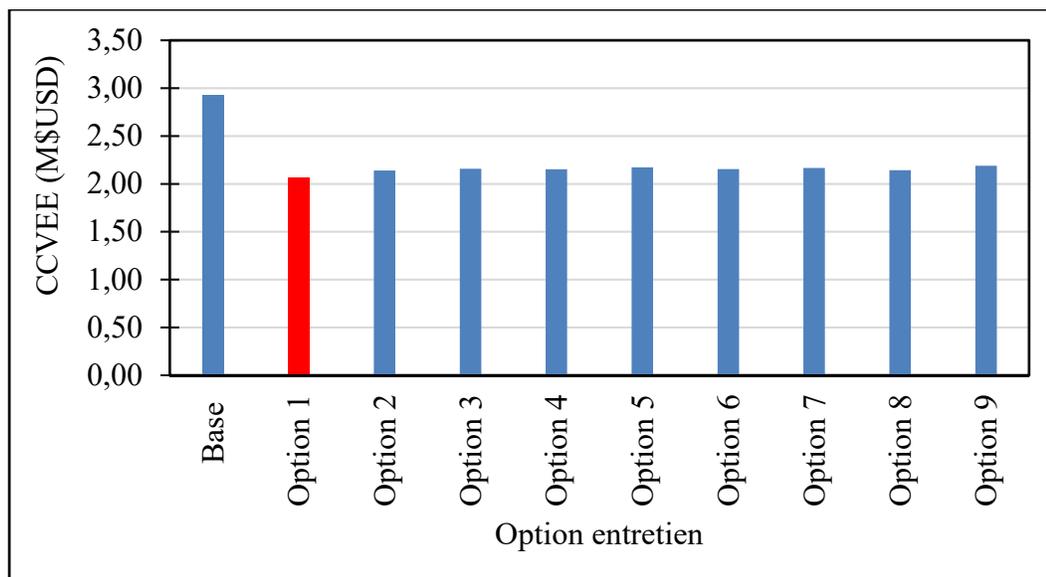


Figure 4.24 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH1

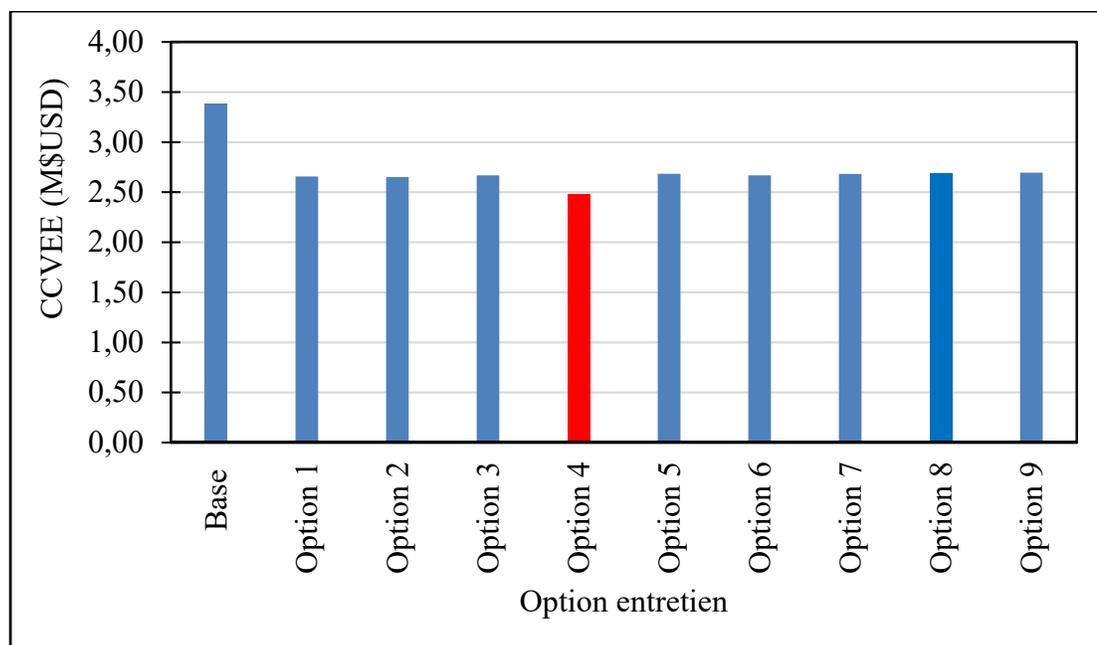


Figure 4.25 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH2

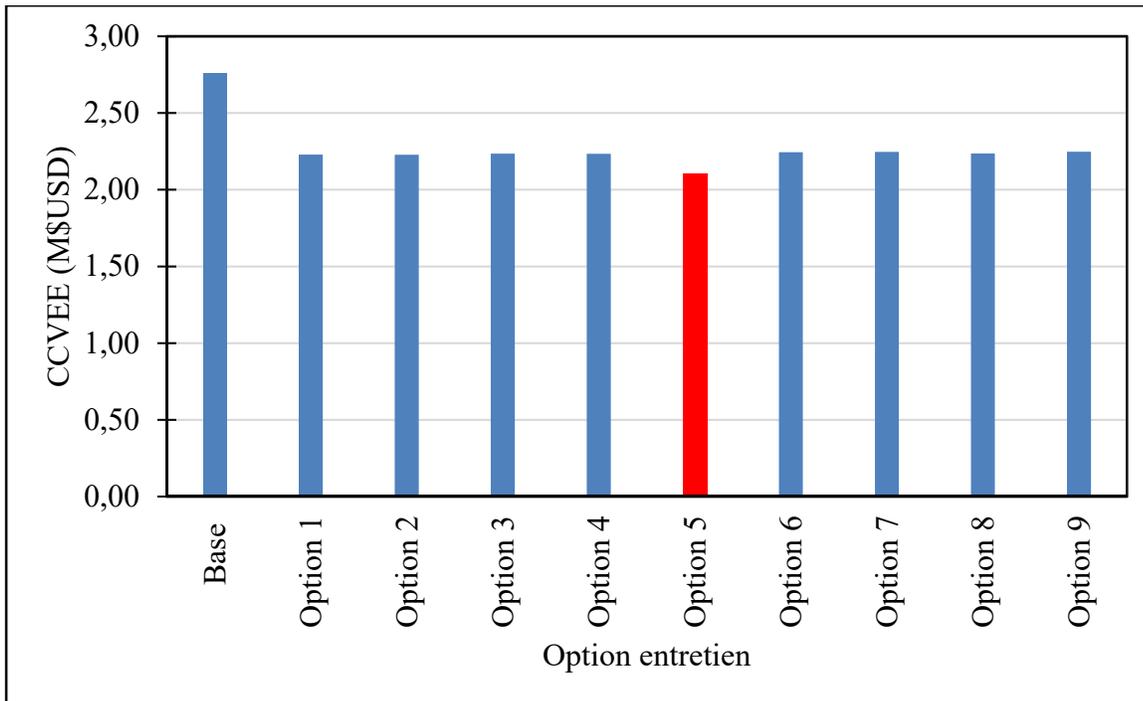


Figure 4.26 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH3

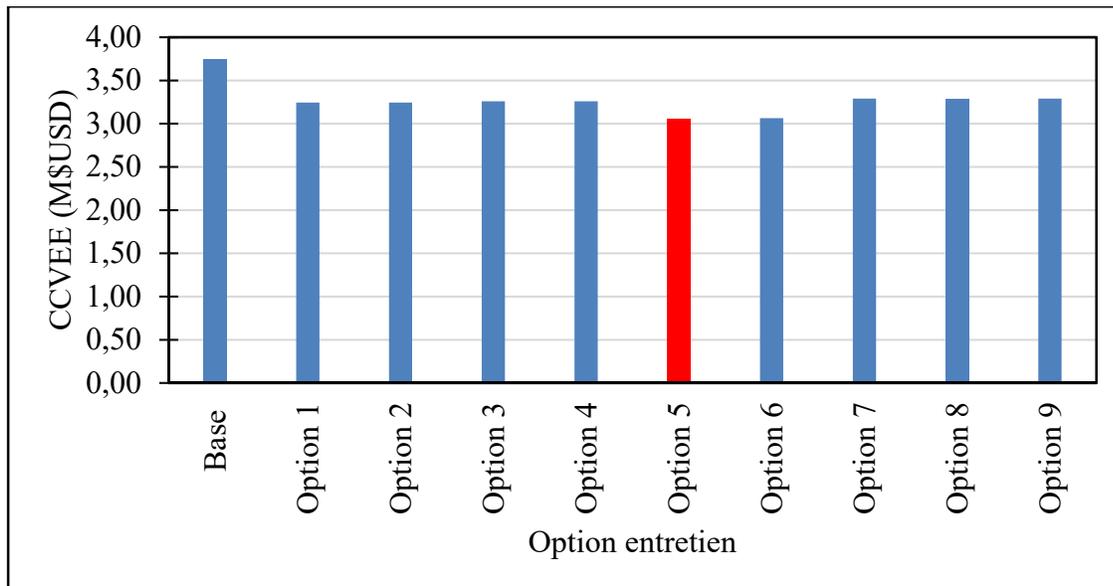


Figure 4.27 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH4

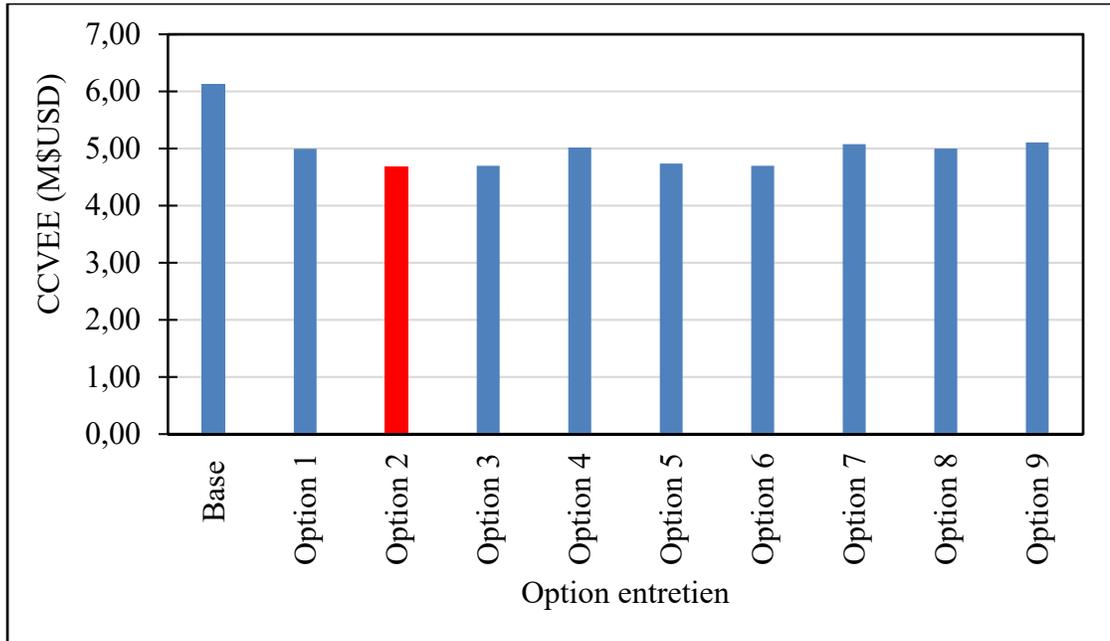


Figure 4.28 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH5

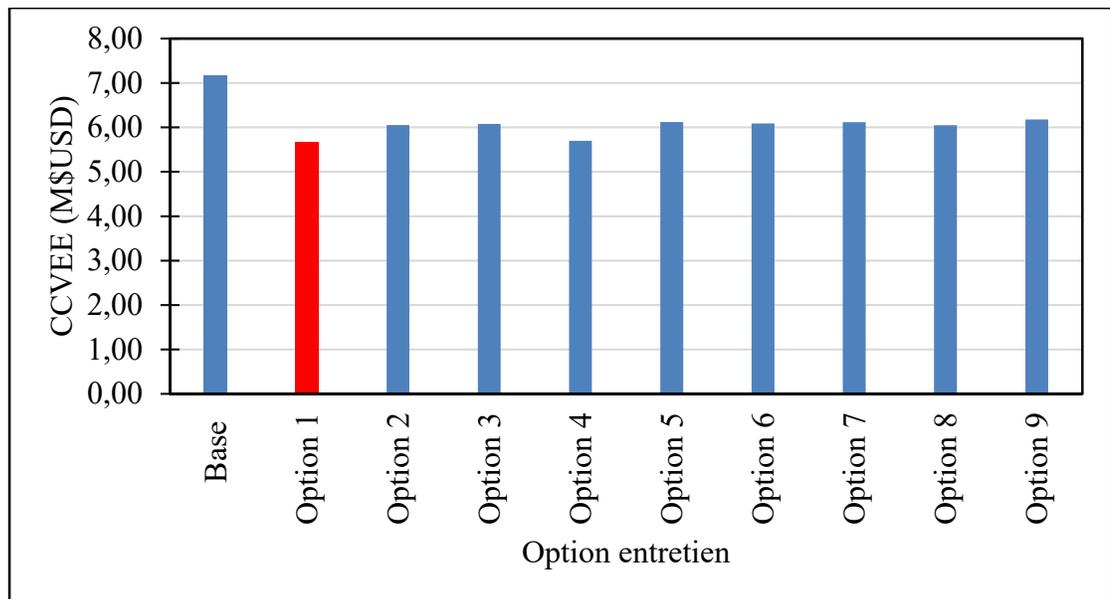


Figure 4.29 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH6

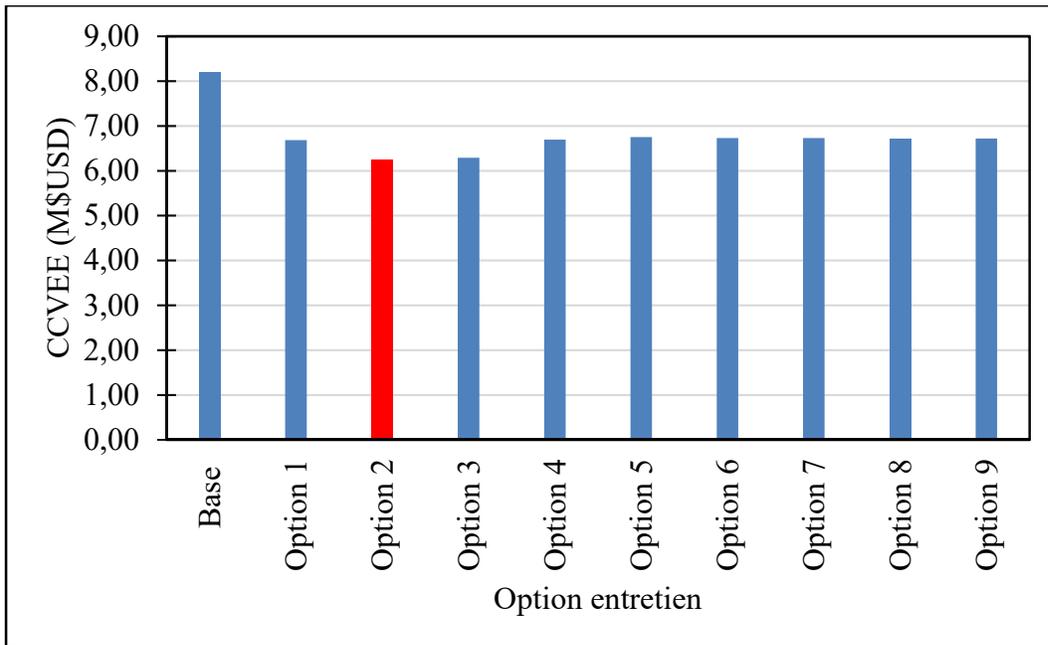


Figure 4.30 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH7

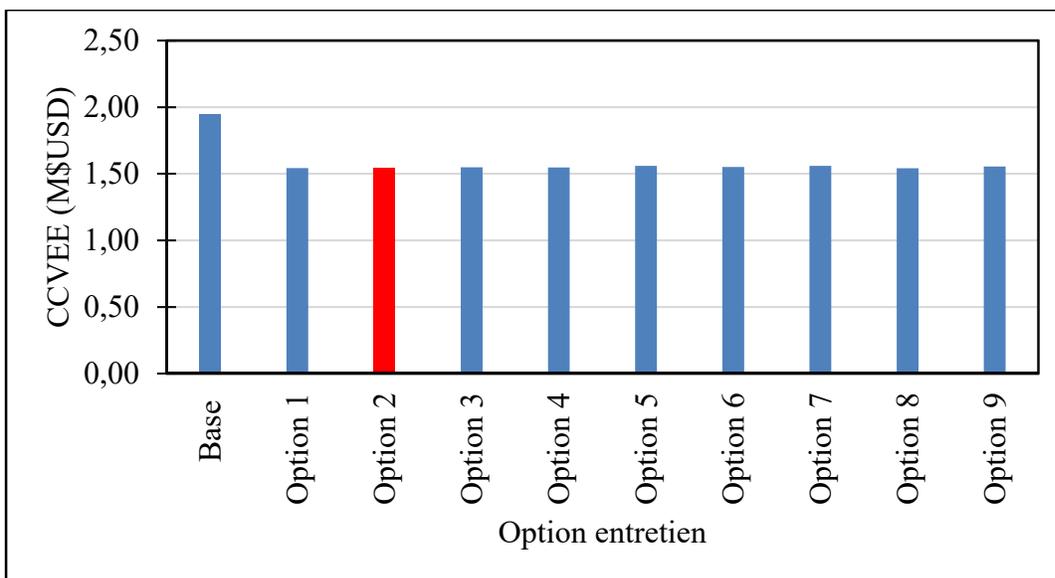


Figure 4.31 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH8

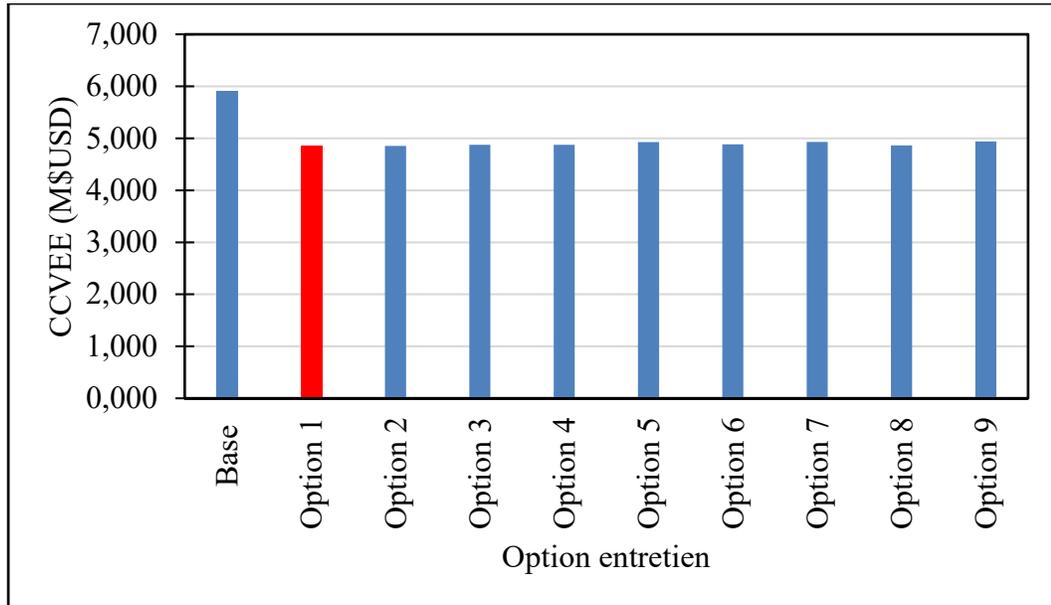


Figure 4.32 Coûts de cycle de vie des émissions polluantes de la section SH9

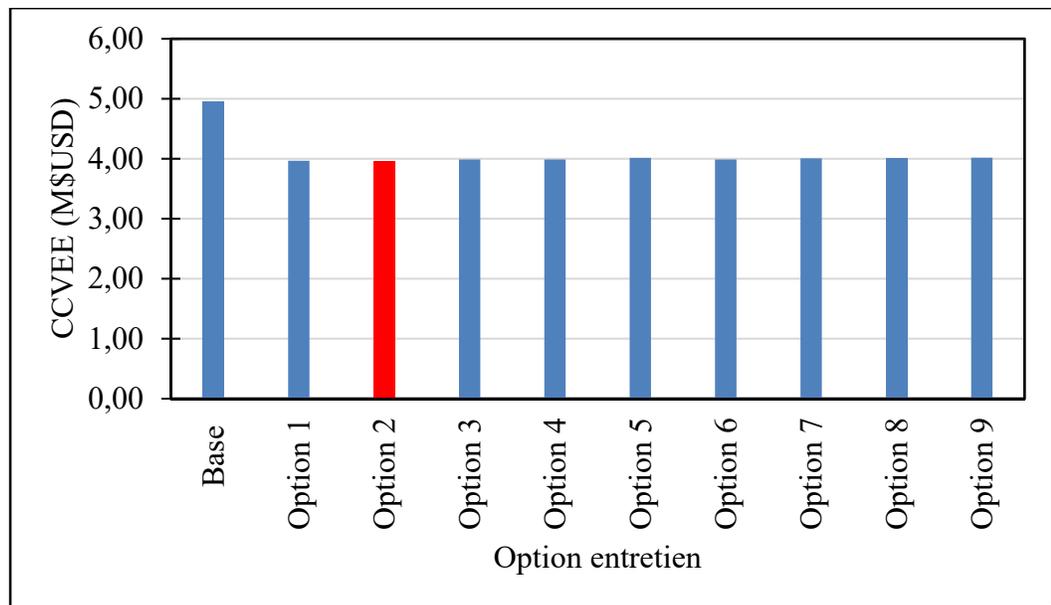


Figure 4.33 Coûts du cycle de vie des émissions polluantes de la section SH10

4.4.4 Meilleures options en considérant les coûts totaux du cycle de vie de transport

Les coûts totaux du cycle de vie de transport (CTCV) des options 1 à 9 incluant l'option de base appliquée à chaque section sont présentés aux figures 4.34 à 4.42. Les CTCV de l'option de base appliquée aux sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10 sont respectivement égaux à 398,07 M\$USD, 287,34 M\$USD, 149,20 M\$USD, 255,273 M\$USD, 263,24 M\$USD, 363,65 M\$USD, 376,50 M\$USD, 114,90 M\$USD, 301,71 M\$USD et 267,04 M\$USD. À l'exception de l'option de base appliquée aux sections SH7, SH8, les CTCV de l'option de base appliquée sur les autres sections sont supérieurs aux CTCV des options 1 à 9. En effet, les CTCV de l'option 9 appliquée aux sections SH7 et SH8 qui sont respectivement égaux à 322,39 M\$USD et 105,63 M\$USD et s'avèrent supérieurs aux CTCV de l'option de base appliquée à ces sections. Cette tendance est probablement associée aux états des sections SH7 et SH8 exprimés en termes d'IRI dont les valeurs (5,28 m/km et 5,04 m/km) sont plus élevées que les valeurs des IRI des autres sections. De plus, les valeurs de l'IRI de 5,28 m/km et 5,04 m/km respectivement des sections SH7 et SH8 traduisent des états de détérioration plus avancés que ceux des autres sections. Par conséquent, les sections SH7, SH8, comparativement aux autres sections, pourraient nécessiter dans une période de temps plus courte des travaux importants tels que les travaux de reconstruction dont les CTCV sont plus élevés. Cela indique aussi que les sections de routes en état de détérioration avancée nécessitent des coûts d'administration plus élevés pour rétablir leurs fonctionnalités et affectent plus les usagers ou la société en général en générant des coûts d'usagers et coûts d'externalités plus élevés (Joubert, 2006).

Les meilleures options, qui sont les options avec des CTCV minimales des sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10, sont respectivement égales à 210,91 M\$USD, 174,80 M\$USD, 111,69 M\$USD, 160,65 M\$USD, 208,97 M\$USD, 260,46 M\$USD, 284,12 M\$USD, 79, 67 M\$USD, 228,46 M\$USD et 195,97 M\$USD (voir figures 34 à 42). Ces meilleures options des sections SH1 à SH10 correspondent respectivement aux options 4, 3, 3, 3, 3, 3, 6, 3, 2 et 3. Les économies sur des coûts totaux du cycle de vie de transport des meilleures options par rapport aux options de base de chaque section sont de 47,02 %, 39,17%,

25,14%, 37,07%, 20,62 %, 28,38%, 24,54%, 30,66%, 24,28% et 26,61% respectivement pour les sections SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9 et SH10. Ces résultats sont très intéressants et confirment une fois de plus l'importance de l'entretien préventif puisque les options 2, 4, 3 et 6 sont composées des travaux d'entretien préventif tels que le rechargement mince en BB de 30 mm et 50 mm, le rechargement en ESB et en ESMSG. En aucun cas les meilleures options n'incluent les options 8 et 9 qui sont composées respectivement des travaux de réhabilitation et des travaux de reconstruction. Cela permet d'affirmer que la réalisation des travaux d'entretien préventif sur des sections de routes dont les états sont «bon» et «moyen» permet de réduire l'empreinte du carbone (faibles coûts des émissions polluantes) et de reporter le recours aux travaux de remise en état (réhabilitation) et de reconstruction qui sont plus dispendieux (AIPCR, 2016; Khan et al., 2017).

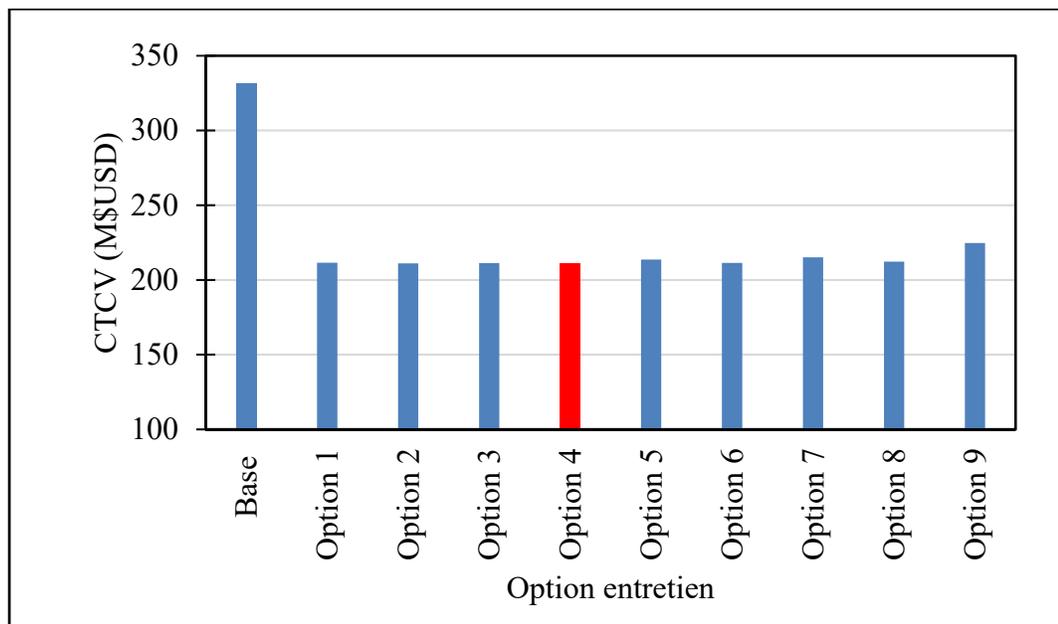


Figure 4.34 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH1

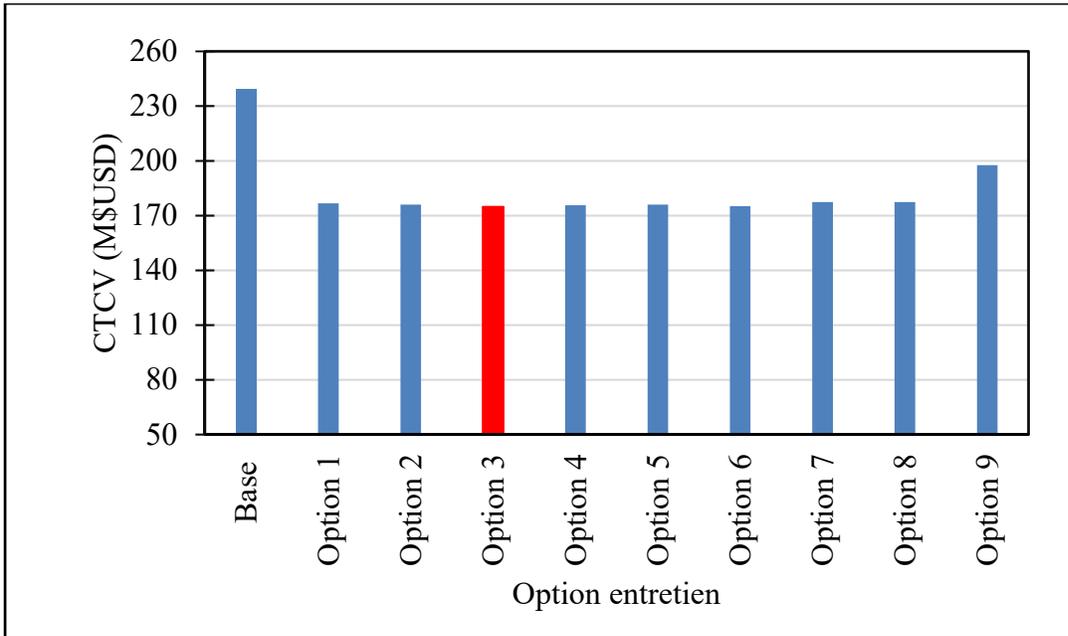


Figure 4.35 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH2

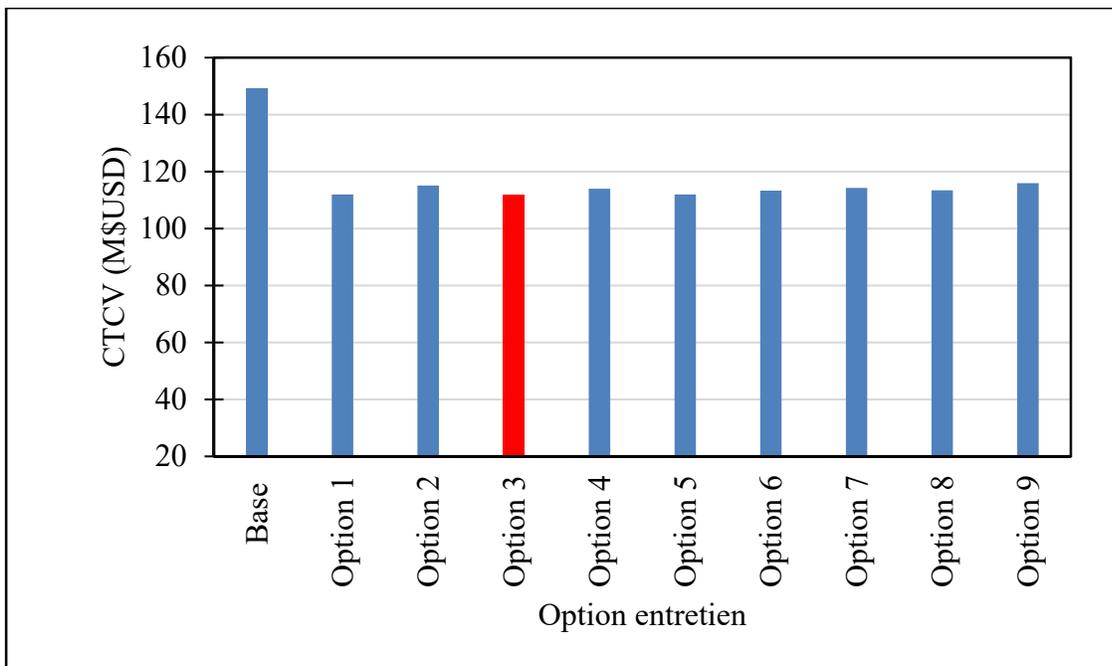


Figure 4.36 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH3

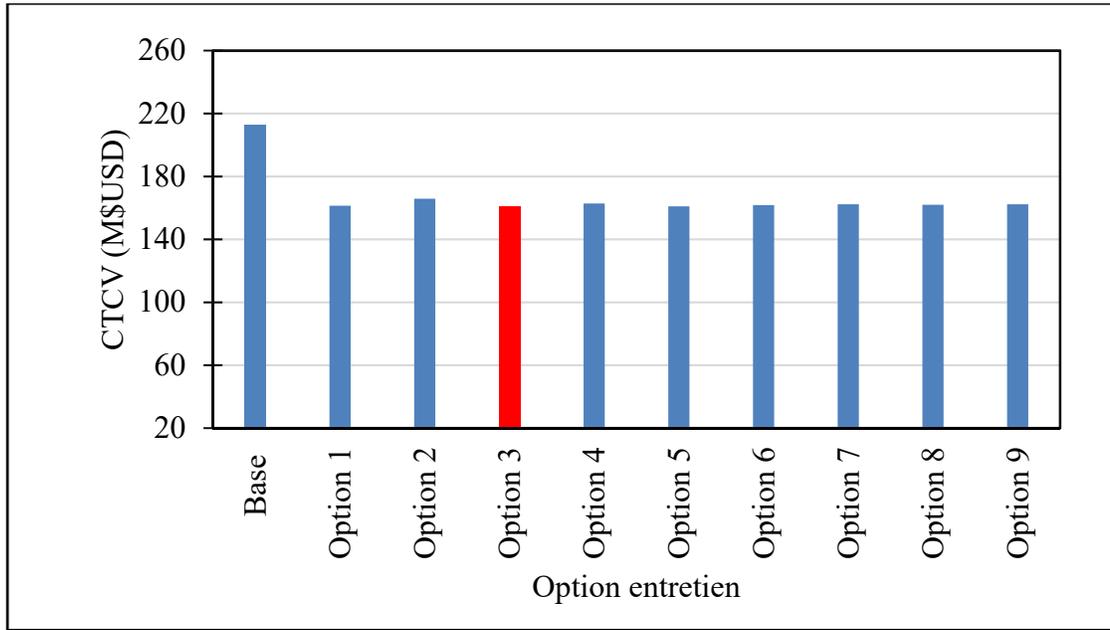


Figure 4.37 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH4

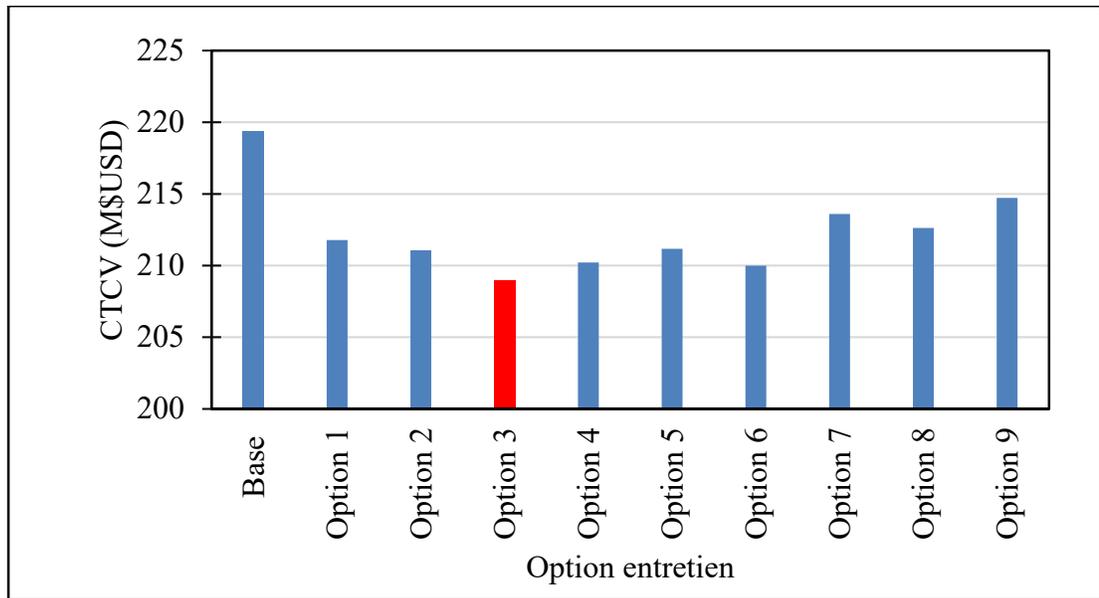


Figure 4.38 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH5

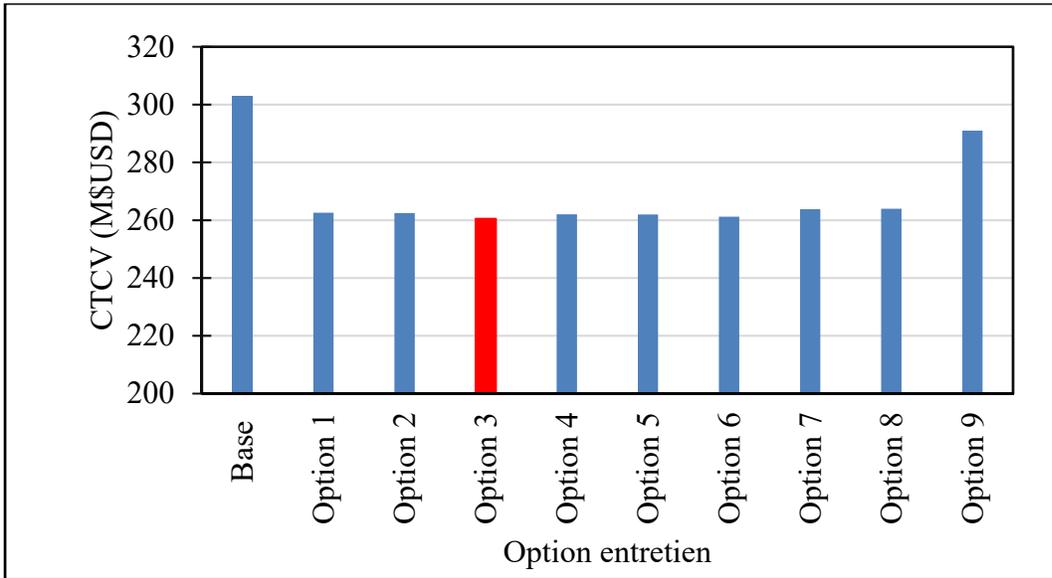


Figure 4.39 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH6

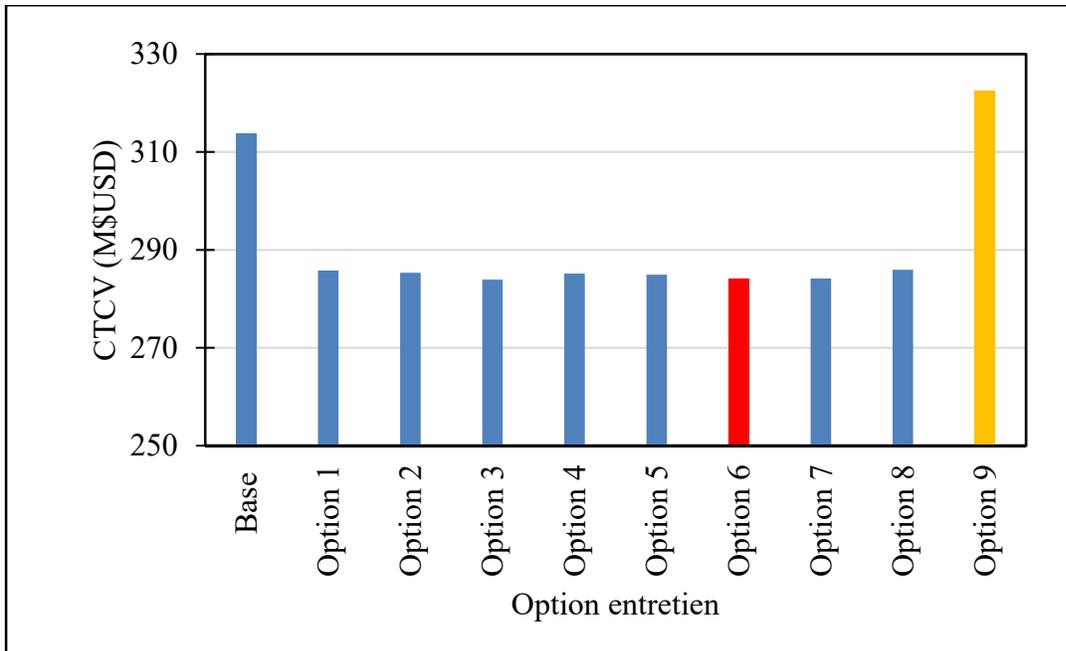


Figure 4.40 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH7

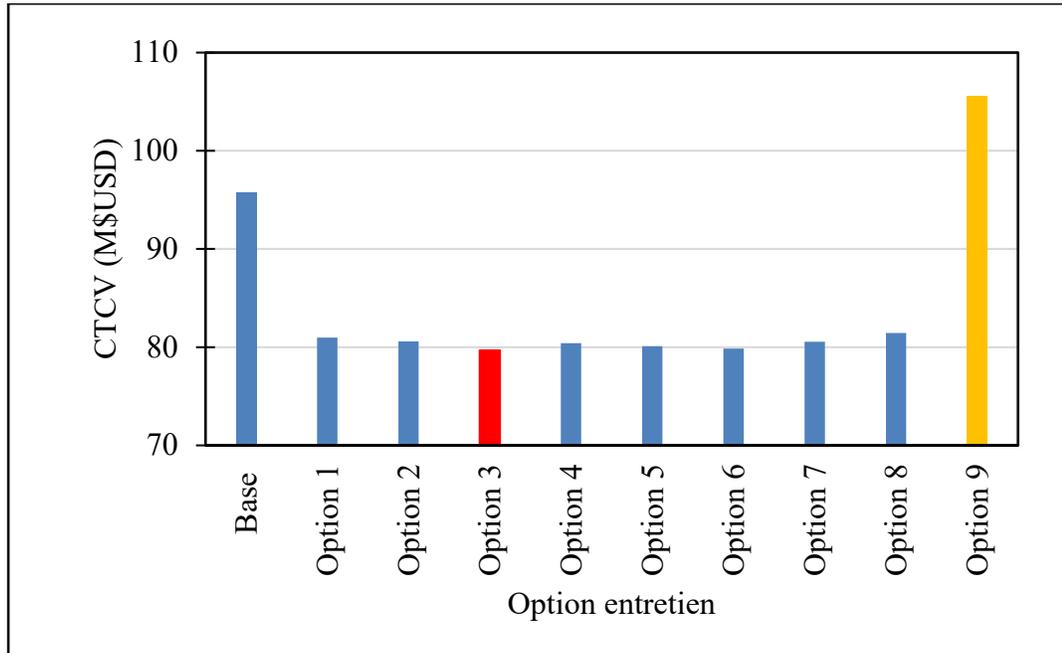


Figure 4.41 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH8

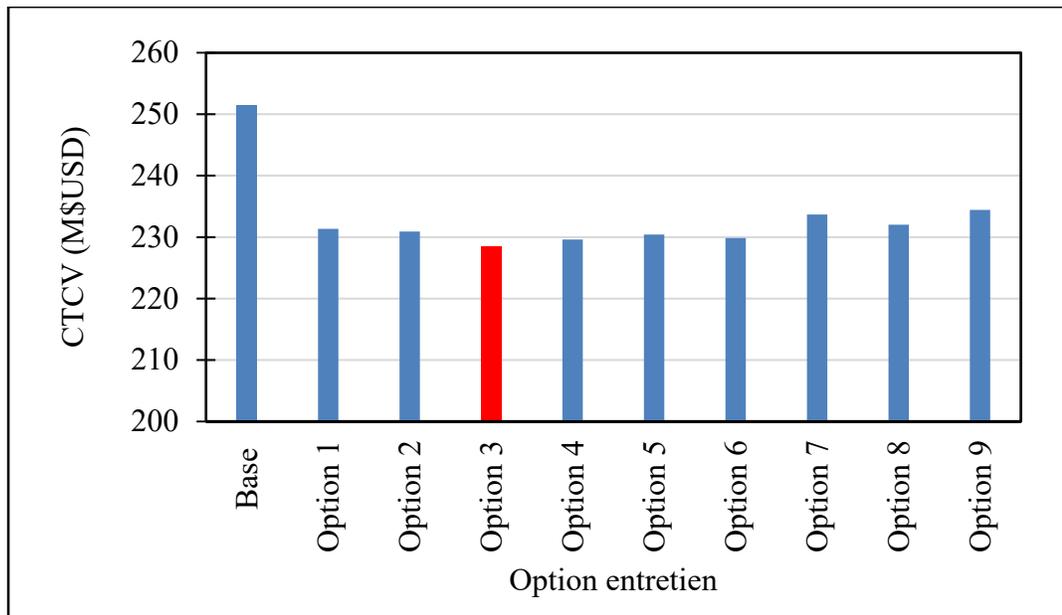


Figure 4.42 Coûts totaux de cycle de vie de la section SH9

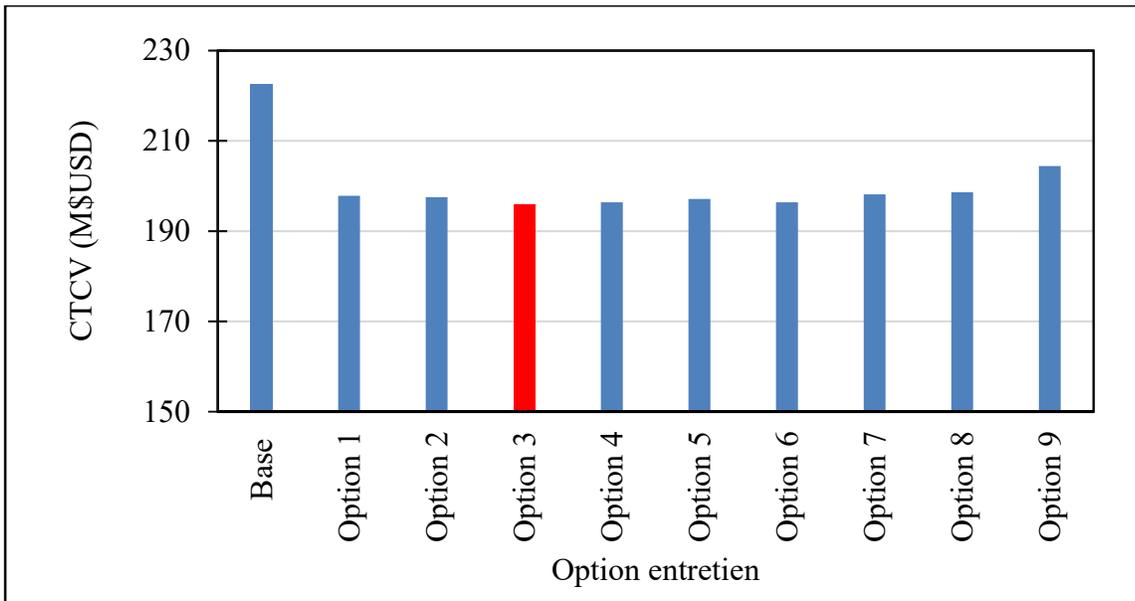


Figure 4.43 Coûts totaux du cycle de vie de la section SH10

4.4.4.1 Répartitions des coûts totaux du cycle de vie de transport

Les coûts totaux des transports pendant le cycle de vie sont la somme des coûts du cycle de vie d'administration (CCVA), des coûts du cycle de vie des usagers et des coûts du cycle de vie des externalités environnementales. Les coûts totaux du cycle de vie des meilleures options de toutes sections sont de 1,92 milliard de dollars USD dont les CCVU représentent 95,6 %, les CCVA représentent 2,44 % et les CCVEE 1,96 % (voir figure 4.44).

Les CCVU constituent la plus grande proportion des coûts totaux de transport et traduisent ainsi l'importance des coûts sociaux supportés par la société en ce qui concerne le transport des personnes et des biens. Les CCVEE sont les plus faibles. Cependant, en plus des hypothèses de calcul qui peuvent s'avérer des sources d'incertitudes des CCVEE, seule une petite partie des externalités environnementales ont été monétarisées. En effet, plus exhaustivement, les coûts des externalités environnementales sont des coûts liés aux mesures d'atténuation du bruit, de la vibration, de l'érosion des sols, de la détérioration de la qualité de l'eau, de la consommation d'une grande quantité d'eau, de l'inondation et de la modification hydrologique, de la déforestation et des impacts négatifs sur le paysage, le tourisme, la sécurité,

le changement de la culture locale et de la société causés par la réalisation des travaux de construction, d'entretien et de réhabilitation des routes (USAID, 2014). Par conséquent, ces coûts environnementaux ne doivent pas être interprétés de façon rigoureuse, mais permettent d'avoir un aperçu des coûts liés à la pollution de l'air par les émissions polluantes des véhicules. De plus, il est important de rappeler que les coûts unitaires de la pollution de l'air sont basés sur l'impact des émissions des véhicules sur la santé de la population. De ce fait, bien que les CCVEE soient faibles comparativement aux CCVA et aux CCVU, leurs impacts sont assez élevés, notamment pour les pays d'Afrique de l'Ouest où des mesures comme un système d'assurance maladie, qui contribue à réduire les frais médicaux des maladies causées par la respiration des émissions polluantes des véhicules par la population, sont quasi inexistantes.

Les CCVA sont la deuxième proportion des CTCV la plus élevée, mais s'avèrent très minimes par rapport au CCVU. Cela indique que l'administration de gestion routière du pays concerné doit déboursier 1,96 % des CTCV pour entretenir adéquatement ses tronçons routiers de « haute priorité » sur une durée de 20 ans.

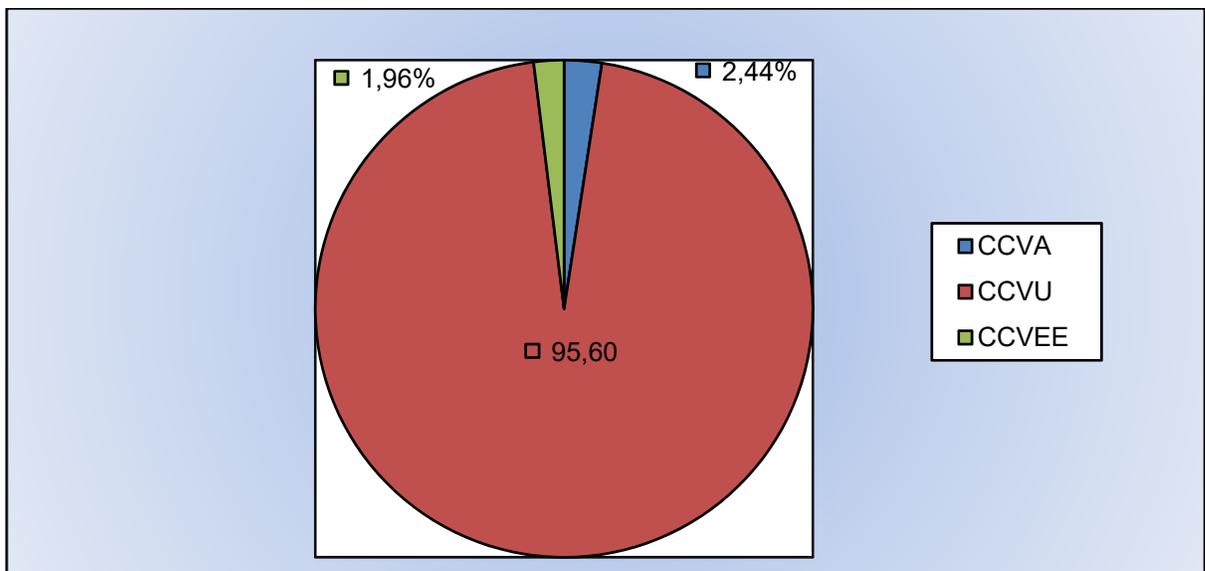


Figure 4.44 Répartition des coûts totaux de cycle de vie

4.4.5 Optimisation sous contraintes budgétaires

4.4.5.1 Options optimums et ordre de priorité d'entretien des sections

Les résultats de l'optimisation des travaux d'entretien peuvent être subdivisés en deux principales parties telles que présentées au tableau 4.8. Une première partie des résultats est issue de la maximisation de la valeur actuelle nette sur le coût d'investissement (VAN/inv) sans aucune contrainte budgétaire pour déterminer les options optimales, qui se trouvent être les options dont les VAN/Cinv sont les plus élevées pour chaque section, et de déduire le besoin budgétaire total des différentes interventions en ERR. Il peut être vu au tableau 4.8 que ces options sont les mêmes que les meilleures options déterminées en considérant les CTCV. La deuxième partie des résultats provient de la maximisation de VAN/Cinv, mais sous réserve que les fonds disponibles représentent successivement 75 %, 50 % et 25 % du budget total issu de la première partie.

Les tendances observées avec 75 % du budget total disponible pour l'entretien sont les suivantes : l'option optimale pour la section SH4 est l'entretien courant qui est composé des travaux tels que l'entretien annuel du système de drainage, la réparation des nids de poule (ndp) à partir de 20 ndp/km et le colmatage des fissures à partir d'une surface de fissures structurelles de 5 %. L'option optimale pour la section SH1 est le rechargement en BB de 30 mm à partir d'un IRI de 5 et chaque 5 ans. L'option optimum des sections SH2, SH7, SH8 est le rechargement en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 5 et tous les 7 ans. L'option optimum de la section SH3 est le rechargement en ESMSG à partir d'un IRI de 4 et tous les 3 ans. Les options optimums des sections SH5, SH6, SH9 et SH 10 sont le rechargement en BB de 30 mm à partir d'un IRI de 4 et tous les 5 ans.

Avec 50 % du budget, les tendances suivantes peuvent être énumérées : l'option optimum des sections SH4, SH5, SH9 est l'entretien courant ; l'option optimum de section SH1 est le rechargement en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 4 et tous les 7 ans ; le rechargement en BB de 30 mm à partir d'un IRI et tous les 5 ans est l'option optimum des sections SH2 et SH10 ; l'option optimum de la section SH3 est le rechargement en ESMSG à partir d'un IRI de 5 et

tous les 3 ans ; le rechargement en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 5 et tous les 7 ans est l'option optimum des sections SH6, SH7 et SH8.

Les tendances observées avec 25% du budget sont les suivantes : l'entretien annuel du système de drainage, la réparation des nids de poule (ndp) à partir de 20 ndp/km et le colmatage des fissures à partir d'une surface de fissures structurelles de 5 % constituent l'option optimum des sections SH1, SH4, SH5, SH7, SH9 et SH10. L'option optimum des sections SH2, SH6 et SH8 est le rechargement en BB de 50 mm à partir d'un IRI de 5 et tous les 7 ans. Le rechargement en ESMSG à partir d'un IRI de 5 et tous les 3 ans est l'option optimum de la section SH3. Toutes les tendances observées ci-dessus avec les différents scénarios budgétaires indiquent clairement qu'avec une restriction du budget, l'entretien préventif n'est réalisable que sur certaines sections tandis que les autres options se limiteront à l'entretien courant. Plus le budget est réduit, plus les fonds disponibles pour réaliser les travaux d'entretien préventif (resurfaçage mince et rechargement en enduit superficiel) sur certaines sections sont insuffisants et plus de sections recevront uniquement des travaux d'entretien. Cela influencera les coûts totaux des travaux de « fonctionnement » et des travaux « d'investissement » ainsi que l'état moyen de toutes les sections sur le cycle de vie. L'analyse d'une telle influence des restrictions budgétaires est présentée à la section 4.4.5.2.

Dans certains cas, des restrictions budgétaires peuvent amener certaines organisations routières à reporter certains travaux à l'année suivante. Il convient donc de faire une analyse comparative de la réalisation des travaux « d'investissement » durant la période budgétaire et le report de ces travaux à la première année suivant cette période budgétaire. Une telle comparaison s'effectue à l'aide d'un programme annuel ou pluriannuel des travaux en ciblant des périodes budgétaires d'un ou de deux ans (Morosiuk, Riley et Toole, 2006). Il est évident qu'un report à l'année prochaine, par exemple d'un resurfaçage mince sur section qui devrait être réalisé cette année, pourrait se transformer en réhabilitation de la section en raison de son nouvel état plus détérioré qui nécessitera des travaux d'entretien plus importants. La présente étude se limitera à l'analyse de programme de cycle de vie sans tenir compte de l'impact du report des travaux d'entretien.

Tableau 4.8 Options optimums en fonction des contraintes budgétaires

Sections homogènes	CTCV	Optimisation (VAN/Cinv)			
		100% budget	75 % budget	50 % budget	25 % budget
SH1	Option 4	Option 4	Option 5	Option 4	EC
SH2	Option 3	Option 3	Option 6	Option 3	Option 6
SH3	Option 3	Option 3	Option 3	Option 5	Option 5
SH4	Option 3	Option 3	EC	EC	EC
SH5	Option 3	Option 3	Option 3	EC	EC
SH6	Option 3	Option 3	Option 3	Option 6	Option 6
SH7	Option 6	Option 6	Option 6	Option 6	EC
SH8	Option 3	Option 3	Option 6	Option 6	Option 6
SH9	Option 3	Option 3	Option 3	EC	EC
SH10	Option 3	Option 3	Option 3	Option 3	EC

Les options optimums de chaque section, qui ont été déterminées en considérant que 100 % du budget de l'entretien est disponible, peuvent être utilisées pour classer les sections par ordre de priorité en fonction de leurs rapports de VAN/Cinv. Le classement par ordre décroissant des VAN/Cinves permet classer les projets (sections) du plus prioritaire au moins prioritaire. Comme présenté à la figure 4.45, la section SH1 est celle dont la VAN/Cinv est la plus élevée, et constitue donc à cet effet la section la plus prioritaire suivie respectivement des sections SH4, SH3, SH2, SH6, SH10, SH8, SH9, SH7 et SH5. La section SH1 est certainement la plus prioritaire en raison de son volume de trafic qui est plus élevé comparativement à celui des autres sections. Il est important de mentionner que les paramètres du trafic tels que le TJMA et l'ÉCAS sont des paramètres d'entrée très pertinents pour l'analyse économique dont les résultats permettent de déterminer l'indicateur économique VAN/Cinv (TRL, 2005). Par conséquent, un trafic élevé mènera probablement à des valeurs élevées du rapport VAN/Cinv. Cependant, cette tendance ne peut pas être dégagée pour les autres sections parce leurs TJMA ne sont pas aussi élevés que celui de la section SH1. De plus, d'autres sections ont les mêmes trafics, d'autant plus qu'elles appartiennent aux mêmes tronçons de route (par exemple SH3 et SH4, SH5 à SH7). L'ordre de priorité des sections en fonction des VAN/Cinv ne peut pas être justifié uniquement par les paramètres du trafic, mais plutôt par l'action combinée du trafic des

sections, des états des sections, des normes d'entretien appliquées aux sections et des conditions climatiques qui prévalent dans la zone d'étude des projets. Néanmoins, ce classement par ordre de priorité des sections en fonction des VAN/Cinv est très pertinent parce qu'il demeure le seul indicateur économique fiable et robuste pour classer les projets par ordre de priorité (Adiguna, Dewanti et Odoki, 2017b).

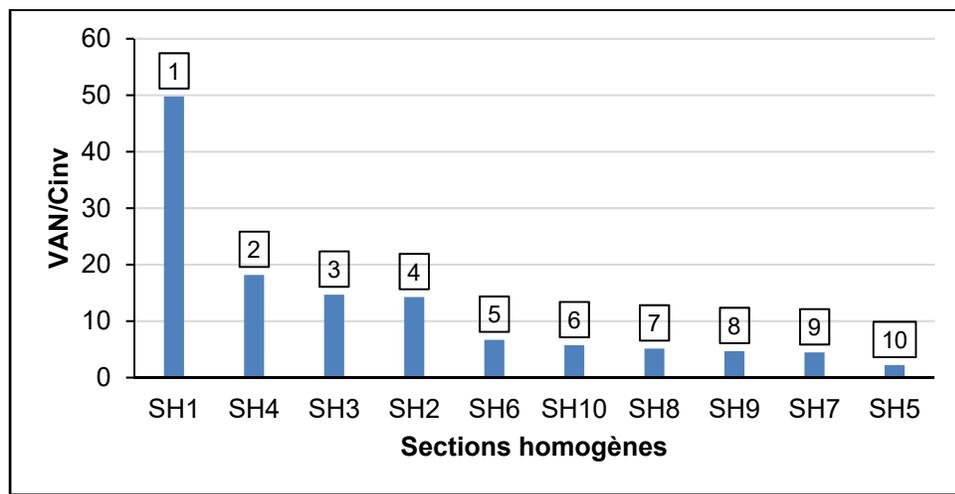


Figure 4.45 Ordre de priorité des sections en fonction des VAN/Cinv

4.4.5.2 Analyse budgétaire en fonction de l'IRI et des coûts de travaux

Les contraintes budgétaires influencent les états des sections et les coûts des travaux d'entretien courant et périodique pendant le cycle de vie. La figure 4.46 présente l'influence des différents scénarios budgétaires sur l'état moyen et les coûts totaux des travaux d'entretien. Les états moyens des sections pendant la période d'analyse sont égaux à 3,33 m/km, 3,48 m/km, 4,06 m/km et 4,72 m/km en considérant respectivement des scénarios budgétaires de 100 %, 75 %, 50%, 25% du budget total. Les coûts totaux du cycle de vie des travaux d' « investissement » (entretien périodique) de toutes les sections sous les contraintes budgétaires de 100 %, 75 %, 50% et 25 % du budget total sont respectivement égaux à 75,32 M\$USD, 67,00 M\$USD, 44,78 M\$USD et 21,79 M\$USD. Les coûts totaux du cycle vie des travaux de « fonctionnement »

sont égaux à 2,59 M\$USD, 3,71 M\$USD, 5,17 M\$USD et 6,52 M\$USD en considérant respectivement les fonds disponibles de 100 %, 75 %, 50% et 25 % du budget total. Il est important les coûts de cycle de vie des travaux d'entretien sont des coûts financiers. L'analyse de ces résultats met en évidence trois tendances majeures. Les fonds disponibles constitués de 75 % du budget total permettent de maintenir l'état moyen des sections (IRI =3,48 m/km) à un état moyen approximatif à l'état moyen (IRI =3,33 m/km) généré avec tous les fonds d'entretien disponibles (100 % budget total), tandis qu'une disponibilité des fonds d'entretien de 50 % et 25% du budget total générera une détérioration plus importante et entrainera des états moyens respectifs de 4,06 m/km et 4,78 m/km. Par conséquent, le scénario avec 75 % du budget total est le plus recommandé à l'administration routière de la zone d'étude pour maintenir à un niveau de service acceptable les dix sections homogènes pendant une période de 20 ans.

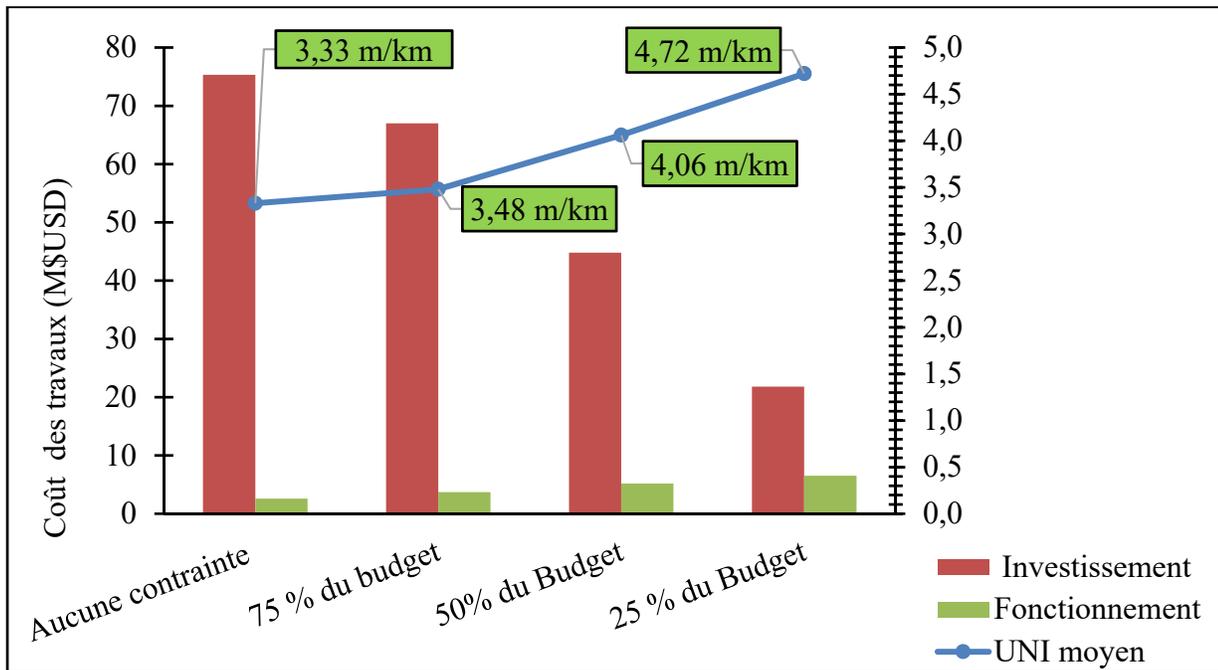


Figure 4.46 Variation de l'état et des coûts de travaux en fonction du budget

4.4.5.3 Programme quinquennal de travaux

Le budget alloué à l'entretien des routes étant très souvent limité, il est donc fondamental pour les administrations routières d'établir une programmation des travaux d'entretien à moyen terme pour fixer les priorités afin d'assurer une meilleure utilisation de ce budget insuffisant (Kerali, Odoki et Stannard, 2000). Il est généralement recommandé d'établir les besoins budgétaires en entretien routier pour une période de 5 à 10 ans (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a; Kumar, 2014c; Morosiuk, Riley et Toole, 2006). Le tableau 4.9 présente le programme quinquennal des travaux d'entretien en considérant que l'administration routière dispose de tous les fonds pour entretenir convenablement ses sections routières sur une période de 5 ans. Les travaux de l'entretien périodique sont classés annuellement par ordre de priorité du rapport VAN/Cinves. Il est important de mentionner que, bien qu'il existe d'autres indicateurs économiques, le rapport VAN/Cinves est l'indicateur économique le plus approprié pour classer des options ou des projets en raison de sa robustesse et sa fiabilité comparativement aux indicateurs tels que le taux de rendement (TRI) et la VAN (Morosiuk, Riley et Toole, 2006). Les résultats du tableau 10 indiquent qu'un budget de 41,157 millions de \$ USD est nécessaire pour la réalisation des travaux d'entretien préventif des 10 sections de routes sur une période de 5 ans. Il peut aussi être observé au tableau 4.9 qu'aucune activité d'entretien périodique n'est prévue pour les années 2018 et 2020. Cela signifie que l'évolution de la détérioration des sections n'a pas atteint les seuils d'intervention nécessitant le déclenchement de l'entretien périodique à l'année 2018 et 2020. De même, la réalisation des travaux d'entretien périodique n'est pas optimale à l'année 2018 et 2020. Dans un tel cas, les travaux d'entretien courant doivent être systématiquement réalisés sur toutes les sections aux années 2018 et 2020. Bien que les coûts de fonctionnement (entretien courant) ne soient pas présentés au tableau 4.9, ils sont inclus dans le besoin budgétaire total de l'entretien des 5 prochaines années.

Tableau 4.9 Plan quinquennal d'entretien des sections

Année	Section	Longueur (km)	TJMA (véh/km)	Travaux	VAN/Cinv	Coût financier	Coût cumulé (M\$USD)
2016	SH1	9,8	7930	Resurfçage mince BB 50 mm@4 m/km	48,956	2,872	2,872
	SH3	20,2	1878	Rechargement ESMSG@4 m/km	15,451	2,121	4,993
	SH2	22,6	3073	Resurfçage mince 30 mm BB@4 m/km	13,766	3,739	8,732
	SH8	13,8	2030	Resurfçage mince 30 mm BB@4 m/km	5,021	2,466	11,198
2017	SH6	32,1	1680	Resurfçage mince 30 mm BB@4 m/km	6,555	5,715	16,913
	SH10	23,9	2111	Resurfçage mince 30 mm BB@4 m/km	5,605	4,260	21,172
	SH9	28,5	2111	Resurfçage mince 30 mm BB@4 m/km	4,599	5,077	26,249
	SH5	25,9	1680	Resurfçage mince 30 mm BB@4 m/km	2,111	4,618	30,867
2018	Entretien courant toutes les sections						
2019	SH7	35,0	1809	Resurfçage 50 mm BB@5 m/km	4,457	10,290	41,157
2020	Entretien courant toutes les sections						

Resurfçage mince BB 50 mm@4 : resurfçage mince à partir d'un IRI de 4 m/km

4.4.6 Systèmes des résultats et recommandations

Un des principaux rôles du gestionnaire des routes ou de l'ingénieur routier est de fournir aux décideurs plusieurs alternatives leur permettant de faire un choix judicieux en fonction des objectifs, mais pas de décider à leur place. Les objectifs peuvent être liés à la mobilité, à la réduction de la pauvreté, à la sécurité routière ou à préservation de l'environnement (Talvitie,

2000). Les résultats présentés au tableau 4.10 donnent aux décideurs des pays en développement et aux bailleurs de fonds une multitude de choix d'options en fonction de l'orientation de leurs politiques en matière d'entretien des routes. Ainsi, les recommandations suivantes peuvent être faites : si la politique routière est la réduction des émissions polluantes des véhicules, il est recommandé de choisir les options dont les CCVEE sont les plus faibles. Si l'objectif est de minimiser la consommation d'énergie, dans ce cas les options avec des valeurs minimums de EGLOB sont recommandées. Si l'objectif est de minimiser les coûts totaux de transport composés des CCVE, CCVA et CCVE, les options avec les CTCV minimums sont recommandées. Dans le cas où le budget est insuffisant pour entretenir adéquatement toutes les sections, il est recommandé de sélectionner les options optimums en maximisant la fonction-objectif (VAN/Cinv) sous contraintes budgétaires. Dans le cas de la présente étude, les options optimums avec 75 % du budget total disponible sont recommandées.

Tableau 4.10 Synthèse des meilleures options

Sections homogènes	CCVEE	CTCV	EGLOB	Optimisation (VAN/Cinv)			
				100% budget	75 % budget	50 % budget	25 % budget
SH1	Option 1	Option 4	Option 4	Option 4	Option 5	Option 4	EC
SH2	Option 4	Option 3	Option 2	Option 3	Option 6	Option 3	Option 6
SH3	Option 5	Option 3	Option 4	Option 3	Option 3	Option 5	Option 5
SH4	Option 5	Option 3	Option 2	Option 3	EC	EC	EC
SH5	Option 2	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	EC	EC
SH6	Option 1	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	Option 6	Option 6
SH7	Option 2	Option 6	Option 2	Option 6	Option 6	Option 6	EC
SH8	Option 2	Option 3	Option 2	Option 3	Option 6	Option 6	Option 6
SH9	Option 1	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	EC	EC
SH10	Option 2	Option 3	Option 1	Option 3	Option 3	Option 3	EC

4.5 Conclusion

L'évaluation économique et l'analyse de la programmation sur le cycle de vie des interventions en entretien, réhabilitation et reconstruction (ERR) pour les chaussées flexibles existantes démontrent que la sélection des meilleures interventions d'ERR devrait être basée sur la réduction des impacts environnementaux, de la consommation d'énergie, des coûts des émissions polluantes des véhicules, des coûts totaux de transport et des restrictions budgétaires. Les résultats issus de l'application de l'approche développée dans ce présent article sur des routes candidates à l'entretien indiquent clairement que les meilleures interventions en matière d'entretien en considérant la consommation du carburant, les coûts des émissions polluantes, les coûts totaux de transport et les restrictions budgétaires sur le cycle de vie sont principalement des travaux d'entretien périodique (préventif). Le besoin budgétaire pour réaliser adéquatement les travaux d'entretien sur toutes les sections conformément au plan quinquennal d'entretien est de 41,157 M\$US.

Les travaux de recherche présentés dans cet article offrent aux administrations responsables de la gestion des routes dans les pays de l'Afrique de l'Ouest et aux bailleurs de fonds, la possibilité d'intégrer les coûts environnementaux dans leurs processus de prise de décision pour une meilleure gestion et préservation du patrimoine routier existant. Les incertitudes dans la monétisation des impacts environnementaux proviennent principalement de l'insuffisance de l'état de l'art.

Cette méthode intégrée devrait permettre aux gestionnaires et aux décideurs de faire un choix judicieux des meilleures interventions d'entretien des sections prioritaires du réseau routier en fonction de leurs objectifs tels que les économies sur les coûts totaux de cycle de vie et des coûts de cycle des émissions polluantes, la réduction de l'énergie de cycle de vie consommée par les véhicules motorisés et l'amélioration de l'IRI. De plus, en cas de restriction budgétaire, qui est toujours le cas dans la majorité des pays en développement, cette approche permet de déterminer la réduction possible du budget d'entretien sans compromettre le niveau de service des routes. L'implémentation de cette méthode permettrait aussi de déterminer les niveaux de

service minimum économiquement justifiés selon classe fonctionnelle et le volume de trafic afin d'établir des interventions en matière d'entretien réalisables sur les routes de l'Afrique de l'Ouest. Il en ressort qu'un programme de préservation n'est rentable que si l'entretien préventif est appliqué au bon moment.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

Malgré les efforts consentis ces dernières années par les bailleurs de fonds et les administrations routières pour le financement des projets de construction et d'entretien des routes dans les pays de l'Afrique subsaharienne (ASS), force est de constater que ces investissements routiers, outre le fait d'être insuffisants et inéquitables, ne sont pas gérés de manière intégrée et durable. Cette problématique engendre une faible densité des routes revêtues et une détérioration accrue des routes existantes. La faible densité des routes revêtues freine le développement socio-économique des régions surtout rurales, favorisant du même coup l'isolement des communautés locales et l'inaccessibilité des services sociaux de base. Le mauvais état des routes affecte la société de manière générale par l'augmentation des coûts des usagers (coûts d'exploitation des véhicules, coûts du temps de trajet et coûts des accidents), des émissions polluantes et la consommation d'énergie. Le déficit de financement de la construction et de l'entretien des routes ne peut être comblé que par un processus de longue haleine nécessitant l'implication du secteur privé et des revenus réguliers et stables qui doivent provenir de l'usage des routes. Il est avéré que l'utilisation des méthodes et outils de priorisation adéquats pour intégrer les indicateurs et paramètres techniques, économiques, environnementaux et sociaux dans le processus de prise de décision en gestion des chaussées permet de sélectionner équitablement les projets routiers (construction et entretien) en fonction des contraintes de ressources afin de choisir les meilleures options d'interventions (entretien, réhabilitation et reconstruction) de ces projets sélectionnés. Toutefois, les pratiques récentes en matière de gestion des chaussées dans les pays de l'ASS ne considèrent que très rarement la priorisation conjointe de ces deux principaux types d'investissements routiers (construction et entretien) en intégrant ces indicateurs et paramètres dans une perspective de développement durable dans les analyses de données routières.

Bien qu'il existe une multitude d'outils et de méthodes pour la priorisation conjointe des projets routiers et la prise en compte des indicateurs et paramètres techniques, économiques, sociaux et environnementaux, les décideurs et gestionnaires des routes dans les pays en

développement, et plus particulièrement ceux de l'Afrique subsaharienne, sont réticents à les utiliser dans leurs processus de prise de décisions. Cependant, plusieurs raisons justifient cette réticence. Premièrement, on constate qu'il manque un cadre théorique et conceptuel clair pour la définition des indicateurs de performance, économiques, environnementaux et sociaux communs aux projets de construction et d'entretien ainsi que pour les choix des méthodes de pondération et d'agrégation convenables à ces indicateurs. Par conséquent, il n'est pas possible de développer un modèle intégré de priorisation adéquat pour les projets routiers. Deuxièmement, la complexité de la quantification et de la monétisation des aspects environnementaux et sociaux empêche leur incorporation dans l'analyse économique conventionnelle tant au niveau réseau qu'au niveau projet. L'absence d'une base de données routière fiable et la collecte dispendieuse des données détaillées sur le terrain empêchent d'effectuer des analyses approfondies et de développer des approches appropriées pour le développement et la préservation des réseaux routiers en ASS.

Dans ce contexte, cette thèse vise à développer une approche pour le développement (projets de bitumage) et la préservation (projets d'entretien périodique) d'un sous-réseau routier en ASS. Cette approche fournit aux administrations routières et aux bailleurs de fonds un indice composite de priorisation et deux méthodes rationnelles intégrées, sur lesquels ils peuvent s'appuyer pour sélectionner les projets routiers prioritaires au niveau projet et faire des choix judicieux des options d'interventions routières au niveau projet. La démarche suivie pour développer cette approche est divisée en quatre phases.

La première phase consistait à effectuer un travail bibliographique et analyser des publications passées et récentes relatives au sujet de recherche. Cet état d'art a été réalisé continuellement durant toute la période de thèse et a permis d'établir le cadre conceptuel, les indicateurs et les méthodes de priorisation adaptées au projet de recherche.

La deuxième phase avait pour but d'élaborer un processus de priorisation et de sélection des projets routiers au niveau réseau. Ce processus s'est appuyé sur la méthodologie de construction des indices composites de l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) pour développer un indice de priorité de financement des routes (IPFR). Ainsi, l'IPFR a été obtenu en pondérant d'abord les principaux indicateurs (techniques,

économiques, sociaux et environnementaux) à l'aide d'une analyse statistique multivariée, et par la suite en les agréant linéairement. L'IPFR a permis de classer les projets routiers par ordre de priorité et de sélectionner les projets prioritaires de construction et de préservation des routes. Cet outil s'est avéré fiable et robuste puisque toutes les hypothèses concernant la méthode statistique multivariée, qui n'est autre que l'analyse en composantes principales, ont été validées.

La troisième phase était le développement de la première méthode intégrée pour le choix des meilleures options de bitumage des projets de construction (reclassement). Cette méthode intégrée a mené à l'élaboration d'une procédure rationnelle comprenant le dimensionnement mécaniste-empirique, l'analyse économique et les impacts sociaux et environnementaux. Les critères environnementaux et sociaux tels les émissions polluantes et l'accessibilité aux services sociaux de base ont pris en compte simultanément avec les critères économiques et sécuritaires à l'aide de l'analyse multicritère (AMC) du modèle HDM-4. L'AMC de ce modèle se base sur la méthode AHP (Analytic, Hierarchy Process) pour combiner les poids relatifs des différents critères avec leurs indices de performance afin de déterminer les vecteurs de classement des options d'interventions préétablies. Ainsi, la meilleure option de bitumage est celle avec un vecteur de priorité élevé par rapport aux autres options d'interventions. La série d'options d'intervention est composée des interventions d'entretien des chaussées non revêtues, de bitumage des chaussées en enrobé dense et de bitumage des chaussées en enduit superficiel. Il a été démontré dans cette phase que l'intégration des aspects sociaux et environnementaux peut influencer le choix du type de revêtement.

La dernière phase visait à établir une autre méthode intégrée offrant plusieurs possibilités aux gestionnaires pour le choix des meilleures options d'interventions préventives des routes bitumées prioritaires. Cependant, les niveaux de service de ces routes ont été déterminés au préalable afin d'assurer que les interventions préventives soient applicables. Il a été démontré que des opérations d'entretien périodique appliquées aux sections des routes, qui sont toujours relativement en bon état, selon des critères d'état et de durée adéquats, étaient les meilleures options préventives. Ainsi, selon les politiques ou objectifs d'entretien des administrations routières, les meilleures options d'entretien périodique ont engendré des réductions

considérables sur la consommation d'énergie, des coûts des émissions polluantes et des économies des coûts totaux de transport. Les quantités des émissions polluantes et d'énergie consommée par les véhicules sont calculées par le sous-modèle « *Social and Environment Effects* » d'HDM-4. Les coûts des émissions polluantes sont le produit des quantités des polluants et de leurs coûts unitaires correspondants. Les coûts unitaires des polluants sont déterminés en se basant sur les coûts de pollution de l'air du Canada, de l'Europe et des États-Unis d'Amérique. Toutefois, ces coûts unitaires sont corrélés avec le PIB de la zone d'étude pour mieux refléter la parité des pouvoirs d'achat et du bien-être économique des pays.

De plus, cette phase a permis de choisir les options optimums d'entretien périodique en cas de restrictions budgétaires ainsi que d'élaborer un programme quinquennal d'entretien.

Le présent projet de recherche contribue à l'avancée des connaissances scientifiques en matière de gestion des routes, plus particulièrement des approches de priorisation des projets routiers par la mise en place d'un nouvel indice de priorité de financement des routes au niveau réseau et l'établissement de deux nouvelles méthodes rationnelles intégrées au niveau projet. Il n'existe aucun outil et aucune méthode intégrée de ce type pour la priorisation et le choix de meilleures options d'intervention des routes dans le contexte ouest-africain. Pour une première fois, un IPFR permet de classer conjointement des projets de construction et préservation d'un sous-réseau routier afin de sélectionner les plus prioritaires en fonction d'une exigence fixée au préalable par le bailleur de fonds (environ 330 km de routes admissibles au programme de financement). Par ailleurs, ce nouvel indice s'est basé sur une méthode statistique multivariée pour l'agrégation des indicateurs de développement durable et des indicateurs techniques associés à ces projets routiers. L'application des méthodes rationnelles intégrées aux projets routiers prioritaires sélectionnés assure de procéder à des choix judicieux pour ce qui est de meilleures options de bitumage et d'interventions préventives au niveau projet en prenant en considération les états fonctionnels et structurels des tronçons de routes candidates constituant ces projets routiers ainsi que les aspects environnementaux et sociaux. De plus, cet outil et ces méthodes sont novateurs, car ils permettent aux décideurs et gestionnaires d'économiser en temps et argent, des facteurs non négligeables dans un contexte de fonds très limités comme celui des pays de l'ASS. De manière générale, cette thèse démontre qu'il est possible d'intégrer

tant au niveau réseau qu'au niveau projet les aspects sociaux et environnementaux autant de manière qualitative que quantitative (émissions polluantes exprimées en termes de quantités et monétaires) dans la priorisation des projets routiers afin de promouvoir les objectifs du développement durable à l'horizon 2030.

Bien que les contributions du présent projet de recherche mentionnées ci-dessus soient majeures, certains résultats pertinents des chapitres 2, 3 et 4 méritent d'être soulignés.

En se référant aux résultats du chapitre 2 (article 1) :

- Les valeurs de corrélation entre les indicateurs et les composantes principales après la rotation varimax permettent d'attribuer approximativement les dimensions aux composantes principales retenues. Ainsi, la composante principale 1 peut être considérée comme étant la dimension économique, tandis que la composante 2 est environnementale, la composante 4 technique, et les composantes 3 et 5 sociales.
- Les projets routiers prioritaires sélectionnés en se basant sur leurs IPFR et l'exigence du bailleur de fonds) sont au nombre de 10 projets, dont 4 projets de construction (bitumage) et 6 projets de préservation totalisant 323 km. Les coûts d'administration estimés, qui sont basés sur les coûts unitaires issus de la base de données de la Banque mondiale, sont respectivement de 47,2 millions USD pour les projets de bitumage et de 10,5 millions pour les projets de préservation.

En se référant aux résultats du chapitre 3 (article 2) :

- Les épaisseurs des couches existantes de fondation et de forme des tronçons non revêtues (projets de construction prioritaires) ne doivent pas être remplacées puisque le dimensionnement de ces tronçons, basés sur les principales caractéristiques telles que celles du trafic et du sol, a permis de trouver des épaisseurs inférieures aux épaisseurs initiales (couches de fondation et forme existantes). De plus, les exigences de caractéristiques géotechniques recommandées par le Guide de dimensionnement des

chaussées dans les pays tropicaux ont été satisfaites pour les matériaux composant ces couches existantes. Par conséquent, ces deux couches ne doivent pas être modifiées ni changées. En outre, le guide a permis de mesurer les dimensions de la couche de base, qui sont de 150 mm et la couche de surface. La couche de surface est constituée soit d'un revêtement en enduit superficiel bicouche ou en enrobé dense. Les épaisseurs du revêtement en enduit superficiel bicouche dimensionnée sont de 25 mm et celles du revêtement en enrobé dense varient de 90 à 120 mm. Le choix de ces épaisseurs a été validé avant de continuer les analyses subséquentes puisque les sollicitations internes satisfont la condition de fissuration à la base des couches de surface et celle d'orniérage à surface de la plateforme.

- En se basant uniquement sur l'aspect économique, les valeurs actuelles nettes et les taux de rendement internes des meilleures options sont respectivement supérieures à 0 et 12 %. Par conséquent, ces options composées de travaux de bitumage en ESB en 2018 satisfont les conditions de financement des projets routiers exigées par la Banque mondiale. Ces conditions demeurent toujours satisfaites après des variations de +/- 20 % des paramètres pertinents comme le trafic normal, les coûts d'investissement et la croissance du trafic. Cela constitue une preuve de la robustesse de l'analyse économique.
- L'intégration des aspects sociaux et environnementaux dans l'analyse économique conventionnelle par l'analyse multicritère conduit à un changement de la meilleure option de bitumage. Ainsi, la meilleure option de bitumage des tronçons prioritaires non revêtus techniquement solide, économiquement viable avec des externalités environnementales négatives faibles et des avantages sociaux élevés est l'option de bitumage en ED de 2016. Les coûts d'administration de cette meilleure option de bitumage appliquée à tous les projets de construction prioritaires sont de 42,5 millions USD tandis que ceux estimés au chapitre 2 sont de 47,2 millions USD, ce qui prouve la fiabilité de l'IPFR. En effet, cet outil permet d'estimer les coûts d'administration des meilleures options de bitumage des routes sans réaliser des investigations approfondies sur le terrain (niveau réseau) avec une marge d'erreur de 10 %.

- Sur le plan environnemental, le bitumage des routes prioritaires sélectionnées en ED au début de l'année 2016 permettra de réduire les quantités des émissions polluantes de 21,06%, 33,05%, 33,47 % et 31,52% respectivement sur les tronçons A5, A10, A11 et A16.

En se référant aux résultats du chapitre 4 :

- Les meilleures interventions en entretien périodique en considérant les quantités de consommation d'énergie sur le cycle de vie sont le resurfaçage mince de 50 mm à un IRI de 4 à tous les 7 ans, le resurfaçage mince de 50 mm à un IRI de 3 à tous les 7 ans, le rechargement en ESB à un IRI de 4 à tous les 5 ans, le rechargement en ESB à un IRI de 3 à tous les 5 ans et le resurfaçage mince de 30 mm à un IRI de 3 à tous les 5 ans. Ces interventions entraîneront en moyenne une réduction de 23 % de la consommation d'énergie du trafic motorisé comparativement aux interventions d'entretien minimum.
- Les meilleures interventions en entretien périodique en considérant les coûts des émissions polluantes sur le cycle de vie sont le resurfaçage mince de 30 mm à un IRI de 3 à tous les 5 ans, le resurfaçage mince de 50 mm à un IRI de 4 à tous les 7 ans, le rechargement en ESMSG à un IRI de 5 à tous les 3 ans et le resurfaçage mince de 50 mm à un IRI de 3 à tous les 7 ans. L'économie des coûts des émissions polluantes des meilleures interventions d'entretien périodique est environ de 23 % comparativement aux travaux d'entretien minimum.
- Les meilleures interventions en entretien périodique en considérant les coûts totaux de transport sur le cycle de vie sont le resurfaçage mince de 50 mm à un IRI de 4 à tous les 7 ans, le resurfaçage mince de 50 mm à un IRI de 4 à tous les 5 ans, le rechargement en ESMSG à un IRI de 4 à tous les 3 ans et le resurfaçage mince de 50 mm à un IRI de 3 à tous les 7 ans. L'économie des coûts totaux de transport des meilleures interventions en entretien périodique est d'environ 30 %. Les coûts totaux de transport sur une période de 20 ans prenant en compte toutes les meilleures interventions en entretien périodique sont de 1,92 milliard USD, dont 2,44 % représentent les coûts de cycle de vie d'administration, 1,96% les coûts de cycle de vie des externalités environnementales et 95,6 % les coûts de cycle de vie d'exploitation des véhicules.

- Lorsqu'il n'y a aucune restriction budgétaire, le maintien des sections de routes prioritaires à un IRI moyen de 3,33 m/km après travaux sur le cycle de vie nécessite la réalisation des meilleurs travaux d'entretien périodique pour un montant de 75,32 millions USD, tandis qu'avec 75% du budget disponible, l'IRI moyen augmente légèrement en étant égal à 3,48 m/km après travaux. Toutefois, il n'est pas recommandé de restreindre le budget à 50% et 25 % parce que les états moyens des routes sur le cycle de vie seront respectivement égaux à 4,06 m/km et 4,72 m/km après travaux. La condition d'une chaussée dont l'IRI est supérieur à 4 après travaux signifie généralement une transition vers un mauvais état fonctionnel. En supposant qu'il n'y a aucune restriction budgétaire, un programme quinquennal d'entretien des sections prioritaires demande un budget de 41,157 millions USD. En se basant sur ce budget, le coût unitaire de prévention est de 34 193,5 \$/km/ an. L'écart de ce coût unitaire est faible comparativement à celui estimé dans le chapitre 2 qui est de 43 460 \$/km/an. Une fois de plus, ceci valide l'IPFR, qui permet de déterminer approximativement le budget de la prévention des sections prioritaires avec une différence d'environ 21%.
- Pour toutes les sections homogènes, dont des niveaux de service compris entre « bon » et « moyen », aucune option de réhabilitation ou de reconstruction ne correspond à de meilleures options ou options optimums d'intervention en entretien.

LIMITES, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Ce projet de recherche comporte aussi des limites et objections qui peuvent faire l'objet de recherches futures.

Le développement de l'indice de priorité de financement des routes (IPFR) ne prend pas en considération la dimension temporelle pour prioriser les projets routiers au niveau réseau. Cette limite est due au manque de données routières fiables, récentes et passées du sous-réseau routier de la zone d'étude. Plus spécifiquement, l'administration routière de la zone d'étude ne disposait pas de données actualisées sur les états structurels et fonctionnels et de données sur les impacts environnementaux et sociaux collectées à des intervalles temporels fixes et réguliers. La construction d'un IFPR variant en fonction du temps permettrait d'effectuer un choix judicieux des projets au niveau réseau à toute date prévue de réalisation des projets routiers et de faire le suivi des projets pour s'assurer que les objectifs préétablis sont atteints.

Les étapes de construction de l'IPFR comportent chacune plusieurs méthodes. Ainsi, l'approche déductive, l'approche hiérarchique et l'approche inductive peuvent être utilisées pour construire l'IPFR. L'approche déductive consiste à normaliser au plus dix (10) variables (indicateurs) et à les agréger par la suite pour en déduire l'IPFR ; l'approche hiérarchique, pour sa part, consiste à développer des sous-indices composites thématiques (par exemple l'indice technique, l'indice économique, l'indice social et l'indice environnemental) à partir d'un nombre très élevé d'indicateurs (variables), qui seront par la suite agrégés pour former l'IPFR; finalement, l'approche inductive a recours à l'analyse en composantes principales (ACP) pour réduire au moins 15 indicateurs en un plus petit nombre d'indicateurs sous-jacents, qui seront agrégés pour former l'IPFR. Les poids des indicateurs peuvent être déterminés par le biais de l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse hiérarchique des procédés (AHP), l'analyse d'enveloppe des données (AED), l'approche « bénéfice de doute », les opinions publiques, etc. Les méthodes d'agrégation linéaire et géométrique peuvent être utilisées pour agréger les indicateurs. Le choix de chaque méthode des étapes de construction de l'IPFR introduit des incertitudes dans l'analyse. Une analyse d'incertitude et de sensibilité basée sur le choix des facteurs d'incertitude et la simulation Monte-Carlo serait utile pour la vérification

de la robustesse de l'IPFR. Cette vérification pourrait se référer à des mesures statistiques comme le coefficient de variation, l'intervalle de confiance et la médiane. Cette thèse n'a pas inclus l'analyse d'incertitude et de sensibilité en raison de l'indisponibilité des experts contactés. En effet, l'application de certaines méthodes de pondération nécessite des opinions d'experts multidisciplinaires.

Les principes de la méthode Delphi ont été utilisés dans cette thèse pour recueillir les opinions des critères environnementaux et sociaux qui ne peuvent être exprimés en termes monétaires. Toutefois, la procédure complète de la méthode Delphi n'a pas été suivie dans le présent projet de recherche. La principale raison est que plusieurs experts que nous avons contactés pour répondre aux questionnaires préétablis n'étaient pas disponibles ou n'ont pas répondu à notre requête. Par conséquent, les opinions des experts utilisés dans l'analyse au chapitre 3 sont les médianes des opinions du faible nombre d'experts ayant accepté notre requête. La méthode complète de Delphi consiste en la définition du problème, l'élaboration des questionnaires, la sélection d'un grand nombre d'experts multidisciplinaires regroupés au sein d'un panel, la distribution des questionnaires aux experts (emails, rencontres, etc.), l'analyse des réponses et l'obtention d'un consensus. Lorsqu'il n'y a pas de consensus, un nouveau questionnaire est élaboré et le processus recommence jusqu'à trouver un consensus des opinions de tous les experts. L'application de cette méthode dans les règles de l'art avec des experts disponibles pour répondre aux questionnaires permettrait d'obtenir des résultats plus adaptés au contexte de la zone d'étude.

Les impacts environnementaux intégrés dans les analyses au niveau projet se limitent aux principales émissions polluantes et à la consommation d'énergie des véhicules pendant la phase d'exploitation des tronçons. Il serait donc intéressant d'intégrer dans l'analyse économique les polluants émis et l'énergie consommée pendant la phase de réalisation des travaux de construction et d'entretien des différents tronçons ainsi que les coûts associés à la nuisance sonore, l'érosion des sols, la dégradation de la qualité de l'eau, la déforestation, la sécurité, les effets négatifs sur la faune et la flore qu'entraîneraient ces travaux routiers. Cette

inclusion demeure complexe parce que l'état d'art pour quantifier et monétiser ces impacts reste très limité.

Dans la priorisation des projets routiers au niveau réseau, seuls les projets de reclassement et de préservation sont considérés. Une analyse multicritère et une optimisation sous contraintes budgétaires prenant en compte conjointement les projets de construction, de préservation, de réhabilitation et de reconstruction en associant leurs indicateurs techniques, économiques, environnementaux et sociaux permettraient aux administrations routières de prioriser plus exhaustivement l'ensemble de leurs réseaux routiers et de choisir les meilleures options de revêtement et de préservation.

De plus, la méthode rationnelle intégrée pour le choix des meilleures options d'entretien périodique qui a été développée dans cette thèse n'est efficace que pour des routes dont les niveaux de services sont bons et moyens selon les exigences de l'UEMOA. Les économies des coûts de cycle de vie des émissions polluantes (CCVEE) et les réductions des quantités de consommation d'énergie (EGLOB) engendrées par les meilleures options d'entretien périodique sont basées sur la comparaison des options d'entretien préventif avec l'option de base (entretien minimum) appliquées sur chaque section de route. Il est connu que la condition des chaussées influence les CCVEE et les EGLOB. Néanmoins, une analyse discriminante utilisant comme variables l'ensemble des paramètres ou facteurs entrant dans le calcul des CCVEE et d'EGLOB de chaque section homogène serait pertinente pour identifier d'autres paramètres influents afin de comparer adéquatement les économies des CCVEE et les réductions d'EGLOB des sections entre elles.

ANNEXE I

PANEL D'EXPERTS ET PARTIES PRENANTES DE L'ÉTUDE

Table A I.1 Panel of experts

Number	Discipline	Organization	Intervention in the evaluation process
1	Environment	Consultant	Data collection, validation of framework and indicators
2	Social	Consultant	Data collection, validation of framework and indicators
3	Economy	Consultant	Data collection, validation of framework and indicators
4	Pavement design/academic researcher	Consultant	Data collection, validation of framework and indicators

Table A I.2 Stakeholders of the study

Type of stakeholder	Stakeholders
Government authorities	<ul style="list-style-type: none"> - Ministry of Infrastructure and Transport - Ministry of the Environment - Communal authorities - Mayors of urban communes - District chiefs - Chiefs of neighborhoods
Affected communities and individuals	<ul style="list-style-type: none"> - Inhabitants of towns and villages potentially affected by land acquisition and/or other environmental and social impacts - Users of lands and resources affected by the project: farmers, market gardeners, fishers, etc. - Representatives of affected people such as traditional leaders, religious leaders, etc. - Village committees: water management committees, village development committees, etc. - Urban committees such as neighborhood development committees
Commercial interests	<ul style="list-style-type: none"> - Local businesses, traders and contractors potentially affected by land acquisition and/or other environmental and social impacts - Local and national companies providing goods and services to the project - Other companies of road construction
General public and civil society	<ul style="list-style-type: none"> - Any individual - Lifeblood - Automobile drivers' unions - Motorcycle taxi driver syndicates - Professional affiliations - Social and environmental non-governmental organizations

ANNEXE II

ÉQUATIONS ET HYPOTHÈSES DE CALCUL DES SOLLICITATIONS ET DES
CONTRAINTES ADMISSIBLES

- Équations de calcul des contraintes et sollicitations admissibles (SETRA, 1994)

$$\varepsilon_{t,adm} = \varepsilon_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times k_r \times k_s \times k_c \quad (\text{A- II-1})$$

Où

$\varepsilon_{t,adm}$ = déformation en traction à la base des couches bitumineuses

ε_6 = déformation correspondant à 10^6 de cycles entraînant la rupture avec une probabilité de 50%

k_r = coefficient tenant compte du risque de calcul

b = pente de la droite de fatigue

$$\sigma_{t,adm} = \sigma_6 \times k_r \times k_d \times k_c \times k_s \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \quad (\text{A- II-2})$$

Où

$\sigma_{t,adm}$ = contrainte en traction à la base des couches traitées aux liants hydrauliques

σ_6 = contrainte correspondant à 10^6 de cycles entraînant la rupture avec une probabilité de 50%

k_r = coefficient tenant compte du risque de calcul

k_c = coefficient de calage

k_d = coefficient tenant des discontinuités de la couche de base

k_s = coefficient tenant de l'hétérogénéité locale de la portance du sol

$$\varepsilon_{zadm} = A(NE)^{-0.222} \quad (\text{A- II-3})$$

Où

ε_{zadm} = déformation admissible à la surface du sol de support (orniérage)

A = paramètre d'évolution des déformations permanentes des sols et matériaux non traités (A égal à 12000 $\mu\text{déf}$ pour une chaussée à trafic élevé et 16000 $\mu\text{déf}$ pour une chaussée à trafic faible)

NE (ÉCAS) = nombre d'équivalents d'essieux de référence (13 tonnes)

Hypothèses de calculs des contraintes et sollicitations admissibles

Certaines hypothèses ont été faites pour le calcul des sollicitations internes et des contraintes et déformations admissibles dans les couches de la chaussée. Ces hypothèses sont énumérées comme suit :

- Les interfaces des couches sont parfaitement liées (collées) entre elles ;
- Les différentes couches de la chaussée ont un comportement élastique linéaire, d'où l'importance de déterminer le module d'élasticité et le coefficient de poisson.

Les modules d'élasticité de la couche en surface en ESB ou en ED ont été pris des valeurs moyennes des modules d'élasticité des matériaux bitumineux spécifiées dans les guides (CEBTP, 1984) et (SETRA, 1994). L'équation 6 a été utilisée pour calculer le module d'élasticité des couches de base et de fondation (matériaux granulaires) en fonction de leurs CBR. Étant donné que les couches de la chaussée sont parfaitement liées entre elles, le coefficient de poisson est égal à 0,35.

$$E \text{ (MPa)} = 5 \text{ CBR}(\%) \quad (\text{A- II-4})$$

ANNEXE III

ÉTAPES DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE POUR LA PRISE EN COMPTE CONJOINTE DES ASPECTS ÉCONOMIQUES, ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX (TRONÇONS A10) (Odoki et Kerali, 2000b)

Partie A – Détermination du vecteur des priorités

- Établissement de la matrice hiérarchique des critères (MH)

Tableau A III.1 Matrice hiérarchique des critères

Critère	Critère			
	1	2	3	4
1	PR11	PR12	PR13	PR14
2	PR21	PR22	PR23	PR24
3	PR31	PR32	PR33	PR34
4	PR41	PR42	PR43	PR44

Où

PR : poids relatif

Critère 1 : Économique

Critère 2 : Confort

Critère 3 : environnemental

Critère 4 : Social

$$PR_{mn} = \frac{PR_{m1}}{PR_{n1}} \quad (\text{A- III-1})$$

Où

PR_{mn} ; poids relatif de la ligne m et de la colonne n de MH

PR_{m1} ; poids relatif de la ligne m et de la colonne n de MH

PR_{n1} ; poids relatif de la ligne m et de la colonne n de MH

- Établissement de la matrice normalisée des hiérarchies (MNH)

Tableau A III.2 Matrice normalisée des hiérarchies

	Critère			
Critère	1	2	3	4
1	PN11	PR12	PR13	PR14
2	PN21	PR22	PR23	PR24
3	PN31	PR32	PR33	PR34
4	PN41	PR42	PR43	PR44

Où

PN ; Poids normalisé

$$PN_{ij} = \frac{PR_{ij}}{\sum_{i=1}^N PR_{ij}} \quad (\text{A- III-2})$$

Où

PN_{ij} : Poids normalisé de la matrice normalisée de ligne i, colonne j

PR_{ij} : Poids normalisé de la matrice des hiérarchies de ligne i, colonne j

- Établissement du vecteur des priorités (VP)

Tableau A III.3 Vecteur des priorités

VP
P1
P2
P3
P4

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^N PN_{ij}}{N} \quad (\text{A- III-3})$$

Où

P_i : poids du vecteur de priorité de ligne i

N ; nombre de critères

- **Vérification de la cohérence**

Calcul du vecteur X

Tableau A III.4 Cohérence - Vecteur X

Vecteur X
X1
X2
X3
X4

$$X_i = \sum_i^N \sum_j^N PR_{ij} \times P_j \quad (\text{A- III-4})$$

Calcul du vecteur Y

Tableau A III.5 Cohérence - Vecteur Y

Vecteur Y
Y1
Y2
Y3
Y4

$$Y_i = \frac{X_i}{P_i} \quad (\text{A- III-5})$$

Calcul de moyenne arithmétique des éléments du vecteur Y (λ_{\max})

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_i Y_i}{N} \quad (\text{A- III-6})$$

Indice de cohérence (IC)

$$\text{IC} = \frac{\lambda_{\max} - N}{N-1} \quad (\text{A- III-7})$$

Indice aléatoire (IA)

Tableau A III.6 Indice aléatoire

N (critères)	1	2	3	4	5	6	7
IA	0	0,16	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32

Rapport de cohérence (RC)

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (A-III-8)$$

SI $RC \leq 10\%$, la matrice MH est cohérente

SI $RC \geq 10\%$, la matrice MH n'est pas cohérente. Dans un tel cas les poids relatifs doivent être modifiés

Partie B – Détermination des indices de performance et de la matrice de comparaison

- **Indices de performance**

Critère économique

-

$$VANINDEX_j = \frac{VAN_j - \text{MIN}(VAN)}{\text{MAX}(VAN) - \text{MIN}(VAN)} \quad (A-III-9)$$

Où :

$VANINDEX_j$: indice de performance de l'option j de la VAN compris entre 0 et 1

$\text{MAX}(VAN)$: La valeur maximale des valeurs actuelles nettes de toutes les options sur la période d'analyse

VAN_j : la valeur actuelle nette de l'option j sur la période d'analyse

$MIM(VAN)$: La valeur minimale des valeurs actuelles nettes de toutes les options sur la période d'analyse.

Critère de niveau de service (confort)

$$RN_j = \frac{\sum_{y=1}^Y 5^{-\log_{0.343} IRI_{jy}}}{Y} \quad (\text{A- III-10})$$

Où :

RN_j : le confort (ride number) de l'option j

y : année d'analyse (y= 1,2,...Y) ; Y est la durée de l'analyse

IRI_{jy} : indice de rugosité moyen annuel de l'option j

$$RNINDEX_j = \frac{RN_j - \text{MIN}(RN)}{\text{MAX}(RN) - \text{MIN}(RN)} \quad (\text{A- III-11})$$

Où :

$RNINDEX_j$: indice de performance de l'option j

$\text{MAX}(RN)$: valeur maximale des RN de toutes les options

$\text{MIN}(RN)$: valeur minimale des RN de toutes les options

Critère environnement

$$AQI_j = \sum_y \frac{\sum_i EYR_{iy} \frac{1}{S_i}}{\sum_i \frac{1}{S_i}} \quad (\text{A- III-12})$$

Où :

AQI_j : indice de qualité de l'air de l'option j

$EYRi_{y,j}$: quantité d'émission de type i pour l'année y de l'option j

S_i : concentration limite de l'émission du type i

Les valeurs de défauts des seuils de concentration des émissions polluantes fixés par (European Council Directive, 1999) sont de 99 pour les hydrocarbures, le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone, 40 pour les oxydes d'azote, 125 pour le dioxyde de soufre et 0,5 pour le plomb.

$$AQINDEX_j = \frac{MAX(AQI) - AQI_j}{MAX(AQI) - MIN(AQI)} \quad (A-III-13)$$

Où :

$AQINDEX_j$: indice de performance de l'option j de la pollution atmosphérique

$MAX(AQI)$: valeur maximale des AQI de toutes les options

$MIN(AQI)$: valeur minimale des AQI de toutes les options

- **Matrice de comparaison (MC)**

La matrice de comparaison est constituée avec à partir des vecteurs de comparaison qui ont été établi avec les indices de performance des critères en suivant les étapes de la partie A.

Tableau A III.7 Matrice de comparaison

Tronçon	Option	Critères			
		1	2	3	4
A10	1	VC11	VC12	VC13	VC14
A10	2	VC21	VC22	VC23	VC24
A10	3	VC31	VC32	VC33	VC34
A10	4	VC41	VC42	VC43	VC44
A10	5	VC51	VC52	VC53	VC54
A10	6	VC61	VC62	VC63	VC64
A10	7	VC71	VC72	VC73	VC74

- **Calcul du vecteur de classement du tronçon A10**

Tableau A III.8 Vecteur de classement

C
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7

$$C_i = \sum_i^N \sum_j^N V_{ij} \times P_j$$

(A- III-14)

ANNEXE IV

COÛTS UNITAIRES DES ÉMISSIONS POLLUANTES

Tableau A IV.1 Coûts unitaires des émissions polluantes

Année	Hydrocarbure (HC) \$USD/t	Monoxyde de carbone (CO) \$USD/t	Oxyde d'azote (NO _x) \$USD/t	Oxyde de soufre (SO ₂) \$USD/t	Dioxyde de carbone (CO ₂) \$USD/t	Particule (PM _{2,5}) \$USD/t	Plomb (Pb) \$USD/t
1	12,184	5,807	87,879	101,573	0,701	1030,977	0,358
2	10,069	4,799	72,627	83,945	0,579	852,047	0,296
3	9,154	4,363	66,025	76,313	0,526	774,588	0,269
4	8,322	3,966	60,023	69,376	0,479	704,171	0,245
5	7,565	3,606	54,566	63,069	0,435	640,156	0,223
6	6,877	3,278	49,605	57,335	0,396	581,960	0,202
7	6,252	2,980	45,096	52,123	0,360	529,054	0,184
8	5,684	2,709	40,996	47,385	0,327	480,958	0,167
9	5,167	2,463	37,269	43,077	0,297	437,235	0,152
10	4,697	2,239	33,881	39,161	0,270	397,486	0,138
11	4,270	2,035	30,801	35,601	0,246	361,351	0,126
12	3,882	1,850	28,001	32,364	0,223	328,501	0,114
13	3,529	1,682	25,455	29,422	0,203	298,637	0,104
14	3,208	1,529	23,141	26,747	0,185	271,488	0,094
15	2,917	1,390	21,038	24,316	0,168	246,808	0,086
16	2,652	1,264	19,125	22,105	0,153	224,371	0,078
17	2,411	1,149	17,386	20,096	0,139	203,973	0,071
18	2,191	1,044	15,806	18,269	0,126	185,430	0,064
19	1,992	0,950	14,369	16,608	0,115	168,573	0,059
20	1,811	0,863	13,063	15,098	0,104	153,248	0,053

Note : Les coûts unitaires des émissions polluantes varient en fonction des approches de calculs et des hypothèses considérées. Par conséquent, les coûts unitaires au tableau 8 ne peuvent en aucun cas être utilisés en dehors du contexte de ce présent article.

ANNEXE V

ÉQUATIONS POUR LA DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE CONSOMMÉE PAR LES VÉHICULES MOTORISÉS (Bennett et Greenwood, 2000)

$$\text{EGLOB}_k = \text{EGLICV}_k \times \text{VKM}_k \quad (\text{A- V-1})$$

$$\text{EGLOB} = \sum_{k=1}^K \text{EGLOB}_k \quad (\text{A- V-2})$$

$$\text{EGLOBY} = \sum_{y=1}^Y \text{EGLOB}_y \quad (\text{A- V-3})$$

Où

EGLOB_k : consommation d'énergie annuelle par le véhicule de type k en MJ

EGLOB : consommation d'énergie annuelle de tous les véhicules en MJ

EGLOBY : consommation du cycle de vie de l'énergie de tous les véhicules de chaque option

EGLICV_k : facteur moyen de consommation d'énergie par le véhicule de type k en MJ/km ; il dépend de la consommation d'énergie des pièces détachées, des pneus, de l'huile et du carburant pendant l'utilisation des véhicules.

VKM_k : nombre de kilomètres parcourus par le véhicule de type k par année

ANNEXE VI

PRINCIPALES ÉTAPES DE DÉTERMINATION DES COÛTS DE CYCLE DE VIE DES EXTERNALITÉS ENVIRONNEMENTALES (CCVEE)

- Calcul de la quantité du polluant i de chaque véhicule de type k pour la période p du flux trafic en tonnes ($EYRi_{kp}$) par l'équation 5.

$$EYRi_{kp} = T_{pk} \times L_j \times EMi_{kp} \times 10^{-9} \quad (\text{A- VI-1})$$

Où

T_{pk} : volume de trafic annuel de chaque véhicule de type k pour la période p du flux du trafic (véhicule/ans)

L_j : la longueur de la section sous l'option d'investissement j (km)

EMi_{kp} : la quantité moyenne du polluant i (g/1000 véh-km) de chaque véhicule de type k durant la période p du flux de trafic

- Calcul de la quantité annuelle du polluant i de chaque type de véhicule de type k sous l'option j ($EYRi_{jk}$) en tonnes par l'équation 6.

$$EYRi_{jk} = \sum_{p=1}^n EYRi_{kp} \quad (\text{A- VI-2})$$

Calcul de la quantité annuelle du polluant i (tonnes) de l'option j de la section ($EYRi_j$) par l'équation 7.

$$EYRi_j = \sum_k \sum_{p=1}^n EYRi_{kp} \quad (\text{A- VI-3})$$

- Le coût annuel de chaque émission polluante i de l'option j sous chaque section (CEP_{ij}) a été calculé par l'équation 8 :

$$CEP_{ij} = EYR_{ij} \times CUE_i \quad (\text{A- VI-4})$$

Où

CUE_i : le coût unitaire annuel de l'émission polluante de type i présenté dans le tableau 8.

Le coût de cycle de vie des externalités environnementales de chaque option j de chaque section ($CCVEE_j$) a été calculé par l'équation 9.

$$CCVEE_j = \sum_m \sum_{i=1}^I CEP_{ij} \quad (\text{A- VI-5})$$

Où

$i = 1, 2, \dots, I$ (nombre d'émissions polluantes)

$m = 1, 2, \dots, M$ (années)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AASHTO. 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington,DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 624 p.
- AASHTO. 1998. *Life-cost analysis in pavement design : In search of better investment decisions*. Washington,DC: American Society of State Highway and Transformation Officials, 150 p.
- AASHTO. 2012a. *Pavement management guide*. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 152 p.
- AASHTO. 2012b. *Pavement Management Guide Chapter Six : Project and Treatment Selection*. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials., 30 p.
- AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials. 2012c. « Pavement Management Guide Chapter Six : Project and Treatment Selection ». p. 30.
- AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials. 2012d. « Pavement Management Guide Chapter three :Inventory Data Collection and Data Integration Issues ».
- AASHTO. 2012. *Pavement Management Guide*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 40 p.
- ADB. 2003. *Integrated environmental and social impact assesment guidelines*. Abidjan,cote d'ivoire: African Development Bank, 11 p.
- Adiguna, Surya , Dewanti et JB Odoki. 2017a. « Multi-Year Program under Budget Constraints Using Multi-Criteria Analysis ». *Journal of the Civil Engineering Forum*, vol. 3, n° 2, p. 12.
- Adiguna, Surya , Dewanti et JB Odoki. 2017b. « Multi Year Program under Budget Constraints Using ». *Journal of the Civil Engineering Forum*, vol. 3, n° 2, p. 12.
- Adlinge, Sharad S. 2009. « Pavement Deterioration and its Causes ». *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 9, n° 15, p. 7.
- AFDB. 2018. *Economic prospects in Africa*. Ivory Coast: African Development Bank Group, 38 p.

- AIPCR. 2014. *Importance de l'entretien routier*. Association mondiale de la Route, 40 p.
- AIPCR. 2016. *La préservation des routes nationales comme moteur du développement*. France: Association mondiale de la Route, 46 p.
- Amiril, Assa, Abdul Hadi Nawawi, Roshana Takim et Siti Nur Farhana Ab Latif. 2014. « Transportation Infrastructure Project Sustainability Factors and Performance ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 153, p. 90-98.
- Antony, G. M., et K. V. Rao. 2007. « A composite index to explain variations in poverty, health, nutritional status and standard of living: use of multivariate statistical methods ». *Public Health*, vol. 121, n° 8, p. 578-87.
- Archondo-Callao, Rodrigo 2004a. *Roads economic decision model : Softwareuser and case studies*. Washington,DC: Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP), 118 p.
- Archondo-Callao, Rodrigo 2004b. *Roads Economic Decision Model: software user guide and case studies* Washington,DC: Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP), 114 p.
- Assaf, Gabriel J. 1993. « Sub-network level analysis in pavement management : the code and MAREE systems ». Waterloo, Canada, University of Waterloo, 272 p.
- Autret, Paul 1997. « Étude des routes non revêtues VIZIRET Système de gestion de l'entretien d'un réseau routier ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, vol. 3, n° 22, p. 20.
- AUTRET, Paul , et René REQUIRAND. 1989. *Surface Dressing: Synthesis of international experiences*. France: Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), 66 p.
- Autret, Paul, et Jean-Louis Brousse. 1991. *VIZIR: méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un réseau routier*. Paris,France: Laboratoire centrl des ponts et chaussées, 62 p.
- BAFD. 2015. *Procédures d'Évaluation Environnementale et Sociale (PEES)*. Abidjan,Cote d'ivoire: Banque Africaine de Développement, 100 p.
- Bandura, Romina 2008. *A Survey of Composite Indices Measuring Country Performance: 2008 Update*. New York: United Nations Development Programme, 96 p.
- Banque mondiale. 2019. « Inflation, prix à la consommation (% annuel) ». < <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/fp.cpi.totl.zg> >. Consulté le 2019-02-18.

- Bardeesi, Mohamad Wajdi , et Youssef Attallah. 2015. « Economic and environmental considerations for pavement management systems ». *European Scientific Journal*, vol. 11, n° 29, p. 13.
- Bax, Charlotte, Paul Wesemann, Victoria Gitelman, Yongjun Shen, Charles Goldenbeld, Elke Hermans, Doveh, Etti, Shalom Hakkert, Fred Wegman et Letty Aarts. 2012. *Developing a Road Safety Index*. United Kingdom: European Commission.
- Belli, Pedro , Jock Anderson, Howard Barnum, John Dixon et Jee-Peng Tan. 1998a. « Handbook on economic analysis of investment operations ». < <http://siteresources.worldbank.org/INTCDD/Resources/HandbookEA.pdf> >. Consulté le 29/01/2017.
- Belli, Pedro , Jock Anderson, Howard Barnum, John Dixon et Jee-Peng Tan. 1998b. *Handbook on economic analysis of investment operations*. Washington,DC: World Bank, 2009 p.
- Benmaamar, Mustapha 2006a. *Financing of road maintenance in sub-saharan Africa: Reforms and progress towards second generation road funds*. Washington.DC: Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP), 26 p.
- Benmaamar, Mustapha 2006b. *Le financement de l'entretien routier en Afrique subsaharienne :Réformes et progrès vers les fonds routiers de seconde génération*. Washington, DC: Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP), 26 p.
- Bennett, Christopher R, Alondra Chamorro, Chen Chen, Hernan de Solminihac et Gerardo W Flintsch. 2007. *Data collection technologies for road management*. Washington, D.C.: World Bank, 167 p.
- Bennett, Christopher R, et Ian D Greenwood. 2000. *Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4*. United Kingdom: World Road Association/World Bank, 401 p.
- Bennett, Christopher R. , et William D. O. Paterson. 2000. *A Guide to Calibration and Adaptation*. Washington, DC: World Bank, 229 p.
- Beria, Paolo, Ila Maltese et Ilaria Mariotti. 2012. « Multicriteria versus Cost Benefit Analysis: a comparative perspective in the assessment of sustainable mobility ». *European Transport Research Review*, vol. 4, n° 3, p. 137-152.
- Berthaud, Yves, Patrick Buhan et Schmitt Nicolas (351). 2013. *Aide-mémoire de mécanique des sols*, 3. Paris, France: DUNOD.

- Beuran, Monica , Marie Castaing Gachassin et Gaël Raballand. 2013. *Are There Myths on Road Impact and Transport in Sub-Saharan Africa?* Paris,FRance: Université Paris - Panthéon-Sorbonne, 15 p.
- Bhandari, Sahadev Bahadur , Padma Bahadur Shahi et Rabindra Nath Shrestha. 2016. « Ranking rural road projects: weighting different evaluation criteria with a focus on the case of nepal ». *International Journal of Engineering Research and Science & Technology (IJERST)* vol. 5, n° 1, p. 24.
- Biau, Carole, Karim Dahou et Toru Homma. 2008. *How to increase sound private investment in Africa's road infrastructure: Building on country successes and OECD policy tools.* Paris,France: Organisation for Economic Co-operation and Development, 31 p.
- BOAD. 2015a. *Étude sur l'entretien routier dans les pays de l'union économique et monétaire ouest africaine (UEMOA) : bilan des 50 dernières années et perspectives.* Togo: Banque Ouest Africaine de Développement, 318 p.
- BOAD. 2015b. *Étude sur l'entretien routier dans les pays de l'union économique et monétaire ouest africaine (UEMOA) : bilan des 50 dernières années et perspectives.* Lomé,Togo: Banque Ouest Africaine de Développement (BOAD), 318 p.
- Briguglio, Lino , et Waldemar Galea. 2003. *Updating the economic vulnerability index.* Malta: University of Malta, 16 p.
- Brundtland, Gro Harlem , Mansour Khalid , Susanna Agnelli , Saleh A Al-Athel, Bernard Chidzero , Lamine Mohammed Fadika, Volker Hauff, Istvan Lung , Ma Shijun, Margarita Marino do Botero, Nagendra Singh , Paulo Nogueira-Neto, Saburo Okita , Shridath S Ramphal , William D Ruckelshaus, Mohamed Sahnoun , Emil Salim , Bukar Shaib, Vladimir Sokolov, Janez Stanovnik , Maurice Strong et Jim MacNeill. 1987. *Development and International Economic Co-operation: Environment.* New York: United Nations World Commission on Environment and Development 427 p.
- Brushett, Stephen 2005. *Management and Financing of Road Transport Infrastructure in Africa.* Washington,DC: World Bank, 26 p.
- Burningham, Sally , et Natalya Stankevich. 2005. *Why road maintenance is important and how to get it done.* Transport Note No. TRN-4. Washington, DC: World Bank, 10 p.
- Burningham , Sally , et Natalya Stankevich. 2005. *Importance de l'entretien des routes et moyens d'y parvenir.* Washington,DC: Banque Mondiale, 12 p.
- Cafiso, Salvatore, et Alessandro Di Graziano. 2012. « Definition of Homogenous Sections in Road Pavement Measurements ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 53, p. 1069-1079.

- Cafiso, Salvatore, Alessandro Di Graziano, Henry R Kerali et J. B. Odoki. 2002. « Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management ». *Transportation Research Record 1*, n° 02, p. 12.
- CEBTP. 1984. *Guide de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*. Paris, France: Centre Expérimental de Recherches et d'Étude du Bâtiment et des travaux Publics, 147 p.
- Chandran, Shiju, Kuncheria Isaac et A. Veeraragavan. 2007. « Prioritization of Low-Volume Pavement Sections for Maintenance by Using Fuzzy Logic ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1989, p. 53-60.
- Chappat, Michel, et Julian Bilal. 2003. *The environmental road of the future : life cycle analysis*. Paris COLAS group, 47 p.
- Chehovits, Jim, et Larry Galehouse. 2010. « Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete ». In *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation*. (California, United States), p. 27-42.
- Chen, Greg 2009. *Road Traffic Safety in African Countries – Status, Trend, Contributing Factors, Counter Measures and Challenges*. Coll. « New York ». New York: Baruch College, 27 p.
- Chootinan, Piya, Anthony Chen, Matthew R. Horrocks et Doyt Bolling. 2006. « A multi-year pavement maintenance program using a stochastic simulation-based genetic algorithm approach ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 40, n° 9, p. 725-743.
- COST. 2007. *Selection and assessment of individual performance indicators*. United Kingdom: European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (COST).
- Costello, Anna B, et Jason W Osborne. 2005. « Best Practices in Exploratory Factor Analysis: Four Recommendations for Getting the Most From Your Analysis ». *Practical Assessment, Research and Evaluation*, vol. 10, n° 7, p. 9.
- CPCS. 2018. *Coûts sociaux externes transport routier Cote-Nord Québec* CPCS Transcom Limited, 62 p.
- Čutura, B., G. Mladenović, B. Mazić et I. Lovrić. 2016. « Application of the HDM-4 Model on Local Road Network: Case Study of the Herzegovina-Neretva Canton in Bosnia and Herzegovina ». *Transportation Research Procedia*, vol. 14, p. 3021-3030.

- DFID, Ministère britannique de développement international. 2016. *La préservation des routes nationales comme moteur du développement*. 2016R07FR. Paris: Association mondiale de la Route, 46 p.
- Done, S , W G Ford et A C Edwards. 2001. *Appropriate Surfacing for Low-Volume Roads*. Wokingham, United Kingdom: Transport Research Laboratory 40 p.
- Donnges, Chris, Geoff Edmonds et Bjorn Johannessen. 2007. *Rural road maintenance :Sustaining the benefits of improved access*. Bangkok: International Labour Organization, 112 p.
- Dorchies, T.Pierre. 2005. *The environmental road of the future: Analysis of energy consumption and greenhouse gas emissions*. Toronto: Sintra Inc., 19 p.
- Doukas, Haris, Alexandra Papadopoulou, Nikolaos Savvakis, Theocharis Tsoutsos et John Psarras. 2012. « Assessing energy sustainability of rural communities using Principal Component Analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 4, p. 1949-1957.
- EC. 2006. *Energy conservation in road pavement design, maintenance and utilisation*. Ireland: European Commission, 63 p.
- Ekionea, Jean-Pierre Booto , Prosper Bernard et Michel Plaisent. 2011. « Consensus par la méthode Delphi sur les concepts clés des capacités organisationnelles spécifiques de la gestion des connaissances ». *Association pour la recherche qualitative*, vol. 29, n° 3, p. 25.
- ETSU. 1997. *Emissions modelling framework for HDM-4*. United Kingdom: University of Birmingham, 200 p.
- European Council Directive. 1999. *Limit values for pollutants in ambient air*. Brussels: The Council of the European Union, 100 p.
- FAD. 2001. *Deuxième programme routier république du Burkina Faso*. Abidjan, Cote d'Ivoire: Fonds Africain de développement, 50 p.
- Farhan, J., et T. Fwa. 2009. « Pavement Maintenance Prioritization Using Analytic Hierarchy Process ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2093, p. 12-24.
- Farhan, Yahya, Ali Anbar, Nisrin Al-Shaikh et Rami Mousa. 2017. « Prioritization of Semi-Arid Agricultural Watershed Using Morphometric and Principal Component Analysis, Remote Sensing, and GIS Techniques, the Zerqa River Watershed, Northern Jordan ». *Agricultural Sciences*, vol. 08, n° 01, p. 113-148.

- Foster, Vivien , et Cecilia Briceño-Garmendia. 2010. *Africa's Infrastructure : A Time for Transformation*. Washington,DC: World Bank, 384 p.
- Foster, Vivien, et Cecilia Briceno-Garmendia. 2010. *Vue d'ensemble Infrastructures africaines : Une transformation impérative*. Washington,DC: Banque mondiale 413 p.
- Freeman, TJ, H Ren Pinchott et HC Spiegelman. 2003. *Analysis and treatment recommendations from the supplemental maintenance effectiveness research program*. Texas: Texas transportation institute, 160 p.
- Freireira, G.W, et L Picado-Santos. 2002. « Probabilistic segment-linked pavement management optimization model ». *Journal of transportation engineering*, vol. 128, n° 6, p. 568-577.
- Freudenberg, Michael. 2003. « Composite Indicators of Country Performance ».
- Friesen, C. E., P. Seliske et A. Papadopoulos. 2016. « Using Principal Component Analysis to Identify Priority Neighbourhoods for Health Services Delivery by Ranking Socioeconomic Status ». *Online J Public Health Inform*, vol. 8, n° 2, p. e192.
- Fuquan, Pan, Jian John Lu et Qiaojun Xiang. 2008. « Influencing factors for safety level of service and its principal component analysis ». *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, p. 6.
- Fwa, T.F, et K.C Sinha. 1988. « Highway routine maintenance programming at network level ». *Journal of transportation engineering*, vol. 114, n° 5.
- Garcia-Diaz, A, et J.S Liebman. 1980. « An investment staging model for a bridge replacement problem ». *Operations research* vol. 28, n° 3, p. 736-753.
- Gastaldi, Massimiliano, Riccardo Rossi, Gregorio Gecchele et Luca Della Lucia. 2013. « Annual Average Daily Traffic Estimation from Seasonal Traffic Counts ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 87, p. 279-291.
- Ghibaudo, Marion. 2018. « Optimisation du choix des interventions sur un réseau routier existant ». Montréal, École de technologie supérieure 200 p.
- Gitelman, Victoria, Etti Doveh et Shalom Hakkert. 2010. « Designing a composite indicator for road safety ». *Safety Science*, vol. 48, n° 9, p. 1212-1224.
- Veillez sélectionner un type de document autre que « Generic » afin de faire afficher la référence bibliographique.
- Gopalakrishnan, Kasthurirangan , John Harvey et Wynand JvdM Steyn. 2014. *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements*. New York, USA: Springer 514 p.

- Gopalakrishnan, Kasthurirangan, Wynand JvdM Steyn et John Harvey. 2014. *Climate Change, Energy, Sustainability and Pavements*, 2. New York: Springer Heidelberg, 517 p.
- GovEx. 2019. « Proxy Measure ». Consulté le 2019+04-13.
- Guillaumont, Patrick. 2009. *An Economic Vulnerability Index: Its Design and Use for International Development Policy*. France: Université d'Auvergne, 36 p.
- Gwilliam, Ken , Vivien Foster, Rodrigo Archondo-Callao, Cecilia Briceno-Garmendia, Alberto Nogales et Kavita Sethi. 2008a. *Africa infrastructure country diagnostic : roads in Sub-Saharan Africa*. Washington DC: Africa Infrastructure Country Diagnostic (AICD), 10 p.
- Gwilliam, Ken, Vivien Foster, Rodrigo Archondo-Callao, Cecilia Briceño-Garmendia, Alberto Nogales et Kavita Sethi. 2008b. *The Burden of Maintenance: Roads in Sub-Saharan Africa*. Washington, DC: The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 77 p.
- Gwilliam, Kenneth M, et Zmarak M Shalizi. 1996. *Road Funds, User Charges and Taxes*. Washington,DC: World Bank, 16 p.
- Haas, Ralph , Guy Felio, Zoubir Lounis et Lynne Cowe Falls. 2009. « Mesurables performance indicators for road: Measurable Performance Indicators for Roads: canadian and international practice ». In *Best practices in urban transportation planning: measuring change*. (Vancouver, British Columbia), p. 22. Transportation Association of Canada.
- Haas , Ralph , Susan Tighe, Guy Dore et David Hein. 2007. « Mechanistic-empirical pavement design: evolution and future challenges ». In *Pavement Preservation: Supporting the Economy*. (Saskatchewan), p. 23. Transportation Association of Canada.
- Haas, Ralph, W Ronald Hudson et Lynne Cowe Falls. 2015. *Pavement asset management*. Canada/USA: Scrivener publishing, 387 p.
- Haas, Ralph, W Ronald Hudson et John Zaniewski (579). 1994a. *Modern pavement management*. Florida,USA: Krieger publishing company.
- Haas, Ralph, W. R. Hudson et J. P. Zaniewski. 1994b. « Modern Pavement Management ». In., p. 300. Malibar, FL: Krieger Publishing Company.
- Haas, Ralph, W.Ronald Hudson et John Zaniewski (76). 1994c. *Modern Pavement Management* Malabar,Florida: Krieger Publishing Company, 579 p.

- Haider, Manfred , et Marco Conter. 2012. *Infrastructure effects on vehicle energy consumption*. Austria: Austria Institute of Technology (AIT), 50 p.
- Hallin, J. 2011. *Guide for pavement type selection*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 70 p.
- Han, Bingye, Jianming Ling et Hongduo Zhao. 2016. « Environmental impacts of different maintenance and rehabilitation strategies for asphalt pavement ». In *Transportation research congress*. (China), p. 312-322. American Society of Civil Engineers.
- Haule, Joseph. 2015. « Road funds in Africa ». In *Pavement preservation and recycling summit*. (Paris), p. 36. International transport forum.
- Healy, Leyden K, D Douthwaite, I Lumley, M Gibbons, A Murray, K. Farrell, B Guckian et P Johnston. 2007. *A sustainability assessment process for road-building and other development in Ireland*. Ireland: The foundation for economics sustainability, 71 p.
- Heggie, Ian G. 2003. « Shortage of funds to maintain and modernise the road network ». *Transport Reviews*, vol. 23, n° 2, p. 139-160.
- Heggie, Ian G. . 1999. « Commercially managed road funds: managing roads like a business, not like a bureaucracy ». *Kluwer Academic Publishers*, n° 26, p. 25.
- Henning, Theuns , Peter Kadar et Christopher R Bennett. 2006. *Surfacing Alternatives for Unsealed Rural Roads*. Washington,DC: World Bank, 8 p.
- Hine, John 2014. *Good Policies and Practices on Rural Transport in Africa : Planning Infrastructure & Services*. 93779. Washington, D.C: The World Bank Group, 155 p.
- Huang, Y, R Bird et M Bell. 2009. « A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation ». *Transport Research Part D*, vol. 14, n° 3, p. 197-204.
- Huang, Y.H (250). 2004. *Pavement Analysis and Design*, 2. Englewood Cliffs,NJ: Prentice-Hall.
- Humplick, Frannie , et Paterson, William D. 1994. « Framework of performance indicators for managing road infrastructure and pavements ». In *Third International Conference on Managing Pavements*. (Washington DC), p. 11. National Academy Press.
- IFSTTAR. 2009. *Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques*. Paris,France: Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux, de l'Aménagement et des Transports, 84 p.

- IFSTTAR. 2016. *Alizé-Lcpc : Manuel d'utilisation Version 1.5*. France: Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 116 p.
- Interactive, Pavement. 2018. « Empirical design ». < <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/empirical-pavement-design/> >. Consulté le 2018-12-03.
- ISO. 2006. *ISO 14040 : Environmental management - Life cycle assessment* Switzerland: International Organization for Standardization, 96 p.
- Jambu, Michel. 1991. *Exploratory and Multivariate Data Analysis*. San Diego,USA: Academic Press, Inc, 471 p.
- Javed, Farhan. 2011. « Integrated prioritization and optimization approach for pavement management ». Phd. Singapore, National university of singapore, 215 p.
- Joubert, Pierre. 2006. « Application du modèle GiRR pour la programmation de travaux d'entretien au Monténégro ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées (BLPC)* n° 256, p. 28.
- Kaan, Ozbay, Jawad Dima, A. Parker Neville et Hussain Sajjad. 2004. « Life-Cycle Cost Analysis State of the Practice Versus State of the Art ».
- Kaba, Emmanuel Kossè, et J Gabriel Assaf. 2018. « Nouvel indice de priorité de financement des routes (IPFR) pour la sélection des projets routiers de « haute priorité » dans les pays en développement en utilisant l'analyse en composantes principales ». *Annale de batiment travaux publics (Eska)*, vol. 70, n° 3, p. 23.
- Kabir, Golam, Rehan Sadiq et Solomon Tesfamariam. 2013. « A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management ». *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 10, n° 9, p. 1176-1210.
- Kaiser, F.Henry, et John Rice. 1974. « An index of factorial simplicity ». In *Educational and Psychological Measurement*. (California), p. 117-117. Psychometrika.
- Karan, M.A, et Ralph Haas. 1976. « Determining investment priorities for urbana pavement improvements ». *Journal of Association of Asphalt Paving Technology* vol. 45.
- Kebre. 2013. « Modélisation sur un réseau de route avec recherche sur les paramètres influents en utilisant le modèle hdm4-v2 : application a la route Ouahigouya_thiou_fronrière du mali ». Ouagadougou, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 72 p.

- Keeley, R. J., et R. J. McDonald. 2015. « Part III: Principal component analysis: bridging the gap between strain, sex and drug effects ». *Behav Brain Res*, vol. 288, p. 153-61.
- Ken, Gwilliam. 2011. *Africa's Transport Infrastructure : Mainstreaming Maintenance and Management*. Washington, D.C: International Bank for Reconstruction and Development / World Bank, 576 p.
- Kerali, H.G.R, J.B Odoki et Eric Stannard. 2000. *Vue d'ensemble de HDM-4*. Association mondiale de la route 46 p.
- Kerali, Henry G.R, et J.B Odoki. 2006. *Analytical Framework and Model Descriptions*. United Kingdom: World Road Association (PIARC), 15 p.
- Kerali, Henry G.R, J.B Odoki et Eric E Stannard. 2006. *Overview of HDM-4*. World Road Association (PIARC), 58 p.
- Khan, Misbah U., Mahmoud Mesbah, Luis Ferreira et David J. Williams. 2017. « Development of optimum pavement maintenance strategies for a road network ». *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 14, n° 2, p. 85-96.
- Kimbonguila, Adolphe , Nor Edine Abriak et Frédéric Becquart. 2015. « Méthode de dimensionnement des structures de chaussées : quelle(s) adaptabilité(s) pour les matériaux granulaires alternatifs ? ». *HAL*, p. 10.
- Koranteng-Yorke, John Bernard, Gurmel Ghataora et Jennaro Odoki. 2014. « Rational approach for tropical pavement design using life-cycle principles: case study of Ghana ». *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 16, n° 8, p. 667-683.
- Krishnan, Vijaya 2010. « Constructing an Area-based Socioeconomic Index: A Principal Components Analysis Approach ». In *Early Childhood Intervention Australia*. (Australia), p. 26.
- Kumar, R. Srinivasa (566). 2014a. *Pavement evaluation and maintenance management system*. India: Universities Press.
- Kumar, R. Srinivasa (12). 2014b. *Pavement evaluation and Maintenance Management system*. India: Universities Press (India) Private Limited, 560 p.
- Kumar, R.Srinivasa (560). 2014c. *Pavement evaluation et maintenance management system*. India: Univesities press.
- Labi, Samuel , et Kumares C Sinha. 2005. « Life-Cycle Evaluation of Flexible Pavement Preventive Maintenance ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 133, n° 10, p. 8.

- Lantran, Jean Marie, Jacques Baillon et Jean-Marc Pagès. 1994. *Road Maintenance and the Environment*. Washington,DC: World Bank, 168 p.
- Levik, Kjell 2001. *How to sell the message "Road maintenance is necessary" to decision makers*. Norvège: Norwegian Public Roads Administration, 10 p.
- Li, N, R Haas et M Huot. 1998. « Integer programming of maintenance and rehabilitation treatments for pavements networks ». *Journal of transportation research board*, vol. 1629, p. 242-248.
- Li , Qindong , et Arun Kumar. 2003. *National and international practices in decision support tools in road asset management*. Australia CRC for Construction Innovation., 52 p.
- Li, Tao, Hongchao Zhang, Chris Yuan, Zhichao Liu et Chengcheng Fan. 2012. « A PCA-based method for construction of composite sustainability indicators ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, n° 5, p. 593-603.
- Li, Zongzhi 2006. *Review of Literature on Highway Project Benefit-Cost and Tradeoff Analyses*. Chicago, Illinois: Illinois Institute of Technology, 28 p.
- Litman, Todd 2019. *Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning*. Vancouver, Ontario: Victoria Transport Policy Institute, 110 p.
- Loo, Robert. 2002. « The Delphi method: a powerful tool for strategic management ». *Policing: An International Journal of Police Strategies & Management*, vol. 25, n° 4, p. 762-769.
- Mahoney, J.P, N.U Ahmed et R.L Lytton. 1978. « Optimization of pavement rehabilitation and maintenance by use of integer programming ». *Journal of transportation research board* n° 674, p. 15-22.
- Mainali, Brijesh, et Semida Silveira. 2015. « Using a sustainability index to assess energy technologies for rural electrification ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, p. 1351-1365.
- Malhotra, Naresh (197). 2011. *Marketing research : An applied orientation*, 6. Upper Saddle River, NJ USA: Prentice Hall,Inc, 711 p.
- Marcelo, Darwin , Cledan Mandri-Perrott, Schuyler House et Jordan Schwartz. 2016. *Prioritizing Infrastructure Investment :A Framework for Government Decision Making*. 7674. Washington DC: World Bank Group, 41 p.
- Mata, Teresa M., Nidia S. Caetano, Carlos A. V. Costa, Subhas K. Sikdar et António A. Martins. 2013. « Sustainability analysis of biofuels through the supply chain using indicators ». *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 3, p. 53-60.

- Mazziotta, Matteo , et Adriano Pareto. 2013. « Methods for constructing composite indices : one for all or all for one? ». *Italian Journal of Economics, Demography and Statistics*, vol. 17, n° 1, p. 14.
- Mbara, T. C. , M Nyarirangwe et T Mukwashi. 2010. « Challenges of raising road maintenance funds in developing countries: an analysis of road tolling in Zimbabwe ». *Journal of Transport and Supply Chain Management*, vol. 5, n° 2, p. 25.
- MCC. 2007. *Guidelines for Environment and Social Assessment*. Washington,DC: Millennium Challenge Corporation, 19 p.
- MiDA. 2018. *Investment in African infrastructure challenges and opportunities*. Washington,DC: Mobilizing Institutional Investors to Develop Africa's Infrastructure, 46 p.
- MIDT. 2012. *Programme quinquennal 2013-2017 de l'entretien périodique*. Burkina Faso: Ministère des Infrastructures, du Désenclavement et des Transports, 217 p.
- Misra, Rahul, et Animesh Das. 2003. « Identification of Homogeneous Sections from Road Data ». *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 4, n° 4, p. 229-233.
- Mohapatra, Dipti Ranjan. 2015. « An Economic Analysis of Improvement of Road Infrastructure: A Case Study ». *European Academic Research*, vol. 2, n° 11, p. 16.
- Morosiuk, Greg , Mike Riley et Tyrone Toole. 2006. *Volume deux guide des applications de HDM-4*. Washington, DC: Banque mondiale et Association mondiale de la Route (AIPCR), 136 p.
- Mostafa, M., et Mostafa Hassan M. 2018. « Road Maintenance in Africa: Approaches and Perspectives ». *E3S Web of Conferences*, vol. 38, p. 01005.
- MTMDET. 2016. *Plan d'intervention en infrastructures routières locales*. Québec Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports, 20 p.
- National Research Council of the National Academies. 2009. *Sustainable Critical Infrastructure Systems - A Framework for Meeting 21st century Imperatives*. Washington, DC, 58 p.
- O'Flaherty, Coleman, et David Hughes. 2016. *Highways - The Location, Design, Construction and Maintenance of Road Pavements 5*. London,UK: ICE Publishing.
- Odoki, J.B, et H.G.R Kerali. 2000a. *Analytical framework and model descriptions : Part C - Road Deterioration Model*. Washington,DC: World Road Association, 149 p.

- Odoki, J.B, et Henry Kerali. 2000b. *Analytical Framework and Model Descriptions : Part D5 - Works Effects* Whashington, DC: World Bank, 20 p.
- Odoki, J.B, et Henry Kerali. 2000c. *Analytical Framework and Model Descriptions : Part D - Works Effects* Whashington, DC: World Bank, 20 p.
- Odoki, J.B, et Henry Kerali. 2000d. *Analytical Framework and Model Descriptions : Part F - Social and environmental effects*. Whashington, DC: World Bank, 20 p.
- Odoki, J.B, et Henry Kerali. 2000e. *Analytical Framework and Model Descriptions : Part G5 - Analyse multicritère* Whashington, DC: World Bank, 20 p.
- Odoki, J.B, et Henry Kerali. 2000f. *Analytical Framework and Model Descriptions : Part G - Analyses*. Whashington, DC: World Bank, 20 p.
- Odoki, J.B, et Henry Kerali. 2000g. *Volume 4 :Analytical Framework and Model Descriptions : Part D -Works effects*. Whashington, DC: World Bank, 75 p.
- Odoki, J.B, et Henry Kerali. 2000h. *Volume 4 :Analytical Framework and Model Descriptions : Part F -Social and environmental effects*. Whashington, DC: World Bank, 75 p.
- OECD. 1990. *Road monitoring for maintenance management :manual for developing countries*. Washington,DC: Organisation for Economic Co-operation and Development, 115 p.
- OECD. 2008. *Handbook on Constructing Composite Indicators : Methodology and User Guide*. Organization for Economic Cooperation and Development, 162 p.
- Osborne , Jason W, et Anna B Costello. 2004. « Sample size and subject to item ratio in principal components analysis ». *North Carolina State University*, vol. 9, n° 11, p. 9.
- Ouyang, Y., P. Nkedi-Kizza, Q. T. Wu, D. Shinde et C. H. Huang. 2006. « Assessment of seasonal variations in surface water quality ». *Water Res*, vol. 40, n° 20, p. 3800-10.
- Park, Kyungwon , Natacha Thomas et Wayne Lee. 2007. « Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 12, n° 133, p. 4.
- Pellecuer, Luc 2016. « Influence of pavement maintenance strategy on road traffic social and environmental impacts and associated costs ». In *Sustainability and Climate Change Considerations in Pavements Session*. (Transportation Association of Canada), p. 13. Transportation Association of Canada: Transportation Association of Canada.

- Pellecuer, Luc, Gabriel J. Assaf et Michèle St-Jacques. 2014. « Influence of Pavement Condition on Environmental Costs ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 140, n° 10, p. 04014050.
- Perraton, Daniel, et François Olard. 2013. *Note de cours MGC-837 : Les matériaux bitumineux, fabrication et mise en place*. Montréal, QC: École de Technologie Supérieure (ÉTS), 234 p.
- PIARC. 2004a. *Economic evaluation methods for road projects in PIARC member countries*. Paris, France: World Road Association, 85 p.
- PIARC. 2004b. *The framework for performance indicators*. Paris, France: World Road Association, 128 p.
- PIARC. 2005. *Evaluation and funding of road maintenance in piarc member countries*. Paris, France: World Road Association, 80 p.
- PIARC. 2012. *High level indicators management*. Paris, France: World Road Association, 59 p.
- PIARC. 2013a. *Best practices for the sustainable maintenance of rural roads in developing countries*. France: World Road Association, 47 p.
- PIARC. 2013b. *Pratiques exemplaires concernant l'entretien durable des routes rurales dans les pays en développement*. Paris, France: Association mondiale de la Route, 47 p.
- Pituch, A. Keenan , et P. James Stevens. 2016. *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences*, 6. New York: Routledge, 814 p.
- Ranganathan, Rupa , et Vivien Foster. 2011. *ECOWAS's Infrastructure A Regional Perspective*. Washington, DC: World Bank, 76 p.
- RICARDO-AEA. 2014. *Update of the Handbook on External Costs of Transport*. United Kingdom: European Commission, 139 p.
- Saaty, T. L. . 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Saisana, M, A Saltelli et S Tarantola. 2005. « Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators ». *Royal Statistical Society*, p. 18.
- Saisana, Michaela , et Stefano Tarantola. 2002. *State-of-the-art Report on current methodologies and practices for composite indicator development*. Ispra: Joint Research Center, 72 p.

- Salih, Jamaa, Francis Edum-Fotwe et Andrew Price. 2016. « Investigating the-Road Maintenance Performance in Developing Countries ». *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 10, n° 4, p. 5.
- Santero, N, E Masanet et A Horvath. 2011. « Life-cycle assessment of pavements ». *Critical review : resources, Conservation, and Recycling*, vol. 55, p. 10.
- Satero, Nicholas, et Arpad Horvath. 2009. « Global Warning Potential of Pavements ». *Environmental Research Letters*, vol. 4, n° 3, p. 8.
- Schliesser, A, et A Bull. 1992. *Road Network Management : A New Approach to Road Management and Conservation*. Santiago, Chile, : Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)
United Nations, 238 p.
- Schmiedeknecht, Maud H. 2013. « Environmental Sustainability Index ». In *Encyclopedia of Corporate Social Responsibility*, sous la dir. de Idowu, Samuel O., Nicholas Capaldi, Liangrong Zu et Ananda Das Gupta. Schmiedeknecht2013. p. 1017-1024. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. < https://doi.org/10.1007/978-3-642-28036-8_116 >.
- Schreyer , Paul , et Francette Koechlin. 2002. « Parités de pouvoir d'achat : mesure et utilisations ». *Cahiers statistiques de l'OCDE*, n° 3, p. 8.
- Schrijver, Alexander. 1998. *Theory of Linear and Integer Programming*. Book. Coll. « Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization ». Chichester: Wiley.
- SETRA. 1994. *Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée*. France: SETRA/LCPC, 266 p.
- Shah, Yogesh U, Jain, S.S, M.K Jain et Devesh Tiwari. 2013. « A Critical Review of Prioritization Models for Pavement Maintenance Management Decisions ». In *2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*. (College of Engineering, Teerthanker Mahaveer University), p. 18.
- Shah, Yogesh U., S. S. Jain et Manoranjan Parida. 2012. « Evaluation of prioritization methods for effective pavement maintenance of urban roads ». *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 15, n° 3, p. 238-250.
- Shen, Liyin, Yuzhe Wu et Xiaoling Zhang. 2011. « Key assessment indicators for the sustainability of infrastructure projects ». *American Society of Civil Engineers*, vol. 137, n° 6, p. 11.

- Shrestha, S., et F. Kazama. 2007. « Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan ». *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, n° 4, p. 464-475.
- Sinate, David , Vanlalruata Fanai, Snehal Bangera et Sara Joy. 2018. *Connecting Africa: Role of Transport Infrastructure*. India: Export-Import Bank of India, 76 p.
- Veillez sélectionner un type de document autre que « Generic » afin de faire afficher la référence bibliographique.
- Smith , James T, et Susan L Tighe. 2006. « Analytic Hierarchy Process as a Tool for Infrastructure Management ». *Journal of the Transportation Research Board*, n° 1974, p. 3-9.
- SSATP. 2014. *SSATP Annual Report 2013*. Washington,DC: World Bank Group, 52 p.
- Stannard, Eric E, Jo M Dakin et David C Wightman. 2000. *Software User Guide*. United Kingdom: PIARC.
- Starkey, Paul , Anna Ternell, Simon Ellis et John Hine. 2002. *Improving rural mobility: Options for developing motorized and nonmotorized transport in rural areas*. Washington,DC: World Bank, 79 p.
- Subramanyam, B, S Aravind et Kumar R Prasanna 2017. « Functional and structural evaluation of a road pavement ». *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 8, n° 8, p. 7.
- Talvitie, A. 2000. « Evaluations of road projects and programs in developing countries ». *Elsevier Science Ltd*, vol. Transport policy 7, p. 12.
- Tate, Eric. 2012. « Social vulnerability indices: a comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis ». *Natural Hazards*, vol. 63, n° 2, p. 325-347.
- TC. 2008. *Estimates of the full cost of transportation in Canada*. Canada: Transports Canada, 106 p.
- Tessa, Rux Diane. 2016. « La priorisation des investissements dans les infrastructures de transports en Afrique ». Bruxelles, Université libre de Bruxelles, 43 p.
- The World Bank. 2005. *A framework for the economic evaluation of transport projects*. Washington, DC: World Bank, 25 p.
- TIGER. 2016. *Benefit-cost analysis resource guide*. USA: U.S Department of transportation, 20 p.

- Torres-Mach, Cristina , Víctor Yepes, Alondra Chamorro et Eugenio Pellicer. 2014. « Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management ». *Journal of Construction*, vol. 13, n° 2, p. 8.
- TRL. 1993a. *Overseas road note 31 : A guide to the structural design of bitumen- surfaced roads in tropical and sub-tropical countries*. London: Transport Research Laboratory, 82 p.
- TRL. 1993b. *Pavement Design, Management, and Performance*. Washington,DC: Transportation Research Record, 125 p.
- TRL. 2000. *Overseas Road Note 3 : A guide to surface dressing in tropical and sub-tropical countries*. Crowthorne, United Kingdom: TRL limited, 46appendix p.
- TRL. 2004. *Overseas Road Note 40 : A guide to axle load surveys and traffic counts for determining traffic loading on pavements*. United Kingdom: Transport Research Laboratory, 76 p.
- TRL. 2005. *Overseas Road Note 5 :A guide to road project appraisal*. United Kingdom: Transport Research Laboratory, 153 p.
- TRL, et ODA. 1993. *Overseas Road Note 31: A guide to the structural design of bitumen-surfaces*. United Kingdom: Overseas Centre Transport Reaearch Laboratory, 75 p.
- Tsamboulas, D, G. S Yiotis et K. D Panou. 1999. « Use of multicriteria methods for assessment of transport projects ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 125, n° 5, p. 8.
- Uddin, Waheed, Ronald Hudson et Ralph Haas (360). 2013. *Public infrastrucure asset management* New York: MCGraw-Hill Education.
- UEMOA. 2005. *Règlement N°14/2005/CM/UEMOA relatif à l'harmonisation des normes et des procédures du contrôle du gabarit, du poids, et de la charge à l'essieu des véhicules lourds de transport de marchandises dans les États membres de l'Union Économique et Monétaire Ouest Africaine*. Bamako,Mali: Union Économique et Monétaire Ouest Africaine, 19 p.
- UEMOA. 2009a. *Directive N° 11/2009/CM/UEMOA portant harmonisation des stratégies d'entretien routier dans les états membres de l'UEMOA*. Burkina Faso: Union Économique et Monétaire des États Membres de l'Afrique de l'Ouest, 62 p.
- UEMOA. 2009b. *Règlement N°08/2009/CM/UEMOA portant adoption du statut du réseau routier communautaire de l'UEMOA et de ses modalités de gestion*. Cotonou, Bénin: Union Économique et Monétaire Ouest Africaine, 6 p.

- UEMOA. 2009c. *Règlement n°08/2009/cm/UEMOA portant adoption du statut du réseau routier communautaire de l'UEMOA et de ses modalités de gestion*. Lomé, Togo: Union Economique et Monétaire Ouest Africaine, 11 p.
- UNDP. 2018. *Human Development Indicators and Indices: 2018 Statistical Update Team*. Washington DC: United Nations Development Programme, 123 p.
- United Nations. 2001. « Importance of infrastructure to development, poverty reduction stressed at thematic session of brussels conference ». < <https://www.un.org/press/en/2001/dev2328.doc.htm> >. Consulté le 2019-09-26.
- United Nations. 2009. « The transport situation in Africa ». In *Sixth session of the Committee on Trade, Regional Cooperation and Integration*. (Addis Ababa, Ethiopia), p. 22. United Nations.
- United Nations ESCAP. 2006. « Sustainable Infrastructure in Asia ». In *In Overviews and Proceeding Seoul Initiative Policy Forum on Sustainable Infrastructure Seoul* (Republic of Korea) Vol. 66, p. 218. United Nations ESCAP.
- USAID. 2014. *Sector environmental guidelines : Rural roads*. Washington, DC: United States Agency for International Development 44 p.
- Walls, J, et M.R Smith. 1998. *Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design*. Washington, DC: Federal Highway Administration, 150 p.
- Wang, F, Z Zhang et R.B Machemehl. 2003. « Decision-making problem for managing pavement maintenance and rehabilitation projects ». *Journal of transportation research board*, n° 1853, p. 21-28.
- Wang, Ting, In-Sung Lee, Alissa Kendall, John Harvey, Eul-Bum Lee et Changmo Kim. 2012. « Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 33, p. 86-96.
- WDGPH. 2013. *Addressing Social Determinants of Health in the City of Guelph: A public health perspective on local health, policy and program needs*. Guelph, Ontario: Wellington Dufferin Guelph Public Health 184 p. < <https://www.wdgpulichealth.ca/sites/default/files/wdgpfiles/sdoh-wdg-report-2013-for-web.pdf> >.
- WikiTP. 2016. « Calcul d'une structure de chaussée ». < <http://www.wikitp.fr/structure-de-chausseacutees> >. Consulté le 2018-12-02.
- Wirehn, L., A. Danielsson et T. S. Naset. 2015. « Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change ». *J Environ Manage*, vol. 156, p. 70-80.

- Wolters, Angela S, et Kathryn A Zimmerman. 2008. « Assessing the Impact of Strategic-Level Pavement Management Decisions ». In *7th International Conference on Managing Pavement Assets*. (Calgary, AB, Canada), p. 12.
- Wolters, Angela, Katie Zimmerman, Kerrie Schattler et Ashley Rietgraf. 2011. *Implementing pavement management systems for local*. Illinois,USA: Illinois Center for Transportation, 46 p.
- World Bank. 2005a. « A Framework for the Economic Evaluation of Transport Projects ». *Transport Note* n° TRN-5, p. 25.
- World Bank. 2005b. « Risk and Uncertainty Analysis ». *Transport Note*, n° 7, p. 7.
- World Bank. 2005c. « Sources of operating costs ». *Transport Note*, n° 14, p. 6.
- World Bank. 2005d. « Valuation of time savings ». *Transport Note*, n° 15, p. 13.
- World Bank. 2005e. « When and how to use NPV, IRR and Modified IRR ». *Transport Note*, n° 2, p. 9.
- World Bank. 2006. « Road Software Tools ». < <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTTRANSPORT/EXTRROADSHIGHWAYS/0,,contentMDK:20483189~menuPK:1097394~pagePK:148956~piPK:216618~theSitePK:338661,00.html> >. Consulté le 01/03/2018.
- World Bank. 2008. « Road costs knowledge system (ROCKS) ». < <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTTRANSPORT/EXTRROADSHIGHWAYS/0,,contentMDK:20485235~menuPK:1097394~pagePK:148956~piPK:216618~theSitePK:338661,00.html> >. Consulté le 2018/0.7/25.
- World Bank. 2017. *The world bank environmental and social framework*. Washington,DC: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 121 p.
- World Bank Group. 2010. *Cost-benefit analysis in world bank projects*. Washington, D.C.: World Bank, 82 p.
- Wu, Z, et G Flintsch. 2009. « Pavement preservation optimisation considering multiple objectives and budget variability ». *Journal of the Transportation Engineering (ASCE)*, vol. 5, n° 135, p. 305-315.
- Zimmerman, K.A, et ERES Consultants. 1995a. *Pavement management methodologie to selects projects and recommend preservation treatments*. Washington, D.C: Transportation Research Board.

Zimmerman, Kathryn A, et Inc Eres Consultants (27). 1995b. *Pavement management methodologie to selects projects and recommend preservation treatments*, 1. Washington, D.C: Transportation Research Board, 27 p.

